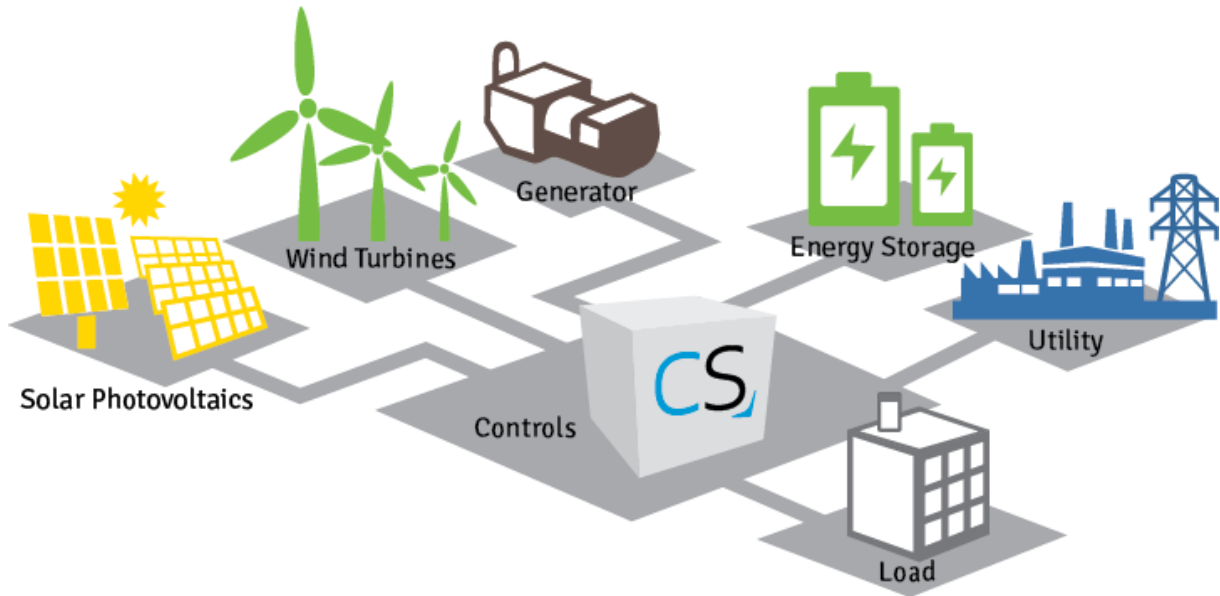


Praktische gids: “Oplossingen voor verhoogde zelfconsumptie & zelfvoorziening bij KMO’s”



Inhoudsopgave

Aanleiding praktische gids	i
Hoofdstuk 1: 'Literatuur- en marktstudie opslagsystemen & flexibiliteit'	1
1. Toepassingsgebied.....	2
1.1. Lokale betrouwbaarheid.....	2
1.1.1. UPS en noodstroomvoedingen	2
1.1.2. Piek – en onbalansproblematiek.....	5
1.2. Ondersteunende diensten	8
1.2.1. Congestiemanagement.....	8
1.2.2. Flexibiliteitsmarkt.....	11
1.2.3. Ondersteunende diensten door middel van energieopslag.....	14
2. Opslagtechnologieën – Literatuurstudie en marktstudie	14
2.1. Chemische opslag	15
2.1.1. Power-to-Gas	16
2.1.2. Brandstofcel.....	20
2.2. Elektrische opslag	23
2.2.1. SMES.....	23
2.2.2. Supercondensatoren	24
2.3. Elektrochemische opslag	25
2.3.1. Solid state- batterijen	25
2.3.2. Flow batterijen.....	29
2.3.3. Kwalitatieve vergelijking batterijsystemen	30
2.3.4. Second life batterijen.....	30
2.4. Mechanische opslag.....	32
2.4.1. Vliegwiel.....	32
2.4.2. CAES.....	40
3. Integratie in KMO.....	41
3.1. Perceptie vanuit individuele KMO.....	41
3.1.1. Inleiding	41
3.1.2. Perceptie vanuit clustering KMO's.....	48
3.2. Besluit	51
4. Flexibiliteit in verbruiksprofielen	53
4.1. Inleiding	53
4.2. Typische verbruikers.....	54
4.2.1. Procesenergie versus non-procesenergie.....	54
4.2.2. Tijdsduur van de verbruikers	55
4.2.3. Controleerbaar karakter	59
4.2.4. Model van een productieproces in industriële context	60
4.3. Besluit	62
5. Literatuurlijst	62
Hoofdstuk 2: 'Dimensionering van een hybride installatie'	65
1. Inleiding	65
1.1. Definities en begrippen.....	65
1.1.1. Zelfconsumptie	65

1.1.2.	Zelfvoorziening	66
1.2.	Case studie 1 – Algemene dimensionering	69
1.2.1.	Algemene gegevens	69
1.2.2.	Optimale zelfconsumptie en zelfvoorziening.....	74
1.2.3.	Analyse overbrugging 30-min	78
1.3.	Randvoorwaarden opslagcapaciteit.....	81
1.3.1.	Opladen van de opslagcapaciteit	81
1.3.2.	Temperatuursinvloed.....	82
1.3.3.	Depth of discharge (DOD).....	82
1.3.4.	Zelfontlading.....	83
1.3.5.	Batterijbenutting.....	83
1.3.6.	Totaalrendement	84
Hoofdstuk 3:	‘Ontwerp van een hybride opslagsysteem’	85
1.	Inleiding	85
2.	HESS structuur	86
2.1.	Passieve parallel architectuur	86
2.2.	Cascade architectuur	86
2.3.	Common DC-bus architectuur	86
3.	Stappenplan bij dimensionering van een HESS.....	87
3.1.	Bepaling van gewenst lastprofiel	87
3.2.	Vermogen en energieomvang bepalen.....	88
3.3.	Technologiekeuze	90
3.4.	Optimalisatiemethodes.....	91
3.4.1.	Filtratie.....	91
3.4.2.	Amplitude sharing.....	93
4.	Besluit	94
Hoofdstuk 4:	‘Tijdsresolutie’	95
1.	Inleiding	95
2.	Herkomst van de vermogensvariaties.....	96
2.1.	Zon.....	96
2.2.	Wind	98
3.	Verschil tussen data met kwartier- en secondenresolutie.....	98
3.1.	Achtergrond.....	98
3.2.	Simulatie met kwartierdata AMR.....	98
3.3.	Simulatie met variërende opbrengst op kwartierbasis	101
3.4.	Vergelijking tussen 15min en 10sec resolutie	107
4.	Algemene conclusie	112
Hoofdstuk 5:	‘Demonstrator’	113
1.	Inleiding	113
2.	Dimensionering en ontwerp	115
2.1.	Recuperatie supercaps.....	116
2.2.	Recuperatie OPzV-batterij	117
2.3.	Ontbrekende componenten voor common DC-opstelling.....	118
2.3.1.	Netomvormer en DC-bus niveau	118
2.3.2.	DC-DC-omvormer	120

2.3.3.	EMS-controller	120
2.4.	Common DC hybride demonstrator	121
3.	Functionaliteiten van componenten	122
3.1.	ESI-commissioning	122
3.2.	DC-DC commissioning	127
3.3.	Voorlader	129
3.4.	Overspanningsbeveiliging DC-bus	130
4.	EMS-programma	131
5.	Literatuurlijst	133
Hoofdstuk 6: 'Instellingen en configuraties'		135
1.	Inleiding	135
2.	Instellen BMS/EMS	135
2.1.	Literatuurstudie BMS	136
2.1.1.	Zelfontlading	136
2.1.2.	Strategieën	136
2.1.3.	SOC bepalen	141
2.2.	Analyseren van batterijspecificaties	144
2.2.1.	Algemene specs	144
2.2.2.	Laadkarakteristieken	145
2.2.3.	Levensduur karakteristiek	146
2.2.4.	Ontlaadkarakteristiek	146
2.3.	Testprocedures voor parameterdeterminatie	148
2.3.1.	Standaardcyclus	148
2.3.2.	Capaciteitstest	148
2.4.	Parameterconfiguratie	149
3.	Indienstname supercaps	150
3.1.	Equivalent vervangschema	151
3.1.1.	Impedantie spectrometrie	153
3.1.2.	DC methode met rustperiode	153
3.1.3.	Rekenvoorbeeld equivalente parameters	154
3.2.	Energiespecificaties	155
3.3.	Vermogensspecificaties	155
3.4.	Levensduur	156
3.5.	Stappenplan dimensionering SC	157
3.5.1.	Toelichting serie- en parallelconfiguratie van cellen	158
3.5.2.	Toelichting temperatuur en koelvermogen	161
3.5.3.	Voorlaadcircuit	162
4.	Literatuurlijst	164
Hoofdstuk 7: 'Veiligheid en normering'		165
1.	Algemeen	165
2.	Bespreking van de C10/11	166
2.1.	C10/11 LV-1 – Kleine elektriciteitsproductie-installatie die in parallel werk met het openbaar distributienet	167
2.1.1.	Veiligheidsonderbreking	167
2.1.2.	Spanningsstijging in de installaties van de distributienetgebruiker (DNG)	167

2.1.3.	Storingen veroorzaakt door parallelname (toepasbaar op LV-1, LV-2 en MV-1)	167
2.2.	C10/11 LV2 – Elektriciteitsproductie-installatie die parallel werkt met het openbaar laagspanningsdistributienet.....	169
2.2.1.	Bijzondere gevallen.....	169
2.2.2.	Aanvullende installatievereisten.....	170
2.2.3.	Combinatie van energieopslagsystemen met andere productievoorzieningen.....	170
2.2.4.	Netontkoppelbeveiliging.....	171
2.2.5.	Wisselwerking met het distributienet.....	171
2.3.	C10/11 MV-1 – Elektriciteitsproductie-installatie die parallel werkt met het openbaar hoogspanningsdistributienet	173
2.3.1.	Omschakeling naar lokale eilandwerking met kritieke belastingen	174
2.3.2.	Vergrendeling en minimumspanningsrelais.....	174
2.3.3.	N-1 situaties.....	174
2.3.4.	Parallelnames in het distributienet door DNB	174
2.3.5.	Aarding (geldig voor LV-1, LV-2 en MV-1).....	174
3.	Bespreking van de NPR 9090	176
3.1.	Terminologie.....	176
3.1.1.	Onderscheid tussen actieve en passieve DC-installaties.....	176
3.1.2.	AC-koppelingen.....	176
3.2.	Risicoclassificatie van systemen.....	177
3.3.	Wijze van aarding van het stelsel.....	177
3.3.1.	DC-stelsels.....	177
3.3.2.	Netstelsels.....	178
3.4.	Voedingsbronnen.....	179
3.4.1.	Nominale spanning	179
3.4.2.	Spanningstoleranties	180
3.5.	Beschermingsmaatregelen	180
3.5.1.	Bescherming tegen elektrische schokken	180
3.5.2.	Bescherming afhankelijk van het type netstelsel.....	182
3.5.3.	Beveiliging tegen overstroom en overspanning.....	183
3.5.4.	Bescherming tegen corrosie	185
3.6.	Keuze van elektrisch materiaal en beveiligingsapparatuur	186
3.6.1.	Het toepassen van AC-apparatuur in DC-installaties	186
3.6.2.	Beveiliging tegen corrosie door lekstromen	187
3.6.3.	Parallele voedingsbronnen.....	187
4.	Literatuurlijst	187

Aanleiding praktische gids

Deze praktische gids werd geschreven voor het **TETRA project ‘ Oplossingen voor verhoogde zelfconsumptie en zelfvoorziening bij KMO’s’**. Het doel van deze praktische gids is om een leidraad en bondige samenvatting te vormen van dit project op een begrijpbare manier voor installateurs, studiebureaus,... De kennis van dit project bouwt verder op het **TETRA project ‘ Decongestie van het distributienet door decentrale opslag’**. Waarvan tevens een praktische gids beschikbaar is.

Het variabel en minder flexibel karakter van elektriciteit uit zon en wind resulteert in specifieke problemen in het elektriciteitsnet, dat ontworpen werd vanuit het standpunt van gecentraliseerde productie. De zoektocht om on site een goede balancering tussen belastingen, decentrale bronnen en energiebuffers te bekomen is van essentieel belang voor een optimale energiehuishouding in de industriële sector. De technologische mogelijkheden om de **zelfvoorziening en zelfconsumptie** van energie op bedrijfsniveau te **verhogen** (zoals geïntroduceerd in het TETRA-project D³O - IWT 130187) zijn voor handen, maar moeten op elkaar afgestemd worden: hét **uitgangspunt** van dit project.

Een hoge zelfvoorziening en zelfconsumptie kadert in een optimale afweging van de totale productie van lokaal opgewerkte energie ten opzichte van het totaal verbruik. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de gelijktijdigheid van verbruik en opbrengst met inbegrip van hedendaagse opslagmogelijkheden en mogelijke verschuiving van verbruik. Om op industriële installaties dit optimalisatieproces effectief te realiseren, is een praktische technologievertaling van een breed gamma van innovatieve technieken noodzakelijk. Bovendien levert de verhoging van de zelfconsumptie en -voorziening toename van autonomie op, wat voor de netbeheerder in een verminderde spannings- of stroomcongestie resulteert.

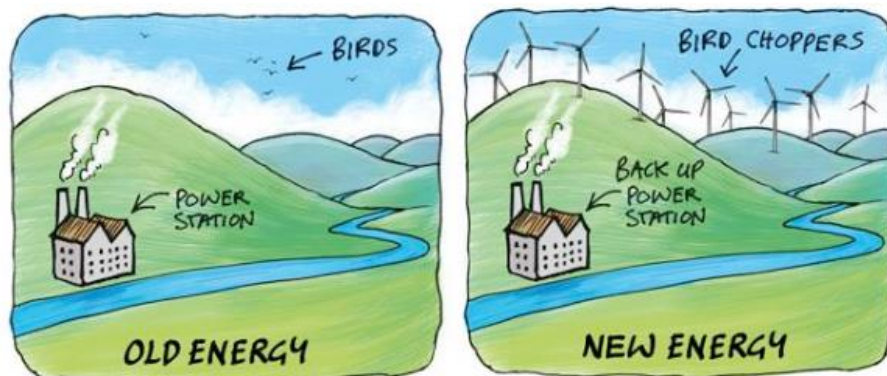
Hoofdstuk 1: ‘Literatuur- en marktstudie opslagsystemen & flexibiliteit’

In dit stuk zal dieper onderzoek gebeuren via zowel een literatuur- en marktstudie omtrent de verschillende types energieopslagsystemen en flexibiliteit in verbruiksprofielen, dit zodanig een coherent geheel kan verkregen worden over de mogelijkheden die beschikbaar zijn/kunnen zijn voor een KMO.

Eerst zal er een algemeen kader geschetst worden omtrent het toepassingsgebied vanuit lokale toepasbaarheid voor de KMO en ondersteunende diensten die de KMO kan aanleveren als ondersteunende dienst.

Dit wordt gevolgd door een literatuurstudie omtrent opslagtechnologieën, gevolgd door een marktstudie welke opslagtechnologieën toepasbaar zijn binnen een KMO, of als verschillende KMO's geclusterd worden (op zelfde feederniveau). Daarnaast wordt er ook dieper ingegaan omtrent de combinatie tussen verschillende opslagtechnologieën.

Als laatste stuk wordt dieper ingegaan omtrent de flexibiliteit die kan verkregen worden door bedrijfsprocessen te analyseren. Dit alles moet leiden tot een breed beginsel omtrent de mogelijkheden vanuit de KMO om een verhoogde zelfconsumptie en zelfvoorziening te bewerkstelligen, die eveneens helpt als net ondersteunde activiteit (bewust of onbewust).



1. Toepassingsgebied

Als het aankomt op het toepassingsgebied, kan dit vanuit 2 standpunten benaderd worden. Met name de kijk voor een **verhoogde lokale betrouwbaarheid** (UPS en piek/onbalansregeling) en de kijk als **net ondersteunde dienst** (congestiemanagement en flexibiliteitsmarkt). Soms is de overgang tussen de 2 standpunten relatief klein, maar er zal toch gepoogd worden om hieronder een breder concept te bespreken onder elk van de vernoemde toepassingsgebieden.

1.1. Lokale betrouwbaarheid

Als men spreekt over een betere lokale betrouwbaarheid, denken we onmiddellijk aan hoe de KMO zo autonoom mogelijk kan blijven werken. Zodanig de installatie bij tekorten, risico's op black-out, onverwachte netuitval,... voor een bepaalde tijd onafhankelijkheid van het distributienet blijft draaien. Het is zeker niet de bedoeling dat een volledige afhankelijkheid kan worden tewerkgesteld, maar er moet een optimum gevonden worden zodanig de betrouwbaarheid van de klant, aangesloten op het distributienet, toch sterk verhoogd. In 2014 is er een enquête uitgevoerd geweest vanuit EELAB/Lemcko die als fundament voor dit project is ontstaan.

Uit een eerder uitgevoerde enquête vanuit EELAB/Lemcko (2014) – *met een 200-tal responsies* –, werd de behoefte van de doelgroep omtrent lokale betrouwbaarheid beter ingeschat. De gebruikerscommissie ontving de resultaten van de enquête en was op het eind van het project opgeslagen in de database van EELAB/Lemcko. Dit staat toe een beeld te schetsen van de evolutie van perceptie van KMO's.

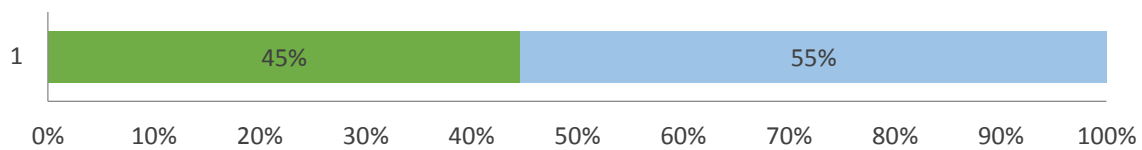
1.1.1. UPS en noodstroomvoedingen

Het Federaal Planbureau berekende dat de jaarlijkse bedrijfskost van één netcongestie in de vorm van een uitval voor de gehele Vlaamse bedrijvigheid ongeveer 216 M€ bedraagt. Deze informatie wijst erop dat het noodzakelijk is voor bedrijven om hun zelfconsumptie en zelfvoorziening te vergroten. Energieopslag kan dit verwezenlijken. Bovendien kan energieopslag een belangrijke rol spelen op de verbetering van de spanningskwaliteit ongeacht de waarschijnlijkheid van een stroomuitval.

Resultaten vanuit de enquête tonen aan dat bedrijven sterk bezig zijn met het aspect op een mogelijke netuitval. Of dat bedrijven maatregelen kunnen nemen als er zich een probleem zou voordoen. Bijna de helft van de bedrijven beschikt zelf over energiereservers die het toelaten een bepaalde periode te overbruggen.

- ± 36% beschikt over een UPS systeem,
- ± 10% beschikt over een noodstroogenerator,
- ±50% beschikt over andere systemen of heeft geen weet of er een mogelijkheid tot energiereserves aanwezig is in het bedrijf waar ze tewerk gesteld zijn.

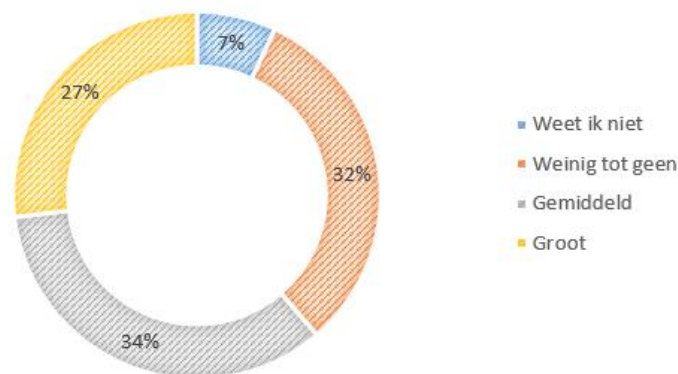
Echter moet wel opgemerkt worden dat uit deze enquête een aantal kleinere bedrijven aangeven autonoom verder te werken op basis van hun batterijcapaciteit in laptops of via hun zonnepanelen. Dit toont duidelijk aan dat de begripsvorming van energievoorziening en buffering, evenals het gebruik en de mogelijkheden van hernieuwbare energiebronnen op een nood aan de kennisbehoefte bij KMO's wijzen.



Figuur 1: Heeft uw bedrijf bepaalde energiereserves die het kan aanspreken in geval van een black-out?

Op de vraag als er financiële schade verwacht wordt bij een geplande uitval, is toch 30% zich bewust van de grote kosten die een uitval met zich zou meebrengen. Veel is natuurlijk afhankelijk van het productieproces in het bedrijf. Daarnaast voorspelt meer dan 1/3 van de verbruikers een gemiddelde schade.

Uiteraard spelen de duur en het moment op de dag wanneer de uitval plaatsvindt een cruciale rol. Zeker als beslist wordt om een afschakelplan in geval van elektriciteit schaarste in te voeren. Dit plan maakte het mogelijk om toch een betere inschatting te verkrijgen welke gemeentes in het afschakelplan verschijnen (regio gebonden per schijf) en tot welke afschakelschijf het bedrijf behoort. Het tijdstip van uitval werd dan meer concreet bepaald tussen 17 en 20h –moment waarop veel KMO's hun activiteiten voor die dag stop zetten – zodanig deze resultaten zeker deel uitmaken van onderstaande schadeberekening bij de bedrijven.



Figuur 2: In welke mate verwacht u financiële schade wanneer zich een geplande uitval voordoet?

Natuurlijk is het begrip UPS (Uninterruptible Power Supply) nogal abstract, dit omdat ook veelal IPS systemen (Interruptible Power Supply) onder deze noemer worden geplaatst. UPS-systemen zijn in staat om zowel kortstondige of langdurige netstoringen (afhankelijk van opslagcapaciteit) op te vangen. Tevens zorgen ze voor een stabiele en continue voedingsspanning bij **tijdskritische systemen!** Bij IPS systemen daarentegen staan korte onderbreking ($T_{off} < 5ms$) toe. Hierdoor ligt de kostprijs een stuk lager dan bij UPS systemen die moeten garanderen dat er geen onderbreking kan/mag zijn. IPS systemen worden vaak toegepast bij kringen met voldoende tussenkringcapaciteit (buffer) om die kortstondige uitval te overbruggen tot dat het IPS systeem het kan overnemen.

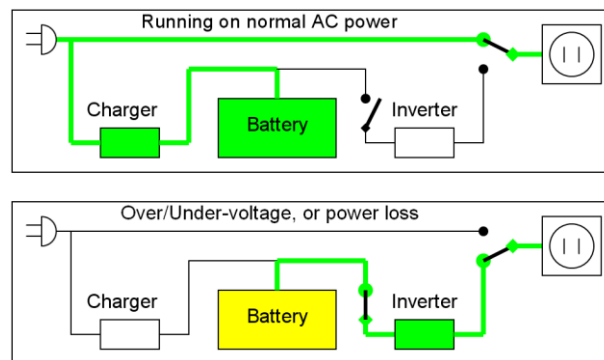
Een korte verduidelijk van de verschillende systemen die onder de noemer van UPS-systemen vallen, wordt hieronder beschreven. Dit kunnen zowel statische als dynamische systemen zijn.

Tabel 1: Overzichtstabel type UPS-systemen

Type	Capaciteit	Inschakeltijd	Kosten
2 ^e onafhankelijke voeding	Oneindig	Heel kort	Heel hoog
Dieselgroepen	Bijna oneindig	Lang	Gemiddeld tot hoog
Back-up batterijen	Laag	Heel kort	Laag
Dynamische spanningshersteller	Laag	Heel kort	Heel hoog
UPS	medium	Heel kort	Gemiddeld tot hoog

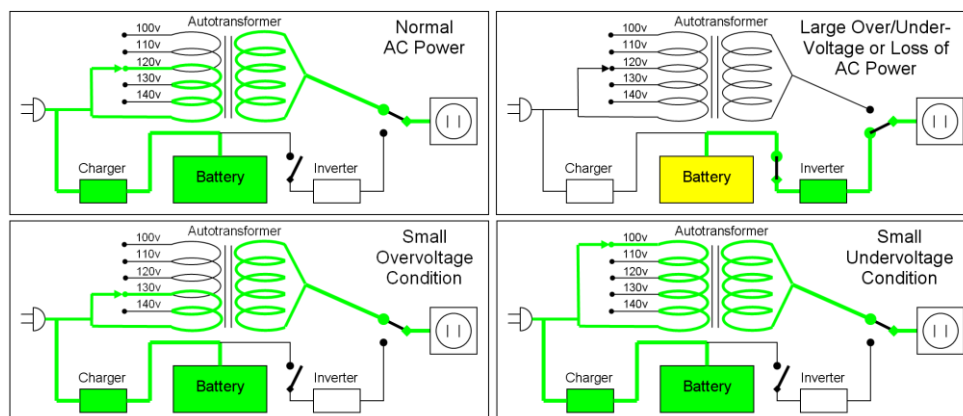
Voor statische UPS-systemen zijn er verschillende types beschikbaar:

- Een eerste systeem is de passieve stand-by UPS, die in parallel met het net wordt geplaatst. In normale mode voedt het net het systeem (IPS-systeem). Frequentie- en/of spanningsregeling zijn hier onmogelijk, waardoor de kostprijs voor implementatie ook relatief laag is. Daarnaast bezit dit type UPS ook een dode tijd.



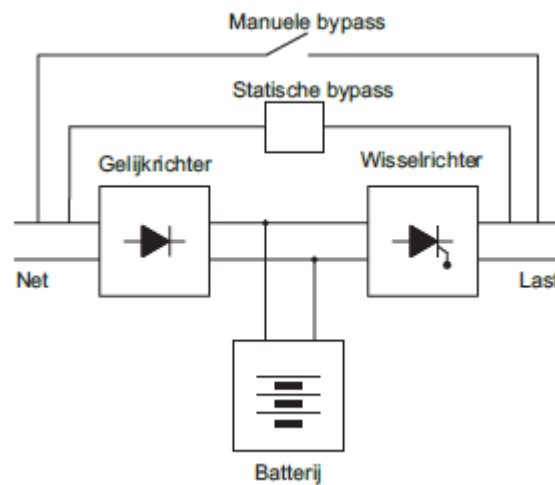
Figuur 3: Passive stand by UPS - topologie

- De lijn-interactieve UPS, eveneens parallel met het net geplaatst (IPS) beschikt over een gebrekkige bescherming tegen overspanningen en transiënt gedrag. Hier kan spanningsregeling wel, maar frequentieregeling is nog steeds niet toepasbaar.



Figuur 4: lijn interactief UPS - topologie

- Een laatste type statische UPS is de dubbele conversie UPS, die in serie met de last wordt verbonden en bijgevolg een UPS-systeem is (t.o.v. de andere die IPS-systemen zijn). Deze configuratie laat frequentie- en spanningsregeling toe. Doordat de configuratie in serie is met het distributienet lijkt dergelijk UPS-systeem aan continue verlies.



Figuur 5: dubbele conversie UPS - topologie

Naast de statische UPS-systemen, bestaan dynamische of roterende UPS-systemen. Deze baseren zich op het principe van vliegwielen. Zowel traag- als sneldraaiende vliegwielsystemen zijn beschikbaar, dit zal invloed hebben op de duur van opslag in het systeem.

1.1.2. Piek – en onbalansproblematiek

1.1.2.1. Peak shaving

Door de grotere vraag naar elektriciteit overdag, is elektrische energie duurder. Sommige elektrische centrales ('basisbelasting energiecentrales') werken dag en nacht onophoudelijk het kostelijk is om ze telkens aan en uit te zetten. Andere kleinere elektrische centrales ('piekbelasting energiecentrales') worden alleen gebruikt tijdens de piekuren en verbruiken dure fossiele brandstoffen (zoals diesel en aardgas) teneinde snelle reactietijden te bereiken. Een gelijkmatig verdeeld elektriciteitsvraag over de hele dag, zou de kost van elektriciteit sterk verlagen.

Dit heeft ervoor gezorgd dat netbeheerders een tweevoudig tarief ontwerpen dusdanig het nachtverbruik toeneemt. Hierbij wordt de nachtconsumptie aan een goedkoper prijs aangerekend. Elk netverbruiker heeft het recht een tweevoudige meter aan te vragen en te installeren waardoor het bedrag op de factuur aanzienlijk kan reduceren – *afhankelijk van de aangeboden dag/nacht tarieven van de energieleverancier* – door de consumptie tijdens de nacht door te geven.

De elektriciteitsfactuur voor commerciële en industriële consumenten (> 56 [kVA]) houdt ook een andere component in, de zogenoemde piekmeting ('demand charge'). De elektriciteitsmeter registreert het gemiddelde geconsumeerde vermogen per tijdsintervallen van 15 minuten. De klant wordt gefactureerd (€/kW/jaar) voor het hoogste gemiddelde vermogen tijdens de facturatieperiode. Bij veel grootverbruik bedrijven, denk maar aan bedrijven die grote machines hebben draaien, kost het opstarten van deze grootverbruikers heel veel energie. Met als gevolg een enorme piek in het energieverbruik. Dit kan maar een minuut per dag duren, terwijl de rest van de dag de energie aanzienlijk lager en gelijkmatiger is. Toch kan die ene piek bepalend zijn voor de piekmeting. Door het

maximale energieverbruik te verminderen, kunnen consumenten met hoge pieken zorgen voor een constanter energieverbruik wat uiteindelijk besparing op de elektriciteitsfactuur levert.

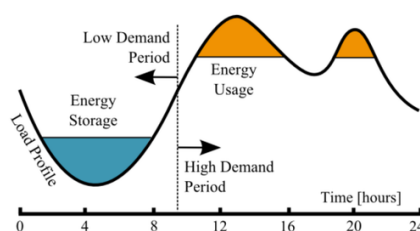
1. Tarief gebruik van het net							
1.1 Onderscreven en bijkomend vermogen							
<i>Trans HS. >26-36 kV. 26 - kV, Trans LS met piekmeting & prosumenten met terugdraaiende teller</i>							
1.1.1 Trans LS							
[X * afvlakingscoëfficiënt] EUR/kW							
+ Y euro / kWh _{norm} (normale uren)							
+ Z euro / kWh _{stil} (stille uren)							
met:							
X=		piekmeting →	EUR/kW/jaar	POWER	E210	21,00%	1,8863369
X/12=			EUR/kW/maand			21,00%	0,1571947
Afvlakingscoëfficiënt =			$Cte B + [Cte C / (Cte D + kW)]$	CTE_B			0,1
				CTE_C			796,5
				CTE_D			885
Y =		tweevoudig tarief →	EUR/kWh	DAY_CONSUMPTION	E210	21,00%	
Z =			EUR/kWh	NIGHT_CONSUMPTION	E210	21,00%	
			EUR/kWh	RISTORNO	E211	21,00%	
max som term in X en term Y							
1.1.2 LS met piekmeting							
X EUR/kW		piekmeting →	EUR/kW/jaar	POWER	E210	21,00%	
X=			EUR/kW/maand			21,00%	
X/12=							
1.1.3 LS zonder piekmeting & prosumenten met terugdraaiende teller LS							
dag		tweevoudig tarief →	EUR/kWh	DAY_CONSUMPTION	E210	21,00%	
nacht			EUR/kWh	NIGHT_CONSUMPTION	E210	21,00%	
exclusief nacht			EUR/kWh	EXCL_NIGHT_CONSUMPTION	E210	21,00%	

Figuur 6: Imea - ELEKTRICITEIT - Tarieflijst distributienettarieven - 2016

Een belangrijke bijdrage tot vermindering van de energiefactuur kan energieopslag zijn. Energieopslag maakt het voor de consument mogelijk om de vraag naar elektrische energie te verschuiven van piekuren naar daluren. Op die manier wordt het energieverbruik gelijkmatiger verdeeld. De methode staat wereldwijd bekend als ‘peak shaving’.

Enkele projecten zijn uitgevoerd waarbij batterijen geïnstalleerd zijn teneinde deze methode te implementeren. De batterijen worden 's nachts opgeladen wanneer de elektriciteitskost goedkoper is en worden overdag ontladen wat leidt tot grotere onafhankelijkheid van het elektriciteitsnetwerk. Bij andere projecten zoals bedrijven die grote energiebehoeftes hebben aan koeling wordt ijsopslag benut. In plaats van grote hoeveelheden elektrische energie te verbruiken om air-conditioners en chillers operationeel te houden tijdens de dag, worden ijsopslagsystemen ingezet. Een ijsopslagsysteem verbruikt elektrische energie tijdens de nacht om ijs te produceren die later tijdens de dag wordt gebruikt voor toepassingen die koeling vereisen.

Daardoor, aan de hand van energieopslag profiteert de consument tegelijkertijd niet alleen van het verlaagde nachttarief maar ook van de vermeden hoge piekmeting. Volgende grafiek verduidelijkt het ‘peak shaving’ concept d.m.v. energieopslag:

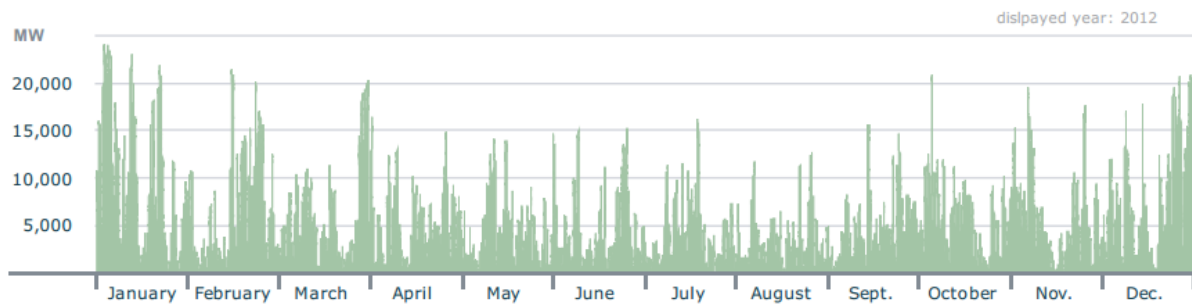


Figuur 7: Peak shaving door middel van energieopslag

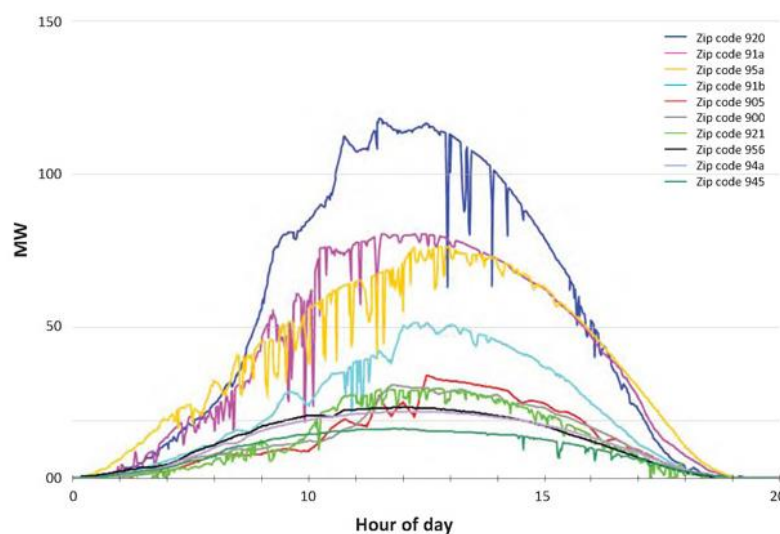
1.1.2.2. Onbalansprobleem - Decentrale productie

Naarmate de tijd vordert neemt het aantal hernieuwbare energiebronnen toe. Steeds meer consumenten kiezen zelf elektriciteit te genereren. Vooral de onvoorspelbaarheid van het energieprofiel van zonnepanelen en windmolens stelt het gebruik van energieopslagsystemen onvermijdelijk. Consumenten die hun energiekosten willen verminderen dienen hun eigen productie

te combineren met energieopslag. Op die manier kunnen zij hun zelfconsumptie en zelfvoorziening optimaliseren.



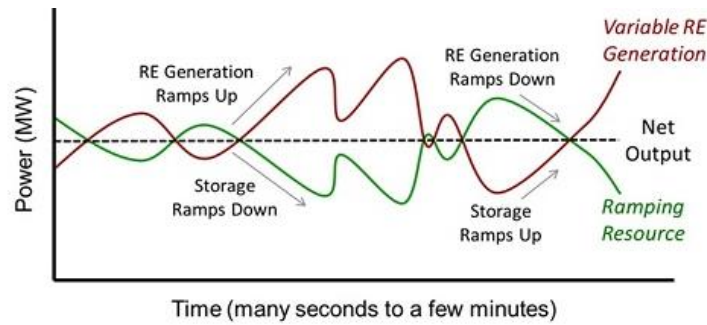
Figuur 8: Variabiliteit van windenergie productie in Duitsland voor 2012 [1]



Figuur 9: PV profielen in verschillende gemeenten in het westen van VS op een juliochtend [2]

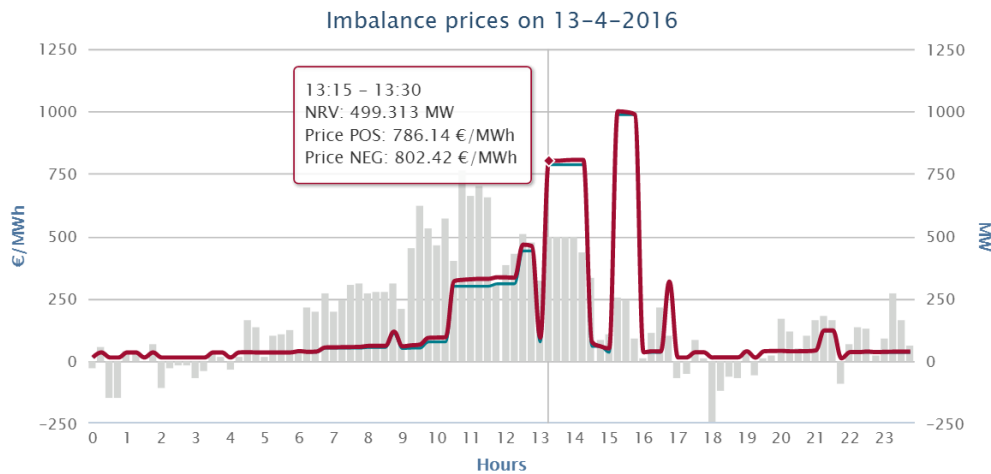
Consumenten die ervoor kiezen zelf een deel van hun elektrisch energieverbruik te genereren aan de hand van hernieuwbare energiebronnen (zoals fotovoltaïsche panelen en windmolens), zonder de integratie van een energieopslagsysteem kunnen grote hoeveelheden van hun geproduceerde energie verliezen. Dit resulteert uit het feit dat elektriciteit-opwekking en verbruik niet gelijktijdig vallen.

De consument kan de efficiëntie van zijn eigen productie aanzienlijk verbeteren door middel van een energieopslagsysteem. Dit zorgt voor een betere afstemming tussen de vraag naar elektriciteit en het beschikbaar hernieuwbare energie. Bijv. tijdens periodes waarbij de vraag groter is dan het aanbod van hernieuwbare energie, wordt het opslagsysteem ontladen terwijl bij periodes van overschot het opslagsysteem wordt opgeladen. (Figuur 10). Het is vermeldenswaardig dat in het geval dat er geen energieopslag wordt benut, de ongelijktijdigheid tussen vraag en aanbod zou leiden tot grote en frequente injecties én afnames van elektrische energie naar en van het elektriciteitsnetwerk. De netbeheerder zou daardoor de respectievelijke distributiekosten kunnen voor aanrekenen. Dit gebeurt vandaag door het vaste prosumentarief voor installaties (WKK, zonnepanelen, windmolens) met terugdraaiende tellers onder de 10 [kW] en door de meetbare proportionele distributiekosten voor installaties met bi-directionele meters boven de 10 [kW] [3].



Figuur 10: Combinatie van hernieuwbare energie met energieopslag [4]

Daarnaast is door de komst van decentrale productie-installaties (DP) ook het onbalansprobleem serieus toegenomen. Een evenwichtsverantwoordelijke moet erover waken dat injectie en afname zoveel mogelijk gelijk blijven aan elkaar, desondanks de beperkte voorspelbaarheid van de DP. Een onbalans veroorzaakt door een onverwachte wijziging in vraag, variabel opbrengstprofiel,... kan leiden tot sterk variërende onbalansprijzen.



Figuur 11: Onbalansprijzen op 13/4/2016

1.2. Ondersteunende diensten

1.2.1. Congestie management

De distributienetbeheerder is verantwoordelijk voor midden- en laagspanning. Door integratie van decentrale energieopwekking is er nood aan actieve uitbating van het distributienet. Oplossingen zoals lokale als decentrale opslag, online tap changer transformatoren (OLTC),... moeten ervoor zorgen dat de uitbating optimaal en binnen het vereist spanningsprofiel (EN50 160) kan blijven verlopen in de toekomst.

Als de doelstellingen enkel en alleen al voor Vlaanderen worden bekeken, worden deze sterk verhoogd in vergelijking met de doelstellingen van 2014. Het is de bedoeling dat de opbrengst voor zonne-energie stijgt met 31% (van 2.670 GWh naar 3.510 GWh) en deze voor wind energie zal stijgen met 39% (2.094 GWh naar 2.913 GWh). Alleen dit al wijst op een serieuze uitdaging voor het distributienet om deze extra belasting in het netwerk te kunnen opnemen. Om dit mogelijk te maken is het heel belangrijk om te kijken in welke context het net verder kan uitgebreid worden zonder de correcte werking van decentrale energieproductie tegen te werken (uitval of verminderde productie).

Daarnaast geldt ook de regel dat hernieuwbare energie prioritair is, wat betekent dat deze voorrang heeft ten opzichte van andere vormen van energie opwekking.

Limieten voor spanningsfluctuaties en grenzen voor minimale en maximale spanningen worden opgelegd door de EN50160 – “Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks”. Waarbij de 10-minuten RMS gemiddelde waarde varieert tussen 207 – 253V. Als door decentrale energieproductie, de spanning in die mate stijgt dat de limieten worden overschreden, volgt een uitschakeling of gecontroleerde daling van het opgewekt PV-vermogen. Dit moet kunnen vermeden worden door integratie van opslag, waardoor we te allen tijde de DP optimaal kunnen benutten. Ook een invoering van het capaciteitsstarief kan leiden tot een betere benutting van het distributienet.

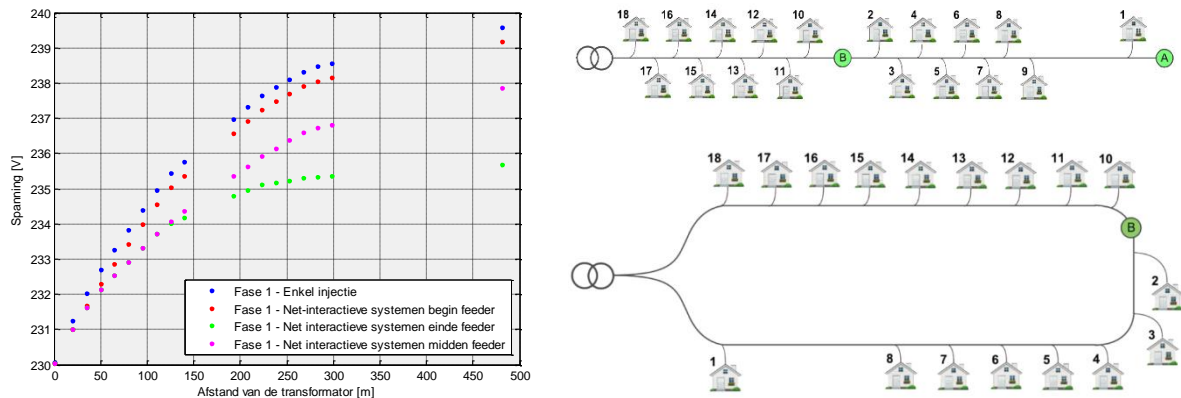
De gelijktijdigheidsfactor van een PV-installatie bedraagt 1, dit terwijl de dimensionering van de distributienetten er klassiek gerekend wordt met een gelijktijdigheid tussen de 0.25 à 0.3. Voor middenspanningsklanten is het probleem minder uitgesproken, maar moet er toch gerekend worden met een gelijktijdigheid van 0.5 tot 0.6.

Reactief vermogenscontrole is niet haalbaar op laagspanningsnetten, door de grote R/X verhouding in de laagspanningsnetten. Voor middenspanningsnetten is die verhouding een stuk lager, waardoor reactief vermogenscontrole kan doorgevoerd worden.

Daarnaast moet actief vermogenscontrole leiden tot een optimalere benutting van het systeem. Dit kan zowel door het toepassen van DSM (demand side management) als het intelligent benutten van opslag. Hieronder een korte benadering voor de integratie van opslag op kleine schaal vanuit de studie – Tetra IWT D³O.

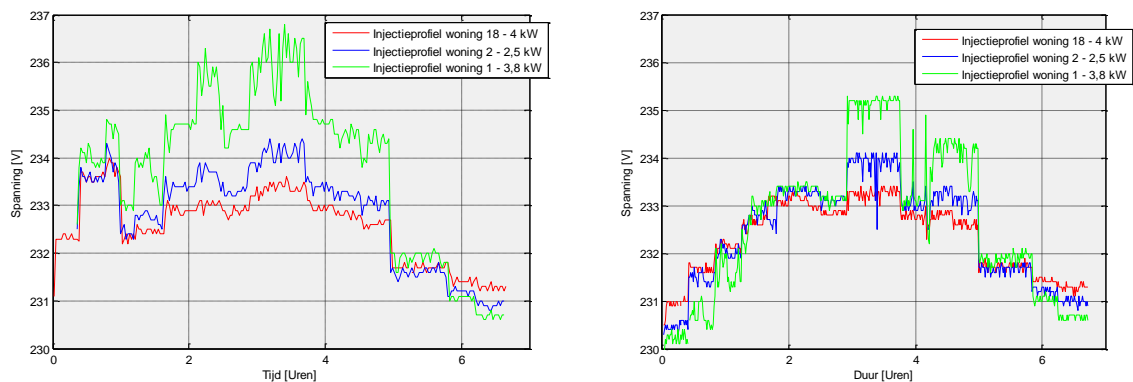
In Figuur 12 wordt er opslag voorzien in een straalnet waarop verschillende PV-installaties geïnstalleerd worden. Er kan opgemerkt worden dat als de opslag op het einde van de feeder van dit net geïnstalleerd wordt, dit zal leiden tot de grootste spanningsdaling. Vanuit technologisch standpunt is het dan ook duidelijk dat de integratie van opslag op het einde iedere afzonderlijke feeder moet geïnstalleerd worden (hogere impedantie en resulterende spanningsval). Echter vanuit techno/economisch standpunt moet overwogen worden hoeveel feeders er aangesloten zijn op die transformator en hoeveel afzonderlijke kleinere batterijbanken er moeten geïnstalleerd worden die tot een bepaalde congestie kunnen leiden, in vergelijking met 1 grote batterijbank dicht bij het distributienettransformator zou worden geplaatst. Zo zou voor een bepaalde prijs toch dezelfde congestie kunnen bereikt worden als slechts 1 grotere batterijbank wordt geplaatst bij de transformator i.p.v. vele kleinere in iedere afzonderlijke feeder.

Bij middenspanningsnetten speelt dit probleem ook veel minder, mits we daar veelal een gesloten lussysteem hebben (ringtopologie), zijn er meer mogelijke locaties om ideale opslageenheden te implementeren die zullen leiden tot een verdere decongestie van het net.



Figuur 12: Bepaling ideale locatie in straalnettopologie

Uit de studie voor het laagspanningsnet werden al relevante spanningsdalingen opgemeten bij integratie van lokale opslagsystemen in het distributienet. Natuurlijk zal een slim algoritme a.d.h.v. forecasting van groot belang om het mogelijk te maken dat de feeder verder kan ontlast worden. Zeker vanuit het concept net-ondersteunende activiteit, moet er op ingespeeld worden dat er bepaalde capaciteit ter beschikking kan gesteld worden op moment wanneer dit nodig zou zijn (wat kan leiden tot grotere opslagsystemen i.v.m. een optimaal opslagsysteem voor het bedrijf in kwestie). De meeste systemen worden op vandaag ook geconfigureerd om een optimalisatie van decentrale energieproductie door te voeren. Wat wil zeggen, dat er in feite geen stroom vanuit het net zal gebruikt worden om de batterijbank op te laden bij overschotten. Daarvoor moet ook de denkwijze en laadalgorithmes aangepast worden zodanig er vb. bij een te hoog/laag spanningsniveau er een link gelegd wordt bij het al dan niet benutten van de gegeven opslagcapaciteit zodanig er controle is op het spanningsniveau.

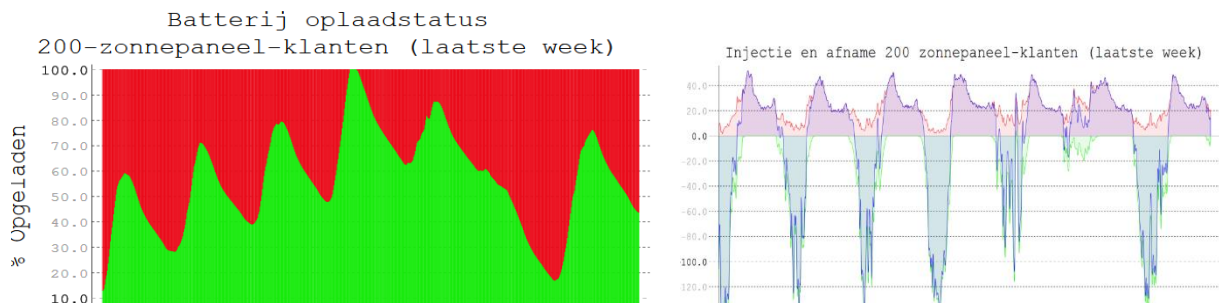


Figuur 13: Spanningscongestie in straalnet - Batterijbank kan opgeladen worden door de ganse feeder.

Echter moet men zich wel bewust zijn, dat er een goede opslagunit van primordiaal belang is. Batterijen vb. kunnen leiden tot een daling van de spanningscongestie, maar zijn bijvoorbeeld ook beperkt in maximale toelaatbare oplaadstroom (beschermen batterij) zodat de beoogde doelstellingen niet behaald worden. Dit en vele andere technologische parameters moeten inherent mee opgenomen worden in het opslagverhaal. Zo zal bijvoorbeeld spanningscongestie over de middag het hoogste zijn, maar zal niet noodzakelijk het batterij systeem kunnen zorgen dat de spanningscongestie binnen de limieten blijft.

Bovenstaande omschrijving is geldig voor een klein PV-batterijsysteem, opgenomen op het einde van het distributienet. Gezien dit een kleine unit was met beperkte opslagcapaciteit, was de unit ook na

enkele uren opgeladen. Echter geldt hetzelfde voor een grote batterijopslagsystemen. Vb. Integratie van een 5MWh batterijbank voor 200 residentiële klanten is slechts na 3 dagen volledig opgeladen, waardoor er terug een congestieprobleem is (indien er uiteraard geen verbruik zou zijn). Via slimme sturingen kan dit probleem vermeden worden door verbruiksprofielen hierop af te stemmen.



Figuur 14: Implementatie van grote buffer zonder sturing

1.2.2. Flexibiliteitsmarkt

“Demand Respons”, “Load (Side) Management” en “Demand Side Management” zijn begrippen die frequent in literatuur opduiken en houden min of meer de zelfde betekenis. Ze omvatten het balanceren van elektrische netten en het grondbeginsel dat productie en vraag van elektrische energie exact op elkaar dienen afgestemd te worden. Deze regeling werd historisch gezien centraal gecontroleerd, maar door de toename van gedistribueerde opwekking van energie de voorbije jaren komt het decentraal afstemmen van vraag en aanbod steeds frequenter voor.

Zeker als er gekeken wordt naar de flexibiliteitsmarkt, kan een steeds grotere verschuiving waargenomen worden. Waar vroeger het volledige flexibiliteitsverhaal in handen was van de transmissienetbeheerder (TNB - ELIA), worden op vandaag DNB steeds meer betrokken in het verhaal.

Nieuwe terminologie	Huidige terminologie	Beschrijving	Types	Sourcing	TSO/DSO	Aangeboden door
Frequency Containment Reserves (FCR)	Primaire reserves (R1)	Zeer snelle, gezamenlijke Europese reserves met als doel de frequentie-afwijking te stabiliseren na een incident.	R1-200mHz	Yearly	TSO only	Generation CIPU
			R1-Down R1 100mHz	Monthly	TSO only	Generation
			R1-Up	Monthly	DSO only	Load
Automatic Frequency Restoration Reserves (aFRR)	Secundaire reserves (R2)	Snelle automatische reserves met als doel het evenwicht van de Belgische regelzone te herstellen.	R2-up	Yearly	TSO only	Generation CIPU
			R2-down	Yearly	TSO only	Generation CIPU
Manual Frequency Restoration Reserves (mFRR)	Tertiaire reserves (R3)	Manuele reserves ter ondersteuning van de aFRR om het evenwicht van de Belgische regelzone te herstellen.	R3-PROD	Yearly	TSO only	Generation CIPU
			ICH	Yearly	TSO only	Afschakelbare klanten (load)

Figuur 15: Veranderingen in flexibiliteitsmarkt

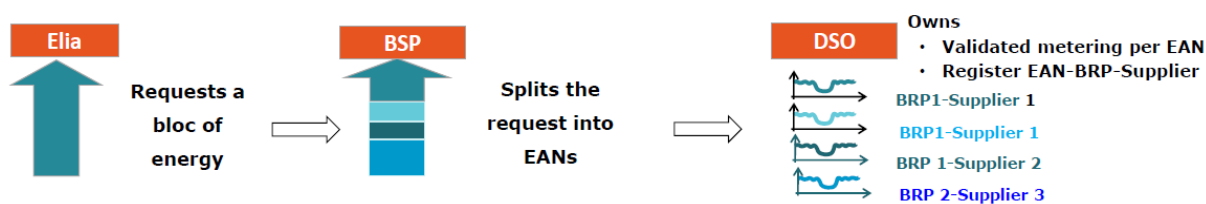
Ook toekomstig gericht is het de bedoeling dat er een volledige flexibiliteit ontstaat door alle regelreserves vrij regelbaar te maken op een kortere tijd en dit zowel voor TSO/DSO. Ook de technologie zal niet meer aan banden liggen, waardoor opslag ook een ideale integreerbare oplossing vormt in verschillende ondersteunende diensten naar het net toe.

Nieuwe terminologie	Huidige terminologie	Beschrijving	Types	Sourcing	TSO/DSO	Aangeboden door
Frequency Containment Reserves (FCR)	Primaire reserves (R1)	Zeer snelle, gezamenlijke Europese reserves met als doel de frequentie-afwijking te stabiliseren na een incident.	R1-200mHz	Daily	DSO/TSO	Technology neutral
			R1-Down R1 100mHz	Daily	DSO/TSO	Technology neutral
			R1-Up	Daily	DSO/TSO	Technology neutral
Automatic Frequency Restoration Reserves (aFRR)	Secundaire reserves (R2)	Snelle automatische reserves met als doel het evenwicht van de Belgische regelzone te herstellen.	R2-up	Daily	DSO/TSO	Technology neutral
			R2-down	Daily	DSO/TSO	Technology neutral
Manual Frequency Restoration Reserves (mFRR)	Tertiaire reserves (R3)	Manuele reserves ter ondersteuning van de aFRR om het evenwicht van de Belgische regelzone te herstellen.	R3-UP	Daily	DSO/TSO	Technology neutral
			R3-Down	Daily	DSO/TSO	Technology neutral

Figuur 16: Toekomstige flexibiliteitsleutel

Bedrijven kunnen hier zeker op vandaag al hun steentje bijdragen en kunnen verder congestiemanagement problematieken verhelpen. Een distributienetgebruik kan deelnemen aan het R3DP flexibiliteitssturing via 2 mogelijkheden, met name:

- Als de netgebruiker meer dan 1MW flexibel vermogen heeft, kan hij rechtstreeks deelnemen via Elia of onrechtstreeks via een balance service provider (die zal de flexibiliteit van 1 of meerdere distributienetgebruikers groeperen en kan deze activeren op verzoek van de TNB (Elia)), vb. in het kader van het R3DP reserveregelsprincipe.
- Als de netgebruiker minder dan 1MW flexibel vermogen heeft, kan hij enkel deelnemen via een BSP (Balancing Service Provider). Dit wordt wel gekoppeld aan een voorafgaand onderzoek/studie.



Figuur 17: Source ELIA

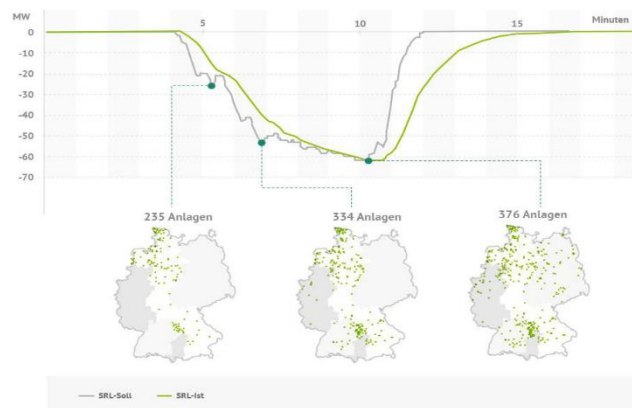
Om te bepalen hoe een onderneming kan bijdragen tot die flexibiliteitsregeling moeten enkele zaken overwogen worden in welke mate ze kunnen deelnemen aan de regeling, met name de afschakelbaarheid, de controleerbaarheid en de accepteerbaarheid.

- **Afschakelbaarheid:** het procentueel vermogen dat uitgeschakeld kan worden, in de veronderstelling dat de nodige communicatie, procescontrole en drijfveren aanwezig zijn. Indien achterliggende processen “geïsoleerd” of in grote mate onafhankelijke zijn van de uitbating, is de waarde maximaal. Naast het proces zelf bepaald tevens de verbruiker zelf of frequent afschakelen tot de mogelijkheid behoort of ten zeerste te vermijden is.
- **Controleerbaarheid:** het procentueel afgenomen vermogen, geassocieerd met toestellen die de communicatie en controlemogelijkheden bezitten om lasten af te schakelen of bij te regelen (shed + shift). Deze factor is nihil bij processen die een niet-gemoduleerd verbruik vertonen (cf. indelingscriteria verderop).
- **Accepteerbaarheid:** het procentueel vermogen, geassocieerd met toestellen of diensten waar de bereidheid of acceptatie er is om onder gelimiteerde omstandigheden te opereren tijdens kritieke momenten, in ruil voor een compensatie. Deze factor vertoont sector gerelateerde overeenkomsten.

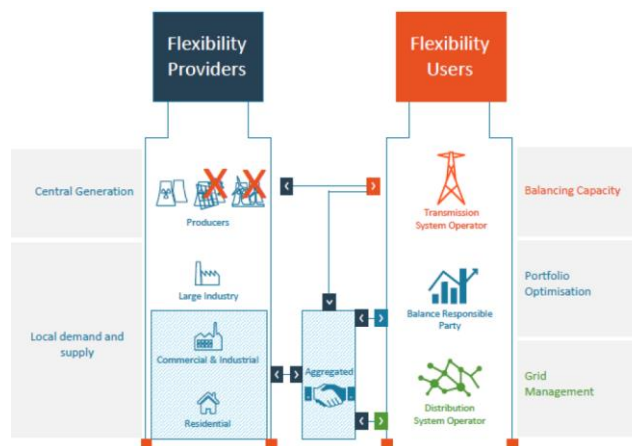
Op basis van het strengste criterium, namelijk accepteerbaarheid kan een afgeleide ogenblikkelijke belastingscurve opgesteld worden die het bespeelbaar vermogen weergeeft op een specifiek tijdstip. Deze afgeleide curve bevat informatie over de responstijd, minimum en maximum herschaaltijd van het vermogen en de minimale “hersteltijd” van het systeem na het beantwoorden van het actiesignaal. Deze info kan uiteindelijk meegenomen worden voor het bekomen van een hogere zelfconsumptie en zelfvoorziening via vraagzijdesturing.

Het maken van een product of het leveren van een dienst kan beschouwd worden als een opeenvolging van verschillende stappen. Het verloop vertoont ofwel een continue of batch kenmerken. In een batch proces zijn de inputs beschikbaar aan het begin van de cyclus en wordt het product stapsgewijs gevormd. Bij een continu proces daarentegen worden inputs en outputs doorlopend voorzien. Dit is van belang voor DR-acties, omdat continue processen doorgaans als moeilijker te controleren wordt aanzien in vergelijking met een stapsgewijze productie.

Flexibiliteit is de sleutel naar de toekomst, een voorbeeld vanuit Duitsland toont de mogelijkheden voor reserveregelingen. Daarbij werden verschillende installaties geactiveerd voor een negatief regelvermogen te bekomen. Zo kon men op relatief korte tijdschaal een serieus vermogen regelen afhankelijk van de momentane tekorten/overschotten.



Figuur 18: Source NEXT Kraftwerke



Figuur 19: Source USEF

1.2.3. Ondersteunende diensten door middel van energieopslag

Energieopslag en met name energieopslag in pompcentrales (PHS, *Pumped Hydro Storage*) heeft een belangrijke rol gespeeld in dit domein. Toch, zien wij de laatste jaren een aantal projecten die te maken hebben met andere technologieën zoals batterijen, vliegwielen en waterstof opslag .

Batterijen hebben snelle reactietijden en kunnen hun nominaal vermogen bereiken binnen enkele milliseconden. Ze kunnen gebruikt worden voor zowel injecties als afnames van elektrische energie. Hun nadeel is het feit dat hun efficiëntie sterk afhankelijk is van de ontladingsdiepte (DOD, *Depth of Discharge*) en om die reden moet hun laadtoestand (SOC, *State of Charge*) binnen gespecificeerde grenzen blijven .

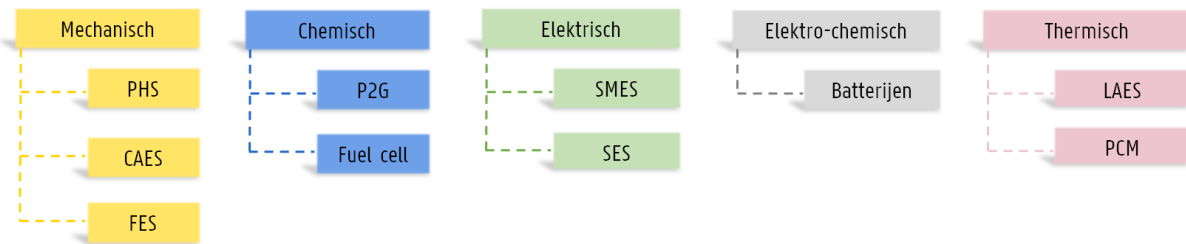
Vliegwielen kunnen ook gebruikt worden voor zowel injecties als afnames van elektrische energie. Ze zijn sneller dan batterijen en er zijn geen limieten met betrekking tot de ontladingsdiepte. Ze kunnen volledig (ontladingsdiepte tot 100%) ontladen of opgeladen worden zonder hun efficiëntie te verliezen met een levenscyclus veel groter dan die van batterijen. Dankzij deze eigenschap zijn vliegwielen uiterst geschikt voor frequentieregulatie. Toch, is hun hoge zelfontlaadsnelheid (tot 100%/per dag) op vandaag het grootste nadeel.

Waterstof elektrolyzers kunnen alleen elektrische energie omzetten in waterstof en daardoor is hun regeling niet bidirectioneel zoals bij batterijen/vliegwielen die energie kunnen injecteren. Ze kunnen toch de geproduceerde hoeveelheid waterstof regelen en op die manier wordt hun controle gerealiseerd. Bovendien, kunnen ze hun vermogen binnen enkele milliseconden aanpassen.

In het slechtste geval verwacht Elia dat de deelnemer binnen de 30 seconden kan reageren wat erop wijst dat de bovenvermelde energieopslagsystemen (batterijen, vliegwielen waterstof elektrolyzers en supercaps) snel genoeg zijn. In tegenstelling tot PHS , die afhankelijk is van geografische specificaties en alleen toepasbaar bij grootschalige projecten (tientallen MW) , zijn batterijen en waterstof elektrolyzers beschikbaar op de markt en ze komen in maten (kW - MW) geschikt voor een KMO. Niettemin, moeten wij op dit punt benadrukken dat netgebruikers in de meeste gevallen mogen deelnemen aan ondersteunende diensten onder de voorwaarde dat hun vermogen groter dan 1 MW is. Het idee om ondersteunende diensten te bieden aan de hand van batterijen/vliegwielen is nog nieuw maar toch zijn er enkele projecten uitgevoerd en nieuwe worden gepland. Minder bekend is het idee omtrent waterstof elektrolyzers voor ondersteunende diensten. Toch, naarmate de inzet van hernieuwbare energie op het netwerk toeneemt zal de vraag naar ondersteunende diensten stijgen en bijgevolg zal decentrale energieopslag er een belangrijke bijdrage toe kunnen leveren.

2. Opslagtechnologieën – Literatuurstudie en marktstudie

Als men spreekt over opslag technologieën, is er op vandaag een breed spectrum aan technieken mogelijk. Natuurlijk kan men iedere technologie opsplitsen met hun afzonderlijke unieke eigenschappen waardoor een combinatie van technologieën zou moeten leiden tot een optimalisatie. Vandaar er eerst een overzicht zal gegeven worden omtrent elk opslagsysteem individueel, om dan later de gecombineerde mogelijkheden te onderzoeken. Een overzicht omtrent de mogelijke opslagtechnologieën is weergegeven in figuur 20.



Figuur 20: Overzicht van opslagtechnologieën

2.1. Chemische opslag

Als er wordt gesproken omtrent chemische opslag, dan spreken we voornamelijk van P2G (Power to Gas) en brandstofcellen, of ‘fuel cells’. Chemische opslag is vooral bekend onder de noemer waterstof (H₂). Maar naast waterstof bestaat er ook de mogelijkheid om methaan of ammonia te gebruiken. Het grote voordeel van waterstof is dat er enkel water vrijkomt als reactieproduct.

Waterstofopslag is een veelbelovende technologie voor lange termijn energieopslag (dagen - maanden) dankzij zijn heel lage energieverlies over de tijd. Waterstof wordt opgeslagen onder druk in gasflessen of tanks, en dit kan praktisch worden uitgevoerd voor onbeperkte tijd. Voor stationaire toepassingen is gasvormige opslag onder hoge druk de meest populaire keuze. Grote hoeveelheden waterstof kunnen opgeslagen worden in ondergrondse zoutcavernes en buizensystemen. Kleinere hoeveelheden worden opgeslagen in bovengrondse tanks of flessen onder een druk tot 900 bar. Dit vormt de meest geschikte methode voor KMO's.

Als het aandeel van hernieuwbare energie in het elektriciteitsnet toeneemt, wordt het steeds problematischer om het ongeplande intermitterende aanbod af te stemmen op de tijd variërende vraag aan elektriciteit. In feite als de inzet van hernieuwbare energie meer dan 20% van de totale capaciteit is, zoals veel landen reeds ervaren, worden kwesties omtrent netbalancing problematisch en leiden op vandaag tot de inperking van de wind (windmolens worden uitgeschakeld, vermogensderating). Het gevolg hiervan is de noodzaak voor lange termijn, grootschalige energieopslag oplossingen.



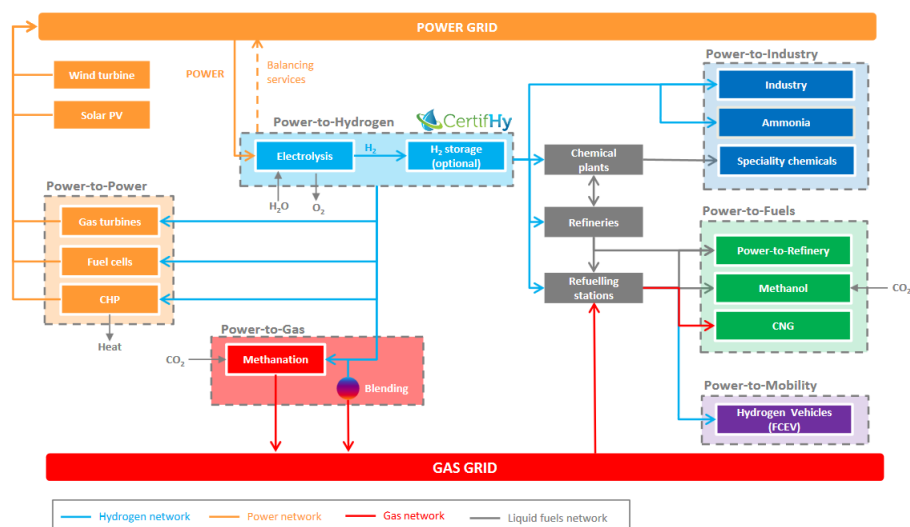
Figuur 21: Opslag van waterstof voor vb. tanken met heftrucks (vb. Colruyt Halle)

2.1.1. Power-to-Gas

2.1.1.1. Introductie

Power-to-Gas (P2G) is, zoals de naam het zelf zegt, de conversie van elektriciteit in gas. Het meest voorkomende proces is elektrolyse waarbij water (H_2O) met behulp van elektriciteit wordt gesplitst in **waterstof (H_2)** en zuurstof (O_2). Het is dan ook de bedoeling dat met de overschotten van decentrale energieproductie (zoals wind of zon) men in staat is het 'P2G' net te bevoorraden met de grondstof (= overschot elektriciteit).

P2G onderscheidt zich van andere energieopslag doordat het naast energieopslag, ook nog andere functies kan vervullen, waardoor de businesscases voor P2G diverser zijn. Hieronder wordt een overzicht weergegeven van de mogelijke applicaties.



Figuur 22: Mogelijkheden Power-to-Gas

Waterstof is dus een valabele gas waarmee veel processen kunnen worden uitgerold. Waterstof is het 1^{ste} element van het periodiek systeem en daardoor het meest eenvoudig chemisch element. Het is in normale omgevingscondities een kleurloos, reukloos, niet-corrosief, niet-oxiderend, niet-radioactief, niet kankerverwekkend en niet-toxisch gas met volgende karakteristieken:



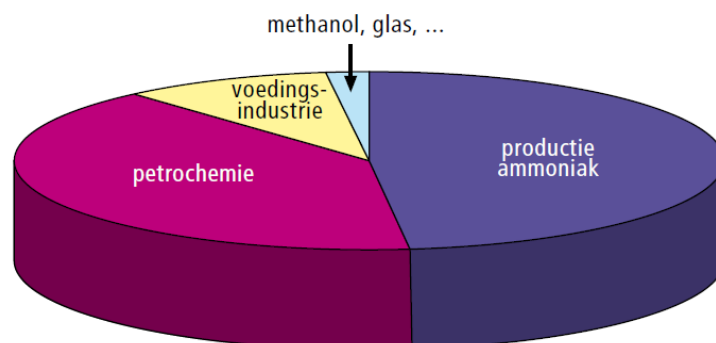
Karakteristiek	Waterstof	Commentaar
Dichtheid gasvormig H ₂ (0 °C, 1 atm)	0,090 kg/Nm ³	14 maal lichter dan lucht
Kookpunt (1 atm)	-252 °C (20 K)	methaan: -161 °C (112 K)
Dichtheid vloeibare H ₂	70,8 g/l	benzine: 720 g/l
Energie-inhoud gasvormige H ₂ (OVW)* (0 °C, 1 atm)	120 MJ/kg 33,33 kWh/kg 10,8 MJ/Nm ³ 3 kWh/Nm ³	methaan: 50 MJ/kg methaan: 36 MJ/Nm ³
Energie-inhoud vloeibare H ₂ (OVW)*	8,5 MJ/l 120 MJ/kg 2,36 kWh/l	benzine: 33 MJ/l benzine: 46 MJ/kg
Ontvlambaarheidsgrenzen in lucht (25 °C, 1 atm)	4 – 75 vol %	methaan: 5,3 – 15,0 vol %
Detonatiegrenzen in lucht (25 °C, 1 atm)	15 – 59 vol %	methaan: 6,3 vol % - 13,5 vol %
Zelfontbrandingstemperatuur	585 °C	methaan: 540 °C
Ontstekingsenergie	0,02 mJ	methaan: 0,29 mJ

Figuur 23: Eigenschappen waterstof (Bron: Waterstofnet)

2.1.1.2. Toepassingsgebieden - Chemie

Voor de chemie is **waterstof een waardevolle grondstof**. Verschillende bedrijven maken gebruik van waterstof dat gemaakt is op basis van aardgas (vb. productie van methanol of waterstofperoxide). Als men toch overschotten van elektrische productie heeft, kan dit waterstof mogelijks het aardgas vervangen. Daarnaast kan waterstof in combinatie met CO (= syngas) gebruikt worden als een tussenproduct.

Op dit moment wordt waterstof bijna uitsluitend gebruikt als een chemische grondstof. De huidige toepassingen van waterstof worden weergegeven in de onderstaande figuur (24). Op wereldniveau worden momenteel jaarlijks circa 500 miljard m³ aan waterstof verbruikt. Waterstof wordt aanzienlijk gebruikt in industriële activiteiten, maar momenteel ongeveer 95% van deze waterstof wordt geproduceerd door de **hervorming van fossiele grondstoffen** want deze optie is goedkoper (marktprijs van waterstof is vraagbepalend). Momenteel wordt de prijs bepaald door waterstof dat is geproduceerd uit aardgas (fossiele waterstofproductie). H₂ geproduceerd uit elektrolyse is momenteel echter nog 2x zo duur.



Figuur 24: Toepassingen waterstof

2.1.1.3. Toepassingsgebieden – Opslag en energieopwekking

Waterstof kan op verschillende manieren **als brandstof** worden ingezet. Dit kan vb. aan de hand van brandstofcellen (zie verder). Dus indien er overschotten zijn aan elektriciteitsproductie, kan daarvan waterstof geproduceerd worden en die kan, na een bepaalde opslagtermijn, terug omgezet worden in elektriciteit in grote opslaghoeveelheden. Echter is de efficiëntie van dit proces vele malen lager dan andere opslagmogelijkheden en wordt er op vandaag een maximaal rendement van 40% behaald (80% efficiëntie elektrolyse, 50% efficiëntie brandstofcel). Ook hier is op vandaag de kostprijs nog een sterk beperkende parameter (brandstofcellen zijn duur door de lage inzetbaarheid op vandaag).

Waterstof brandstofcellen kunnen verdeeld worden in drie categorieën naargelang de beoogde toepassing: Draagbaar, Stationair, Transport.

Verbrandingsmotoren zijn tegenwoordig de meest bekende technologie voor bedrijven die op zoek zijn naar back up power oplossingen. Er is een aantal bedrijven op dit moment die waterstof brandstofcellen bieden voor back up power toepassingen. Waterstof brandstofcellen kunnen oplossingen bieden aan KMO's of banken, drogisterijen, boekhandels, alle kleine - middelgrote retailers, ziekenhuizen, telecomcentra enz.

Deze KMO's beschikken meestal over onvoldoende ruimte om verbrandingsmotoren te installeren. Bovendien, zijn de hoge lawaai-emissies van verbrandingsmotoren een ander probleem waarmee rekening gehouden moet worden. Het geluidsniveau van een noodgenerator kan gemakkelijk de waarde van 100 decibels overschrijden. Daarnaast zijn ze milieuvriendelijk en naarmate de Europese richtlijnen omtrent CO₂ uitstoot strenger worden dienen wij geleidelijk alternatieve technologieën te onderzoeken. Een ander nadeel is het feit dat de betrouwbaarheid van de motor afneemt naarmate de tijd vordert vanwege de mechanische slijtage van de bewegende onderdelen. Volgens Arshad Mansoor, Senior Vice President voor R&D in Electric Power Research Institute, mislukt de start van noodgeneratoren 15% van de tijd. Tot slot, zijn de verbrandingsmotoren gevoelig voor extreme temperaturen.

Waterstof brandstofcellen vereisen minder ruimte en hun lawaai-emissies zijn niet zo intens (60 dB). Hun impact op het milieu is triviaal (indien waterstof wordt geproduceerd door hernieuwbare energie bronnen) en ze hebben weinig mechanische onderdelen wat zorgt voor een daling van de onderhoudskosten. Daarnaast is hun temperatuurbereik breder wat leidt tot lagere kosten voor verwarming en koeling. Een ander voordeel is de mogelijkheid om waterstof te genereren van hernieuwbare energie bronnen (wind, zon). Op die manier verdwijnt de behoefte om waterstof te kopen in tegenstelling tot de onvermijdelijke aankoop van fossiele brandstoffen in het geval van een verbrandingsmotor.

In deze paragraaf staat een beschrijving van enkele opkomende projecten die te maken hebben met stationaire klein-middelgrote toepassingen. In 2013, is er een 175 kW brandstofcellensysteem verkocht aan Blue Lake Rancheria Tribe in California. Het systeem wordt aangedreven door waterstof afkomstig van biomassavergassing. Londens Walkie-Talkie gebouw aan Fenchurch Street wordt aangedreven door een 300 kW brandstofcel. Het systeem levert elektriciteit, warm water en airconditioning via absorptie chillers. Japans ENE-FARM programma is misschien wel het meest succesvol gecommercialiseerde brandstofcel programma in de wereld. ENE-FARM heeft de inzet van ruim 120.000 residentiële brandstofcel eenheden (micro CHP) ondersteund. De benodigde waterstof komt uit het bestaande aardgas netwerk en op die manier zijn investeringen in nieuwe infrastructuur vermeden. De belangrijkste deelnemers zijn vandaag Panasonic en Toshiba die PEM eenheden bieden, en Aisin Seiki die SOFC eenheden. De PEM eenheden zijn uitzonderlijk duurzaam. Hun levensduur bereikt meer dan 60.000 uur, een prestatie die een paar jaar geleden als onmogelijk beschouwd werd.

Panasonic claimt dat het rendement van haar 2015 model 95% bereikt (gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit). Het resultaat is een daling van maar liefst 50% van de huishoudens CO₂-uitstoot en een consument elektriciteit kostenbesparing van ¥ 60.000 (€ 487) tot ¥ 75,000 (€ 608).

2.1.1.4. Toepassingsgebieden – Mobiliteit

Voor deze case kan je direct de link leggen met het Colruyt distributiecentrum in Halle. Het is mogelijk om te rijden op waterstof. Ook hier wordt waterstof via een brandstofcel omgezet in elektriciteit. Daarnaast is het ook mogelijk om methaan (CNG) als autobrandstof te gebruiken. Er zijn al verschillende auto's op de markt die rijden op aardgas (CNG). Het methaan kan via het P2G proces worden ingevoerd. Deze initiatieven kunnen in de toekomst ervoor zorgen dat de mobiliteit sterk verduurzaamd. Maar op vandaag is de markt nog niet voldoende ontwikkeld en is verder onderzoek vereist.

Een voorbeeld om toch een betere inschatting te kunnen maken in Power-to-Mobility is vb. de Hyundai IX35FCEV. Het rijverbruik van deze wagen is 0.86 kg waterstof per 100 km. Daarnaast heeft deze wagen een bereik van 594 km per tankbeurt. De kostprijs van waterstof in het tankstation bedraagt ongeveer 10 euro zonder accijnzen.

Daarnaast zijn er ook al heftrucks op waterstof beschikbaar, ze hebben het grote voordeel ten opzichte van batterijen dat ze een lage laadtijd hebben (op minder dan 5 minuten tijd). Kennen weinig tot geen vermogensverlies, ook niet bij koel- of vriesopslag.



Figuur 25: Waterstofvoertuig

2.1.1.5. Toepassingsgebieden – Opslag in het gasnet

Het voordeel van de aardgasinfrastructuur is dat deze wijdvertakt is en een zeer hoge opslagcapaciteit heeft. Daarnaast mag het aardgas ook waterstof bevatten (amper 0.02% - in kleine percentages voor de goede werking van bijv. HR-ketels niet te beïnvloeden). Dit kan in de toekomst nog stijgen. Daarnaast is er op vandaag ook onderzoek naar een nieuwe technologie waarmee waterstof uit aardgas kan gefilterd worden, zodanig waterstof kan opgeslagen worden in het gasnetwerk. Maar ook dit zal nog enkele jaren duren tegen dat deze technologie beschikbaar zal zijn om waterstof vanuit de huidige aardgasinfrastructuur te ontdoen.

2.1.1.6. Toepassingsgebieden – Methanisering

Echter kan men ook methaan (gemaakt van waterstof uit P2G) in het gasnet injecteren, dit kan onbeperkt aan aardgas worden toegevoegd in het aardgasnetwerk. Het grootste nadeel hiervan is dat

het proces om methaan te produceren verbonden is met zeer hoge kosten. Het grote voordeel van deze optie is dat de aardgasinfrastructuur al volledig uitgebouwd is en dus zware investering niet vereist zijn. Daarnaast kunnen er ook hele grote hoeveelheden energie worden opgeslagen.

Daarnaast moet ook de kanttekening gemaakt worden dat door het toevoegen van CO₂ (koolstof) in de transitie naar een klimaatneutraal energiesysteem niet altijd de meest gewenste oplossing is.

Het chemisch conversieproces voor de productie van methaan uit waterstof, wordt ook wel het Sabatierproces genaamd. Hierbij wordt waterstof (H₂) in een reactor geplaatst en reageert dit met kooldioxide (CO₂) tot methaan (CH₄).

Tabel 2: Specificaties per type chemisch conversieproces

Technologie	Opslagcapaciteit [GWh]	Efficiëntie [%]	Opslagduur [Tijd]
Power to Gas (H ₂)	>500 GWh	75	Week/seizoen
Power to Gas (CH ₄)	Aardgasnet	60	Week/seizoen
Power to Gas to Power	>500 GWh	40	Week/seizoen

2.1.2. Brandstofcel

In 1839 ontwierp William Grove de eerste brandstofcel, waarbij hij gassen combineerde om elektriciteit en water te produceren, deze brandstofcel werd ook wel de gasbatterij genaamd. Het eerste commerciële potentieel was gedemonstreerd bij de NASA in 1960, waarbij er gebruik werd gemaakt van brandstofcellen in de Gemini en Apollo ruimtevloten. Sinds 1970 is er meer onderzoek en ontwikkeling gekomen bij de brandstofcellen.

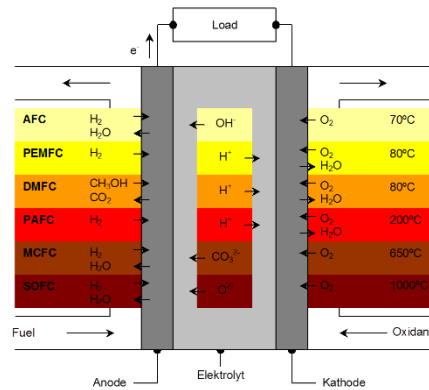
De brandstofcel werd daarnet beschreven als één van de noodzakelijke overgangsorganismes voor het P2G-verhaal als men terug elektriciteit wil produceren. De term die voor dit proces gebruikt wordt, ook wel gekend als P2G2P. Hier gaan we nu iets dieper in op de brandstofcellen en de verschillende types cellen.

De brandstofcellen bestaan, net zoals batterijen, uit individuele elektrochemische cellen. Echter wordt in tegenstelling tot batterijen, voor deze technologie een brandstof gebruikt (meestal waterstof of aardgas). De brandstofcel vereist dus een continue aanvoer van brandstof (geen gesloten medium zoals batterijen) om een chemische reactie te onderhouden en zo elektrische energie te produceren. Dit is dan ook het grootste verschil tussen brandstofcellen en batterijen. Batterijen hebben een beperkte interne brandstofcapaciteit, dit in tegenstelling tot de brandstofcel die een continue brandstofaanvoer van buitenaf kan gebruiken. Bij het proces komt dus zowel elektriciteit, als warmte vrij.

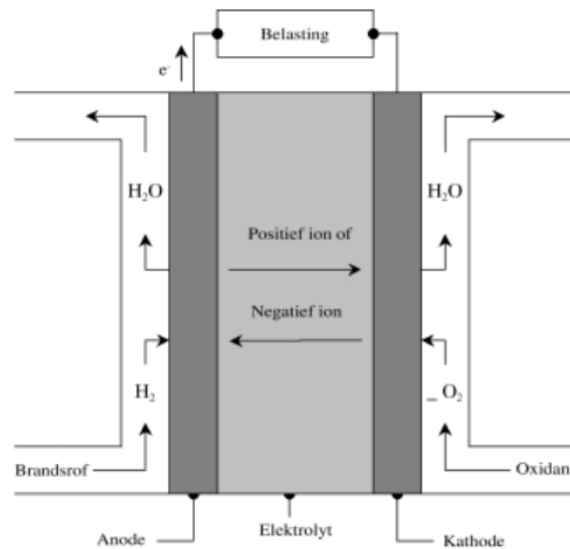
Brandstofcellen wekken, net zoals batterijen ook gelijkstroom op, deze moet omgezet worden in wisselstroom met de nodige omvormersystemen.

Het werkingsprincipe wordt hieronder schematisch weergegeven. Tussen 2 elektroden bevindt zich een ionen geleidend elektrolyt. Waterstof wordt langsheen de anode gestuurd, zuurstof langsheen de kathode. Aan de anode treedt een chemische reactie op waarbij elektronen en ionen geproduceerd worden. Deze elektronen bewegen zich langs een uitwendig circuit naar de kathode en drijven ondertussen een belasting aan. De ionen migreren doorheen de elektrolyt eveneens naar de kathode,

waar samen met de elektronen en zuurstof een nieuwe chemische reactie optreedt en water gevormd wordt.



Figuur 26: Verschillende types brandstofcellen



Figuur 27: Werkingsprincipe - Brandstofcel

Op vandaag zijn er verschillende soorten brandstofceltechnologieën. Dit wordt bepaald op basis van hun gebruikte elektrolyt en de werkingstemperatuur. Hieronder worden deze kort aangehaald.

1. AFC

AFC staat voor Alkaline Fuel cell. Dit is een lage temperatuursbrandstofcel. Ze heeft een werkingstemperatuur van ongeveer 70°C en gebruikt vloeibaar kaliumhydroxide als elektrolyt. De grote voordelen van dit systeem zijn de zeer lage opstarttijd, te wijten aan de lage temperaturen, en de hoge rendementen die gehaald worden in vergelijking met de andere types. De lage temperatuur is inherent ook direct een probleem voor het aantal toepassingsgebieden voor de AFC. Het grootste nadeel van dit type is de gevoeligheid van het kaliumhydroxide voor CO₂-vergiftiging en van de katalysator voor CO-vergiftiging. Hierdoor wordt werking met lucht als oxidans enkel mogelijk met een voorafgaande CO₂-scrubbing en moet de waterstof vrij zijn van CO.

2. PEMFC

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell werken bij een temperatuur van 80. Deze maken gebruik van een vast, protonengeleidend polymeer als elektrolyt, meestal Nafion. Het gebruik van een vast

elektrolyt laat een compacte bouw van de brandstofcel toe, evenals werking onder druk, waardoor de prestaties aanzienlijk verbeteren. Net zoals bij de AFC is de lage werkingstemperatuur voordelig voor korte opstarttijden, en door de iets hogere temperatuur ivm AFC is WKK-werking eenvoudiger mogelijk.

Het gebruik van Platina als katalysator is de rechtstreekse aanleiding tot de 2 grootste problemen waarmee de PEMFC af te rekenen heeft. Ze is duur en de katalysator is extreem gevoelig voor CO-vergiftiging, waardoor de concentratie CO in de voedingsgassen beperkt moet blijven tot 10 à 20 ppm.

De levensduur van de PEM FC bedraagt theoretisch 20.000 uren, wat voor een personenwagen dan ook meer dan voldoende is (5.000 uren zijn voldoende voor 300.000 km). Natuurlijk in de praktijk zal bij wagens de temperatuur hoger oplopen, waardoor de werkelijke levensduur op vandaag ook nog een stuk lager ligt. Don quichote (waterstoftankstation bij Colruyt Group maakt eveneens gebruik van de PEM fuel cell.

3. DMFC

Direct Methanol Fuel cell is in sterke mate verwant aan de huidige PEM fuel cels. De opbouw is gelijkaardig en er wordt Nafion als membraam gebruikt. Aangezien bij PEM-systemen de opslag en productie van voldoende zuivere waterstof geen evidentie zijn, werden de mogelijkheden van methanol als brandstof onderzocht.

Het grote voordeel van methanol ten opzichte van waterstof is dat het opslagvolume voor eenzelfde hoeveelheid energie 6 x kleiner is, het bij omgevingsdruk onder vloeibare vorm kan worden opgeslagen en dat er geen uitbouw nodig is van nieuwe infrastructuur. Bij dit type brandstofcel is het dus niet waterstof, maar methanol die de elektrochemische reactie met water tot CO₂.

De werkingstemperatuur bedraagt tussen de 80 en 130°C, wat snelle opstarttijden nog steeds mogelijk maakt. De nadelen zijn het gebruik van de dure materialen zoals platina en ruthenium.

4. PAFC

Deze Phosphoric Acid fuel cell behoort tot de hoge temperatuursbrandstofcel. De werkingstemperatuur bedraagt ongeveer 200°C en als elektrolyt wordt geconcentreerd fosforzuur gebruikt. Door de hoge temperatuur zijn deze brandstofcellen zeer geschikt voor WKK-toepassingen, maar dit zorgt er tegelijkertijd voor dat de opstarttijden 3 tot 4 uur duren. Door het gebruik van een vloeibaar elektrolyt en platina als katalysator is de werking onder druk niet mogelijk.

5. MCFC

Molten Carbonate fuel cell is een hoge-temperatuursbrandstofcel die gesmolten alkalicarbonaten als elektrolyt gebruikt en werkt bij een temperatuur van 650°C. Door de zeer hoge temperaturen wordt het gebruik van een reformer overbodig. Daarnaast worden warmterecuperatie en stoomproductie mogelijk voor industriële toepassingen. Elke brandstof die rijk is aan waterstof kan rechtstreeks aangewend worden en bovendien heeft het systeem geen behoefte aan dure katalysatoren om optimaal te functioneren. De opstarttijd van grotere systemen kan wel oplopen tot meer dan 20 uur en door de hoge corrosiviteit van de elektrolyt is er een zware belasting van de materialen waaruit de brandstofcel is opgebouwd.

6. SOFC

Solid Oxide Fuel cel systemen zijn hoge temperatuursbrandstofcellen die gebruik maken van een vast elektrolyt. Net zoals bij de MCFC, biedt de hoge werkingstemperatuur (tot 1000°C) de mogelijkheid tot interne reforming, een ruime brandstofkeuze en uitgebreid gamma aan WKK-toepassingen. Er wordt een vast elektrolyt gebruikt, waardoor werking onder druk mogelijk is en de prestaties verbetert.

Echter zijn er ook restricties door de hoge temperaturen zoals een beperkte levensduur en een nog langere opstarttijd dan de MCFC. Daarom wordt ook onderzocht of het mogelijk is deze cellen te laten werken bij een temperatuur rond de 650°C.

2.1.2.1. Voordelen brandstofcel

- Hoge energiedichtheid (1 kg waterstof bevat 3x zoveel energie als 1 liter benzine en aardgas)
- Seizoensopslag is mogelijk
- Milieuvriendelijk – water als afvalstof.

2.1.2.2. Nadelen brandstofcel

- Volume, een waterstoftank voor in de auto is groter dan een conventionele brandstoftank en levert een kleinere actieradius op.
- Waterstof is geur- en kleurloos, lekken en vlammen onzichtbaar. Daarnaast heeft waterstof een 20 x lager ontstekingspunt dan benzine.
- Waterstof vloeibaar opslaan kost veel energie omdat het gekoeld en onder druk moet gebeuren
- Rendement van ongeveer 40% (Power-to-Gas-to-Power)

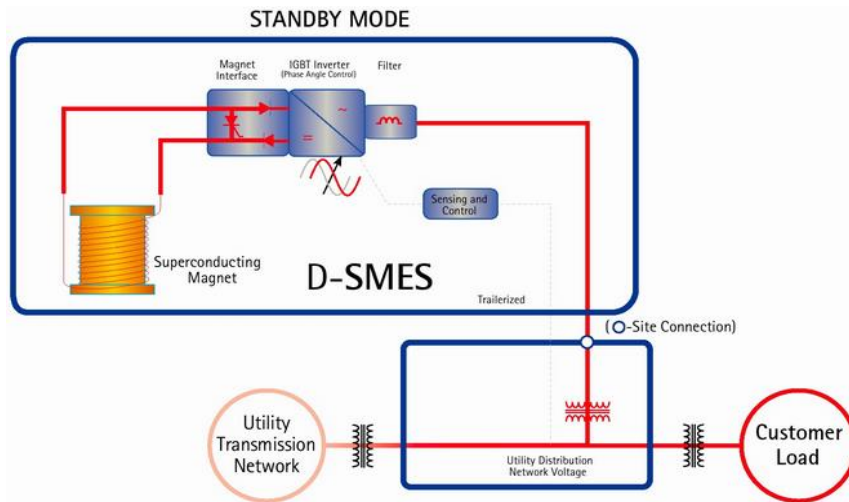
2.2. Elektrische opslag

2.2.1. SMES

SMES staat voor Superconducting Magnetic Energy Storage. Deze eenheden slaan elektriciteit op in een magnetisch veld. Dit magnetisch veld wordt gecreëerd door gelijkstroom (DC) in een supergeleidende spoel, gekenmerkt door cryogene (zeer lage temperaturen).

Supergeleiders zijn al reeds ontdekt door Kamerlingh Onnes in 1911. Dit zijn materialen die onder bepaalde kritische temperatuur al hun weerstand voor elektrische stroom verliezen. In theorie kan de stroom dan ook oneindig lang vloeien in de geleider. Maar moet er dus wel extreem gekoeld worden. Het probleem op vandaag met deze technologie is dat er voor de bekende supergeleiders er maar weinig stroom kan vloeien bij dergelijke temperaturen. Daarnaast is ook vloeibaar helium nodig (duur!) om zeer lage temperatuur geleiders onder 20K te kunnen koelen).

Supergeleidende materialen hebben dus geen elektrische weerstand, wat de energieverliezen tot een minimum beperkt. Om de supergeleidende staat van de spoel te behouden moet er een koelsysteem gebruikt worden (cryogene koeling). Dit vormt samen met de complexiteit van het systeem de voornaamste barrière. Deze systemen hebben een heel snelle reactietijd en een hoge vermogensdichtheid en daarvoor zijn ze dus geschikt voor toepassingen waarbij het snel, en kortstondig, leveren van vermogen centraal staat (vb. diensten netonderbreking).



Figuur 28: Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

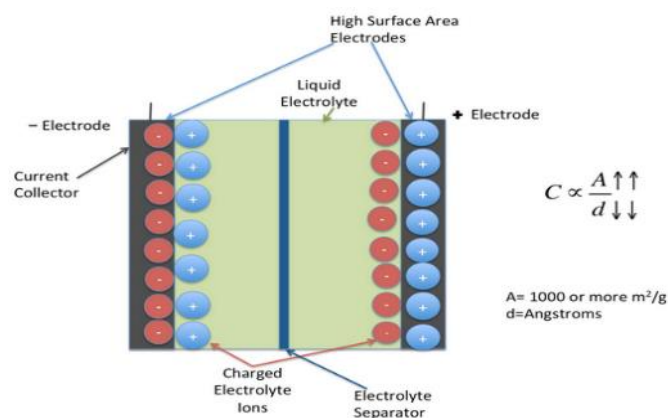
De opgeslagen energie in de spoel is afhankelijk van zijn zelfinductantie en het kwadraat van de stroom. De opslagcapaciteit is afhankelijk van de maximale stroom die door de spoel mag vloeien en de bedrijfstemperatuur van de spoel. 95% van alle energie die erin wordt opgeslagen, kan er terug worden uitgehaald. Daarnaast heeft het een zeer lange levensduur (20-40 jaar), maar met een zeer lage energiedichtheid (veel oppervlak nodig) die kan benut worden. Eveneens zijn er mogelijke risicovolle effecten van het sterke magnetische veld op het menselijk lichaam.

2.2.2. Supercondensatoren

Een condensator slaat energie niet op als een magneetveld, maar als een elektrische lading. Ook condensatoren zijn zeer snel op te laden en behoorlijk efficiënt. De laatste jaren wordt veel onderzoek gedaan naar ultracondensatoren. Ideaal om auto's mee op te laten in enkele seconden t.o.v. enkele uren met standaard accu's. Ultracondensatoren zijn wel niet erg groot, per kg kan maar 0.03 kWh worden opgeslagen

Supercondensatoren bestaan uit 2 geleidende elektroden die zich op een kleine afstand van elkaar bevinden, een elektrolyt en een separator die beide elektroden elektrisch van elkaar scheidt.

Wanneer men een bepaalde spanning aanlegt, worden de ionen in het elektrolyt naar de elektrode aangetrokken met het tegengestelde teken (positief of negatief) aan de lading van het ion. Deze tegengestelde ladingen produceren een elektrisch veld waarin energie wordt opgeslagen. In tegenstelling tot batterijen vloeien er geen ionen van de ene naar de andere elektrode.



Figuur 29: Supercapacitor

Deze technologie beschikt over een hoge vermogensdichtheid en lage energiedichtheid (zoals de SMES). Dit maakt ze ideaal voor het snel leveren van grote, kortstondige vermogens. De opgeslagen energie in een supercapaciteit is proportioneel met hun capaciteit en het kwadraat van de aangelegde spanning tussen de elektrodes. De capaciteit daarentegen is dan weer afhankelijk van het contactoppervlak van het elektrolyt en omgekeerd evenredig met de afstand tussen de elektrodes.

2.3. Elektrochemische opslag

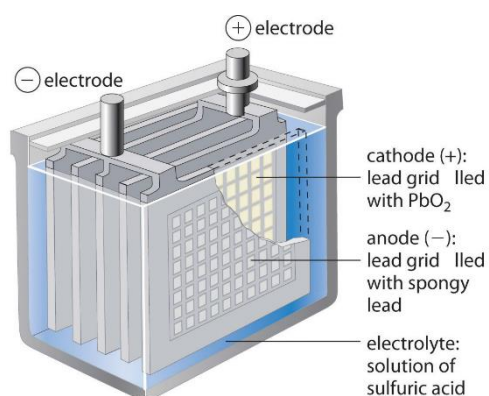
BESS of batterij energy storage systems, bestaan uit batterijen om (overschotten van) elektriciteit op te slaan en deze anderzijds terug om te zetten naar elektriciteit. Voor batterijen kunnen we 2 grote categorieën onderscheiden, zijnde de solid-state systemen (chemische actieve componenten bewegen niet) en de flow batterijen (chemische actieve componenten circuleren).

Er bestaat een grote variëteit aan batterijtechnologieën. Deze kunnen onderverdeeld worden in secundaire (= oplaadbare) en primaire (=niet oplaadbare) cellen.

2.3.1. Solid state- batterijen

2.3.1.1. Loodzuurbatterijen

De loodzuurbatterij is uitgevonden in 1859. De elektroden zijn vervaardigd uit lood en loodoxide en worden ondergedompeld in een elektrolyt bestaande uit een mengsel van zwavelzuur en gedestilleerd water. Gedurende ontlading wordt er aan beide elektroden loodsulfaat gevormd en het elektrolyt verliest zijn zwavelzuur dat omgezet wordt in water.



Loodzuur batterij - elektrische karakteristieken	
Opslagcapaciteit	5 kWh
Energiedichtheid	120 – 150 kg
Rendement	50 – 95 %
Levensduur	500-800 cycli
Celspanning	1.95 – 2.1 V
Zelfontlading	3 – 20 % / maand

Figuur 30: Loodzuur batterij

De voordelen van loodzuurbatterijen zijn de lage kost, ze zijn onderhoudsvriendelijk en het is een bewezen technologie. De nadelen van deze technologie zijn een lage energiedichtheid, temperatuurafhankelijk waterstof en zuurstofgasproductie.

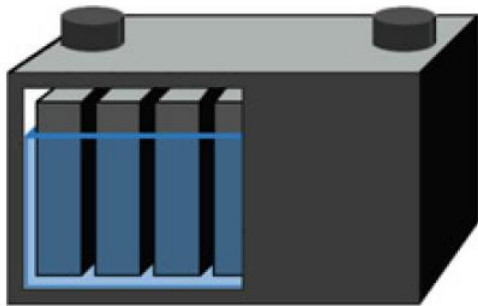
Loodzuurbatterijen waren jarenlang het enige type batterij die veelvuldig werd toegepast voor opslag. Daardoor zijn er ook heel wat ontwikkelingen geweest omtrent dit type batterij. De bekendste types zijn dan ook de FLA (flooded lead acid) en de VRLA (valve regulated lead acid) batterijen.

- **FLA batterijen:** de term flooded wordt gebruikt omwille van de volledige in het elektrolyt ondergedompelde elektroden. Tijdens het opladen van de FLA batterij moet het niveau van het elektrolyt steeds boven de elektroden liggen om schade aan de cel te vermijden. Dit vergt

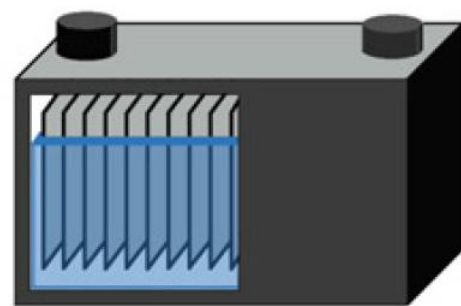
het regelmatig aanvullen van de cellen met gedestilleerd water daar door het opladen van de batterij er elektrolyse optreedt. (water splitst in ionen die onder het gasvormige H_2 en O_2 de cel ontsnappen).

- **VRLA batterijen:** werden ontwikkeld om de nood aan toevoeging van gedestilleerd water te elimineren en ervoor te zorgen dat de loodzuur cel in elke positie kan gebruikt worden. Ze werden zo ontworpen dat bij het opladen de aan positieve elektrode ontstane zuurstof (elektrolyse) terug gereduceerd wordt aan de negatieve elektrode tot water. Dit proces compenseert in grote mate het waterverlies. Echter is het proces geen ideaal proces, waardoor de overschot aan zuurstof en waterstof geventileerd moet worden. Daarom wordt er een druk regelklep voorzien.

Dimensionering van de elektroden, afstand tussen de elektroden en het gebruikte transportmedium (elektrolyt) is bepalend voor de elektrische karakteristieken en dus bepalend voor in welke toepassing deze batterijen het best gebruikt worden. De dimensionering van de elektroden bepaald grofweg 2 types: vb. Tractie batterijen, ook wel deep cycle batterijen genaamd en start batterijen.



De tractie batterij heeft dikkere elektroden waardoor deze minder snel falen door corrosieve effecten. Deze nemen toe naarmate de batterij dieper wordt ontladen (DOD). De klemtoon bij dit batterijtype ligt ook bij de capaciteit.



De start batterij heeft vele dunne elektroden in parallel om lage resistiviteit en een grote actieve oppervlakte te bekomen. Ze laat geen diepe ontlading toe, de klemtoon ligt hier op vermogensdichtheid.

Binnen de VRLA-batterij wordt er op basis van het transportmedium nog een onderscheid gemaakt tussen gel- en AGM-batterijen (Absorbent Glass Mat) VRLA batterijen. Een overzicht van de verschillende voor- en nadelen worden hieronder weergegeven.

Voordelen FLA:

- Lagere kost dan tractie VRLA batterijen
- Meer cycli bij grote DOD dan tractie VRLA batterijen
- Presteren beter in warmere klimaten
- Performanter dan tractie VRLA batterij bij het regelmatig partieel opladen

Nadelen FLA:

- Periodisch onderhoud noodzakelijk (=toevoegen gedestilleerd water)
- Rechtopstaand installeren
- Ontwikkeld gas bij opladen, ventilatie nodig!
- Hogere zelfontlading dan VRLA batterijen
- Presteert slechter in koude omgeving ten opzichte van VRLA batterijen

Voordelen gel VRLA:

- Betere performantie bij het regelmatig diep ontladen (tot DOD = 80%)
- Betere performantie voor laagvermogen toepassingen
- Capaciteit in functie van de tijd verloopt koepelvorming, terwijl bij AGM dit gradueel dalend is.

Voordelen AGM VRLA:

- Minder duur dan gel batterijen
- Laagste zelfontlading, ook ten opzichte van FLA batterijen
- Beter bestand tegen schokken/vibraties
- Best geschikt voor hoog vermogen toepassingen, ook ten opzichte van FLA

2.3.1.2. NiMH-batterijen

Deze batterij is beschikbaar sedert 1980 met de eerste toepassing in ruimtevaart omwille van hun hoge energiedichtheid en lange levensduur. De elektroden zijn ondergedompeld in een zuurbufferend elektrolyt, doorgaans KOH opgelost in water. De anode bestaat uit nikkel oxyhydroxide net zoals de NiCd batterij. De kathode bestaat uit een waterstof absorberende legering M.

Net zoals de VRLA batterij is de NiMH batterij een nagenoeg volledig afgesloten batterij en vergt bijgevolg nagenoeg geen onderhoud. Daar het elektrolyt ook een wateroplossing is, kan bij overladen van de batterij elektrolyse optreden. De NiMH batterij is dan ook uitgerust met een druk regelklep.

Deze batterij onderscheidt zich van de loodzuur batterij door de grotere levensduur en de sterk vergrote energiedichtheid (= ruimtebesparing). Echter ligt de zelfontlading van de NiMH cel wel 5- tot 10 keer groter dan bij loodzuurbatterijen.

Voordelen NiMH:

- Grote energiedichtheid
- Hoge levensduur
- Onderhoudsvrij
- Hoge vermogensdichtheid door conductiviteit van het elektrolyt

Nadelen NiMH:

- Hogere kost dan loodzuur batterijen
- Hogere zelfontlading dan loodzuur batterijen
- Ingewikkelder laad algoritme dan loodzuurbatterijen
- Lager cyclusrendement dan loodzuurbatterijen

2.3.1.3. Nikkel ijzer-batterijen

Ook wel Edison batterij genoemd. Uitgevonden in 1901 en nog steeds beschikbaar in toepassingen als residentiële off-grid installaties en industriële applicaties waar de batterij tegen een hoge stress factor moet bestendig zijn.

Dit type batterij is goed bestand tegen overladen, over-ontladen, ontladen bewaren gedurende langere periodes en kortsluiten van de klemmen. De batterij ondervindt weinig invloed op de capaciteit bij diep ontladen en wordt dus best gebruikt waar een hoog aantal cycli bij grote DOD

noodzakelijk is. De elektroden bestaan uit ijzer voor de kathode en nikkel oxide voor de anode. Als elektrolyt wordt, net als bij NiMH batterijen, een oplossing van kaliumhydroxide in water gebruikt.

Net zoals bij FLA batterijen produceren NiFe batterijen H₂ en O₂. Ook hier zijn dus een goed geventileerde en vonkvrije omgeving vereist. Er wordt vaak beweert dat Edison batterijen een mythische levensduur hebben.

Voordelen NiFe batterij:

- Relatief ecologische batterij, bevat geen zware metalen
- Robuust
- Bestand tegen elektrisch misbruik
- Bewaart goed in ontladen toestand

Nadelen NiFe batterij:

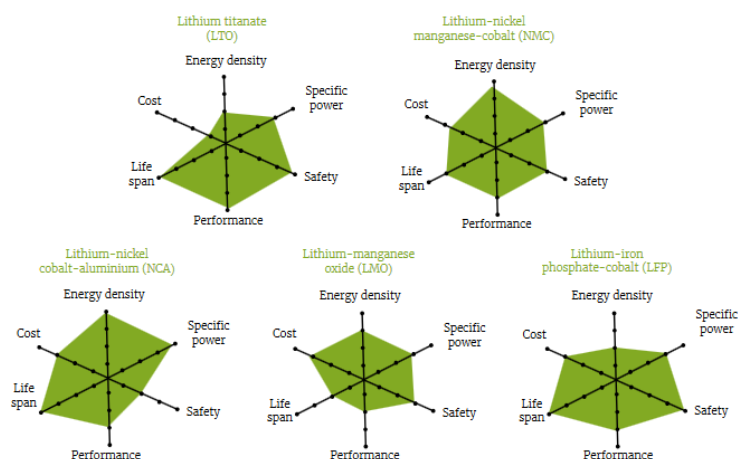
- Duur
- Lage energiedichtheid
- Laag cycluserendement
- Hoge zelfontlading
- Vergt onderhoud

2.3.1.4. Lithium Ion batterijen

Commercieel beschikbaar sinds 1990 met toepassingen in draagbare elektronische toestellen, elektrisch gereedschap, enz.

De werking van dit type batterij verschilt met de andere types opgesomde batterijen. De elektrodes fungeren nu als een inbeddingsmedium voor de ladingsdragende lithium ionen. Een elektrode kan een lithium ion opnemen of afstaan met een slechts geringe verstoring van de elektrode structuur. De elektrode fungeert dus als gastheer, met de lading dragende lithium ion als een gast en het elektron als toegangskost. Het elektrolyt kan geen water bevatten daar lithium een alkalimetaal is in plaats daarvan wordt een lithium zout opgelost in een organisch solvent.

Lithium batterijen scoren wel slechter bij veiligheid. Bij oververhitting door overladen of bij een lek in de container kan de batterij ontbranden. Er bestaan veel verschillende soorten Lithium varianten, hieronder wordt een mooi overzicht gegeven omtrent de verschillende batterijbanken.



Figuur 31: Types Lithium batterijen

Voordelen Li-ion batterij:

- Hoge energiedichtheid
- Groot aantal cycli
- Vergt geen onderhoud
- Bewaart goed in ontladen toestand
- Hoog cyclusrendement

Nadelen Li-ion batterij:

- Duur
- Onveilig

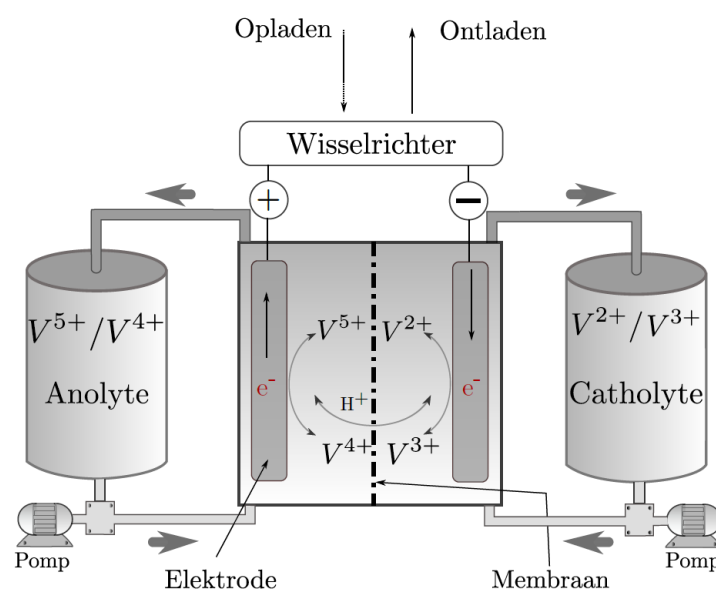
2.3.1.5. Lithium ijzer fosfaat (LFP) batterij

Commercieel beschikbaar sedert 2006. Dit batterij type is geëvolueerd uit de lithium-ion batterij. De kathode bij de LFP batterij bestaat uit LiFePO_4 . De LFP batterij heeft een lagere energiedichtheid dan de lithium-ion batterij, maar scoort beter op veiligheid, levensduur en vermogensdichtheid. Dit maakt de LFP batterij uitstekend geschikt voor elektrische voertuigen, elektrisch gereedschap, elektrische fietsen, etc.

2.3.2. Flow batterijen

Dit is een type herlaadbare batterij waar 2 oplossingen (katholyte en anolyte) gescheiden zijn door een ion doorlatend membraan. De elektrode vloeistoffen worden dus in aparte tanks opgeslagen. Aan de elektroden wordt het anolyte geoxideerd, het katholyte neemt elektronen op en wordt gereduceerd. Zolang er voldoende actief anolyte/katholyte voorhanden is gaat de elektronen overdracht verder. Indien een tegenovergestelde celspanning aangelegd wordt, gebeurt de tegengestelde reactie. Het voordeel van deze batterijen is dat de grootte van de tank de opslagcapaciteit bepaalt.

Deze opslagtechnologie heeft momenteel een zeer beperkte maturiteit, en is ofwel gebaseerd op ZnBr (Zink-Bromide) of VRB (Vanadium-Redox) technologie. Flowbatterijen zijn beter geschikt voor toepassingen waarbij een lange onlaadduur belangrijk is, vb. energiediensten.



Figuur 32: Flow batterij

2.3.3. Kwalitatieve vergelijking batterijsystemen

5 kWh vergelijking	Flow - batterijen	Loodzuur-batterijen	Lithium-ion batterijen	Nikkel-ijzer batterijen	Aqueous batterijen
Energiedichtheid [kg]	250-500	120-150	18 - 50	19-25	294
Rendement [%]	70-80	50-95	80-90	65-80	80 -90
Levensduur [jaar of cycli]	Meer dan 10.000	500 – 800	400 -1200	30 – 50	3000
Celspanning [V]	1,15 – 1,55	1,95 – 2,1	3,2	1,2	2
Zelfontlading [%/maand]	-	3 – 20	8	20 -30	2
Kostprijs	250-500	Laag	Hoog	Hoog	Laag
DOD [%]	70-80	50	80	80	80%

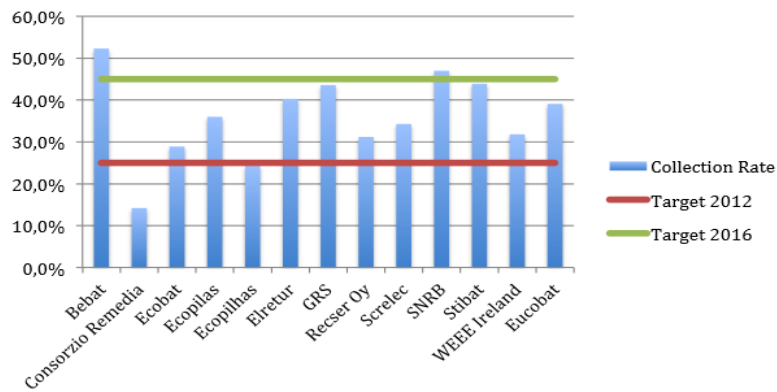
Figuur 33: Vergelijking tussen batterijsystemen

2.3.4. Second life batterijen

Veel batterijsystemen zijn schadelijk voor de omgevingen, vandaar dat hier ook even aandacht wordt gegeven omtrent het recyclen van batterijbanken. Veel vragen rijzen wat er zal gebeuren met oude batterijen die de gewenste capaciteit niet meer kunnen leveren. In dit punt wordt zowel het recyclen als het second life batterij verhaal behandelt.

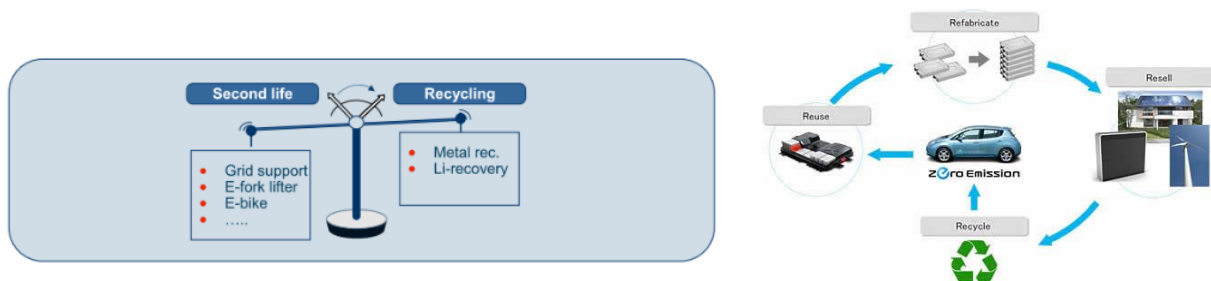
Loodzuurbatterijen bevatten lood, Nikkel Cadmium batterijen – ijzer en nikkel, dat op zich een zwaar metaal is. Dit leidt tot dalende hersenfunctie en gedragsproblemen wanneer het in de bloedstroom zou terechtkomen. Echter is lood in een gesloten verpakking ongevaarlijk, enkel bij productie (4%) en recycling (2%) komen er loodemissies vrij. Echter zijn de loodemissies de laatste 20 jaar met meer dan 75% gedaald. Wat toch wijst op een goede recycling in de voorbije jaren. Lithium batterijen daarentegen zijn gevaarlijk in contact met water (explosie gevaar).

Gelukkige is er aanvaardingsplicht voor batterijen. Er geldt zowel een Vlaamse als een Europese regelgeving waarbij het verplicht is dat er een verzamelpunt is voor batterijen en accu's. Voor België vormt BEBAT het verzamelingsorganisme voor batterijen. Daarvan zijn er meer dan 20.000 collectie punten in België waar batterijen kunnen gedeponereerd worden. Dit alles wordt strikt opgevolgd door OVAM, die verantwoordelijk zijn voor het sorteren van batterijen. Echter presteert België zeer goed als het aankomt op het jaarlijks inzamelen van batterijen. Meer dan 55% van de jaarlijks geproduceerde batterijen worden terug ingezameld, daarmee behoort België tot de top in Europa. Daarnaast kan he zelf zijn dat bij een aanzienlijk aantal batterijen, een derde partij interesse heeft om de oude batterijen op te kopen, vb. RecuPbat, ... (www.ovam.be/register_IHM) om een lijst te raadplegen van derde partijen die de batterijen opkopen.



Figuur 34: Verzamelratio Europese landen

Echter als het aankomt op een zware investering om capaciteit ter beschikking te stellen in het bedrijf, kan het concept second life batterijen leiden tot een goedkoper product die ook nog jaren kan werken als functie van back-up of in het concept van een verhoogde zelfconsumptie en zelfvoorziening.



Figuur 35: Second life batterijen

De bedrijven Bosch, Vattenfall en BMW hebben zelf al een alliantie omtrent second life batterijen. Met de oudere batterijen van elektrische wagens (met een resterende capaciteit tussen de 70 à 85%) willen ze een grootschalig opslagsysteem uitbouwen om het stroomnet stabiel te houden. De energie zou binnen enkele seconden beschikbaar zijn en moet in staat zijn om te helpen het distributienet stabiel te houden. Zo hebben ze al een energiehubs met een totaal piekvermogen van 2325 kW en een totale capaciteit van 3000 kWh (combinatie van Li-ion batterijen en Vanadium Redox Flow batterijen).

Ook in Nederland is er al een snellaadstation tussen Utrucht en Amsterdam, waar een groot batterijpak helpt om piekstroom te leveren. De opslag is opgebouwd uit afgeschreven autobatterijen en moet een piekbelasting opvangen met het 90 kWh grote batterijpakket. Hiermee worden grote kosten voor de aanleg van kostbare netkabels vermeden. Ook in bedrijven kunnen dergelijke batterijen voor een kostenefficiënte oplossing zorgen en helpen in het de sturing van het vraagprofiel.

2.4. Mechanische opslag

2.4.1. Vliegwiel

2.4.1.1. Inleiding

“Flywheels and supercapacitors, with their high cycle life and ramping capabilities, are good candidates for regulation. Batteries may be better for supplying load following, where cycle life requirements and the ratio of peak power to stored energy are lower.”

Vliegwielen zijn geen nieuwe technologie. Duizenden jaren geleden werden eenvoudige vliegwielen al reeds gebruikt voor ambachtelijk aardewerk. Door de industriële revolutie is het gebruik van vliegwielen sterk gestegen door de ingebruikname van de stoom machine. Tijdens deze periode is technologische ontwikkeling van vliegwielen gestart. De eerste mijlpaal was wanneer Dr. A Stodola één van de eerste proefschriften had neergeschreven omtrent de theoretische spannings-beperkingen van roterende isotrope schijven. De volgende mijlpaal vond plaats rond de periode 1970 , wanneer applicaties voor back-up vermogen en elektrische auto's werden voorgesteld. Tijdens deze periode werden vliegwielen voorgesteld die werden gemaakt uit composiet. Rond 1980 werd magnetische lagering geïntroduceerd. Recente ontwikkelingen in materialen, magnetische lagering, vermogenselektronica,... hebben het mogelijk gemaakt op vandaag vliegwielen als optie te aanzien voor elektrische energieopslag.

2.4.1.2. Algemeen

Het grote voordeel van vliegwielen is dat ze op **zeer kleine tijdsbasis een groot potentieel aan kinetische energieopslag bevatten** (= bewegingsenergie, een vorm van energie die een lichaam heeft vanwege de traagheid van de massa, recht evenredig met de massa en het kwadraat van de snelheid). Vliegwiel energie opslag (FES) werkt door het accelereren van een rotor (vliegwiel) naar een heel hoge snelheid en zo de energie in het systeem te behouden als rotationele energie.

De energie is dus opgeslagen in een roterende massa en de hoeveelheid aan opgeslagen energie is in functie van het inertiaalmoment en de hoeksnelheid:

$$E = \frac{1}{2} I * \omega^2 \quad [J]$$

Waarbij I het inertiaalmoment, en ω de hoeksnelheid voorstelt. Er kunnen grotere winsten verkregen worden door het verhogen van de hoeksnelheid dan het verhogen van het inertiaalmoment. Dit komt omdat de opgeslagen energie afhankelijk is van het kwadraat van de hoeksnelheid en maar lineair met het inertiaalmoment.

Het inertiaalmoment is bepaald door de vorm, de rotationele as en de massa van het vliegwiel:

$$I = \int x^2 dm \quad [kg * m^2]$$

Waarbij x de afstand is van de ronddraaiende as van de differentiële massa dm.

De hoeveelheid van opgeslagen energie is gelimiteerd door de treksterkte van het materiaal. Als de spanningen in het vliegwiel de treksterkte van het materiaal overschrijden, zal het vliegwiel breken. Een materiaal met hoge treksterkte is vereist om een hoge energiedensiteit te behalen. Voor de meeste applicaties wordt de totale massa van het systeem in rekening gebracht, dewelke is beschouwd met de specifieke energie van het vliegwiel.

Een vliegwiel gemaakt van hoge dichtheid/dichtheid materiaal zoals staal, zullen inderdaad meer energie opslaan dan een equivalente grote van lage dichtheid vliegwiel met dezelfde hoeksnelheid. Maar lage dichtheid materialen ontwikkelen lagere interne spanningen, waardoor hogere hoeksnelheden worden toegelaten. Dit laat ontwerpen toe die dezelfde hoeveelheid energie opslaan op een lager gewicht, en dus compactere ontwerpen.

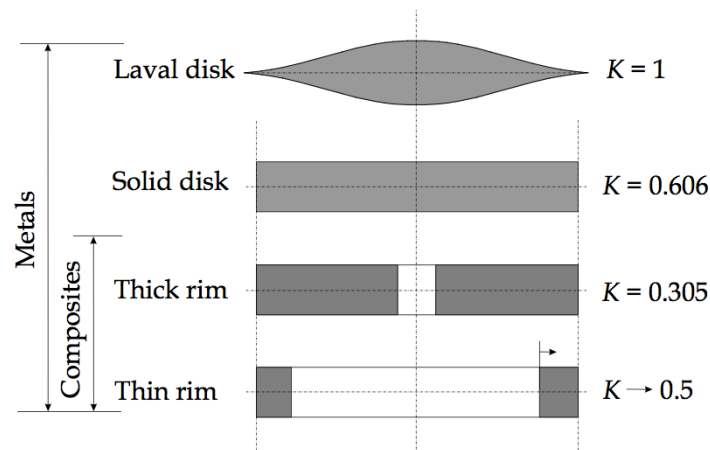
2.4.1.3. Geometrie en materiaal

Een meer algemene uitdrukking voor de maximum specifieke energie en energiedichtheid is hieronder gegeven:

$$Ek, m = K * \frac{\sigma_{max}}{\varphi} \text{ [J/kg]}$$

$$Ek, v = K * \sigma_{max} \text{ [J/m}^3\text{]}$$

Waar K de vormfactor voorstelt en kan beschreven worden als een maat voor hoe efficiëntie het materiaal van het vliegwiel is gebruikt. De meest voorkomende types vliegwiel zijn:



Figuur 36: Vormfactor van verschillende soorten vliegwiel

De laval schijf (genaamd naar de Zweedse ingenieur Gustav De Laval) heeft een vormfactor = 1. De schijf heeft eigenschappen zoals dat de radiale en tangentiële spanningscomponenten hetzelfde zijn in de hele schijf. Afhankelijk van het gebruikte materiaal zal de optimale vliegwielvorm verschillen. Isotropische materialen zoals staal, hebben dezelfde kracht in zowel de tangentiële evenals de radiale richting. Anisotropische materialen, zoals vezelversterkende composieten hebben een unidirectionele treksterkte, dat wil zeggen dat ze sterker zijn in de lengterichting vezel richting. Zoals getoond in de figuur hierboven zijn er vormen die beter geschikt zijn voor dit type materiaal. Een dunne riem (holle cirkelvormige cilinder) vliegwiel is een zeer goede kandidaat voor composiet materiaal omdat de geometrie de hoge unidirectionele sterkte van de vezels benut.

Material	Strength	Density	Strength/ Density	Cost	Strength/ Cost	Comments
	MPa	kg/m ³	MPa/(kg/m ³)	\$/kg	Mpa/\$	
Steel	1400	7780	0.2	1	1400	Conventional metal working
Carbon fiber composite	4000	1750	2.3	20	200	Costlier process, separate curing steps
Glass fiber	1200	2100	0.6	3	400	As above
Kevlar fiber	3500	1200	2.9	12	292	As above

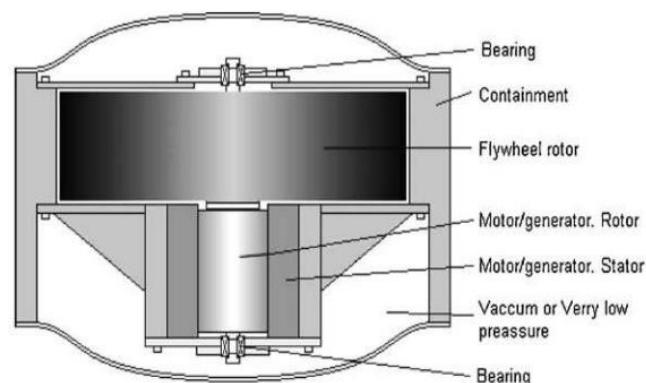
Figuur 37: Vergelijking materiaal

Zoals reeds vermeld, is het beste materiaal voor een vliegwielrotor een hoog sterk materiaal met een lage densiteit. Composiet materialen hebben zowel een hoge sterkte evenals een lage densiteit en zijn ideaal voor vliegwielrotoren gebruikt voor energieopslag. Een composiet materiaal laat een hogere rotationele snelheid toe en dit resulteert in vliegwielrotoren met hoge specifieke energie. Composiet materialen zijn daarom een betere keuze dan metalen als het gaat omtrent design van vliegwielrotoren.

Daarnaast is composiet ook beter qua veiligheidsoverwegingen. Als er een falen komt/ontstaat op een hoge hoeksnelheid en de radiale spanningen overschrijden de materiaalsterkte, dan zal een composiet materiaal niet uiteenspatten in rondvliegende projectielen. Er zullen scheuren in de omtrek komen en het vliegwiel zal gradueel breken.

2.4.1.4. Componenten van een vliegwiel

Een modern vliegwiel opslagsysteem bestaat uit 5 sleutelcomponenten, namelijk de vliegwielrotor, de lagering, de elektrische machine de vermogenselektronica en de behuizing. Deze zullen we nu stelselmatig bespreken.



Figuur 38: Samenstelling vliegwiel

1. Elektrische machine

De energie opgeslagen in een vliegwiel ontstaat door een koppeling met een elektrische machine. Wanneer het vliegwiel laadt, zal de machine het vliegwiel laten accelereren en omgekeerd, wanneer er energie is afgenomen, zal de machine het vliegwiel laten vertragen. Dus de elektrische machine moet zowel kunnen werken als motor- evenals generatormode.

De machine moet streven naar een hoge efficiëntie, hoge vermogensdensiteit, lage stationaire- en rotorverliezen. De hoge efficiëntie is een belangrijke vereiste voor een goed opslagsysteem te zijn. De lage rotor verliezen zijn kritisch sinds de meeste vliegwielopslagsystemen werken in een vacuüm en de verwijdering van warmte beperkt is. Lage stationaire of stand-by verliezen zijn gewenst voor energieopslag over langere tijd.

Er zijn verschillende elektrische machines die kunnen gebruikt worden in een vliegwieltechnologie. De meest gebruikte types zijn de inductiemachine (IM), de geschakelde reluctantiemotor (SRM) en de permanent magneet synchrone machine (PMSM). De voor- en nadelen van de verschillende technologieën worden hieronder opgesomd.

Tabel 3: Overzicht elektrische machines voor vliegwieltechnologie

Type	Voordelen	Nadelen
PMSM	Geen excitatie nodig	Gevaar voor demagnetisering
	Rotor design complexiteit verlaagd, geen nood voor elektrische bedrading	Elektromagnetische draaiverliezen bij geen koppel
	Hoge algemene efficiëntie mogelijk	Lage kracht of PM materiaal vereist structurele hulp tegen centrifugale krachten
	Hoge vermogensdensiteit	Gevoelig voor warmte
IM	Demagnetisering mogelijk	Slechte overbelastingscapaciteit
	Mogelijk om het excitatieveld te controleren	Hoge onderhoudskost
	Geen elektromagnetische draaiverliezen	Extra moeilijkheid aan rotordesign door de extra bekabeling
	Kan gebouwd worden met hoge sterkte materialen voor een lage kostprijs	Hoge verliezen door nood aan excitatie
SRM	Zeer robuust	Lage power factor en lage vermogensdensiteit
	Geen stationaire verliezen	Nood aan excitatie
		Hoge rotor wervelstroomverliezen

In de meeste hoge snelheidsvliegwiel opslagsystemen is PMSM gekozen door de superieure eigenschappen wanneer het aankomt op vermogensdensiteit en efficiëntie.

2. Lagering



De lagering minimaliseert de wrijving en houdt de rotor in positie. In moderne vliegwielen, is hoge snelheid gewenst, rekening houdend met uitgebreide eisen op de lagering. De lagering moet lage verliezen hebben om een goede systeemefficiëntie te bereiken.

Mechanische lagering is de beste keuze voor snelheden onder de 20.000 toeren

per minuut, terwijl als we spreken over snelheden over de 40.000 toeren per minuut, magnetische lagering de beste optie zijn. Mechanische lagering levert een rechttoe- rechtaan implementatie en een lage initiële kost, maar levert relatief hoge wrijvingsverliezen op. De noodzaak aan smering maakt dit type van lagering ongeschikt voor hoge snelheidsvliegwielen. Hoge snelheidsvliegwielen werken in een lage drukomgeving en daarom is smering van mechanische lagering moeilijk te implementeren.

Magnetische lagering komt niet in contact met de rotor of de aandrijfassen en hebben dus lage verliezen, een lange levensduur en hebben geen smering nodig. Deze eigenschappen maken de magnetische lagering geschikt voor het gebruik bij hoge snelheidsvliegwielen.

Een magnetische lagering bestaat uit permanente magneten die de massa van het vliegwiel laten zweven en gecontroleerde elektromagneten die de vliegwielrotor radiaal laten stabiliseren. Deze stabilisatie vereist een complex controle systeem met dure sensoren.

Hoge temperatuur- super geleidende magnetische lagering (HTS) is een recent ontwikkeld type van lagering die de verliezen significant verlaagt. Met dit type lagering is een controlesysteem niet nodig maar het lageringssysteem vereist cryogene koeling.

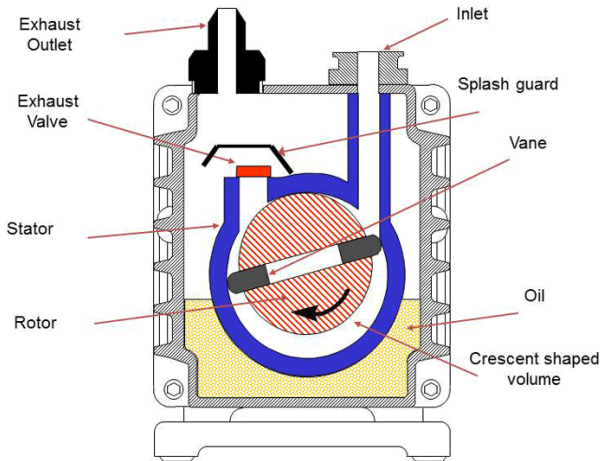
Bearing type	Approximate power loss	Advantages	Disadvantages
Ball (mechanical)	5–200 W	+ Simple, low cost, compact	- Needs lubrication, seals, hubs and axle.
Magnetic	10–100 W	+ Acts directly on rotor, allows high speeds.	- High cost, requires “touchdown bearings” and reliability uncertainty.
HTS	10–50 W	+ Low loss, high forces	- Long-term development requirement, housekeeping losses (cryogenic cooling)

Figuur 39: Vergelijking tussen verschillende soorten lagering

3. Behuizing

Een van de meest belangrijke parameters is de efficiëntie. De aerodynamische luchtweerstand draagt grotendeels bij tot de totale systeemverliezen, omdat deze verliezen stijgen met de derde macht van de rotatieve snelheid. Daarom zijn de verliezen ook groot als er gewerkt wordt onder atmosferische druk. Reductie van deze verliezen zal leiden tot een sterke efficiëntieverhoging en daarom, om de aerodynamische luchtweerstand te verlagen, is het vliegwiel in een vacuüm behuizing plaatsen. Dit vermijdt luchtweerstand en reduceert verliezen. Echter brengt dit wel extra complexiteit met zich mee en vereist dit een bijkomstig systeem zoals een vacuüm pomp en een koelingssysteem. Het koelingssysteem moet hier meer efficiënter zijn omdat de warmteoverdracht minder effectief is in vacuüm (moeilijker dan bij atmosferische omstandigheden).

Voor een perfect vacuüm wordt er gebruik gemaakt van een turbomoleculaire pomp. Deze zijn echter duur, waardoor deze eerder worden gebruikt voor vliegwielen met hoge toerentallen (sneldraaiende vliegwielen) en dus een grote capaciteit, omdat hier de luchtwrijvingsverliezen het grootst zijn. Bij traagdraaiende vliegwielen zal er dan eerder gebruik gemaakt worden van een schottenpomp die voor een gedeeltelijk vacuüm zorgt. Deze pompen zijn veel goedkoper dan de turbomoleculaire pompen.

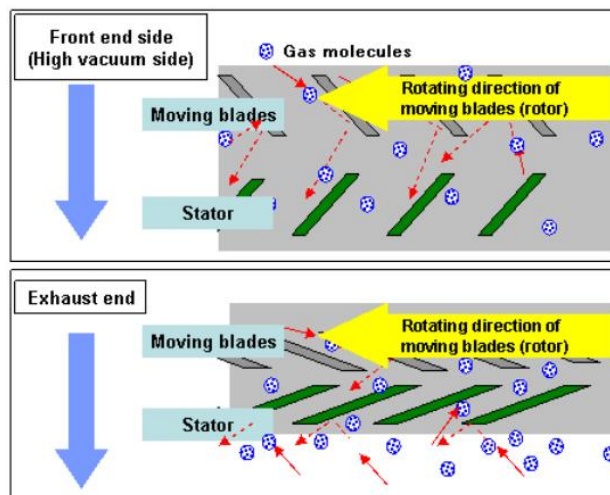


Figuur 40: Schottenpomp

De schottenpomp (of in het Engels rotary vane pump) bestaat uit een excentrische rotor, waarbij er schotten (vanes) via een veer tegen de wanden van de werkkamer worden gedrukt waardoor deze in twee compartimenten wordt verdeeld. Hierbij zal de lucht door de eerste kamer worden geleid en zal de kamer daarna door de schotten worden afgesloten. Door de excentrische vorm van de rotor zal de volume van de kamer kleiner worden waardoor de hoeveelheid lucht hierin wordt gecomprimeerd. Deze gecomprimeerde lucht zal dan door de luchtdruk een uitlaatklep openen waar de lucht uit kan ontsnappen. Deze schottenpompen zijn in de behuizing volledig in olie ondergedompeld die zorgt voor een luchtdichte afsluiting van de uitlaatklep.

Wanneer deze uitlaatklep opent zal er ook een kleine hoeveelheid olie in de werkkamer vloeien, waardoor de schotten zowel worden gesmeerd als luchtdicht gemaakt.

De turbomoleculaire pomp bestaat enerzijds uit roterende bladen (rotor) met daartussen stilstaande bladen (stator). Bij een draaiende rotor zullen de luchtmoleculen in beweging worden gebracht en via de statorbladen zich in de juiste richting voortbewegen. Naarmate de luchtmoleculen zich verder in de pomp bevinden, zullen de stator- en rotorbladen zich dichterbij elkaar bevinden en de hoek hiertussen verkleinen. Hierdoor wordt de luchtdruk in de pomp opgebouwd en wordt er verhindert dat er luchtmoleculen terugvloeien.



Figuur 41: Turbomoleculaire pomp

Naast vacuüm systemen kan men ook gebruik maken van een gasmengsel van helium en lucht om de luchtweerstand drastisch te verlagen. Het voordeel hiervan is dat de eisen van het koelsysteem gereduceerd worden.

De taak van de behuizing is niet enkel om verliezen te beperken, maar het moet ook weerstaan tegen potentieel falen van het systeem. Als de rotor stuk vliegt, moet de behuizing de vliegende projectielen kunnen stoppen/tegenhouden. Daarom is de behuizing typisch van staal of hoog sterk materiaal.

Daarom worden vliegwielen ook meestal in de grond ingebouwd, waardoor ze naast de dikke stalen behuizing ook nog de ingebouwde beveiliging hebben (grondstructuur).

4. Vermogenselektronica

In moderne vliegwielen voor opslag, vormt vermogenselektronica een noodzakelijk deel van het systeem. Het biedt een interface voor de elektrische machine en voor de vermogensoverdracht. De vermogenselektronische interface bestaat meestal uit een bidirectionele inverter/converter en een variabele snelheidsdrive. Het vermogen van of naar het vliegwiel is beschikbaar op de DC-link. Om de vliegwielopslag te verbinden met een AC-net, is een 2^{de} bidirectionele converter nodig. D.w.z. dat de converter enkelfasig kan zijn (AC-DC) of dubbelfasig (AC-DC-AC). Om terug AC te produceren, is het vereist dat we de DC- terug omvormen. Dit gebeurt via PWM (pulse width modulatie)- techniek.

De generator zal een AC-stroom genereren met een dalende frequentie als het vliegwiel vertraagt. Daarvoor is het noodzakelijk om de AC-stroom om te zetten naar een AC-stroom met constante frequentie. Dit wordt gedaan door de vermogenselektronische interface. Voor vliegwielen geconnecteerd met het AC-net, is er de mogelijkheid om zowel actief en reactief vermogen te regelen.

Het is gewenst dat de vermogenselektronische interface een hoog vermogen aankan, een hoge schakelfrequentie en een hoge efficiëntie. Met de ontwikkeling van halfgeleiders kunnen we op vandaag aan die vereiste tegemoet komen. Meestal wordt gewerkt met IGBT's (insulated-gate bipolar transistors). Dit is eigenlijk een transistor die veel vermogen kan schakelen en die met een kleine stuurspanning kan aangestuurd worden.

2.4.1.5. Vermogens- en energiecapaciteit

Wanneer men spreekt over de vermogens- en energiecapaciteit van een FESS (Flywheel Energy Storage System), is het belangrijk om te weten dat beide volledig los staan van elkaar. De specifieke energie van het vliegwiel is afhankelijk van 4 mechanische parameters, namelijk;

- Vorm
- Sterkte van het materiaal
- Massadichtheid
- Hoeksnelheid

De elektrische machine en de vermogenselektronica maken er dus geen deel van uit en dus beïnvloeden deze de energie opgeslagen in het vliegwiel niet. Echter, de rotor van de elektrische machine draagt wel bij aan de totale hoeveelheid van opgeslagen energie, maar algemeen draagt deze veel minder bij dan het vliegwiel zelf. De energie opslag capaciteit is beperkt door de mechanische eigenschappen (hoofdzakelijk rotationele snelheidslimiet van het vliegwiel).

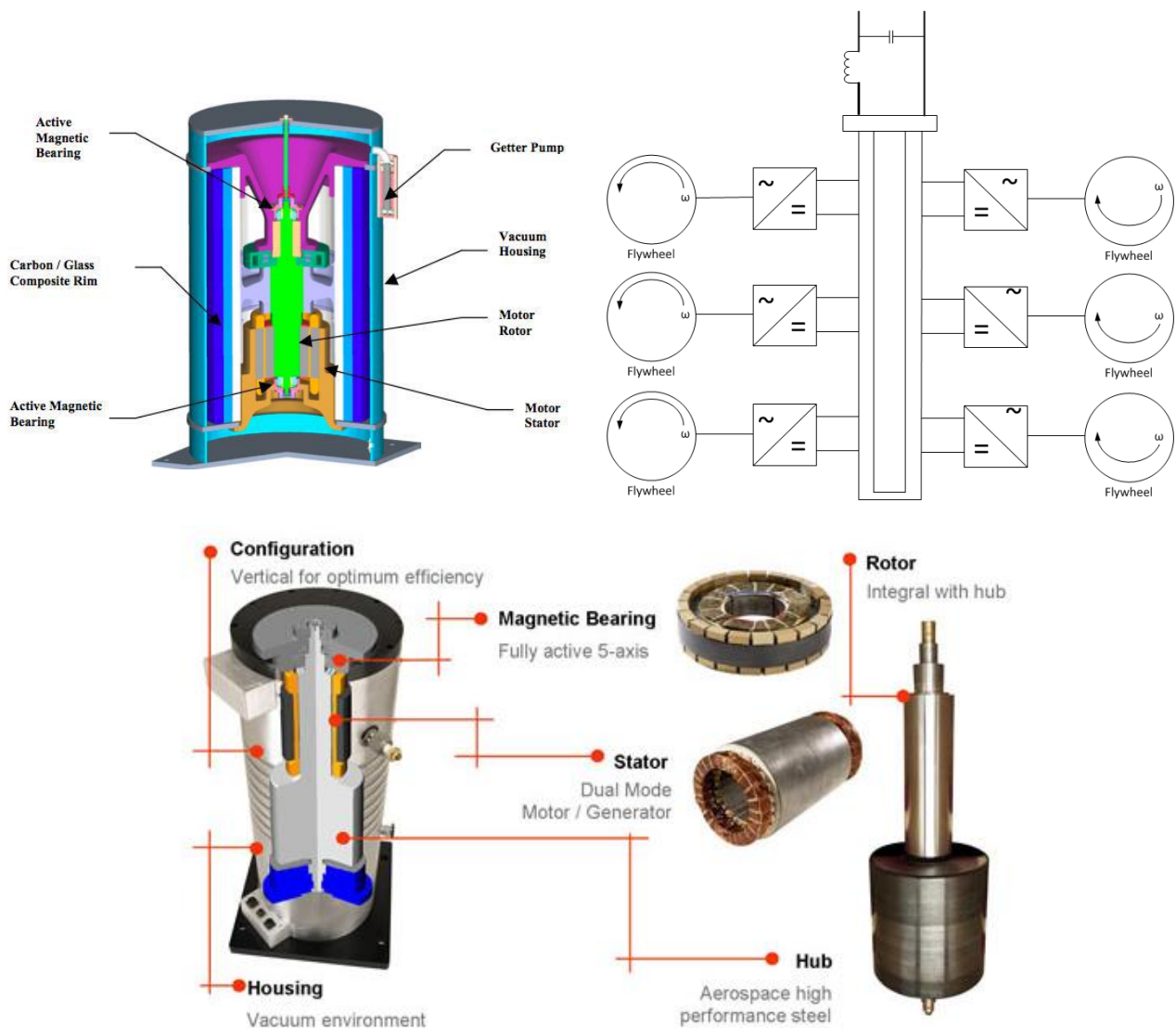
De vermogenscapaciteit van het vliegwiel is hoofdzakelijk afhankelijk van de eigenschappen van de elektrische machine en de vermogenselektronische interface.

Echter kunnen wel verschillende vliegwielen in serie of parallel met elkaar gekoppeld worden om een stijgende opslag en/of vermogenscapaciteit te bereiken (net zoals batterijen).

2.4.1.6. Milieu-impact

De materialen gebruikt in een vliegwiel zijn niet gevaarlijk. Materialen zoals composietvezels (carbon-, glas- en epoxy vezels), staal, koper, aluminium en zeldzame aardmagneten. Onder normale omstandigheden opereren ze zelf bijna tegen de zero uitstoot.

2.4.1.7. Voorbeeld van een vliegwiel



Figuur 42: Voorbeeld vliegwiel

Hierboven zie je een voorbeeld van een vliegwiel, opgesloten in een vacuüm ruimte. Hier worden de vliegwielunits gekoppeld aan een bidirectionele vermogensomvormer die fungeert als een omvormer en een variabele snelheidsdrive. De inverter levert DC. Wanneer meerdere units aan elkaar worden gekoppeld spreken we van een 'common DC-bus' of gemeenschappelijke DC-bus.

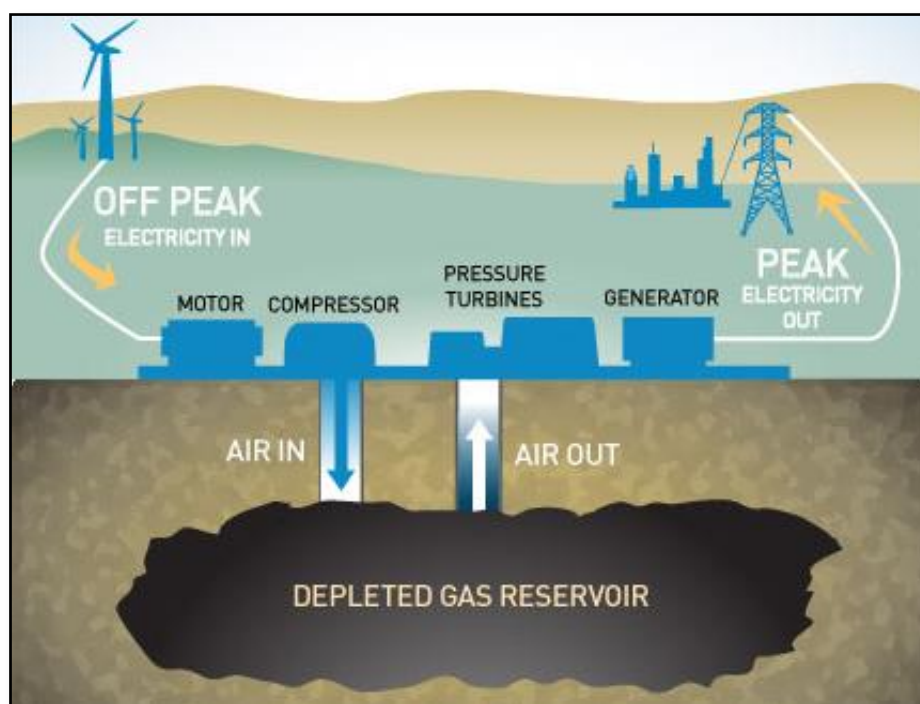
Rekenvoorbeeld:

- We hebben een vliegwiel van 300 kg met een doorsnede van 2 meter met een rotatiesnelheid van 3000 toeren per minuut.
- Hoeksnelheid ($\omega = ((3000 \text{ omw/min} \times 2 \text{ pi}) / 60 \text{ sec}) = 314 \text{ rad/s}$)
- Traagheidsmoment ($I = \frac{1}{2} \times \text{massa} \times \text{straal}^2 = \frac{1}{2} \times 300 \times 1 = 150 \text{ kgm}^2$)
- Ekinetisch = $\frac{1}{2} \times I \times \omega^2 = \frac{1}{2} \times 150 \times 314^2 = 7.394700 \text{ joules} = 2.05408 \text{ kWh}$
 - Maar dit is meestal voor zeer korte energieopslag, dus 370 kW gedurende 20sec.
 - Als we de energie niet direct gebruik, moeten we het vliegwiel in beweging houden en dat zal natuurlijk ook energie kosten.

2.4.2. CAES

CAES, ook wel bekend onder de noemer “*Compressed Air Energy Storage*”, is een vorm van mechanische opslag. Lucht wordt gecomprimeerd en opgeslagen in een ondergrondse grot. Deze gecomprimeerde lucht wordt later door toevoegen van warmte geëxpandeerd door vb. een conventionele gasturbine. Het voordeel van CAES is dat er een hoge opslagcapaciteit beschikbaar is (115 tot 360 MWh), hoge vermogensproductie (50 MW) en een snelle responstijd kan tewerkstellen (5 tot 15 minuten).

Tijdens de compressie van lucht komt veel warmte vrij, wat dus gepaard gaat met veel verlies. Er is wel geen compressiestap meer nodig voor de gasturbine, mits de lucht al onder druk staat in de grot. Hierdoor kan de gasturbine 1/3 meer vermogen leveren en dit maakt dit systeem uitermate geschikt voor piekvragen, net zoals vb. de watervallen van Coo.



Figuur 43: Compressed Air Energy Storage

3. Integratie in KMO

3.1. Perceptie vanuit individuele KMO

3.1.1. Inleiding

In deze sectie presenteren wij een aantal projecten betreffende energieopslagsystemen die gebruikt worden voor verschillende toepassingen, met name peak shaving, back-up en ondersteunende diensten. Sommige van deze projecten zijn volledig privé gefinancierd door de ondernemingen waarvoor het opslagsysteem wordt gebruikt en ze zijn er al in geslaagd om commercieel succes te boeken. Andere projecten zijn gedeeltelijk of volledig door de overheid gesubsidieerd en ze moeten enkele testen ondergaan voordat ze gecommmercialiseerd kunnen worden. Wij hebben onze aandacht besteed aan klein - middelgrote projecten (< 10MW). Grootschalige projecten vallen buiten het bereik van dit onderzoek en bijgevolg heeft het geen zin om te verwijzen naar opslagsystemen zoals CAES en PHS. Andere technologieën zoals SMES en opslag in gesmolten zouten zijn momenteel niet voldoende ontwikkeld en ze zullen ook niet besproken worden. De meest interessante binnen het kader van dit onderzoek projecten betreffen batterijen, vliegwielen, waterstofopslag, faseovergangsmaterialen en supercondensatoren.

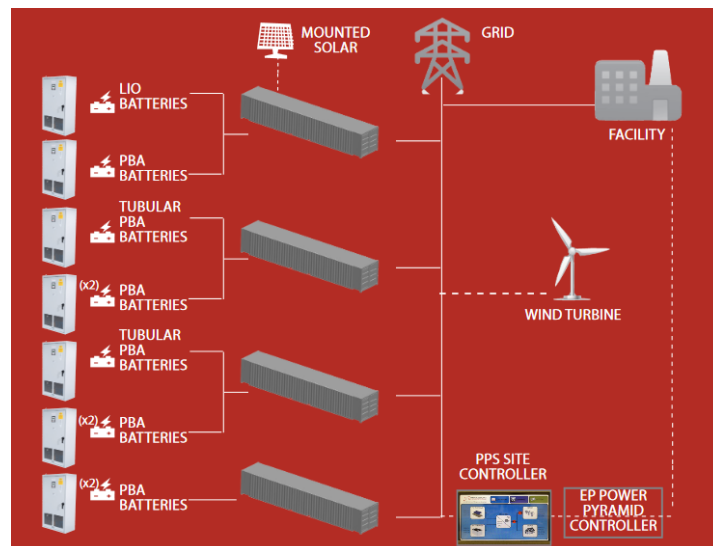
3.1.1.1. Batterijen

Case A:

Gills Onions, een uienverwerkingsbedrijf gevestigd in Oxnard, California, heeft een 600 kW/3.6MWh VRB (vanadium redox batterij) geïnstalleerd in 2012. Het batterijsysteem bestaat uit drie 200kW modules met genoeg elektrolyt te voorzien van energie voor 6 uren. Deze technologie kan meer dan 10,000 volle laadcycli verdragen. Intussen wordt de elektrolyt nooit gedegradeerd en het kan volledig gerecycleerd worden [1]. Het batterijsysteem wordt ontladen tijdens de dag wanneer de elektriciteitskost duurder is en tegelijkertijd reduceert het bedrijf op die manier haar hoge piekmeting. Er wordt geschat dat het bedrijf duizenden dollars kan besparen aan de hand van deze investering [2].

Case B:

Een ander vermeldenswaardig project is het EaglePicher Power Pyramid™ hybride systeem. Drie verschillende batterijtechnologieën (Li-ion, tubulair lood-zuur, en AGM lood-zuur) zijn gecombineerd om een 1 [MW] / 2 [MWh] batterijsysteem te vormen. Daarnaast, wordt hernieuwbare energie opgewekt door middel van een 10 [kW] wind turbine en 20 [kW] fotovoltaïsche panels. In principe, wordt het systeem gebruikt voor 'peak shaving'. Bijkomende toepassingen zoals frequentieregulatie voor ondersteunende diensten zijn ook mogelijk. Naargelang de tarificatie-structuur kan de ROI (Return of Investment) binnen 4 à 7 jaar gerealiseerd worden [3] [4]. De volgende foto toont de topologie van de hele installatie:



Figuur 44: Het EaglePicher hybride opslagsysteem [4]

Case C:

Eigenaars van commerciële gebouwen in Zuid-Californië hebben voor SmartStorage gekozen, een energieoplossing ontwikkeld door een Japans bedrijf. Dit is een 30 [kW] batterijsysteem dat geïntegreerd is met een bestaande 90 [kW] PV systeem. Het lithium-ion batterijsysteem combineert intelligent energie management software met state-of-the-art hardware. Het maakt gebruik van voorspellende algoritmen die de vraag naar elektrische energie kunnen anticiperen en beheren. De opgeslagen energie wordt vrijgegeven tijdens piekperiodes en op die manier kan het piekverbruik aanzienlijk gereduceerd worden [5].

Case D:

Er is een 4 MW/2.6MWh lithium batterijsysteem geïnstalleerd in Ontario, Canada. Het project benut lithium-ijzerfosfaat (LiFePO₄ of LFP), een inherent veilige variant van de lithium batterij chemie. RES Group is eigenaar en constructeur van het systeem. Het batterijsysteem wordt gebruikt om ondersteunende diensten (frequentieregulatie) te bieden aan de lokale distributienetbeheerder in Ontario [6].

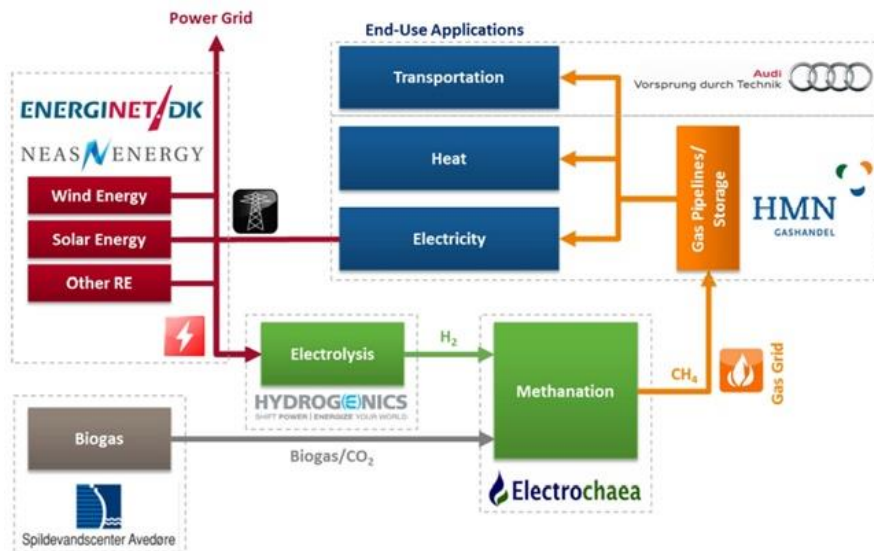
Case E:

In een ander project in Dietikon, Switzerland wordt een 1MW/580kWh Li-ion batterijsysteem getest. Het vermogen van het batterijsysteem kan sneller dan 1 [sec] veranderen van - 1MW naar + 1MW en omgekeerd. De efficiëntie is 85 % wanneer de batterijen worden ontladen en opgeladen op half vermogen (500kW) en tot 50% ontladingsdiepte (DOD, *Depth of Discharge*). Uit het onderzoek blijkt dat het batterijsysteem doeltreffend gebruikt kan worden voor verschillende toepassingen zoals peak shaving, frequentieregulatie en eilandmode [7].

3.1.1.2. Waterstof - H₂

Case A:

Een €3.7 miljoen project loopt in Denemarken. Het energieoverschot van windmolens wordt omgezet in waterstof die later gebruikt wordt teneinde biogas om te zetten in methaangas. Als gevolg hiervan, worden ondersteunende diensten aan de distributienetbeheerder geleverd en tegelijkertijd wordt methaangas gegenereerd [8]. Op de volgende foto, wordt dit project afgebeeld:



Figuur 45: Het P2G Biocat project

Case B:

Een ander voorbeeld bevindt zich in een industriële zone in Yorkshire, Verenigd Koninkrijk. De installatie bestaat uit een 225kW wind turbine direct gekoppeld met een elektrolyzer, 200 kg waterstofopslag, een waterstof tankstation en een 30 kW brandstofcel systeem dat back up elektriciteit genereert voor nabijgelegen gebouwen [9].

Case C:

Intussen zien wij ook dergelijke projecten in België. Een verplaatsbaar waterstof tankstation is gebouwd. Waterstof wordt geproduceerd door elektrolyse en de benodigde elektrische energie komt van windgeneratoren [10].

Case D:

Wij moeten ook benadrukken dat er een project uitgevoerd is in Vlaanderen waaraan 8 partners hebben deelgenomen (Colruyt, Eandis, Elia, Fluxys Belgium, Hydrogenics, Sustesco, Umicore and WaterstofNet). De rentabiliteit van verschillende P2G business scenario's is geanalyseerd [11]. Volgens het onderzoek zijn de meeste P2G toepassingen op dit moment niet rendabel. Toch, zijn de KMO's die waterstof gebruiken voor industriële processen en de mobiliteit sector de meest geschikte kandidaten die kunnen profiteren van deze technologie.

3.1.1.3. Fase overgangsmaterialen - Ijsopslag

Case A:

Underwriters Laboratories (UL) is een onafhankelijke certificeringsinstelling, met hoofdzetel in Northbrook, Verenigde Staten. Een ijsopslagsysteem met 8,000 ton/uur (of 28MWh) koelcapaciteit werd geïnstalleerd. De totale operationele kost werd gereduceerd van \$0,14 naar \$0,066 per Ton. Er wordt geschat dat UL 10 à 11 miljoen dollar zal besparen over de komende 25 jaar [12].

Case B:

Een ander vermeldenswaardig project is uitgevoerd in de Dundalk Institute of Technology (DkIT) campus, in Dublin, Ireland. DkIT had al een wind turbine geïnstalleerd. Met de integratie van een ijsopslagsysteem kan DkIT het overschot van wind energie, tijdens periodes van lage vraag, opslaan in

de vorm van ijs. Als gevolg hiervan, is de efficiëntie van de wind turbine toegenomen en de piekbelasting van de faciliteit is afgenomen. Intussen, heeft DkIT ongeveer \$8.000 bespaard voor de periode Augustus 2011 - Mei 2012 [12].

Case C:

Een 125 [kW] ijsopslagsysteem is geïnstalleerd in Alachua County Library Headquarters , Florida, Verenigde Staten. 40% van de totale elektriciteitsconsumptie is afkomstig van koeling. De faciliteit is erin geslaagd om veel geld te besparen niet alleen dankzij de veel lagere nachttarieven maar ook door de piekbelasting aanzienlijk te verminderen. De laatste heeft als gevolg dat de zogenaamde “piekvraag kost” (demand charge) aanzienlijk gereduceerd is [12].

3.1.1.4. Vliegwielen

Case A:

Er is een 2MW vliegwiel geïnstalleerd in Ontario, Canada in 2014. Het wordt gebruikt om ondersteunende diensten te bieden aan de lokale netbeheerder (IESO). De eigenaar en ontwikkelaar NRStor heeft samengewerkt met Temporal Power, een Canadese fabrikant van vliegwielen, om dit project te realiseren. De energiec capaciteit is 500 [kWh] en bijgevolg kan het vliegwiel op nominaal vermogen energie leveren gedurende 15min. Dit vermogen kan in minder dan 10ms bereikt worden. De AC - AC efficiëntie is 85% en er zijn geen limieten met betrekking tot de ontladingsdiepte (DOD, *Depth of Discharge*) [13].

Case B:

Benito Juárez (AICM) is de tweede grootste luchthaven in de Mexico-stad. Kritische belastingen zoals landingsbaanverlichting en navigatiesystemen maken deel uit van de elektrische installatie van de luchthaven. Om de lokale betrouwbaarheid van het hele system nog meer te vergroten in het geval van een stroomuitval zijn vliegwielen geïnstalleerd. Deze fungeren als noodstroomvoeding en ze nemen de belasting over totdat de generatoren worden ingeschakeld. Er wordt ook gezegd dat een hoge ROI (*Return on investment*) bereikt kan worden sinds de onderhoudskost van deze vliegwielen lager is ten opzichte van andere systemen van dezelfde technologie.

3.1.1.5. Hybride opslagsystemen

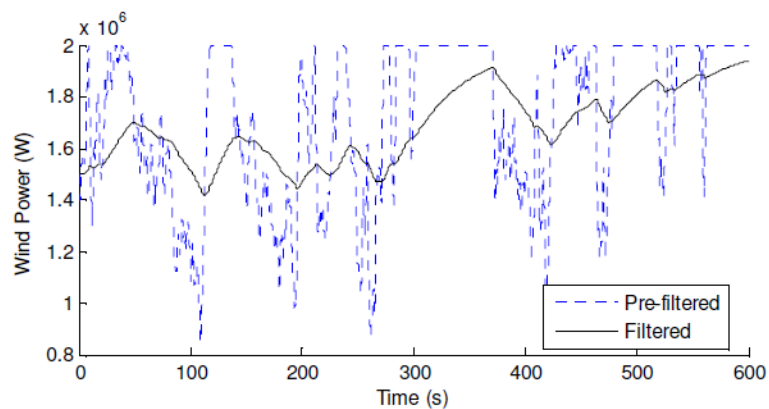
In andere projecten zijn hybride vliegwiel/supercondensator - batterij systemen geïmplementeerd. Door een batterijsysteem te combineren met een vliegwiel/supercondensator kan een energieopslagsysteem gerealiseerd worden met complementaire eigenschappen. Dit hybride systeem kan zowel hoog nominaal vermogen als hoge energiec capaciteit aantonen.

Case A:

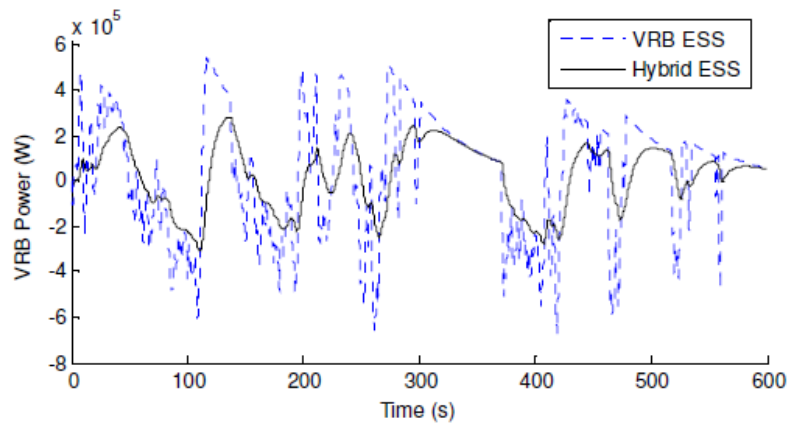
Het Rhode hybride demo project in Ierland is een voorbeeld van zo'n hybride energieopslagsysteem. Twee Beacon Power 160kW vliegwielen zijn geïntegreerd in een Hitachi 240kW lood-zuur batterijsysteem. De bedoeling is om ondersteunende diensten te bieden aan de lokale netbeheerder [14]. De vliegwielen nemen de dynamische, kortstondige hoogfrequente ladingen en ontladingen in terwijl de batterijen worden benut voor de langdurige laagfrequente ladingen en ontladingen. Het voordeel hiervan is dat er een kleinere batterij gekozen kan worden en de levensduur wordt verlengd sinds de batterij onderhevig wordt aan een stabielere belasting.

Case B:

Er zijn veel papers geschreven waardoor de bovenstaande conclusies bevestigd kunnen worden. De resultaten die hieronder weergegeven worden komen uit een paper [15]. Twee verschillende scenario's van energieopslag worden bekeken teneinde de geproduceerde energie van een windmolen te stabiliseren. In het eerste scenario wordt een stand-alone VRB (Vanadium Redox Batterij) opslagsysteem gebruikt. In het tweede scenario wordt een hybride VRB met supercondensator opslagsysteem geïmplementeerd. Het blijkt uit de simulatie dat in het geval van het hybride VRB - supercondensator systeem de laadtoestand (*SOC, State of Charge*) van de batterij niet wordt blootgesteld aan zeer snelle, dynamische veranderingen. Daardoor en zoals eerder vermeld kan een kleinere batterij gekozen worden en zijn levensduur wordt groter.



Figuur 46: Geproduceerd vermogen van een windturbine zonder (blauwe lijn) en met (zwarte lijn) elektrische energieopslag [15]



Figuur 47: Vermogens van een VRB (vanadium redox batterij): alleen VRB (blauwe lijn) , hybride systeem van VRB met supercondensator (zwarte lijn) [15]

Case C:

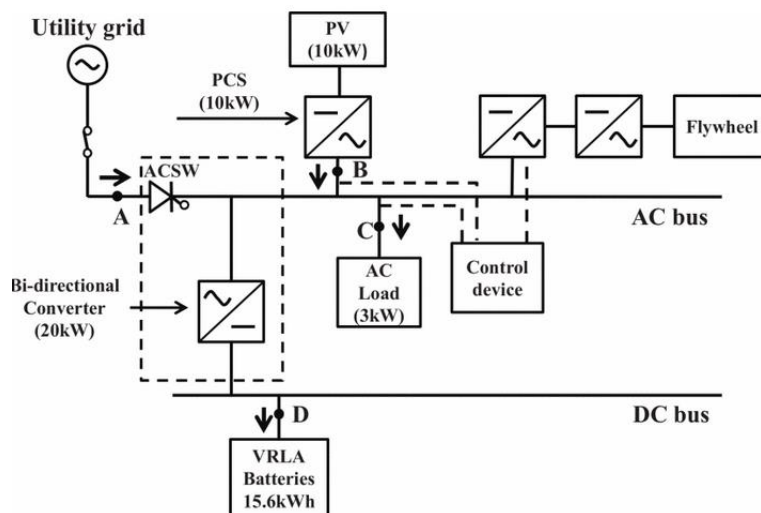


Figuur 48: Schwungrad Energie

Dit innovatief project is momenteel in de laatste fase voor subsidie onder het Horizon2020 programma. Het moet een eerste stap vormen om een verdere integratie als netondersteuning mogelijk te maken in heel Europa.

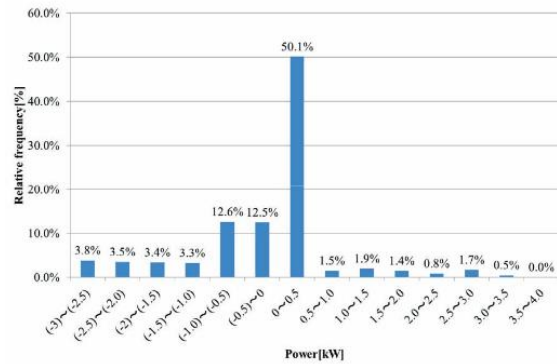
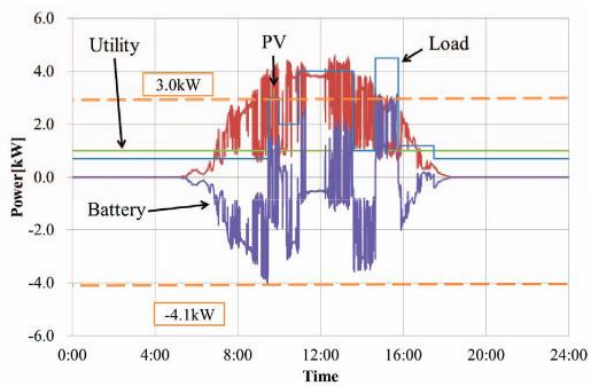
Dit omvat een vliegwielopslag van 4x 150kW die aangesloten wordt op het 110kV elektriciteitsnet om de een snelwerkend stabilisatiesysteem te voorzien. Daarnaast wordt hier ook batterijopslag geïntegreerd. Zo kan het vliegwiel energie opslaan in de batterijbank bij serieuze overschotten en kunnen beide technologieën ondersteunen bij netvariaties. Waarbij het vliegwiel zal instaan voor snelle variaties en de batterijopslag in die mate voor de zware pieken kan ontlast worden en een verlengde levensduur kan aanleveren [16].

Literatuurstudie (simulaties) wijzen uit dat er ook onderzoek werd uitgevoerd in het combineren van beide technologieën om in die mate de batterijbank te ontlasten. Onderstaand wordt de case verder besproken.



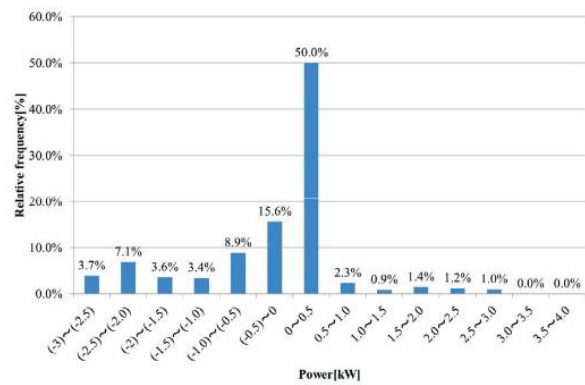
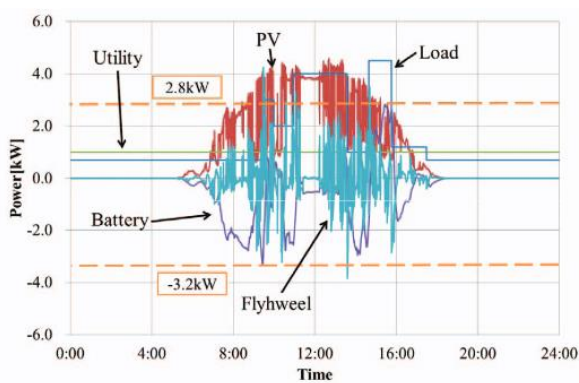
Figuur 49: Opstelling hybride systeem

Er kan een sterke variatie van het zonne-opbrengstprofiel opgemerkt worden, die ervoor zorgt dat er een hoge benutting is van de batterijbank. In onderstaande figuur wordt de relatieve frequentie weergegeven van de batterij benutting. Zonder vliegwielopslag varieert deze tussen 3kW en 3,5kW in bovengrens (ontladen van vliegwiel) en tussen -3,0kW en -2,5kW in de ondergrens (opladen van vliegwiel).



Figuur 50: Benutting PV-batterijsysteem

In een 2^{de} simulatie met een vliegwiel geïntegreerd in het systeem, kan gezien worden dat de pieken die de batterijbank vroeger voor enkele keren in het jaar moest aanleveren, dit hier niet meer het geval is, de pieken onttrokken vanuit de batterijbank zijn gedaald, de batterijbank wordt meer gebruikt voor base load, wat ook optimaler is voor het batterijsysteem.



Figuur 51: Benutting PV-batterij-vliegwielstelsysteem

3.1.2. Perceptie vanuit clustering KMO's

Een 2^{de} perceptie die van belang kan zijn, is het clusteren van verschillende KMO's. We willen hier niet specifiek het Virtual Power Plant (VPP) principe toepassen, waarbij verschillende spelers over heel België in staat zijn elkaar te ondersteunen of in tijden van nood capaciteit voor bepaalde feeders ter beschikking te stellen via intelligente sturingen en ICT. Maar meer vanuit het standpunt om, als bedrijven toch in een industriepark naast elkaar gelegen zijn, een optimalisatie te voorzien voor die cluster van bedrijven met mogelijks zelf een totaal ander productieproces. Deze cluster biedt het voordeel omtrent schaalgrootte ten opzichte vanuit individueel standpunt. Waar men vroeger voornamelijk bedrijven ging clusteren uit het standpunt, het uitvoeren van éénzelfde activiteit (vb. voedingssector), gaan we in dit onderdeel een optimalisatie doorvoeren omtrent opbrengst- en verbruiksprofielen om zo de zelfconsumptie en zelfvoorziening te verhogen van elk van die bedrijven en ook het distributienet zo verder te ontlasten.

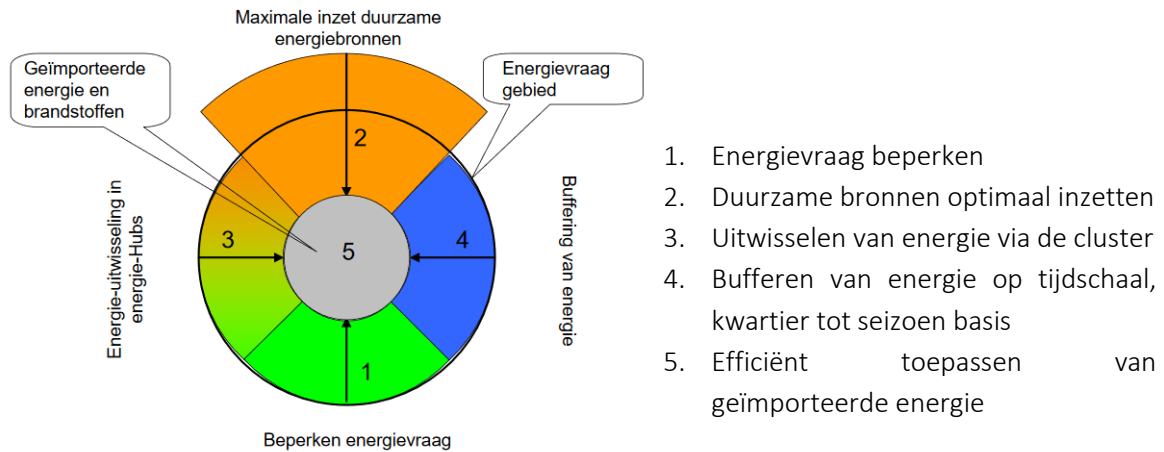
Industrieën zijn veelal gekend van grote installaties qua verbruik en opbrengst. Als er een matching wordt gedaan via de profielen op jaarbasis, wordt geconcludeerd dat door de relatief lage gelijktijdigheidsfactor (0,5 à 0,6 voor middenspanningsklanten – 0,3 voor laagspanningsklanten) nog heel wat interactie met het distributienet mogelijk wordt. Op sommige momenten zijn er grote overschotten aan opbrengst, maar eveneens ook grote tekorten. Dit wordt gecompenseerd op andere momenten waarop men dus op jaarbasis evenveel productie als verbruik heeft.

Echter moet men zorgvuldig tewerk gaan bij die bedrijven om een correcte dimensionering te bewerkstelligen. Bedrijven maken geen gebruik van een terugdraaiende teller en worden zelf belast op kwartierpiek waardoor het opportuun is om zowel de profielen van opbrengst en verbruik zo goed mogelijk met elkaar te matchen.

Als bepaalde bedrijven, gelegen in dezelfde industriezone, nu samen zouden investeren in hernieuwbare energie, kan dit bijdragen tot een betere uitvlakking van de verbruiksprofielen, waardoor men ook in staat is een nauwkeurigere inschatting te maken omtrent de benodigde productie. Zo kan de pieklast en piekproductie sterk verlaagd worden. Als bepaalde bedrijven een zeer seizoensgebonden profiel hebben, kan dit in contrast staan met de opbrengstprofielen en maakt het voor dit bedrijf ook heel lastig om te investeren in hernieuwbare energie. Als dit bedrijf echter de mogelijkheid zou krijgen om samen met een naastliggend bedrijf met een ander productieproces, kan hun gecombineerd profiel die investering die voor elk afzonderlijk weinig interessant was, nu toch al opportuun naar boven komen.

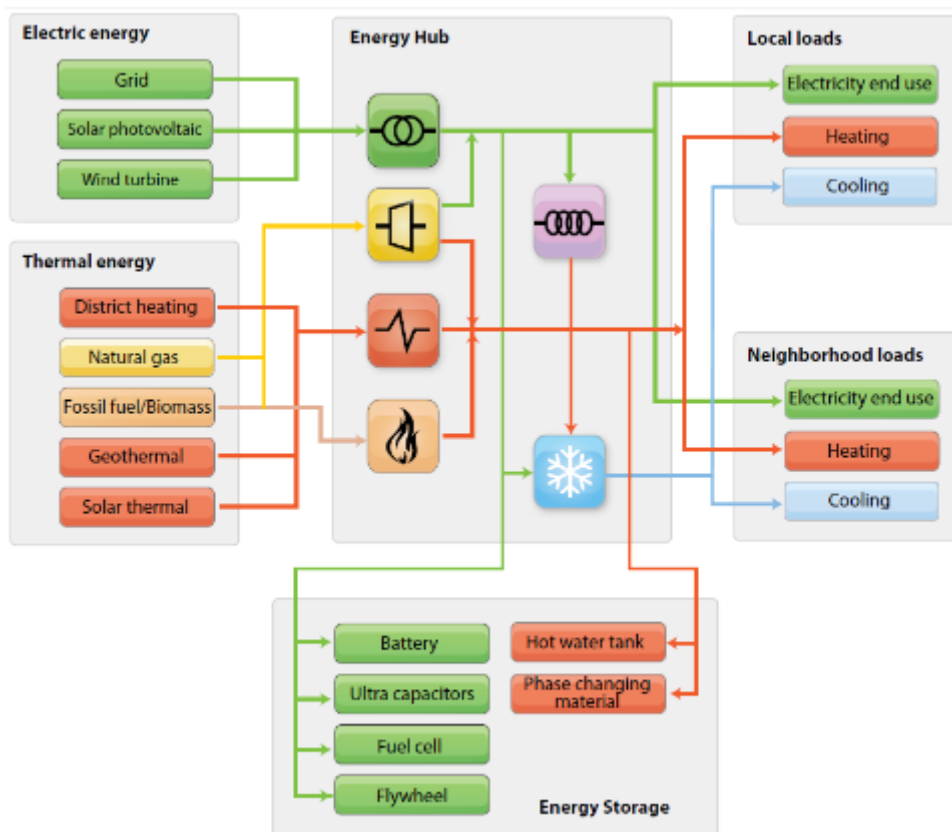
Daarnaast wordt in dit aspect omtrent centrale buffer interessant zodanig we niet locatie-afhankelijk een opslagsysteem implementeren, maar dit op de techno-economische optimale locatie kunnen implementeren om zo decongestie van het distributienet verder mogelijk te maken.

Uit [38] is een trias energetica opgesteld die dit eerder besproken concept verder beschrijft.



Figuur 52: Trias Energetica voor energie neutrale gebiedsontwikkeling

Clusters kunnen ook grensoverschrijdend zijn, met name, het is perfect mogelijk om een WKK te implementeren voor verschillende bedrijven zodanig dat warmte en elektriciteit optimaal kunnen benut worden. Of dat de warmte van de WKK voor bedrijf x is en de elektriciteit nuttig kan gebruikt worden voor bedrijf y. Waar dit potentieel niet mogelijk was als bedrijf individueel.



Figuur 53: Clustering van bedrijven uit verschillende perspectieven [37]

Een belangrijke voorwaarde voor het clusteren van bedrijven is echter dat er heel wat maatregelen moeten voorzien worden. Zoals eerder besproken is er zowel een kost voor het piekverbruik (kwartierpiek) uitgedrukt in €/kW en een verbruikskost, uitgedrukt in €/kWh en €/kVAr, dat een bedrijf moet betalen. Bij een investering in een decentrale energieproductie-eenheid op clusteringsniveau

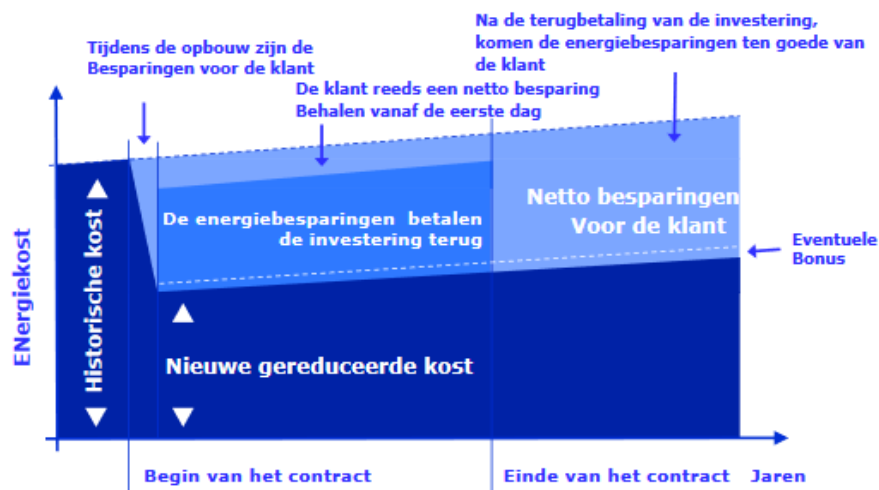
zullen bedrijven, aangesloten in die cluster, nuttig gebruik kunnen maken van deze technologie om zowel hun verbruikskosten en piekkosten te reduceren. Maar daarnaast zullen bedrijven, die zich niet wilden engageren bij de cluster, hier ook nuttig gebruik kunnen van maken, zonder bij te dragen aan de investering. Daarbij is het dan ook van cruciaal belang dat er correcte overeenkomsten (omtrent onderhoud, financiering, rendementsverdeling,...) worden opgesteld tussen de bedrijven onderling zodanig dit een win-win situatie voor elk van hen kan betekenen.

Dit alles zou moeten leiden tot een duurzaam bedrijventerrein, waarbinnen via samenwerking tussen de bedrijven onderling, veranderingen in bedrijfsprocessen en in de inrichting van het terrein gerealiseerd worden.

Alvorens te onderzoeken welke mogelijkheden er zijn om energie uit te wisselen tussen bedrijven onderling, moet er natuurlijk eerst een haalbaarheidsstudie uitgevoerd worden waarbij de mogelijkheid tot clustering van een bepaalde site kan gevaloriseerd worden. Hierbij is het van belang om zowel de proces als de niet-procesgebonden profielen van de bedrijven te analyseren. De niet-procesgebonden kosten zijn namelijk een constante in het verbruiksprofiel, onafhankelijk van het productieproces van het bedrijf (niet seizoensafhankelijk,...).

Ook moet afgetoetst worden of er restenergie vanuit de bedrijven onderling kunnen uitgewisseld worden (vb. bedrijf met productieprocessen waarbij veel warmte vrijkomt, kan nuttig gebruikt worden voor naburige bedrijven).

Om dit alles te realiseren kan ook beroep gedaan worden op een ESCO, via ESC (Energy Supply Contracting) of EPC (Energy Performance Contracting). ESC omvat het efficiënt opwekken en leveren van energie aan de eindgebruiker door een ESCO (Energy Service Company) die de nodige installatie zal financieren en beheren.



Figuur 54: Werking van een ESCO

Er zijn al pilotprojecten in Vlaanderen die tonen dat dit principe ook daadwerkelijk kan verwezenlijkt worden. ESCO 4 Gent is een demonstratieproject vanuit het ESKIMO project heeft ingezet op clustervorming bij een aantal KMO's (bedrijventerrein Drongen en Industrieweg) om een ESCO op een voldoende grote schaal mogelijk te maken. Deze pilotprojecten moeten vooral dienen tot een verduidelijking op vlak van juridische hinderpalen, economische haalbaarheid, financiële risico's en technisch potentieel.

Dit pad kan zeker ook verder onderzocht worden in het project indien er interesse is van de groep en er zich dergelijke cases voordoen.

3.2. Besluit

Technologie	Energiedichtheid [Wh/L]	Vermogensdichtheid [W/L]	Technologie	Energiedichtheid [Wh/L]	Vermogensdichtheid [W/L]
CAES (ondergronds)	2 – 6	0,5 – 2	CAES (ondergronds)	2 – 6	0,5 – 2
CAES (bovengronds)	Hoger dan ondergronds	Hoger dan ondergronds	CAES (bovengronds)	Hoger dan ondergronds	Hoger dan ondergronds
Vliegwiel	20 – 80	1.000 – 5.000	Vliegwiel	20 – 80	1.000 – 5.000
Batterijen – Loodzuur	50 – 90	10 – 400	Batterijen – Loodzuur	50 – 90	10 – 400
Batterijen – Li-ion	200 – 500	1.500 – 10.000	Batterijen – Li-ion	200 – 500	1.500 – 10.000
Supercap	10 – 30	100.000 +	Supercap	10 – 30	100.000 +
SMES	0,2 – 6	1.000 – 4.000	SMES	0,2 – 6	1.000 – 4.000
LAES	4 – 6 x groter dan CAES	-	LAES	4 – 6 x groter dan CAES	-
Brandstofcel	500 – 3000	500 +	Brandstofcel	500 – 3000	500 +

Technologie	Dagelijkse zelfontlading [%]	Maturiteit	Technologie	Levensduur [Cycli]	Cyclus efficiëntie [%]
CAES (ondergronds)	Klein tot nihil	CAES commercieel AA-CAES ontwikkeling	CAES (ondergronds)	8.000 – 12.000	42-57 AA CAES 70
CAES (bovengronds)	Zeer klein	Bezig met commercialiseren	CAES (bovengronds)	23+ jaren	-
Vliegwiel	'20 % per uur'	Demo/Bezig met commercialiseren	Vliegwiel	20.000+	90 – 95
Batterijen – Loodzuur	0,1 – 0,3	Matuur	Batterijen – Loodzuur	200 – 1800	63 - 90
Batterijen – Li-ion	0,1- 5	Commercieel	Batterijen – Li-ion	1.000 – 10.000	90 - 97
Supercap	5 – 40	Ontwikkeling/ commercieel	Supercap	100.000+	90 – 97
SMES	10 – 15	Demo/ bezig met commercializeren	SMES	100.000+	95 – 98
LAES	Small	Ontwikkeling/demo	LAES	25+ jaren	55 – 80+
Brandstofcel	Almost zero	Ontwikkeling/demo	Brandstofcel	20 +	20 - 66

Figuur 55: Overzicht van energieopslagsystemen - Technische Karakteristieken

Bovenstaande tabellen geven een mooi overzicht over de verschillende opslagsystemen, afgetoetst volgens verschillende parameters die van belang zijn om een keuze te maken qua integratie van opslageenheid. Hieronder wordt bovenstaande studie nog even kort samengevat.

Batterijen zijn op dit moment de meest bekende opslagtechnologie voor klein-middelgrote consumenten. Ze hebben al een belangrijke rol gespeeld in de UPS sector en hun impact zal blijven groeien in de komende jaren. Dankzij hun lage zelfontlading kunnen ze elektrische energie opslaan op de lange termijn (uren - dagen). Dit in combinatie met hun vrij hoge AC - AC efficiëntie is een voordeel voor batterijen ten opzichte van andere technologieën. Ze kunnen opgeladen worden tijdens periodes waarbij de elektriciteitskost lager is. De opgeslagen energie wordt later terug geleverd en geconsumeerd tijdens periodes waarbij de elektriciteitskost hoog is of naargelang het verbruiksprofiel van de installatie teneinde hoge piekmetingen te vermijden. Daardoor, kunnen zowel de netbeheerder als de eigenaar van het opslagsysteem tegelijkertijd profiteren van deze situatie sinds een bijdrage tot ontlasting van het netwerk wordt geleverd en de elektriciteitsfactuur van de consument wordt gereduceerd. Daarnaast, bestaat ook de mogelijkheid om batterijen te integreren in decentrale productie-eenheden wiens efficiëntie (= zelfconsumptie) op die manier toeneemt. Batterijen kenmerken zich door snelle responsetijden. Ze kunnen hun nominaal vermogen bereiken in minder dan 1 [sec] en bijgevolg voldoen ze aan alle technische vereisten om deel te nemen aan ondersteunende diensten. Het voornaamste nadeel van batterijen is het feit dat hun efficiëntie

afhankelijk is van de ontladingsdiepte (*DOD, Depth of Discharge*), wat erop wijst dat de laadtoestand (*SOS, State of Charge*) binnen bepaalde limieten moet blijven teneinde de levensduur zo veel mogelijk te verlengen. Daarnaast moet er ook aandacht geschonken worden omtrent de second life batteries, er zullen in de toekomst heel wat mogelijkheden ontstaan in die markt waardoor de mogelijkheid ontstaat om een goedkopere opslag te voorzien.

Supercondensatoren, SMES en vliegwielen behoren tot de categorie van de ‘dynamische’ opslagsystemen. Ze kenmerken zich door hoge vermogensdichtheid en daardoor kunnen ze heel hoge vermogens opleveren ongeacht hun energiecapaciteit. Dit komt in tegenstelling met batterijen waarbij de energiecapaciteit gekoppeld is met het nominale vermogen. Alle drie systemen (supercondensatoren, SMES, vliegwielen) hebben zeer snelle responsetijden. Ze kunnen binnen enkele [msec] hun nominaal vermogen bereiken en ze zijn sneller dan batterijen. Bovendien, zijn er geen beperkingen omtrent de ontladingsdiepte en ze kunnen herhaaldelijk (>100,000 aantal laadcycli) ontladen en opgeladen worden zonder hun efficiëntie te verliezen. Deze eigenschap stelt ze uiterst geschikt voor toepassingen die repetitieve, kortstondige, hoogfrequente ladingen en ontladingen vereisen. Daardoor, kunnen ze gebruikt worden voor ondersteunende diensten. Niettemin, is hun energie capaciteit niet zo hoog zoals bij batterijen en ze kunnen niet gebruikt worden voor energieopslag op de lange termijn (uren - dagen) vanwege hun hoge zelfontlading. De laatste jaren worden toch enkele pogingen gedaan om vliegwielen met magnetische lagers te ontwikkelen. Dit kan leiden tot veel lagere zelfontlading en bijgevolg tot langere energieopslag (min - uren). Alle drie systemen (supercondensatoren, SMES, vliegwielen) kunnen gebruikt worden in hybride opslagsystemen gecombineerd met batterijen en decentrale productie-eenheden.

Waterstofopslag is ook heel belangrijk vooral omdat waterstof toegepast kan worden in verschillende sectoren. Het idee om waterstofopslag te benutten voor ‘peak shaving’ is er nog niet in geslaagd om commercieel succes te boeken vanwege de zeer lage AC - AC efficiëntie. Andere scenario’s lijken aantrekkelijker te zijn. Waterstof kan geproduceerd worden door het overschot van hernieuwbare energiebronnen (zon, windenergie) waardoor hun efficiëntie kan toenemen en tegelijkertijd kunnen ondersteunende diensten geleverd worden aan de netbeheerder. De geproduceerde waterstof kan later gebruikt worden als brandstof voor back-up waterstofbrandstofcellen, voor de mobiliteitssector of voor bedrijven wiens industriële processen gebruik van waterstof maken. Zoals bij batterijen, zijn waterstofelektrolyzers en waterstofbrandstofcellen snel genoeg, ze kunnen zich in minder dan 1s op vol vermogen aanpassen.

Technologienaam	Toepassing													
	Frequentie- controle	Uurlijkse regulering	Dagelijkse regulering	Regulering per seizoen	T&D Net- ontlasting	Black Start	Off-grid / Micro grid	Restwarm tegebruik	Piekvraag- regulering	Vraag- /aanbod- regulering	Prijs- gestuurd reguleren	Reactief vermogen	Ononderbroken stroomtoevoer	Transport
Elektrische energie														
Vliegwiel	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	⚠	○
Pompcentrale	●	●	●	○	○	⚠	○	○	⚠	○	●	●	○	○
CAES	●	●	●	○	○	⚠	○	○	⚠	○	●	⚠	○	○
Loodzuurbatterij	○	●	○	○	⚠	●	○	○	⚠	●	○	○	○	●
Lithium-Batterij	○	●	○	○	⚠	●	○	○	⚠	●	○	○	○	●
Vd Redox	○	●	○	○	⚠	●	○	○	●	●	○	○	○	○
Supercondensatoren	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	⚠
SMES	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Thermische energie														
Warm water	○	○	●	●	⚠	○	●	●	○	●	○	○	○	○
UTS	○	○	○	●	○	⚠	○	○	○	●	○	○	○	○
Gesmolten zouten	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Latente warmte	○	○	●	●	⚠	○	○	●	○	●	○	○	○	○
Gas en vloeibare brandstof														
Waterstofgas	●	●	●	●	●	○	○	○	⚠	○	●	⚠	○	⚠
Zoutcavernes	○	●	●	○	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○
Aquifers & DGF	○	○	●	●	⚠	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LNG	○	●	○	○	⚠	○	○	○	○	○	○	○	○	○

- Indicator voor volledige geschiktheid
- ⚠ Indicator voor potentiële of gedeeltelijke geschiktheid
- Indicator voor ongeschiktheid

Alle andere opslagtechnologieën zijn niet relevant binnen het kader van dit onderzoek ofwel omdat ze grootschalige toepassingen betreffen ofwel omdat ze nog heel immatuur zijn. Daardoor zijn ze ook minder relevant om in deze studie te bevatten.

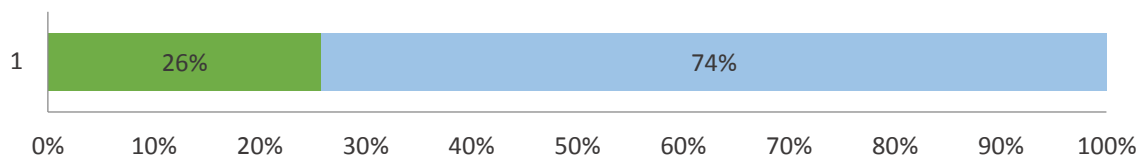
Opslag moet, samen met flexibiliteit leiden tot een optimalisatie van de verbruiks- en opbrengstprofielen. Die optimalisatie zal zowel voordelen bieden voor de KMO zelf als voor ondersteunende dienst of congestiemanagement op het net waarop ze aansloten zijn. Men moet de mogelijkheden die KMO's kunnen bieden zo goed mogelijk uitwerken zodanig deze in de toekomst verder ingezet kunnen worden als sleutel naar verdere flexibiliteitsregeling en dat hun kosten verder kunnen verlaagd worden.

4. Flexibiliteit in verbruiksprofielen

4.1. Inleiding

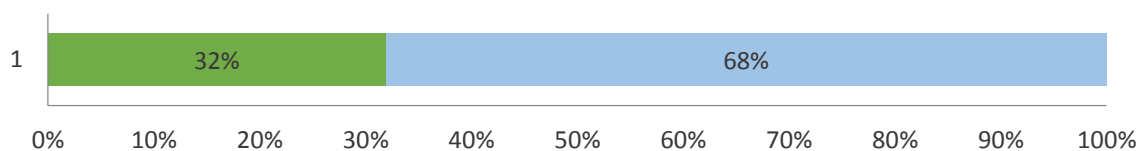
Eerder werd al uitgebreid het concept flexibiliteit behandeld op basis om mee te spelen om de elektriciteitsmarkt en capaciteit ter beschikking te stellen. Echter zullen veel KMO's veel minder mogelijkheden hebben om daarbij capaciteit ter beschikking te stellen, maar kan het zeker wel helpen om hun zelfconsumptie en zelfvoorziening te laten toenemen. Zonder de integratie van opslag kan gepoogd worden om aan de hand van het verschuiven van bepaalde productieprocessen een optimaler verbruiksprofiel te verkrijgen (minder pieken, betere matching met decentrale opwekking,...).

Om een inschatting te krijgen in de flexibiliteit en de aanwezige processen in een bedrijf, worden hieronder nog enkele resultaten aangehaald uit de eerder besproken enquête.



Figuur 56: Is er binnen uw bedrijf een mogelijkheid om elektriciteitsverbruik te verschuiven in de tijd zodat de financiële kosten die gepaard gaan met een black-out beperkt blijven?

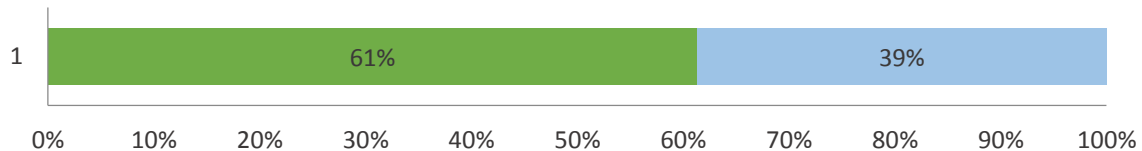
Amper 26% van de ondervraagden zegt dat er een mogelijkheid is om elektriciteitsverbruik te verschuiven in de tijd. Bedrijven hebben quota die moeten behaald worden en productieprocessen liggen vast in de tijd.



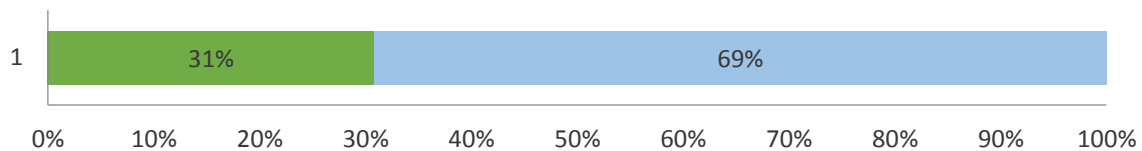
Figuur 57: Staan er koel/vriesinstallaties in uw bedrijf?

Bijna 1/3 van de bedrijven heeft koel- of vriesinstallaties staan in het bedrijf die het mogelijk maken dat er wel eenvoudig wat flexibiliteit kan verkregen worden. Natuurlijk zal de grootte van de koelinstallatie hier een grote rol spelen. Maar bij een koelinstallatie is het perfect mogelijk om enkele graden te variëren in de tijd om zo productiecurves en verbruikscurves beter op elkaar af te stemmen.

Daarnaast bezit meer dan 60% een persluchtinstallatie in hun bedrijf. Ook dit vormt een zekere vorm van flexibiliteit die kan benut worden in het bedrijf. Als laatste werd ook het warm water potentieel bestudeerd, ook hier is veel afhankelijk van de grootte van de buffer om dit toe te passen. Maar bedrijven waarbij de nood aan grote hoeveelheden warm water groot is, beschikken een ideale bron om te flexibiliteit in te lassen door te spelen met de temperatuur (binnen de haalbare grenzen om kalkvorming en legionella te voorkomen).



Figuur 58: Is er een persluchtinstallatie in het bedrijf aanwezig?



Figuur 59: Wordt water elektrisch opgewarmd voor uw productieproces, of wordt er elektrische opwarming gebruikt voor andere toepassingen?

In het volgende hoofdstuk zal er dan ook dieper ingegaan worden omtrent de flexibiliteit afhankelijk van de typische verbruikers in de KMO. Zo kan een beeld geschept worden in welke mate er via niet-gerelateerde kosten, piekverbruiken,... een optimaal profiel kan verkregen worden en een beter beeld kan gevormd worden omtrent de flexibiliteit in het bedrijf.

4.2. Typische verbruikers

Binnen de industriële sector zijn een divers aantal verbruikers te vinden. Een indeling op basis van “typische verbruikers” dringt zich op voor het verdere projectverloop.

4.2.1. Procesenergie versus non-procesenergie

Een eerste onderscheid kan gekozen worden op basis van proces- en gebouw (non proces) gerelateerd verbruik volgens uitbating. Dit is eerder al aan bod gekomen bij clustering van bedrijven. Elke bedrijfsactiviteit vereist specifieke verbruikers zoals productiemachines, warmtebehandelingseenheden, pompen, motoren, ovens, mixers, verlichting, verwarming, koeling, ventilatie, bevochtiging enz.... Als een kwalitatieve indeling kan gemaakt worden omtrent de proces en non-procesenergie, kan er een idee verkregen worden aan de optimalisatiemogelijkheden aan het gebouw enerzijds en het proces anderzijds. Zo is de non-procesenergie ook een base load gedurende het volledige jaar, dit terwijl de procesenergie sterk kan variëren in de tijd. Dit vormt dan ook een interessante parameter om te beschouwen.

In de literatuur werd daaromtrent dan ook een opdeling gemaakt. Een kwalitatieve maatstaf kan de relatieve grootte van dit verbruik, gerelateerd aan het gebouw uitzetten in functie van de bedrijfsoppervlakte. Dit onderscheid kan bijdragen tot een betere inschatting van de non-procesenergie ten opzichte van de totale energiekost.

Tabel 4: Indeling proces- versus bedrijf gerelateerd verbruik[39]

Categorie	Raffinaderijen en grote buitensites	Magazijnen	Industrie type 1	Industrie type 2	Industrie type 3	Industrie type 4
Non-proces verbruik	Verlichting	Verlichting	Verwarming en verlichting	Verwarming	Verwarming	Verwarming
				Verlichting, koeling	Verlichting, koeling, luchtconditionering	Verlichting, koeling, luchtconditionering, cleanrooms

Als conclusie kan gesteld worden dat het niet proces gerelateerde verbruik in industriële gebouwen een algemene relatie heeft met het type gebouwencategorie en dit dus zeker verder zou kunnen gebruikt worden om een inschatting te doen tussen de proces en niet proces gerelateerde verbruik. Hieronder wordt een samenvatting gegeven van de verschillende categorieën en de niet proces gerelateerde kost. Opgelet, deze zijn uitgedrukt in ft² (waarbij 1m² = 10,76ft²).

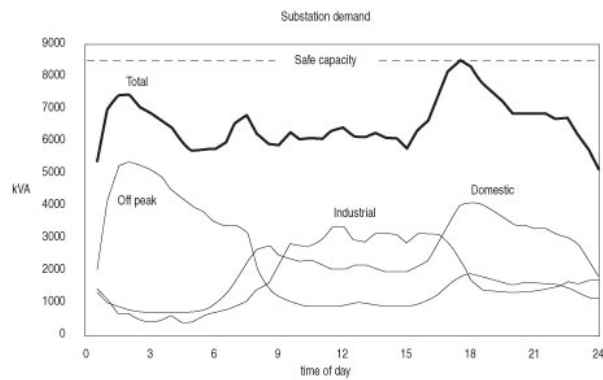
Tabel 5: Niet proces gerelateerde energie en standaarddeviatie

Building category	1	2	3	4	5
Non-process, W/ft ²	0.27	0.70	2.13	3.18	4.01
Non-process standard deviation	0.15	0.11	1.16	1.29	0.61
Lighting (operating hours), W/ft ²	0.27	0.70	1.25	1.10	0.94
Heating (8,760) W/ft ²	—	—	0.88	1.26	1.75
Cooling (8,760), W/ft ²	—	—	—	0.62	1.18
Ventilation (8,760), W/ft ²	—	—	—	0.20	0.14

4.2.2. Tijdsduur van de verbruikers

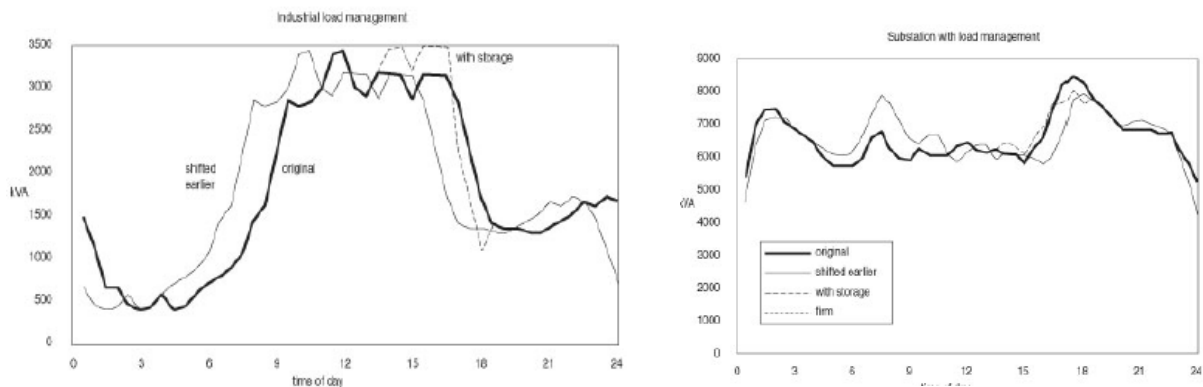
De continue of intermitterende werking van toestellen en productielijnen is ook een piste die zeker het onderzoeken waard is. Belastingen kunnen toegewezen worden tot een bepaalde indelingsklasse om zo een beter beeld te verkrijgen hoe verbruikers ingedeeld kunnen worden en in welke mate de verbruikers een optie tot regeling of bijsturing mogelijk maken.

Als er een beeld kan gevormd worden omtrent base load en piek load verbruikers, kan daarop ook geanticipeerd worden om piek loads te verschuiven in tijd om zo een betere matching mogelijk te maken tussen opbrengst en verbruiksprofielen, of om net meerdere gepiekte verbruiksprofielen tegelijkertijd te vermijden. Dit moet leiden tot zowel een technische ontlasting en financiële opsteker. Zeker bedrijven, waarvan het productieproces toch sterk eenduidig tijd gerelateerd is, is er groot potentieel om besparingen te realiseren en desnoods, met verschuiven van productieprocessen of toevoegen van opslag, optimalisatie kan verkregen worden.



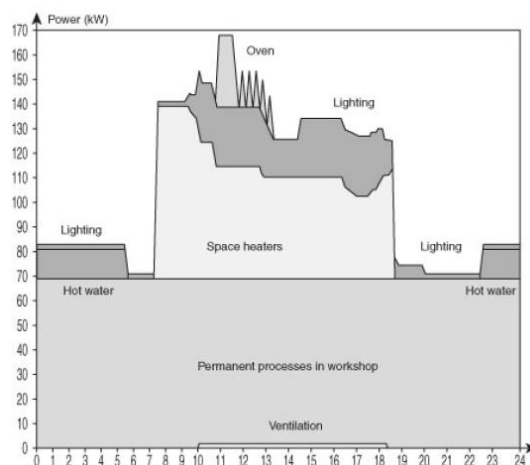
Figuur 60: Afstemming lastprofiel residentieel en industrieel [40]

Door het combineren van het behalen van de doelstelling omtrent energie-efficiëntie, PFC (power factor correctie), gedeeltelijke herindeling productieprocessen en integreren van opslag kan een serieuze verschuiving van het lastprofiel van de industriële partner verkregen worden. Hieronder wordt de nieuwe curve weergegeven door het integreren van bovenstaande parameters:



Figuur 61: Effecten van load management op een industrieel profiel en veranderd vraagprofiel over een productiedag

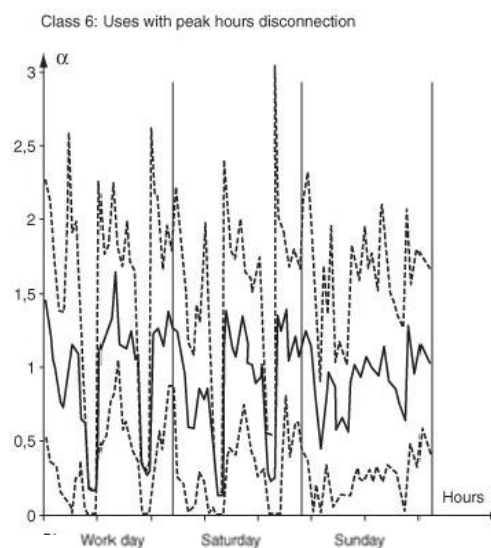
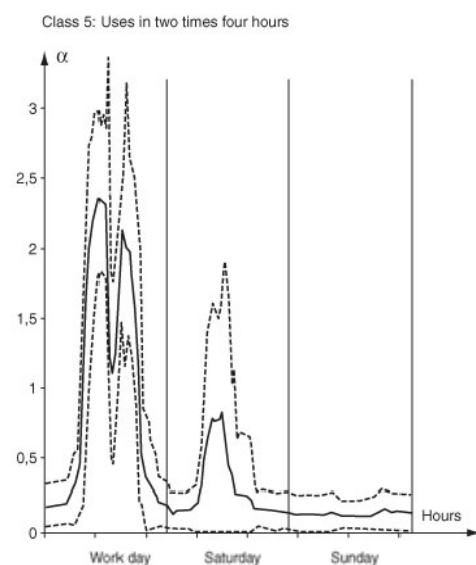
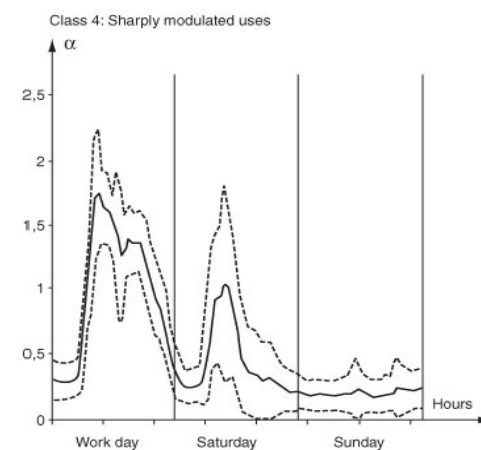
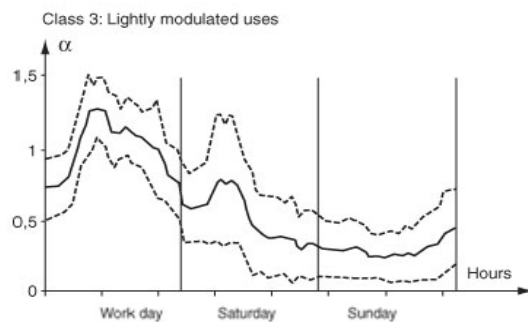
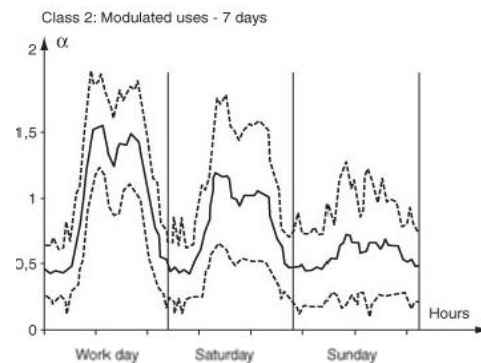
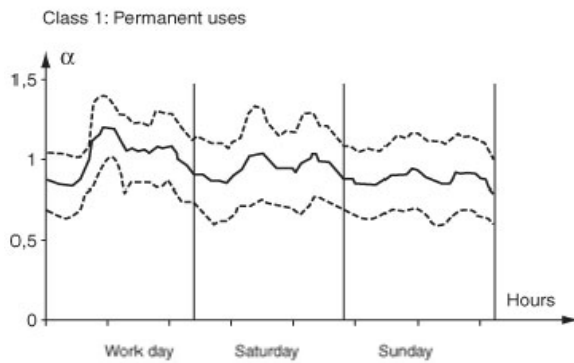
Om een beter idee te verkrijgen omtrent de mogelijkheden binnen de KMO's moet er een idee verkregen worden van de verschillende verbruiksprofielen zodanig bedrijven weten in welke mate hun curves kunnen verschuiven en dus prijs- en congestie gestuurd maatregelen kunnen nemen.

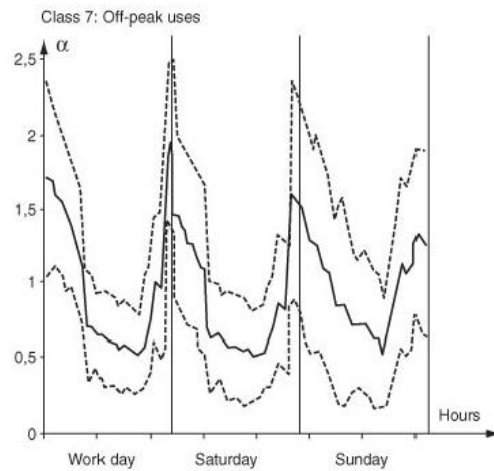


Figuur 62: Profielanalyse om besparingspotentieel te bestuderen

Uit verschillende statistische onderzoeken op dagbelastingcurves kan een onderscheid gemaakt worden in 7 klassen, die worden als volgt gedefinieerd:

- Klasse 1: Permanent gebruik of continue basisbelasting
- Klasse 2: Veranderend profiel in functie van activiteit, 7 dagen per week
- Klasse 3: Licht gemoduleerd gebruik
- Klasse 4: Sterk gemoduleerd gebruik
- Klasse 5: Verbruik in 2 x 4 uur
- Klasse 6: Verbruik met piek uur loskoppeling/disconnectie
- Klasse 7: Verbruik in stille uren



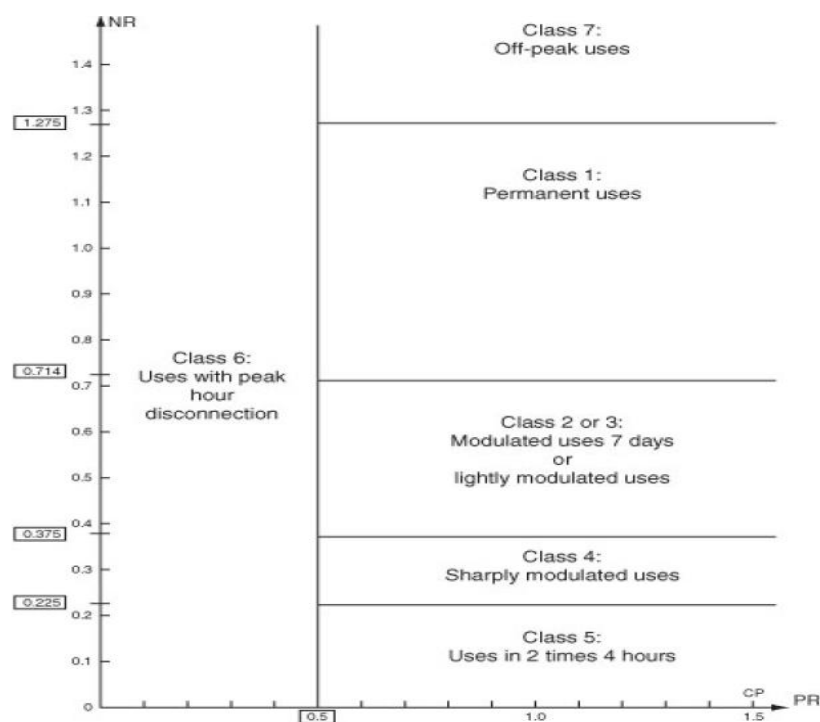


Figuur 63: Indeling volgens verbruikspatroon

Klasse 6 en 7 groeperen verbruikers die reeds inspelen op vraagzijdesturing. De overige verbruikers opereren in overeenstemming met de werkuren. De verticale asymptoten delen telkens de grafiek op in 3 dagen, nl. links een werkdag, in het midden zaterdag en zondag staat rechts. Er worden ook steeds drie curves weergegeven, met name de gemiddelde, maximum en minimum curves. Verbruiksprofielen kunnen volgens deze zeven categorieën ingedeeld worden op basis van twee criteria, met name de piekverhouding en de off-piek verhouding (stille uren).

Bij piekverhouding (PR) wordt het maandelijks verbruik gedurende de piekperiodes ten opzichte van de gemiddelde maandelijks afname vergeleken. Terwijl bij de stille uren verhouding (NR) wordt er gekeken naar het verbruik tijdens de stille uren ten opzichte van de gemiddelde maandelijks afname.

Belastingen kunnen optimaler optreden door de piekverhouding te verschuiven ten voordele van de stille uren verhouding. Onderstaande figuur kan na het berekenen van voorgaande parameters de gepaste klasse min of meer toewijzen.



Figuur 64: Indeling volgens piekverhouding of stille uren verhouding

Een uitgebreide kennis omtrent de tijdsbasis van de “typische verbruikers” is van primair belang om strategieën op te stellen die vraagzijdesturing mogelijk maken. Dit bepaalt samen met de werkwijze van de uitbater en de overtuiging van de organisatie of het productieproces anders kan ingepland of in vermogen geschaald kan worden. Naast de tijd gerelateerde kwestie is ook het aantal keer per tijdsinterval dat de verbruiker in aanmerking komt van belang. Hier wordt verder op ingegaan in de profielanalyse.

4.2.3. Controleerbaar karakter

Als laatste is ook het controleerbaar karakter van belang om even dieper te analyseren. De mate van controle duidt op de mogelijkheid om vlot belastingen in vermogen bij te regelen of volledig uit te schakelen. Zonder veel randvoorwaarden een toestel uitschakelen levert vanuit praktisch perspectief immers veel voordelen.

4.2.3.1. Onderverdeling

Om industriële organisaties aldus te ordenen naar demand response opportuniteiten, wordt voornamelijk gefocust op de grootte van het verbruik en de regelvaardigheid van de afnemer. Onderstaande criteria kunnen gehanteerd worden om data te ordenen:

- Elektrisch verbruik
- Gemiddelde afgenomen vermogen
- Beschikbaarheid van automatisch gestuurde processen
- Beschikbaarheid van deellastprocessen
- Ervaring met energie management activiteiten

Met behulp van deze criteria wordt het grootste potentieel binnen een onderneming zichtbaar, als aan elke verbruiker bijvoorbeeld een score werd toegewezen van 0 tot 10, en als die deelscores per gewicht wordt opgeteld is men in staat om verschillende sectoren al in grote mate onderverdelen.

4.2.3.2. Thermische- en koelprocessen

Voorbeelden van elektrische verwarmingsprocessen zijn ovens (boog, weerstand, inductie), stoomketels, waterboilers, ruimteverwarming, warmtepompen en airco's. Een algemene karakteristiek van dergelijke applicaties is de temperatuurbereik (stelwaarde in combinatie met tolerantie) waarbinnen gefunctioneerd kan worden. Dit maakt het mogelijk het proces te onderbreken tijdens piekmomenten en omgekeerd, te verhogen tijdens dalperiodes.

4.2.3.3. Verbruikers volgens vaste cyclus

Processen die een vaste sequentie van bewerkingen uitvoeren kunnen in vele gevallen niet zomaar gepauzeerd worden. Voorbeelden zijn te vinden in de metaalbewerking en voedingsindustrie. Eens het proces in gang werd gezet, dient de tijd dat het proces kan gestopt worden, bepaald te worden in functie van de kwaliteit. Metalen die bijvoorbeeld niet de gepaste warmte- en koude-stadia hebben doorlopen, voldoen mogelijks niet aan hun kwaliteitseisen. Vandaar moeten die processen op een strategisch moment gekozen worden zodanig dit proces gedurende langere tijd niet samen valt met andere processen die het mogelijk maken dat een piek ontstaat in het verbruiksprofiel. In die vaste cyclus treden zowel gepiekte evenals continue verbruikers op, hierbij moet dieper in het productieproces gekeken worden wanneer pieken voorkomen en of het proces in zijn geheel kan verschoven worden in de tijd om zo een betere afstemming te realiseren tussen piek- en continue verbruikers.

➤ **Gepiekte verbruikers:**

Deze groep duidt op verbruik dat abrupt wordt afgenomen doordat mechanische krachten op een ruw materiaal worden uitgeoefend. Dit resulteert in elektrische pieken en treedt op bij o.a. hydraulische en mechanische persen, maalprocessen en verspaanmachines. Dergelijke belastingen kunnen niet gemoduleerd worden, maar kunnen gedurende een bepaalde tijd veelal uitgeschakeld worden. Deze verbruikers verlenen voornamelijk capaciteit en energie demand response producten.

➤ **Continue verbruikers:**

Bedrijfsprocessen die consistente krachten uitoefenen zoals bv. bij het transporteren van fluïda, mengers, blazers, compressoren. Deze toestellen kunnen gemoduleerd worden, wetende dat ze in vele gevallen aangestuurd worden door controllers zoals VSD en thermostaten. Veelvuldig starten en onderbreken van processen kan daarentegen nefast zijn voor de levensduur. Dergelijk verbruik omvat alle vijf vormen van demand response producten.

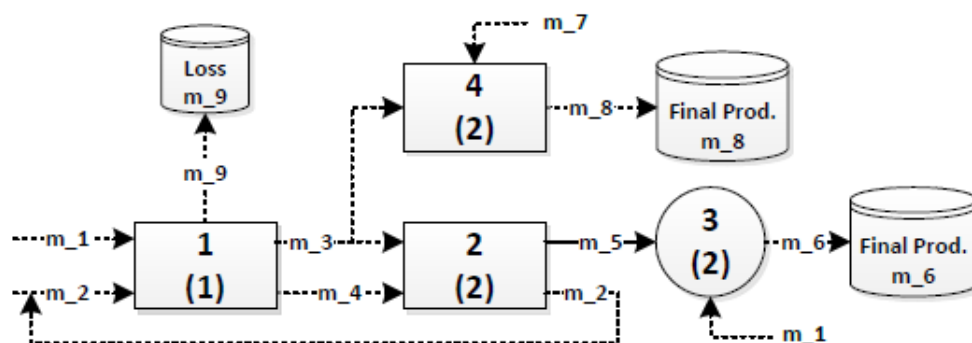
4.2.3.4. Niet-proces gerelateerde verbruikers:

Verbruikers waarop beroep wordt gedaan als de gebruiker dit wenst. Deze omvatten o.a. verlichting, liften, motoren voor specifieke toestellen en staan in principe los van de activiteit (niet proces gerelateerde belastingen). Deze zijn het meest kritisch te onderbreken, aangezien zij dikwijls instaan voor de veiligheid en blijven daarom beter onaangeroerd.

4.2.4. Model van een productieproces in industriële context

Om de vorige punten beter te staven, moet het mogelijk zijn om een model van de processen in het bedrijf op te stellen, dit zodanig bepaalde processen zeker geen vertraging oplopen en alle productieprocessen correct afgestemd worden [41].

Eén of meerdere productie-eenheden bouwen samen aan één of meerdere (eind)producten. Om elk stadia in een model voor te stellen, dienen de in- en outputs gekend te zijn in termen van energie, materiaal en manuren.



Figuur 65: In kaart brengen van bepaalde productieprocessen

Uiteraard wordt in dit project het elektrische aspect benadrukt. Tijdens elke stap ondergaan de inputs een transformatie om uiteindelijk het eindstadium te bereiken. De bovenstaande figuur in dit geval toont twee productieketens. Eenheden van aparte ketens die dezelfde bewerkingscyclus ondergaan, hebben niet per se een simultane bewerkingstijd. Het is hoe dan ook van belang te zorgen dat het proces geen vertraging ondervindt en dat dus steeds voldoende inputs aanwezig zijn alvorens een nieuwe batch cyclus te starten. Veronderstel dat tijd wordt uitgedrukt in vaste eenheden.

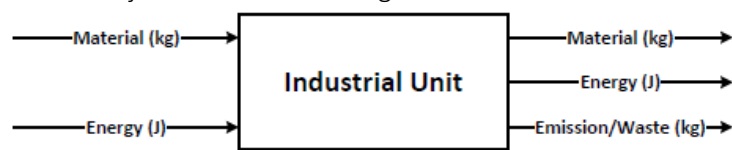
De volgende verduidelijkingen zijn van belang en dienen als illustratie van een werkelijk batch proces.

- De getallen tussen () wijzen het aantal tijdseenheden dat elke fase in beslag neemt.

- Deelproces drie is een onderbreekbare bewerkingsfase en wordt aangeduid met een cirkel. Zodus kan deze stap in het midden gepauzeerd worden en nadien terug hervat worden, waardoor flexibiliteit kan geïmplementeerd worden.
- De volle lijn tussen stap twee en drie wijst op het feit dat de materie na het ene proces direct aan het andere dient bezorgt te worden omwille van temperatuur, druk of andere restricties en er in die periode geen flexibiliteit kan ingebouwd worden, éénmaal dit proces op gang is, moet dit gecontinueerd worden.

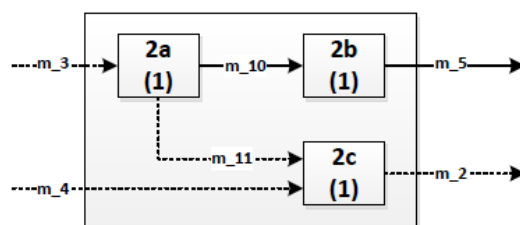
Hieruit blijkt dat een dergelijke gedetailleerde beschouwing helpt bij het ontdekken van flexibiliteit en andere demand response producten. Het productieproces van het bedrijf wordt beter in beeld gebracht, mits enkel dit proces in bepaalde mate aan te passen is. Het gedeelte gebouwgerelateerde kosten wordt hier niet verder besproken.

Als voorbeeld wordt deelproces twee verder onder de loep genomen. Deze fase valt niet te onderbreken en neemt twee tijdseenheden in beslag.



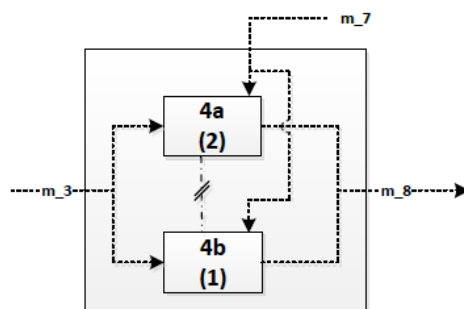
Figuur 66: Inputparameters definiëren die van belang zijn voor het productieproces

In werkelijkheid kan deze stap opgebouwd zijn uit meerdere deelstappen. Elk deel neemt een tijdsinterval in beslag om zijn eindstadium te realiseren. Uit de details blijkt dat het niet te onderbreken karakter te wijten is aan het werkingsprincipe van “a” en “b”. Het blijkt namelijk noodzakelijk dat onmiddellijk na de eerste fase de volgende stap wordt aangevat. Deze voorwaarde geldt niet voor onderdeel “c”, waardoor deze onafhankelijk kan opereren zolang de input voldoende beschikbaar zijn.



Figuur 67: Belang van continuering van het productieproces

Een andere insteek kan bijvoorbeeld het onderscheid tussen deel- en vollast werking zijn. Deelproces vier kan op twee vermogens afgehandeld worden. Op vol vermogen neemt deze stap twee tijdseenheden in beslag, terwijl de deellastwerking de bewerkingstijd halveert. Dit kan opgenomen als flexibiliteit in momenten wanneer er piekverbruik gedetecteerd wordt. Zo kan men dus door batch processen op te delen in meerdere fasen de zogeheten “onzichtbare” flexibiliteit terugvinden.



Figuur 68: Mogelijkheid tot deellastvermogen in productieproces

4.3. Besluit

Flexibiliteit is vandaag in veel vormen terug te vinden in een bedrijf, ieder bedrijf beschikt over een bepaald potentieel dat moet in kaart gebracht worden. Vandaar is het dan ook van uitermate groot belang om een eerste opsplitsing te maken in de proces- versus gebouwgerelateerde verbruikers. Voor de gebouw gerelateerde verbruikers is het van groot belang om deze eerst te optimaliseren (auditing omtrent gebouwschil, verlichting,...) mits dit continue verbruikers zijn waarbij onze basislast bepaald wordt, deze bieden ons ook weinig flexibiliteit. Echter kan hier ook al enige vorm van flexibiliteit ingevoerd worden als het handelt om het bedrijf te verwarmen. Als men ergens een grote piekverbruiker detecteert, moet het mogelijk zijn om die piek weg te nemen door vb. het kort afschakelen van de verwarming in het bedrijf. Andere zaken zoals verlichting, ... brengen weinig potentieel met zich mee.

Eénmaal deze verbruikers of dit energieverbruik in kaart wordt gebracht, is het belangrijk om ons verder toe te spitsen op de mogelijkheden qua processen verbonden aan het type bedrijf. Het productieproces moet ontleed worden om zo een idee te krijgen in welke mate men in staat is om bepaalde processen deels of volledig te verschuiven in de tijd om het piekverbruik in het bedrijf sterk te verlagen. Het moet mogelijk zijn om processen, éénmaal een correcte categorisatie gebeurd is, verder te ontplooiën en zo een grote vorm van flexibiliteit in te voeren, waarbij zorgvuldig piek- en continue processen worden verdeeld in de tijd.

5. Literatuurlijst

- [1] S. Cloete, „The Fundamental Limitations of Renewable Energy,” [Online]. Available: <http://www.theenergycollective.com>.
- [2] CSIRO, „Characterising the Effect of High Penetration Solar Intermittency on Australian Electricity Networks,” 2012. [Online]. Available: <http://www.globalccsinstitute.com>.
- [3] „Veelgestelde vragen over het prosumentarief,” [Online]. Available: <http://www.vreg.be>.
- [4] „Renewable Integration Benefits,” [Online]. Available: <http://energystorage.org>.
- [5] S. Patel, „Vanadium Flow Battery Juices Onion Plant,” 2012. [Online]. Available: <http://www.powermag.com>.
- [6] „Peak Shaving and Demand Charge Avoidance: Prudent Energy Vanadium Redox Battery Energy Storage System (VRB-ESS®),” 2012. [Online]. Available: <http://energystorage.org>.
- [7] „Peak Shaving to Reduce Energy Costs: EaglePicher Power Pyramid™ Hybrid Battery,” 2012. [Online]. Available: <http://energystorage.org>.
- [8] PRINCETON POWER SYSTEMS, „EAGLEPICHER ENERGY STORAGE SYSTEM,” 2012. [Online]. Available: http://www.princetonpower.com/pdfs/eaglepicher_cs.pdf.
- [9] PV Magazine, „Sharp supplies peak shaving batteries for Baker Electric facility,” 1 April 2015. [Online]. Available: www.pv-magazine.com.

- [10] [Online]. Available: <http://www.res-group.com>.
- [11] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig en G. Andersson, „Review of grid applications with Zurich 1 MW battery energy storage system,” ELSEVIER, 2014.
- [12] „Excess Wind Power Turned into Gas in Denmark Using Hydrogenics Technology,” Februari 2014. [Online]. Available: <http://www.hydrogenics.com/>.
- [13] [Online]. Available: <http://www.itm-power.com/>.
- [14] [Online]. Available: <http://www.waterstofnet.be/>.
- [15] Thomas D. (Hydrogenics), Mertens D. (Colruyt), Meeus M. (Sustesco), Van der Laak W., Francois I. (WaterstofNet), „Power-to-Gas Roadmap for Flanders;,” Brussels, 2016.
- [16] [Online]. Available: <http://www.calmac.com/>.
- [17] G. Osborne, „Flywheel Energy Storage,” 19 Mei 2016. [Online]. Available: <http://www.nrstor.com>.
- [18] K. Ross, „First flywheel hybrid energy storage plant in Europe is opened,” 11 December 2015. [Online]. Available: <http://www.pennenergy.com>.
- [19] Wei Li and Géza Joós, „A Power Electronic Interface for a Battery Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Wind Applications,” IEEE, 2008.
- [20] „<http://schwungrad-energie.com/projects/rhode-hybrid-test-facility>,” [Online].
- [21] viWTA, „Waterstof motor van de toekomst?,” vol. Dossier 17.
- [22] rrrrtt, „rtgrtr”.
- [23] R. Ramachandran en R. K. Menon, „An overview of industrial uses of hydrogen,” Int.J. Hydrogen Energy, vol. 23, pp. 593-598, 1998.
- [24] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglobe en W. Rosehart, „Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources;,” in 2010 International Energy Initiative, 2010.
- [25] „Water Electrolysis & Renewable Energy Systems,” [Online]. Available: <http://www.fuelcelltoday.com>.
- [26] Fuel Cell Today, „The Fuel Cell Industry Review 2013,” 2013. [Online]. Available: <http://www.fuelcelltoday.com>.
- [27] Legrand, „Technical Guide - UPS,” 2012. [Online]. Available: <http://www.legrand.be/nl>.
- [28] Jack Basi, Neil Farquharson, „PEM Fuel Cells Make a Powerful Case for Small Business Backup,” COMMSCOPE, 2014.
- [29] TRANE - Susanna Hanson, „Ice Storage Design and Application,” 2013. [Online]. Available: <http://www.trane.com/>.

- [30] „Energy Storage: A Different View from Germany,” [Online]. Available: www.renewableenergyworld.com/.
- [31] „ENE-FARM installed 120,000 residential fuel cell units,” September 2015. [Online]. Available: <https://fuelcellsworks.com/>.
- [32] Eurostat, „Electricity production, consumption and market overview,” [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat>.
- [33] IEC (International Electrotechnical Commission), „Electrical Energy Storage - White Paper,” 2011. [Online].
- [34] VHK for EC, „Average EU building heat load for HVAC equipment,” 2014.
- [35] M. Izquierdo, A. Moreno-Rodríguez, A. González-Gil, N. García-Hernando, „Air conditioning in the region of Madrid, Spain: An approach to electricity consumption, economics and CO2 emissions,” Elsevier, 2011.
- [36] [Online]. Available: www.hydrogenics.com/.
- [37] [Online], Smart Energy Region - Een blauwdruk voor de Vlaamse speerpuntcluster Energie,
- [38] B. Jablonska, G.J. Ruijg, E.M.M. Willems, T. Epema, I.J. Opstelten, H. Visser, M. Nuchelmans, Van Wanum, ‘Innovatieve energieconcepten en pilots voor energieneutrale gebiedsontwikkeling in 2050’, Januari 2011, ECN-0—10-037
- [39] B. Khaled, O. Michael, T. Janet, Industrial Facilities Non-Process Energy, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014
- [40] [Online], Electric Load Management in Industry, Leonardo ENERGY
- [41] A. Gholian, H. Mohsenian-Rad, Y. Hua, ‘Optimal Industrial Load Control in Smart Grid’, sept. 2015

Hoofdstuk 2: ‘Dimensionering van een hybride installatie’

1. Inleiding

In hoofdstuk 2 wordt er dieper ingegaan omtrent de dimensionering van hybride opslagsystemen, gebaseerd op een optimale zelfconsumptie en zelfvoorziening. Er wordt onderzocht welke methodes kunnen gehanteerd worden om een zo correct mogelijke dimensionering af te leveren aan de eindklant. Hierbij zal de timestamp van de verkregen data een grote rol spelen. In dit hoofdstuk zal dan ook uitgebreid de evaluatie en de foutmarge van korte en langere termijndata aan bod komen.

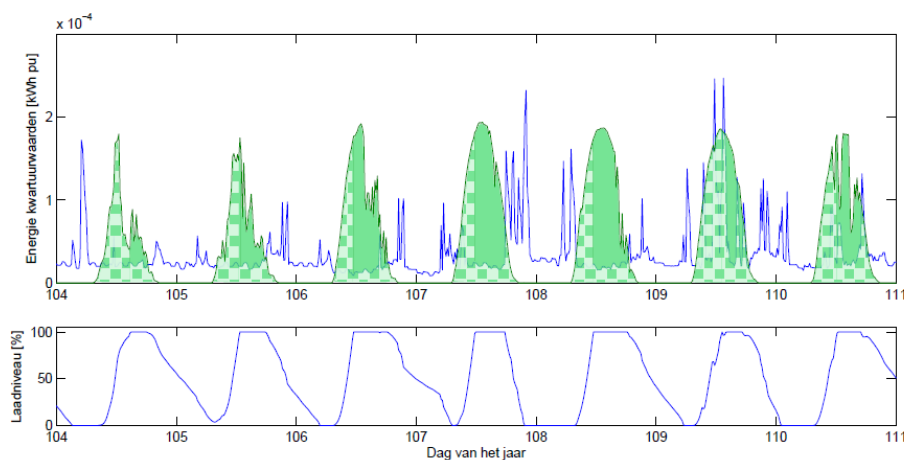
1.1. Definities en begrippen

1.1.1. Zelfconsumptie

De zelfconsumptieverhouding Z_c staat voor het aandeel van de opgewekte zonne-energie dat ogenblikkelijk verbruikt wordt in het eigen huishouden. Ze wordt uitgedrukt door de verhouding van de eigen verbruikte PV-energie op de totale opgewekte energie afkomstig van de zonnepanelen.

Voor een klassieke PV-installatie is het zo dat de eigen verbruikte energie enkel en alleen bepaald wordt door de PV-energie die ogenblikkelijk de gevraagde last voedt. Veronderstel dat een opslagsysteem onder de vorm van batterijen wordt geïntegreerd in een bestaande installatie. Dan is de eigen verbruikte energie de som van de PV-energie die gebruikt wordt om de last te voeden en de PV-energie om de batterijen te laden. Het mag duidelijk zijn dat de zelf verbruikte PV-energie en hiermee ook de zelfconsumptieverhouding stijgt wanneer opslag wordt geïntegreerd.

Dit effect wordt geïllustreerd in Figuur 69. De blauwe lijn stelt het verbruik voor van een woning en de groene lijn de PV-opbrengst. De onderste grafiek stelt het laadniveau van een batterijbank met een opslagcapaciteit van 1,5 kWh per MWh voor. Van zodra de batterij volledig opgeladen is, zal de energie geïnjecteerd worden in het net. Omgekeerd zal er energie onttrokken wanneer het laadniveau nul wordt. De zelfconsumptie wordt geïllustreerd door de verhouding van het groene gearceerde deel op het groen gekleurde deel.



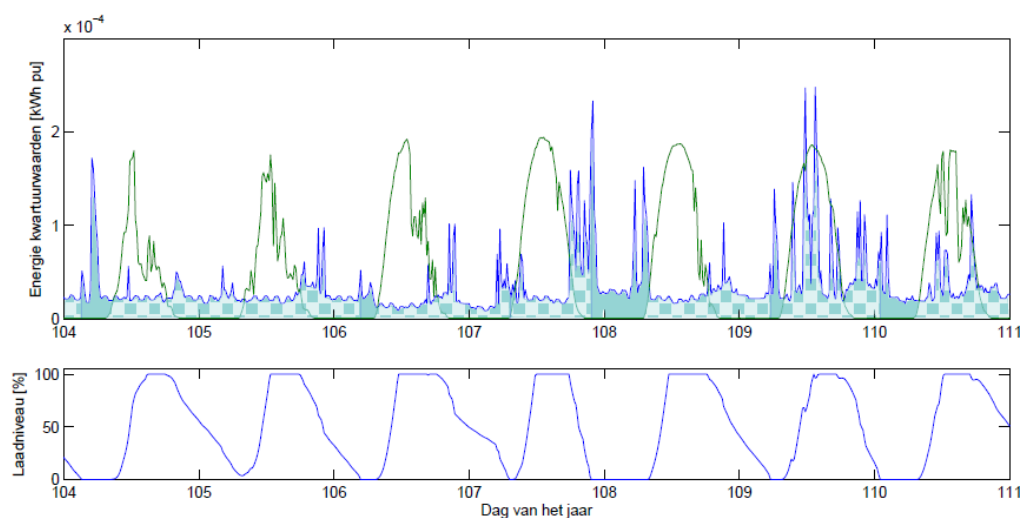
Figuur 69: Zelfconsumptie

1.1.2. Zelfvoorziening

De zelfvoorzieningsverhouding Z_v staat voor het aandeel van de gevraagde energie die je ogenblikkelijk zelf kan voorzien. Het is de verhouding van de gevraagde energie die zelf geproduceerd werd op de totaal gevraagde energie.

Voor de klassieke installatie is het zo dat de eigen geproduceerde energie gelijk is aan de PV-energie die ogenblikkelijk de gevraagde last voedt en dus nog gelijk is aan de eigen verbruikte energie. Indien opslag wordt geïntegreerd in de PV-installatie klopt het voorgaande niet meer en moet de energie afkomstig van het ontladen van de batterijen in rekening worden gebracht. Hierdoor zal naast de zelfconsumptie ook de zelfvoorziening stijgen na het integreren van een opslagsysteem.

De zelfvoorziening kan geïllustreerd worden in Figuur 70 voor dezelfde woning. Deze wordt gegeven door de verhouding van het blauw gearceerde deel op het blauw gekleurde deel.



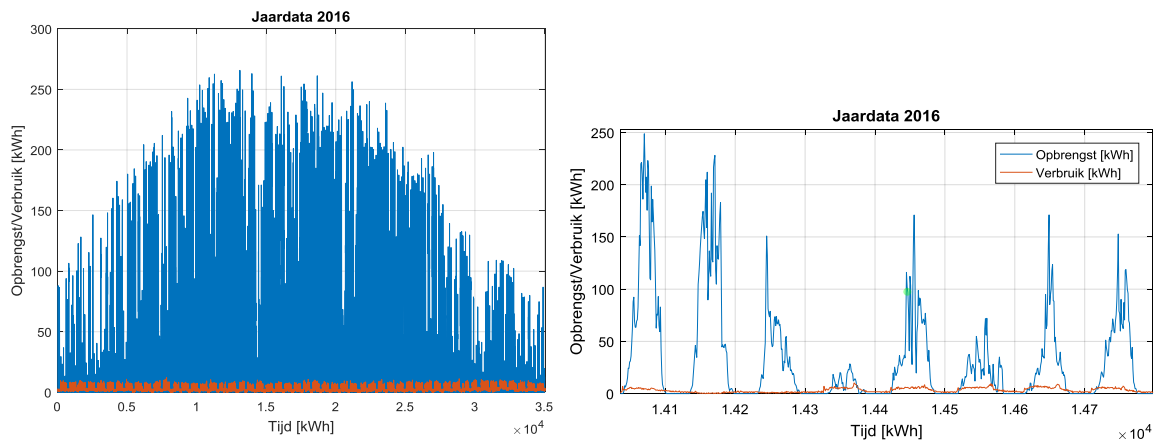
Figuur 70: Zelfvoorziening

Dimensionering opslagcapaciteit

Een belangrijke parameter is de timestamp van de verkregen data. Tot op heden wordt voor een KMO een kostprijs aangerekend op **kwartierbasis**, dus de data die ter beschikking kan worden gesteld is veelal kwartierdata, deze is tevens opvraagbaar bij de distributienetbeheerder. Kortere timestamps geven natuurlijk een beter beeld en kunnen een betere inschatting geven over de exact benodigde opslagcapaciteit en het type opslag die benodigd zal zijn.

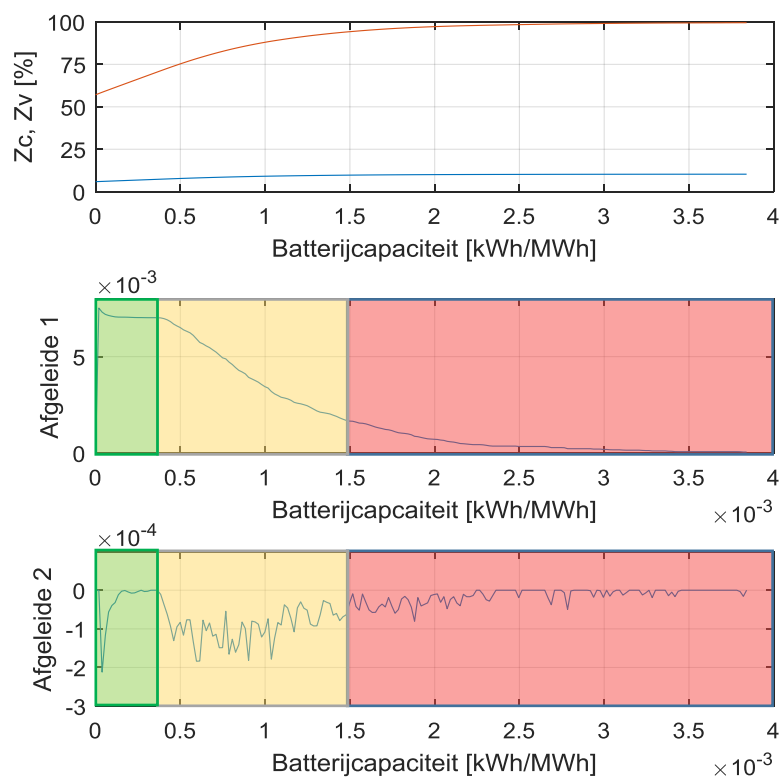
Zonder energiemanagementsystemen is die data moeilijk te verkrijgen. In een eerste onderdeel zal er dan ook een dimensionering uitgewerkt worden op basis van die kwartierdataset, verkregen van de distributienetbeheerder. Later zal een diepgaandere analyse uitgevoerd worden omtrent de afwijking met betrekking tot kortere termijndata.

De dimensionering van de opslagcapaciteit zal uitgelegd worden met een fictief voorbeeld. In het voorbeeld hieronder wordt zowel de verbruiks- evenals de opbrengst data weergegeven van een fictief bedrijf XYZ in kwartierdata. De blauwe lijnen geven de opbrengst weer per kwartier voor het jaar 2016. De oranje lijnen geven het verbruik per kwartier weer voor het jaar 2016. Zo kan in dit voorbeeld opgemerkt worden dat er een groot overschot is aan zonne-energie ten opzichte van het verbruik van het bedrijf.



Figuur 71: Opbrengst- en verbruiksprofiel op jaarbasis

Voor het bepalen van de opslagcapaciteit wordt gebruik gemaakt van afgeleiden. Als de functie ‘eigenverbruik’ wordt afgeleid, kunnen we via de eerste afgeleide de mate van de verandering van deze functie achterhalen en zo dus de steilheid van het eigenverbruik. Via de tweede afgeleide kan de mate van verandering van de eerste afgeleide bepaald worden. Dit wordt even toegelicht aan de hand van een voorbeeld, waarbij de bovenste figuur zowel de zelfconsumptie evenals de zelfvoorziening weergeeft. Hier wordt de zelfconsumptie genomen als functie die 2x zal worden afgeleid (extremum bepaling).



Figuur 72: Dimensionering opslagcapaciteit

Voor de duidelijkheid zijn 3 zones te herkennen in de afgeleiden.

- **Groene zone:** In deze zone is een sterke stijging van de zelfconsumptie op te merken. Als men kijkt naar de 1^{ste} afgeleide, ziet men een constante lijn in de groene zone die aantoont dat de stijging daar recht evenredig is. Dit maakt het dus interessant om te investeren in opslag vanuit het standpunt optimale zelfconsumptie en zelfvoorziening.

- **Gele zone:** Hier kan opgemerkt worden dat de stijging niet meer even constant is. Er begint variatie in te komen, wat dus meebrengt dat de stijging van de zelfconsumptie en zelfvoorziening niet meer zo sterk zal stijgen. Echter kan hier de afweging gemaakt worden tussen zowel het technologisch evenals het economisch optimum en moet onderzocht worden of de batterij nog voor andere doeleinden kan ingezet worden (meer dan enkel maar zelfconsumptie en zelfvoorziening optimalisatie).
- **Rode zone:** Hier is de stijging van zowel de zelfconsumptie evenals de zelfvoorziening klein. Dit brengt dus met zich mee dat de opslagcapaciteit die hier voorgesteld wordt, een over dimensionering betekend voor de werkelijke installatie en dat er dus wordt afgeweken van het technologisch optimum.

Opgelet, het moet duidelijk gemeld worden dat hoe kleiner de batterijcapaciteit gekozen wordt (hoe meer punten afgeleid kunnen worden) hoe correcter de capaciteit kan ingeschat worden en buigpunten beter gevonden kunnen worden.

Daarnaast wordt de **opslagcapaciteit uitgedrukt in kWh/MWh**, dit maakt het eenvoudig om geen absolute units te moeten beschrijven en de case voor meerdere situaties te gebruiken. Echter moet de klant dan gaan afoetsen wat het verbruik is van zijn bedrijf (Vb. 100 MWh) en dan die opslagcapaciteit vermenigvuldigen met het totale verbruik van het bedrijf. Dus stel dat 0.4 kWh/MWh de optimale situatie is, komt dit neer op een opslagcapaciteit van 40 kWh die moet worden geïnstalleerd voor de verhoogde zelfconsumptie en zelfvoorziening te behalen in het bedrijf.

Concreet wordt in onderstaande tabel nog enkele batterijcapaciteiten weergegeven om aan te tonen in welke mate de zelfconsumptie en zelfvoorziening stijgen bij een groter wordende batterijcapaciteit. Zo kan opgemerkt worden dat vanaf de groene zone de stijging van de Zc en Zv minder snel zal toenemen.

Tabel 6: Optimum versus over dimensionering van batterijopslag

	Zonder opslag	0,4 kWh/MWh	0,8 kWh/MWh	1,2 kWh/MWh	1,6 kWh/MWh
Zc [%]	5,91	7,44	8,69	9,43	9,86
Zv [%]	57,08	71,82	83,95	91,06	95,16
ΔZv		14,74	12,13	7,11	4,1

Concreet betekent bovenstaande dat, als er opslagcapaciteit wordt geïnstalleerd in het bedrijf, zowel de zelfconsumptie evenals de zelfvoorziening in het bedrijf zullen toenemen en dus meer processen vanuit het bedrijf op eigen opgewekte energie zullen werken. Echter bij te grote batterijcapaciteit moet afgewogen worden tot op welk punt het interessant is voor het bedrijf om te investeren in opslag.

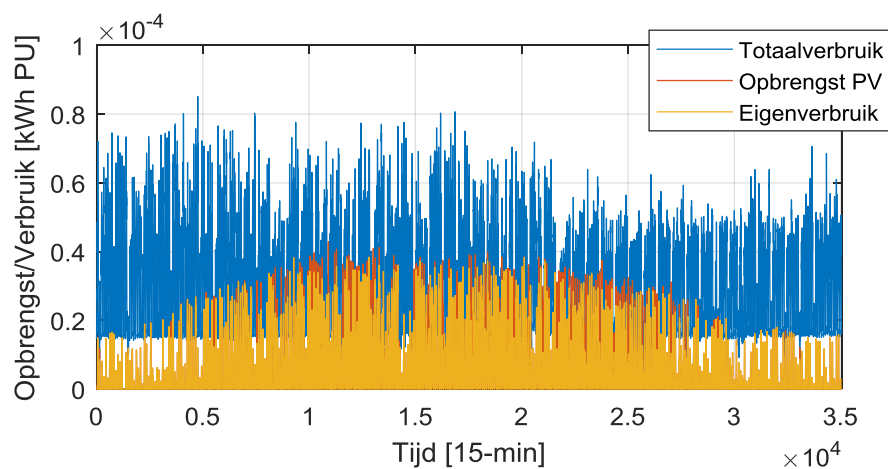
1.2. Case studie 1 – Algemene dimensionering

In deze case studie zullen er verschillende aspecten onderzocht worden om zo inzicht te verkrijgen in het nut voor het investeren in opslagcapaciteit.

- In eerste instantie zal er een dimensionering uitgevoerd worden zoals eerder besproken om de optimale batterijcapaciteit te vinden op basis van de gegevens, verkregen van de distributienetbeheerder. Zo kan er inzicht verworven worden in zowel het verbruiks- evenals het opbrengstprofiel van de klant.
- Daarnaast zal er onderzocht worden of de decentrale productiecentrale bij de klant voldoet om een optimale zelfconsumptie en zelfvoorziening te verkrijgen. Of in welke mate er meer of minder decentrale energieproductie moet geplaatst worden om een betere zelfconsumptie en zelfvoorziening te verkrijgen.
- In laatste instantie zal onderzocht worden of er de mogelijkheid bestaat om de klant voor 30 minuten met zijn kritische lasten in eiland te laten werken aan de hand van het geïnstalleerd systeem en wat de voorwaarden zijn om hier inzicht in te verkrijgen.

1.2.1. Algemene gegevens

- Verbruiksprofiel aanwezig op 15-minutenbasis
 - Totaalverbruik = 138.73 MWh
- Opbrengstprofiel aanwezig (Zonnepanelen) op 15 - minutenbasis
 - Totaalopbrengst = 24.101 MWh

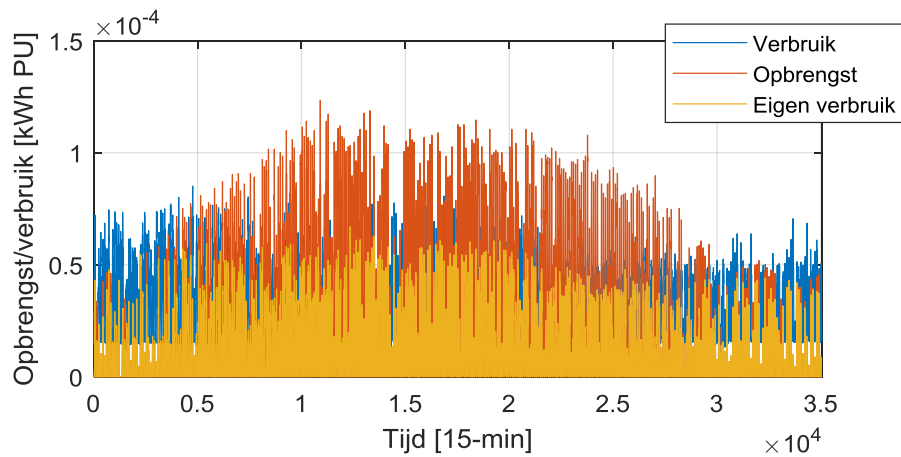


Figuur 73: Verbruik & opbrengstprofiel van bedrijf ABC

Uit bovenstaande figuur kan opgemerkt worden dat praktisch alle PV-energie direct verbruikt wordt in de installatie. Er is dus relatief weinig injectie in het distributienet. Hieruit kan al direct opgemerkt worden dat de vraag van de klant om batterijen te plaatsen voor een verhoogde zelfconsumptie en zelfvoorziening weinig meerwaarde kan bieden.

Zoals kan opgemerkt worden in bovenstaande figuur wordt alles uitgedrukt in p.u. De uitdrukking p.u. (per unit) laat toe procentueel te rekenen in functie van een vooropgestelde parameter, dat laat aan toe resultaten snel door te rekenen naar andere installaties. Zoals eerder aangegeven had de klant een totaalverbruik van 138.73 MWh, p.u. wordt dit dus 1. Dit wil zeggen dat de som van alle

kwartierverbruiken opgeteld 1p.u. zijn. De opbrengst wordt ook gerelateerd aan het verbruik. Er wordt vastgesteld dat deze installatie amper 17.37 % van het totale verbruik kan dekken.



Figuur 74: Verbruiksprofiel met stijgend opbrengstprofiel voor bedrijf ABC

1.2.1.1. Prijs gegevens

- Dalprijs: 16.17 €c
- Piekprijs: 18.94 €c
- Prijs geïnjecteerde PV: 0 €c

1.2.1.2. Gegevens batterijpack

- Type: Li-ion LFP
- Zelfontlading: 3% per maand
- Maximum oplaadstroom: 25A
- DOD: 80 %
- Aantal cycli: 6000 Cycli
- Kost batterij: 523 euro/kWh
- Batterijcapaciteit: 2.4 kWh (50Ah & 48V)

1.2.1.3. Ideale opslagcapaciteit case ABC

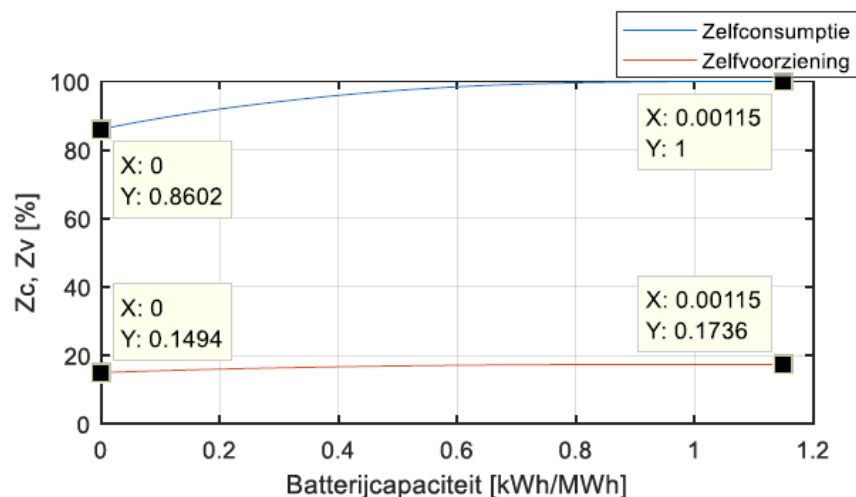
Met de gegeven profielen kan er 17.37 % van het totale verbruik opgevangen worden door de opbrengst van de PV-installatie. Dit leidt direct tot een hoge zelfconsumptie en een lage zelfvoorziening voor dit bedrijf zonder dat daar opslag aan te pas komt.

- Zelfconsumptie: 86.02 %
- Zelfvoorziening: 14.94%

Slechts een klein deel zal terug in het distributienet geïnjecteerd worden. We gaan ervan uit dat de PV-installatie op het dak in eigen beheer is (direct verbruikte PV-energie is gratis), en mits er slechts een kleine hoeveelheid terug in het distributienet geïnjecteerd wordt, zal de injectievergoeding verwaarloosd worden in deze situatie (de injectievergoeding bedraagt amper 35.13 euro voor hun PV-park). In deze situatie moet er een totaalprijs betaald worden van €20.948 op jaarbasis, rekening houdende met piek- en dal tarifiering.

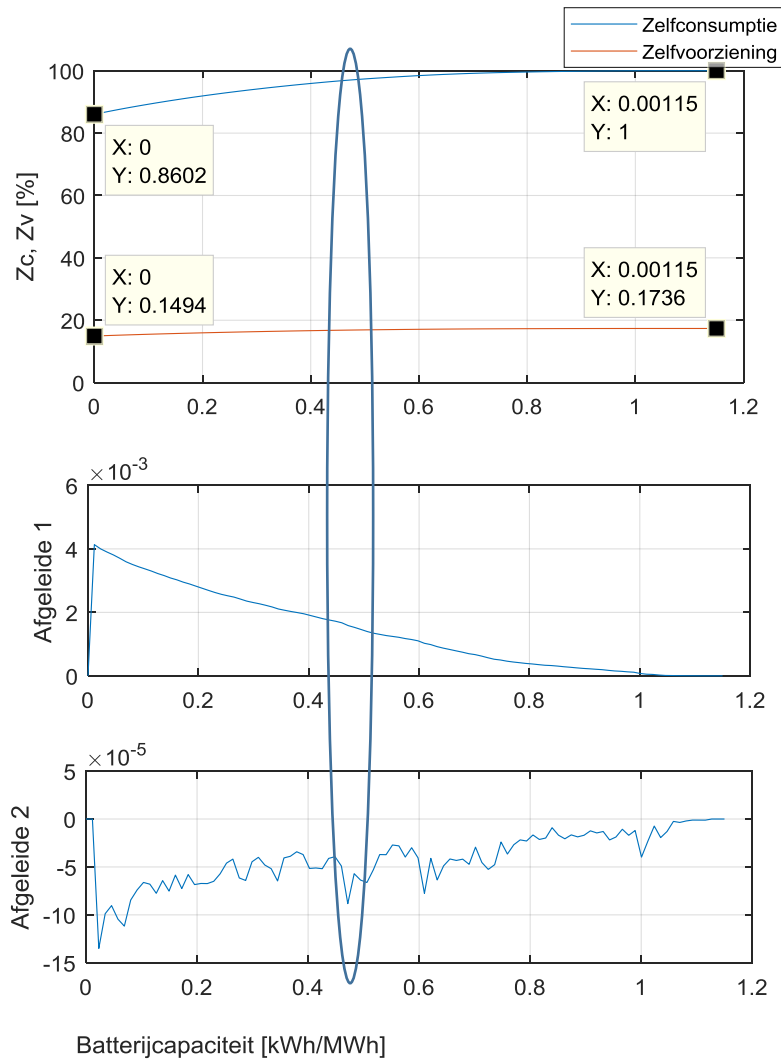
Uit bovenstaande gegevens weten we hoever de klant staat met zijn huidige installatie. De klant moet nog altijd een aanzienlijke som betalen voor de gebruikte elektriciteit, maar heeft wel een hoge benutting van zijn eigen PV-installatie. Zo blijkt ook dat als er opslagcapaciteit wordt toegevoegd aan de installatie, de klant zelf in staat kan zijn om alle opgewekte energie van de zonnepanelen te gebruiken in de eigen installatie.

De zelfvoorziening daarentegen stijgt relatief weinig door integratie van opslag, dit maakt ook direct duidelijk dat er hier zou moeten geopteerd worden voor meer decentrale energieproductie om deze case valabeler te maken qua verhoogde zelfvoorziening en dus verlaagde kosten naar het distributienet.



Figuur 75: Zc & Zv i.f.v. variërende batterijcapaciteit

Nu komt het erop aan om het technologisch optimum voor het bedrijf te vinden. Dit kan aan de hand van de eerder uitgelegde methode van afgeleiden om zo de mate van verandering van het eigenverbruik te kunnen waarnemen.

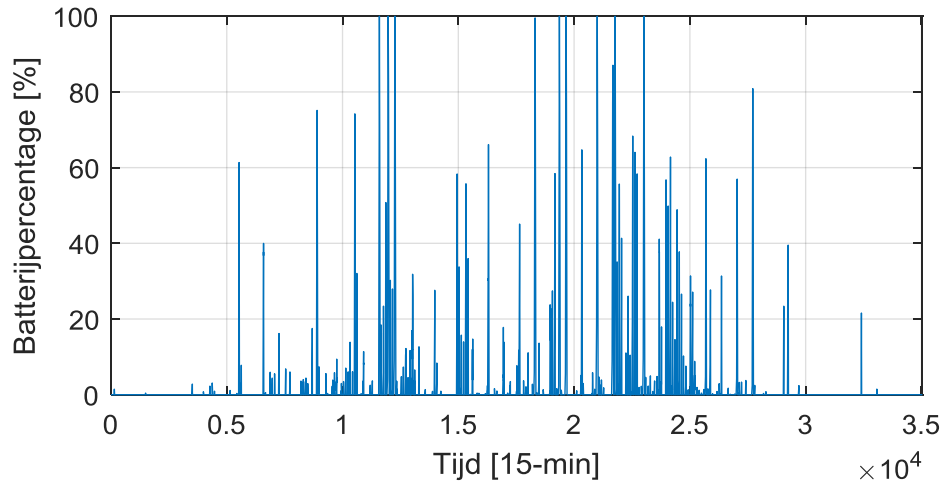


Figuur 76: Optimumbepaling

Via deze methode wordt de mate van verandering gezocht in de afgeleiden. Echter kan hier opgemerkt worden dat zowel de 1^{ste} evenals de 2^{de} afgeleide weinig prijs geven. Er kunnen geen duidelijke kantelpunten gevonden worden. Dit is terug te wijten aan de verhouding van te kleine productie versus verbruik.

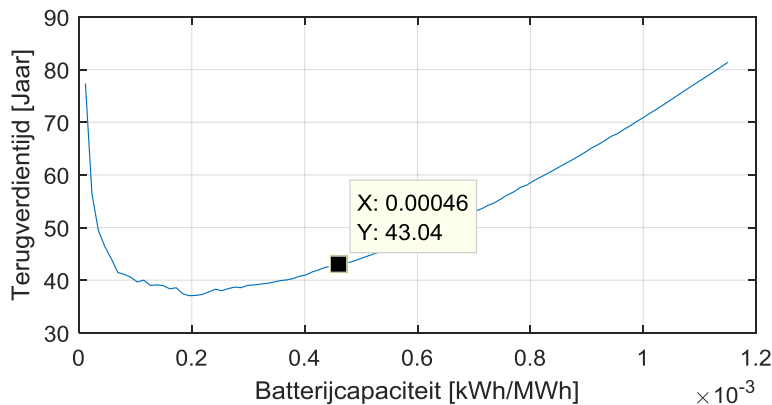
We zien een eerste kantelpunt op 0.46 kWh/MWh, maar dit is geen duidelijk punt om te bepalen voor een optimumsituatie. Dus wordt hier direct opgemerkt dat hier opslag integreren niet snel tot korte terugverdientijden zal leiden. Dus hier moet zeker geopteerd worden voor een kleine batterijbank om de kost minimaal te houden. Vanaf 0.6 kWh/MWh is het totaal zinloos om nog een batterijbank te installeren voor de site, mits er bijna geen verhoging in Zc meer bereikt wordt.

Bij een batterijbank van 1 kWh/MWh slaagt men erin al de overtollige energie op te slaan en dus niks meer in het distributienet te injecteren. De batterijen verbruiken echter weinig cycli door de kleine PV overschotten. Als we even kijken naar de batterij benutting, uitgedrukt in %, zien we dat voornamelijk in de zomermaanden injectie in het distributienet mogelijk is en daar ook de batterijbank wordt gebruikt. In de wintermaanden zal de batterij passief in de installatie aanwezig zijn.



Figuur 77: Batterijbank 1 kWh/MWh voor het vermijden van injectie in distributienet

Door het integreren van een batterijbank van 1 kWh/MWh verbruik, worden er 41 cycli per jaar bereikt. Voor deze batterij zou dit neerkomen op een levensduur van 30 jaar, puur gerekend op cycli verbruik. Dit is natuurlijk niet realistisch, mits ook temperatuur, ontlad- en oplaadstroom, ... hier een rol zullen spelen in de levensduur van de batterijbank. Dit komt later nog aan bod.



Figuur 78: Terugverdientijd versus batterijcapaciteit

Als we kijken naar de terugverdientijd (economische evaluatie), zien we ook hier terug dat de batterijcapaciteit beperkt moet blijven voor de beste/laagste terugverdientijd te bereiken. Echter kan hier opgemerkt worden dat het economisch optimum nog lager ligt dan eerder vermeld. Met een batterijcapaciteit van 0.46 kWh/MWh dimensioneren zal een terugverdientijd vereist zijn van 43 jaar. Dit terwijl de batterijbank zelf maar een levensduur heeft van 30.56 jaar als deze correct wordt gebruikt.

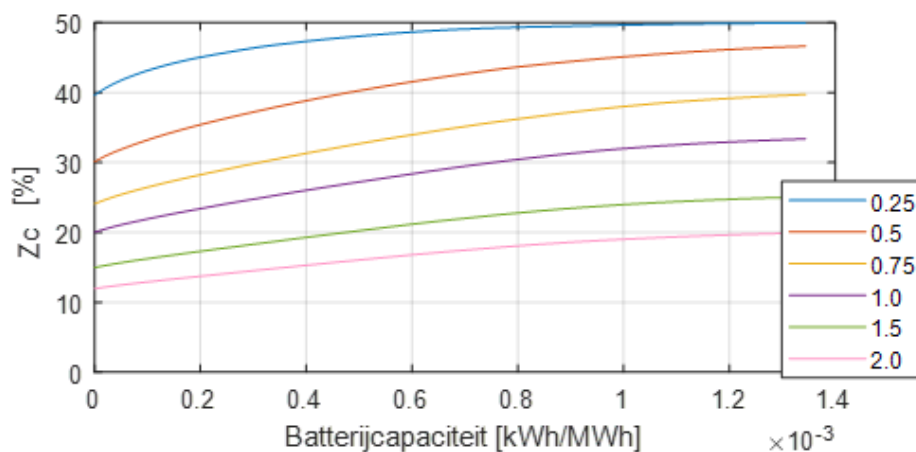
Om een kostenoptimalisatie te behalen, moet het aantal cycli per jaar van de batterijbank stijgen. Vandaar zien we in het economische optimum dat bij een batterijbank van 0.2 kWh/MWh gelegen is. Daar bereiken we een terugverdientijd van 37.11 jaar. De batterij bereikt nog steeds amper 51 cycli en de levensduur van de batterijen is dan gelegen op 24.55 jaar. Dus hoe we deze case ook pogen te dimensioneren, er zal geen positieve case behaald worden voor batterijopslag door de lage injectie in het distributienet.

1.2.2. Optimale zelfconsumptie en zelfvoorziening

Voor het vinden van de optimale zelfconsumptie en zelfvoorziening is het van belang dat er wordt gevarieerd met zowel de opslagcapaciteit evenals de productie van hernieuwbare energie. Uit 2.1.1 bleek dat er een hoge zelfconsumptie werkt bereikt door het plaatsen van een kleine productie installatie, echter is dan ook de investering van opslag minder interessant. Hier wordt onderzocht in welke mate de productie mag stijgen om een techno-economisch optimum te vinden. Voor elk van deze situaties zou er terug via de methode van afgeleiden moeten bekeken worden welke een optimale terugverdientijd kan bereiken.

Tabel 7: Zelfconsumptie versus opbrengst/verbruik verhouding

Zc [%]	Ratio opbrengst/verbruik					
Batterijopslag [kWh/MWh]	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2
0	79,2%	60,2%	48,2%	40,0%	29,9%	23,9%
0.25	91,5%	72,7%	58,1%	48,2%	35,6%	28,2%
0.5	96,1%	80,5%	65,3%	54,4%	40,5%	32,1%
0.75	98,4%	86,4%	71,4%	59,9%	44,8%	35,5%
1	99,3%	90,2%	76,0%	63,9%	47,9%	38,0%
1.25	99,8%	92,7%	78,8%	66,2%	49,7%	39,5%

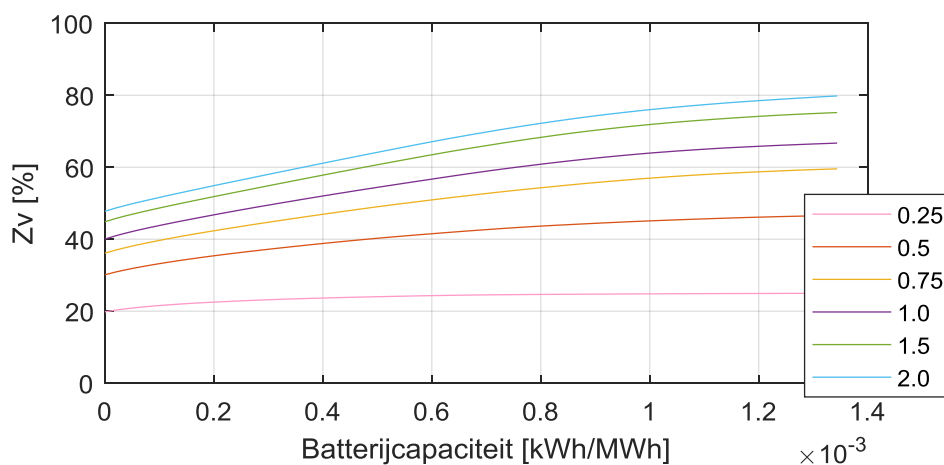


Figuur 79: Stijging van zelfconsumptie versus variërende batterijcapaciteit

In onderstaande tabel is een overzicht weergegeven bij variatie opbrengst/verbruik in combinatie met batterijopslag. De **zelfvoorziening** staat voor het aandeel van de **gevraagde energie** die men **ogenblikkelijk zelf kan voorzien**. Het is de verhouding van de gevraagde energie die zelf geproduceerd werd op de totaal gevraagde energie.

Tabel 8: Zelfvoorziening versus opbrengst/verbruik verhouding

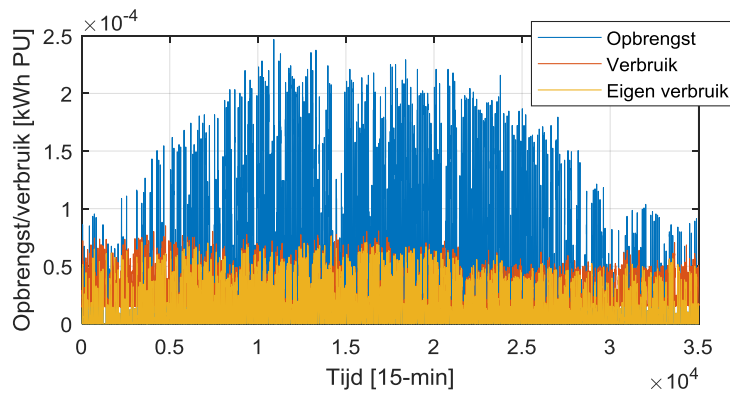
Zv [%]	Ratio opbrengst/verbruik					
Batterijopslag [kWh/MWh]	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2
0	19,9%	30,1%	36,1%	40,0%	44,9%	47,8%
0.25	22,9%	36,3%	43,6%	48,2%	53,3%	56,5%
0.5	24,0%	40,3%	49,0%	54,4%	60,7%	64,1%
0.75	24,6%	43,2%	53,5%	59,9%	67,2%	71,0%
1	24,8%	45,1%	57,0%	63,9%	71,8%	76,0%
1.25	24,9%	46,3%	59,0%	66,2%	74,5%	78,9%



Figuur 80: Stijging van zelfvoorziening versus variërende batterijcapaciteit

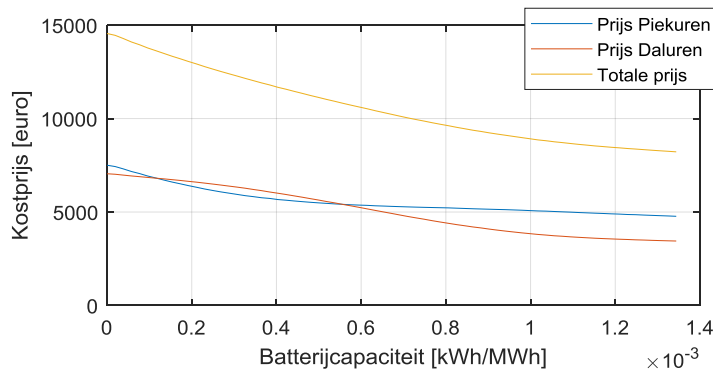
Zowel de zelfconsumptie evenals de zelfvoorziening stijgen bij de integratie van batterijopslag. Zo kan ook opgemerkt worden dat voor deze case er door de integratie van meer decentrale energieproductie, er betere cases ontstaan voor de integratie van opslag. Het mag dan ook duidelijk zijn dat opslag enkel maar nut zal hebben als er voldoende overschotten zijn van de hernieuwbare energiebronnen die anders in het distributienet geïnjecteerd worden.

Vele bedrijven denken dat het ideaal is om evenveel te produceren als te verbruiken op jaarbasis, deze case zal hieronder dan ook even verder uitgerekend worden naar haalbaarheid voor batterijopslag.



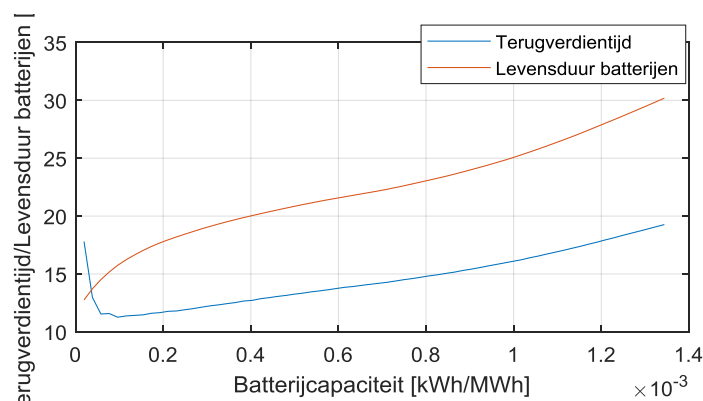
Figuur 81: Opbrengst, verbruik en eigenverbruik voor 1/1 ratio

Zonder opslag kan voor bedrijf ABC opgemerkt worden dat er een zelfconsumptie en zelfvoorziening bereikt wordt van 40.03 %. Door de methode met de afgeleiden toe te passen, kan opgemerkt worden dat er een eerste optimumpunt bereikt wordt bij 0.73 kWh/MWh. Hierbij wordt een Z_c en Z_v behaald van 59.53%.



Figuur 82: Kostprijsberekening ifv variërende batterijcapaciteit

De kostprijs kan serieus dalen door integratie van opslag. Natuurlijk moet hier de afweging gemaakt worden tussen de kostprijs van de opslagcapaciteit versus de reductie in de kostprijs voor de klant.



Figuur 83: Terugverdientijd & levensduur ifv variërende batterijcapaciteit

Daarnaast kan opgemerkt worden dat bij een 1/1 ratio verbruik versus opbrengst, de levensduur van de batterijbank groter is dan de terugverdientijd van de installatie, wat het dus ook voordelig maakt om te investeren in opslag. Opgelet, in deze simulaties werd wel enkel de batterij & omvormerprijs in

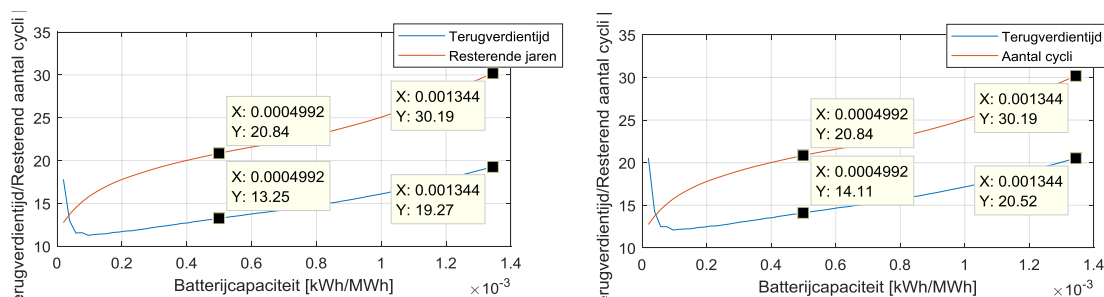
rekening gebracht (geen netkosten,...). Het aantal verbruikte cycli bij 0.73 kWh/MWh ligt op een kleine 300. Dit zou iets minder dan 1 cycli per dag zijn.

Bedrijf ABC kan ook opteren om zo weinig mogelijk in het net te injecteren en op basis daarvan een dimensionering naar opbrengst/opslag te realiseren. Hieronder worden voor bovenstaande ratio opbrengst/verbruik en variatie batterijopslag getoond in welke mate men nog in het net zal injecteren op basis van het verbruiksprofiel van bedrijf ABC en zo eigenlijk netcongestie zal vermijden.

Tabel 9: Injectie net versus ratio opbrengst/verbruik

Injectie net [%]	Ratio opbrengst/verbruik					
	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2
Batterijopslag [kWh/MWh]						
0	5,19	19,88	38,88	59,97	105,15	152,22
0.25	2,13	13,67	31,44	51,85	96,65	143,55
0.5	0,97	9,74	25,99	45,6	89,32	135,86
0.75	0,39	6,81	21,47	40,1	82,81	128,97
1	0,17	4,89	18,02	36,05	78,11	123,98
1.25	0,04	3,66	15,92	33,8	75,4	120,97

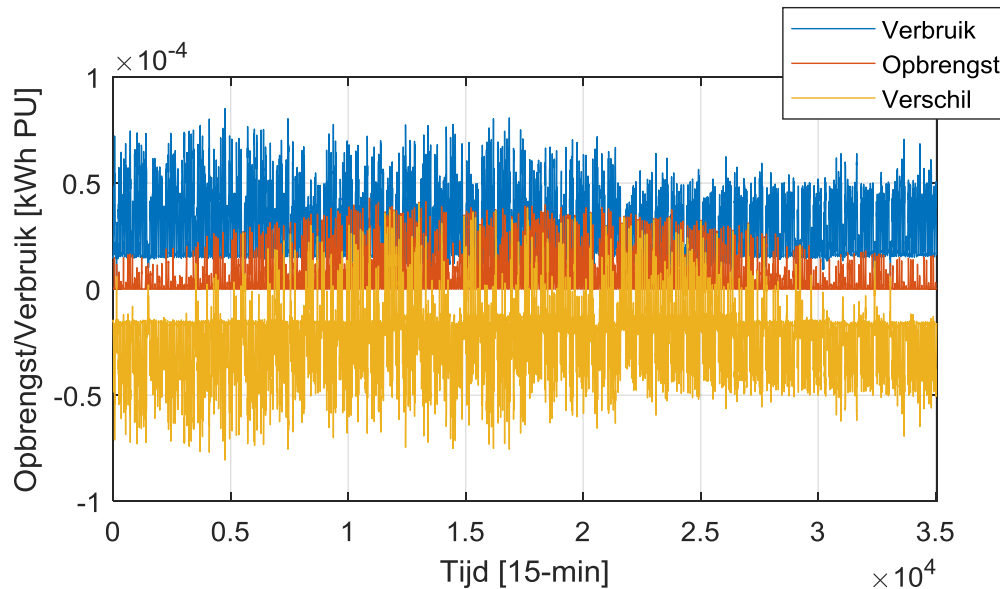
In alle vorige simulaties is er geen netvergoeding gerekend voor het injecteren van elektriciteit in het distributienet. Echter zal dit het economisch verhaal ietwat verslechteren door de integratie van opslag. Hieronder wordt dan nog een simulatie uitgevoerd waarbij er gekozen wordt voor een **1/1 ratio** verbruik/opbrengst met een **batterijopslag van 0.5 kWh/MWh** en wordt gekeken in welke mate die vergoeding een impact heeft op de terugverdientijd. Links zien we dat als er geen injectietarief gekregen wordt, men terugvalt op een terugverdientijd van 13.25 jaar, terwijl dit met een injectievergoeding neerkomt op 14.11 jaar.



Figuur 84: Terugverdientijd versus aantal cycli

1.2.3. Analyse overbrugging 30-min

Opgelet, in deze simulaties gaan we ervan uit dat de uitval aangekondigd is, zoals dit ook wel meestal het geval is bij een tijdelijke stroomonderbreking. Door de kennis dat er een uitval aangekondigd is, wordt er dus ook rekening gehouden dat de batterijen op voorhand opgeladen worden van ofwel decentrale energieproductie als deze aanwezig is, ofwel vanuit het distributienet als er geen of te weinig decentrale energieproductie is.

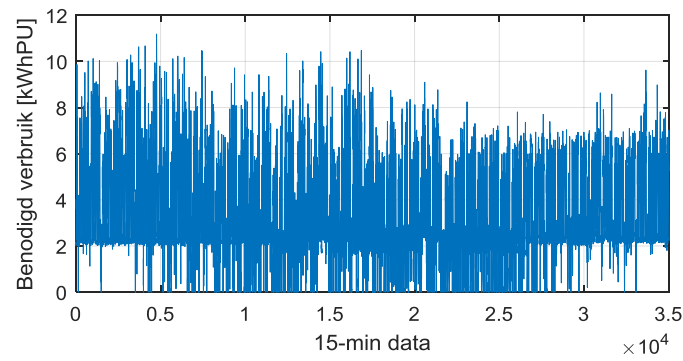


Figuur 85: Verbruiks- en opbrengstprofiel

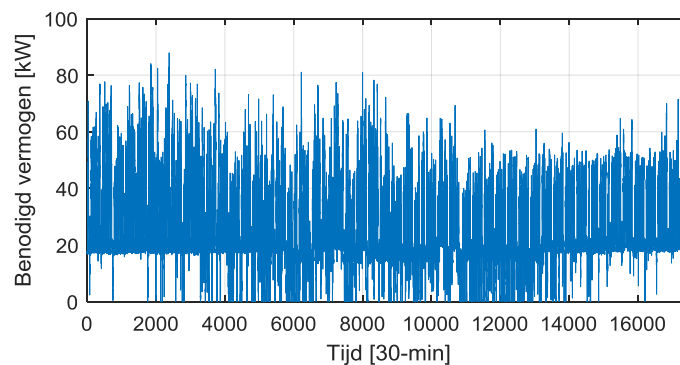
In het verleden werd een afschakelplan of ook wel schaarsteplan voorzien. Dit kondigt aan wanneer er een uitval kan plaatsvinden. Zo kan men anticiperen indien men op voorhand weet wanneer men afgeschakeld wordt. Daarnaast worden ook werkzaamheden aan straten op voorhand aangekondigd en kan men daar dus ook anticiperen. Vandaar wordt er in deze case vanuit gegaan dat dit hier ook het geval is en dat de batterijbank op voorhand zowel vanuit de decentrale energieproductie, evenals vanuit het distributienet kan opgeladen worden.

Op figuur 85 wordt het verschil op kwartierbasis tussen opbrengst en verbruik weergegeven. Zo kan voor deze case met kleine PV-installatie direct opgemerkt worden dat er relatief weinig injectie in het distributienet plaatsvindt. Hierbij kan al direct bij een stroomtekort opgemerkt worden dat de kans groot is dat de batterijbank zal moeten bijgeladen worden vanuit het distributienet. Vanuit de eerste simulatie was er geopteerd voor een batterijbank van **64 kWh effectieve batterijbankopslag (0.46 kWh/MWh)**.

Figuur 86 heeft het benodigd verbruik weer per kwartier. Hierbij wordt rekening gehouden met de direct opgewekte PV-energie die onmiddellijk in de installatie wordt gebruikt. Van daaruit kan nu het benodigd vermogen per 30 minuten berekend worden in figuur 87, zodanig men kan inschatten welke componenten men zal nodig hebben om die 30 minuten uitval te overbruggen en het vermogen te kunnen leveren. Daarnaast kan er ook beslist worden bij een te hoog vermogen dat enkel de kritische lasten blijven werken in het bedrijf om zo het omvormervermogen voor eilandwerking te kunnen beperken.

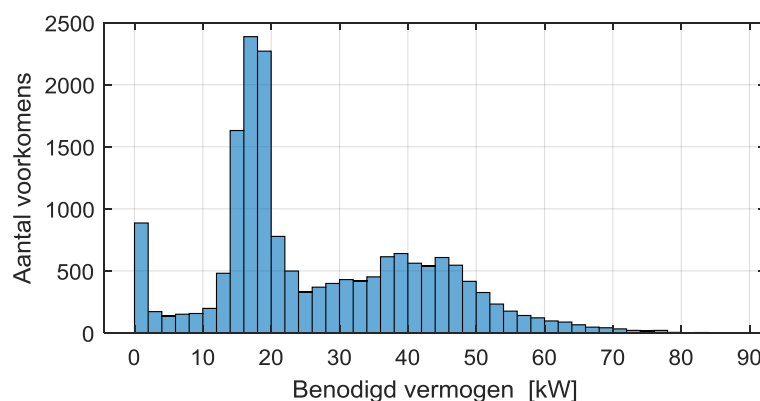


Figuur 86: Benodigd verbruik in kwartierbasis



Figuur 87: Benodigd vermogen per 30-minuten

Het **maximumvermogen dat kan voorkomen bedraagt 87.88 kW**. Men moet dus in staat zijn om die waarde te overbruggen met de beschreven batterijbank. 0.46 kWh/MWh verbruik komt overeen met een effectieve batterijcapaciteit van **64 kWh**. Diezelfde batterijbank moet dus in staat zijn om 87.88 kW leveren in 30-minuten. Zomaar uit de losse pols kan niet verteld worden als dit al dan niet zal lukken, daarvoor moet gekeken worden naar de batterijspecificaties van de gekozen batterij en de snelheid waarmee dat deze batterij zijn beschikbaar vermogen kan afleveren om gedurende 30-minuten te overbruggen.



Figuur 88: Aantal voorkomens van een bepaald vermogen per 30 minuten

Figuur 88 creëert een beter inzicht in voorgaande figuur waaruit het maximum vermogen bepaald werd. Zo kan opgemerkt worden dat het piekvermogen van 87.88 kW uitzonderlijk is. Meestal wordt er een vermogen gevraagd tussen 0 en 50 kW.

De batterij waarmee de simulaties gedaan werden, wordt hieronder verder besproken om te kijken tot welk vermogen het haalbaar is om dit in een halfuur af te leveren. De C-rate is hierbij een belangrijke parameter. Op de kenplaat van de batterijen wordt meestal de C20 waarde weergegeven, ook de batterij die was uitgekozen had een capaciteit van 1150 Ah als C20-waarde.

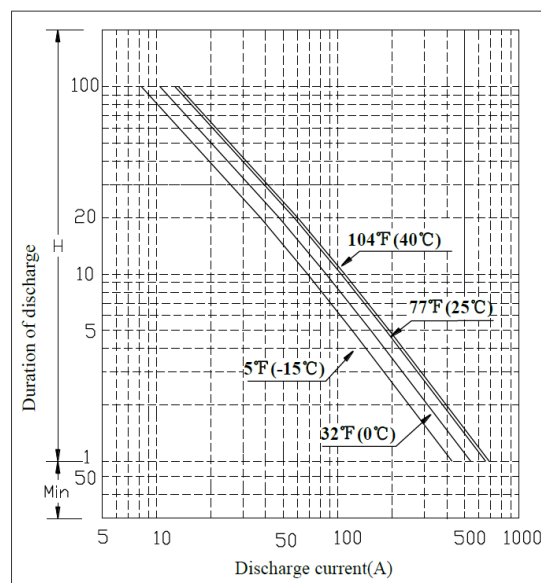
Deze parameter toont in figuur 89 direct aan dat er een verlaagde capaciteit is indien men de batterij met een hogere stroom zal ontladen. Dit betekent dat de 64 kWh die men oorspronkelijk beschikbaar had, zal verlaagd worden indien de batterijbank zwaar ontladen wordt.

Capacity 77°F (25°C)	100 hour rate (12.75A to 1.85Volts)	1275AH
	20 hour rate (57.5A to 1.75Volts)	1150AH
	5 hour rate (189A to 1.7Volts)	945AH

Figuur 89: C-rate

Als 5C-waarde is er 945 Ah beschikbaar en wordt er 189A gedurende deze periode. Terwijl als de batterij traag ontladen wordt (vb. continue 12.75A gedurende 100 uur) zal de capaciteit van de batterijbank toenemen naar zelf 1275 Ah en de benutbare capaciteit toenemen. Voor de bovenstaande berekeningen hadden we gewerkt met de C/20 waarde of een werkelijke capaciteit van 1150Ah.

Voor deze toepassing moeten ervoor gezorgd worden dat de batterij nog voldoende capaciteit overheeft als we deze ontladen op de **2C-waarde (= ontlading in 30 minuten)**. Daarvoor wordt er gekeken in figuur 90. Ook de temperatuur zal een belangrijke rol spelen voor de beschikbare capaciteit.



Figuur 90: Duur van ontlading versus ontlaadstroom

- C/20-waarde = 1150 Wh
- C2-waarde = 850 Wh (afgeleid uit bovenstaande grafiek)

Als we kijken naar de 2C waarde, bereiken we een **ontlaadstroom** tussen de **850 en 900A**. Laten we uitgaan van worst case scenario, dan bereiken we een ontlaadstroom van **850A in 30 minuten**. Dus

hebben we 425Ah beschikbaar en het is een 2V batterijcel, dus **in werkelijkheid beschikken we over 850 Wh ipv 1150 Wh**, we zullen dus een sterk verlaagde batterijcapaciteit hebben van de totale batterijbank. We spraken over een totale grootte van **64 kWh effectieve opslag**, maar in dit geval voor het ontladen in een halfuur, spreken we over **47.3 kWh effectief benutbare capaciteit**.

Omgerekend wordt dit dus 94.6 kW die beschikbaar kan worden gesteld voor dat halfuur. Dit voldoet aan de grootste elektriciteitsvraag. Dus kan worst case scenario, de batterijbank op voorhand opgeladen worden om ervoor te zorgen dat er te allen tijde voldoende buffer is om in eiland te werken.

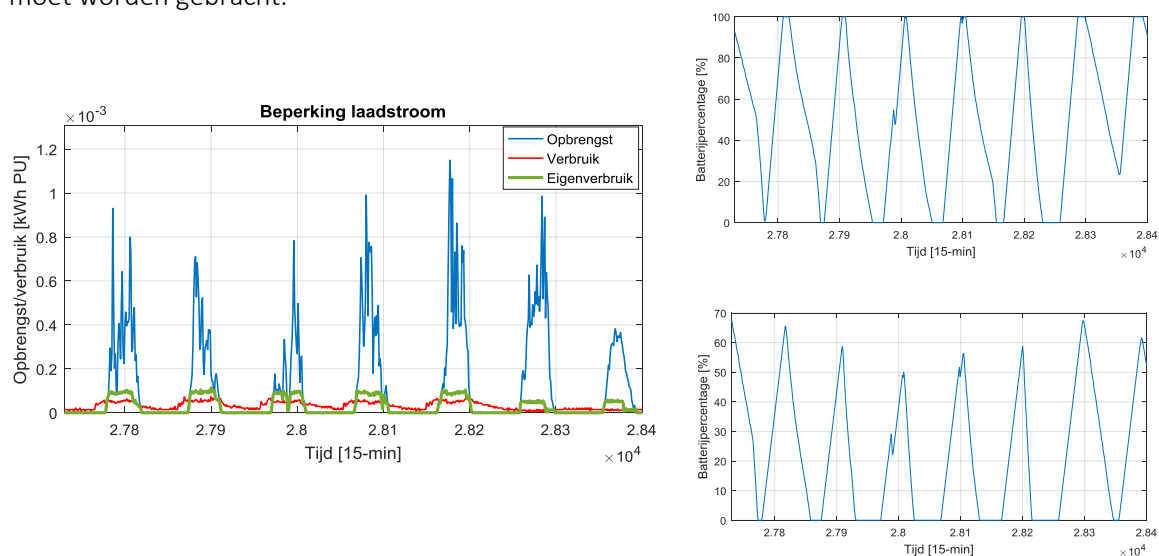
1.3. Randvoorwaarden opslagcapaciteit

Er zijn heel veel invloedsfactoren op de levensduur van de opslagcapaciteit. Zo moet er voldoende kennis zijn welke parameters van invloed zijn en de levensduur van de opslag bevorderen of net niet. Diverse parameters worden hieronder besproken.

1.3.1. Opladen van de opslagcapaciteit

Het is niet omdat er een groot overschot is aan zon of windproductie, dat deze productie ook allemaal onmiddellijk opgeslagen kan worden. Er is een oplaadbeperving die bij de ene opslagcapaciteit al wat groter is dan bij de andere. Vb. Batterijopslag wordt meestal beperkt opgeladen met een stroom die 10 à 20% bedraagt van de C20-rate. Indien men dus opteert voor een batterijbank van 1150 Ah C20-rate, dan raadt men aan om de batterijbank op te laden met een stroom tussen de 115 en 230A. Dit is een vuistregel, afhankelijk van het batterijtype kan het ook zijn dat de batterij zwaarder kan opgeladen worden zonder consequenties voor de levensduur van de batterijbank.

Onderstaand voorbeeld toont een bedrijf met een serieuze overproductie van hernieuwbare energie, hierbij kan opgemerkt worden dat, als er batterijopslag bij dit bedrijf toegepast wordt, er afhankelijk van het gekozen batterijtype, maar beperkt kan opgeslagen worden in de batterijbank. Door die beperking in oplaadstroom is het zelf mogelijk dat, met zo een grote overproductie, het bedrijf toch niet voldoende snel energie kan opslaan in de batterijbank om de rest van de dag te kunnen overbruggen of om de batterijbank volledig op te laden. Dit is een parameter die zeker in rekening moet worden gebracht.



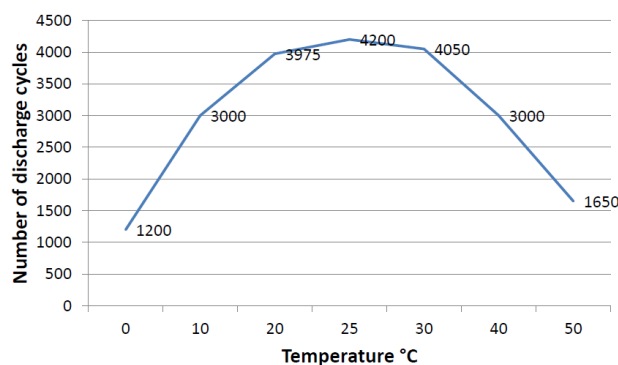
Figuur 91: Beperking oplaadstroom

In figuur 91 wordt een voorbeeld van oplaadbeperving weergegeven. In de bovenste deelfiguur aan de rechterzijde is de oplaadstroom 80A, hierbij kan gezien worden dat de laadstroom net voldoende is om de batterijbank iedere dag tegen de middag op te laden en zo de opgeslagen energie s 'avonds terug te kunnen gebruiken. Hierbij wordt een zelfconsumptie van 88,4% bereikt. Stel dat batterijen worden gekozen waarbij de oplaadstroom maximaal 40A mag zijn, kan de batterijbank zelf niet volledig opgeladen worden ($Z_v = 81.32\%$), desondanks de extreem grote overproductie. Het is dus belangrijk om te onthouden dat een overproductie niet direct leidt tot een hogere zelfconsumptie, maar dat er veel afhankelijk is van de parameters van de gekozen batterijen.

1.3.2. Temperatuursinvloed

Eerder werd al aangehaald dat temperatuur ook een invloed uitoefent op de capaciteit en de levensduur van de batterijbank. In eerste instantie zal het een directe invloed hebben op de beschikbare opslagcapaciteit. Zo zal bij een koudere omgevingstemperatuur de batterij een verlaagde opslagcapaciteit bevatten dan opgegeven in de specificaties. Indien de omgevingstemperatuur terug 25°C zou worden, zal de opslagcapaciteit terug stijgen.

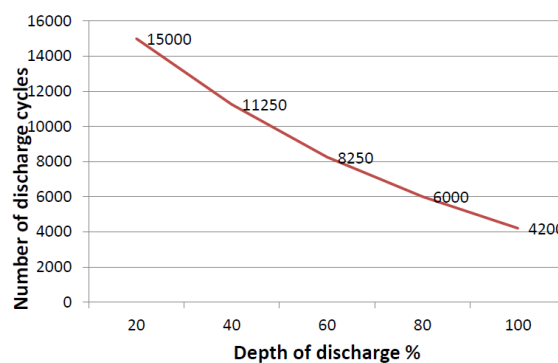
Daarnaast zal een langdurige blootstelling aan verhoogde temperaturen ook leiden tot een verlaagd aantal cycli en zal dus de levensduur van de opslagcapaciteit sterk dalen. Onderstaand werd uit een technische fiche van batterijopslag weergegeven in welke mate de temperatuur een invloed uitoefent op het aantal cycli die de batterijbank zal werken.



Figuur 92: Ontlaaddiepte & temperatuur versus aantal cycli

1.3.3. Depth of discharge (DOD)

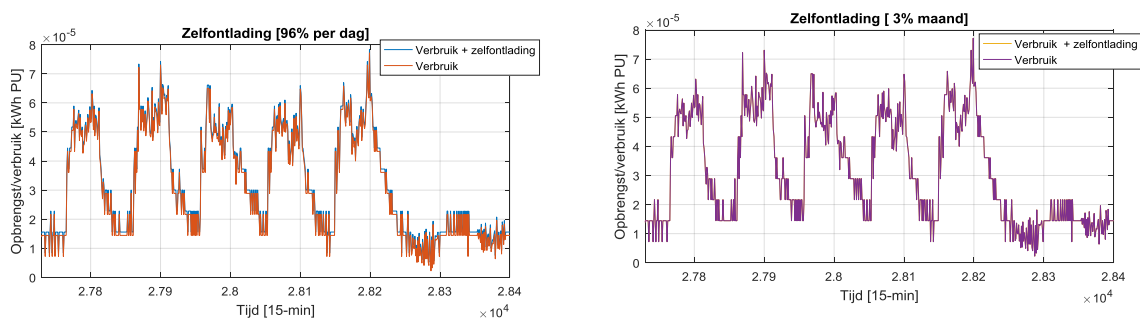
Voor opslagcapaciteit mag het nu al reeds duidelijk zijn dat er veel afhankelijk is van hoe deze wordt gebruikt of in welke situaties deze benodigd is, er is dus een duidelijke voorstudie nodig om een correcte keuze te maken van de opslagcapaciteit. Ook de DOD of diepte van ontlading is terug een belangrijke factor. Als men een bepaalde opslagcapaciteit koopt, zal niet alle energie vanuit die opslagcapaciteit kunnen gebruikt worden als men een optimale levensduur wil behalen.



Figuur 93: Diepte van ontlading versus aantal cycli

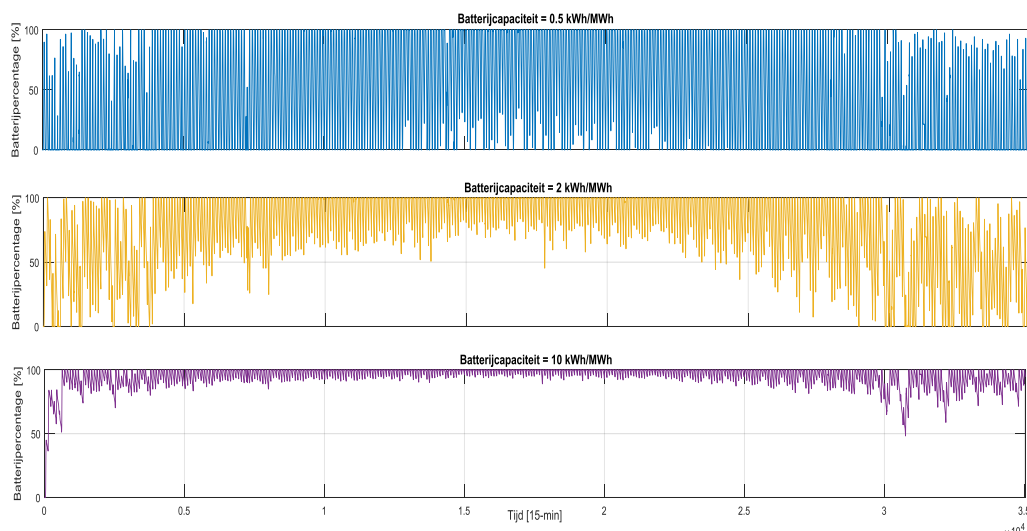
1.3.4. Zelfontlading

Hoe lager de zelfontlading, hoe meer er de mogelijkheid ontstaat om seizoensopslag te doen. De ene opslagtechnologie zal zich hiertoe meer lenen dan de andere opslagtechnologie. Terug voor batterijen kan ook opgemerkt worden dat nikkel-ijzerbatterijen een hogere zelfontlading hebben dan loodzuur of Li-ion batterijen. Natuurlijk zijn er veel verschillende soorten varianten en moet altijd de technische fiche van de batterij bekeken worden en de zelfontlading zo in rekening gebracht worden. Deze zelfontlading moet ook in acht gehouden worden en zal ook leiden tot een lagere zelfvoorziening. De zelfconsumptie zal stijgen door het in rekening brengen van de zelfontlading door het hogere verbruik die wordt verkregen. Niet alle energie die in de opslagcapaciteit geplaatst wordt zal er ook terug uit gehaald worden. Naast de warmteverliezen zal dus ook zo een rendementsdaling plaatsvinden door de zelfontlading van het systeem.



Figuur 94: Zelfontlading

1.3.5. Batterijbenutting



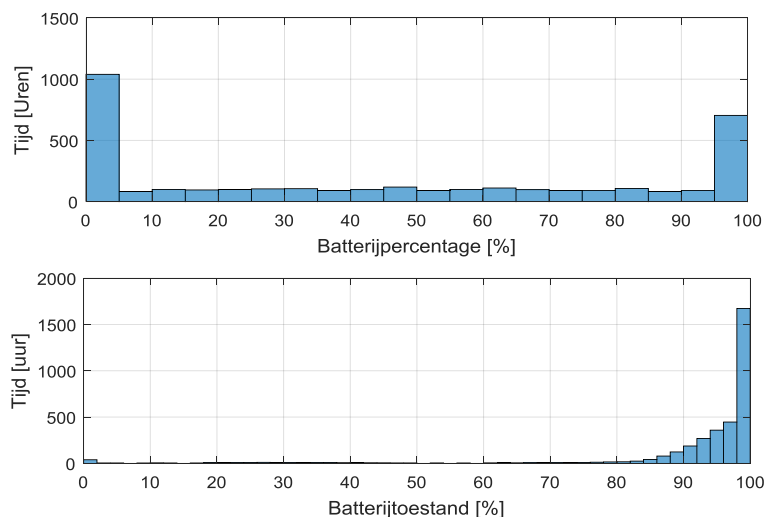
Figuur 95: Batterijbenutting op jaarbasis

Batterijbenutting is best een interessante parameter die ook het economisch verhaal in kaart kan brengen. Eerder werd al opgesomd hoe een systeem kan gedimensioneerd worden zodanig een correcte opslagcapaciteit bereikt wordt. Natuurlijk zal deze opslagcapaciteit leiden tot een verhoogde zelfconsumptie en zelfvoorziening, maar kan men in de meeste gevallen niet volledig onafhankelijk worden.

Velen denken nog steeds dat, indien er meer opslag geplaatst wordt dan het technologisch optimum dit nog steeds zal leiden tot een mooie stijging in zelfconsumptie en zelfvoorziening. Echter treedt, net

door het karakter van de opbrengst- en verbruiksprofielen relatief snel een verzadiging op van het profiel en zullen beide factoren slechts weinig toenemen. In figuur 95 kan dan ook duidelijk opgemerkt worden dat als er een extreem grote batterijbank gekozen wordt, de benutting van deze bank ook uitermate laag is. Zo wordt bij een batterijcapaciteit van 10 kWh/MWh verbruik, de batterij opgeladen, éénmaal opgeladen geraakt deze batterij in de zomer nooit meer volledig ontladen en wordt de batterij gebruikt om langere termijnopslag te realiseren. Echter moet men hier van bewust zijn dat de batterijen weinig cycli zullen bereiken en dus ook een theoretische lange levensduur hebben. Door praktische aspecten zoals temperatuur, degradatie,... zal dit praktisch echter afwijken. Vandaar is het dan ook van uitermate groot belang om voldoende cycli te behalen met de opslagcapaciteit. Men zou toch moeten mikken op een minimum van 1 op- en ontladcycli per dag om te kunnen spreken van een voldoende efficiënt toegepast systeem. Vandaar is een kleine batterijbank dus zeker interessant omdat dit zowel technologisch evenals economisch tot een beter optimum en hogere benutting zal leiden.

Een ander punt dat ook zeker moet vermeld worden is dat bij een kleine batterijbank deze wel veel tot het minimum zal ontlad worden, een goede BMS moet er dan ook voor zorgen dat het systeem zeker niet te diep kan ontladen worden, anders zal dit zeer nadelig zijn voor het aantal cycli van de batterijen. Er moet dus te allen tijde afgetoetst worden welk type opslag er aanwezig is en hoe deze moet gebruikt worden.



Figuur 96: Batterijtoestand versus benutting

1.3.6. Totaalrendement

Het totaalrendement van een systeem is ook van groot belang. Afhankelijk van de gekozen technologie & topologie kunnen rendementen sterk afwijken.

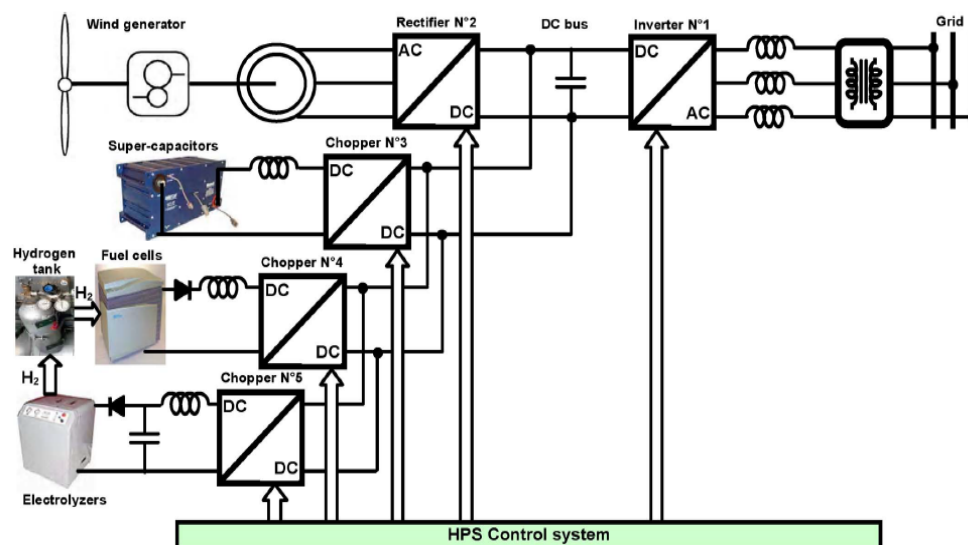
Hoofdstuk 3: ‘Ontwerp van een hybride opslagsysteem’

1. Inleiding

In hoofdstuk 2 werd besproken welke opslagcapaciteit men zou moeten beschikbaar hebben. Dit werd uitgevoerd op basis van kwartierdata omdat dit de meest verkregen tijdswaarde is die beschikbaar is bij bedrijven. Zo kan een eerste inschatting gemaakt worden over welke opslag er beschikbaar moet gesteld worden. Maar door uitmiddeling op kwartierbasis werden nooit opslageenheden zoals supercapaciteiten of andere aangehaald. In hoofdstuk 3 werd daarom dieper ingegaan op het tijdsresolutie aspect. De dimensioneringsmethode in hoofdstuk 2 kan echter ook voor kleine tijdsresoluties gedaan worden en zo kan een veel beter idee gekregen worden van de correcte opslagcapaciteit. In hoofdstuk 4 wordt zowel rekening gehouden met korte tijdsresoluties en de dimensionering van de installatie om zo een hybride opslagsysteem te kunnen ontwerpen en een keuze te maken welke opslageenheden benodigd zijn in vermogen en energie om zo het bedrijf optimaal te ontlasten.

Het grote verschil tussen een conventioneel ‘energy storage system’ en een hybride opslagsysteem is dat bij een hybride opslagsysteem een betere afstemming wordt gemaakt tussen correcte opslageenheden vinden voor zowel vermogens- evenals energievraag, terwijl bij conventionele systemen een middenweg moet gezocht worden die afwijkt van het optimum. Echter omvat het hybride opslagsysteem wel een complexe sturing die bepaald welk type opslag aangesproken moet worden zodanig diverse opslagtechnologieën optimaal kunnen in gezet worden voor een optimalisatie te verkrijgen in de opbrengst- en verbruiksprofielen. Daarnaast kan zowel de systeemefficiëntie en de totale kost beperkt worden door gebruik te maken van een hybride opslagsysteem. De meest voorkomende hybride opslagtechnologieën zijn:

- Batterij – supercaps/vliegwheels
- Batterij – Batterij
- Batterij – brandstofcel & electrolyzer



Figuur 97: Voorbeeld hybride opslagsysteem

2. HESS structuur

Er zijn diverse HESS architecturen beschikbaar. De keuze van een bepaalde architectuur heeft een grote impact op het energiebeleid en de performantie van de toepassing. Zo zal de schaalbaarheid, energie-efficiëntie,... wijzigen afhankelijk van de gekozen architectuur.

2.1. Passieve parallel architectuur

Hierbij is er maar 1 conversie unit (DC-DC) beschikbaar waarop meerdere opslagtechnologieën gekoppeld worden. Het is natuurlijk een eenvoudig en besparend concept, maar zo wordt er ook een onderbenutting gerealiseerd van minstens 1 van de verschillende opslagsystemen. Dit heeft dan ook een beperkte schaalbaarheid omdat niet oneindig veel elementen kunnen in parallel gekoppeld worden. Daarnaast moeten de systemen ook op dezelfde spanningsniveaus werken wat meestal niet evident te vinden is voor diverse opslagtechnologieën. Zo blijft de spanning van een batterij gedurende een langere tijd constant, waardoor de DOD wordt begrensd. Een dergelijke configuratie is dus niet geschikt voor opslagenheden met een grote spanningsrange.



Figuur 98: Passieve DC-configuratie

2.2. Cascade architectuur

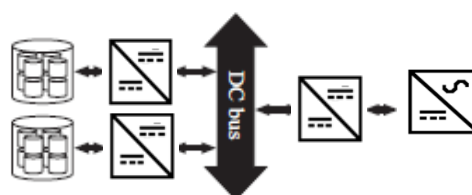
Via deze configuratie kan bij elk component een actief management gerealiseerd worden door het gebruik van een extra DC/DC omvormer. Tevens wordt, in tegenstelling tot daarnet een actief management van de SOC mogelijk gemaakt. Het grootste nadeel aan dit systeem is het gebrek aan vrijheid in opbouw en controle, gezien alles in serie wordt opgesteld. Zo beïnvloed de dimensionering van alle componenten elkaar. Daarnaast is er ook het gebrek in schaalbaarheid door grotere conversieverliezen omdat de energiestroom telkens door meerdere omvormers in serie passeert.



Figuur 99: Cascade DC-configuratie

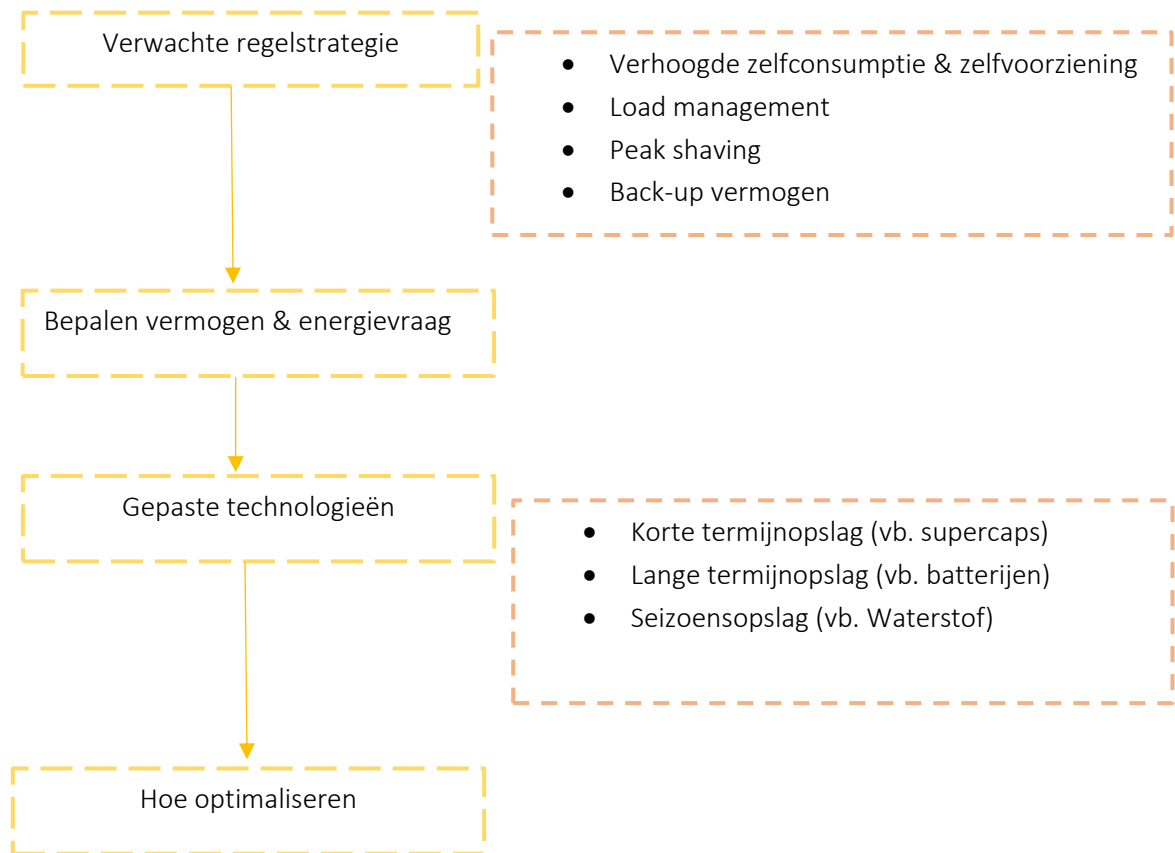
2.3. Common DC-bus architectuur

De laatste technologie is tevens ook de meest toepasbare technologie voor hybride opslagsystemen op te bouwen. De opslagsystemen worden gekoppeld op een gemeenschappelijke DC-bus zodanig een hogere vrijheidsgraad verkregen wordt. Problemen die voorkwamen bij de cascade architectuur worden deels weggewerkt. Zo zal de schaalbaarheid beter zijn, doordat de impact van de conversieverliezen beter beperkt kan blijven ten opzichte van de cascade structuur (niet meer dan 2 conversiestappen tussen opslag en netzijde). Daarnaast zullen de componenten nu ook optimaal kunnen fungeren en kan een betere controlestrategie uitgewerkt worden.



Figuur 100: Parallele DC-bus configuratie

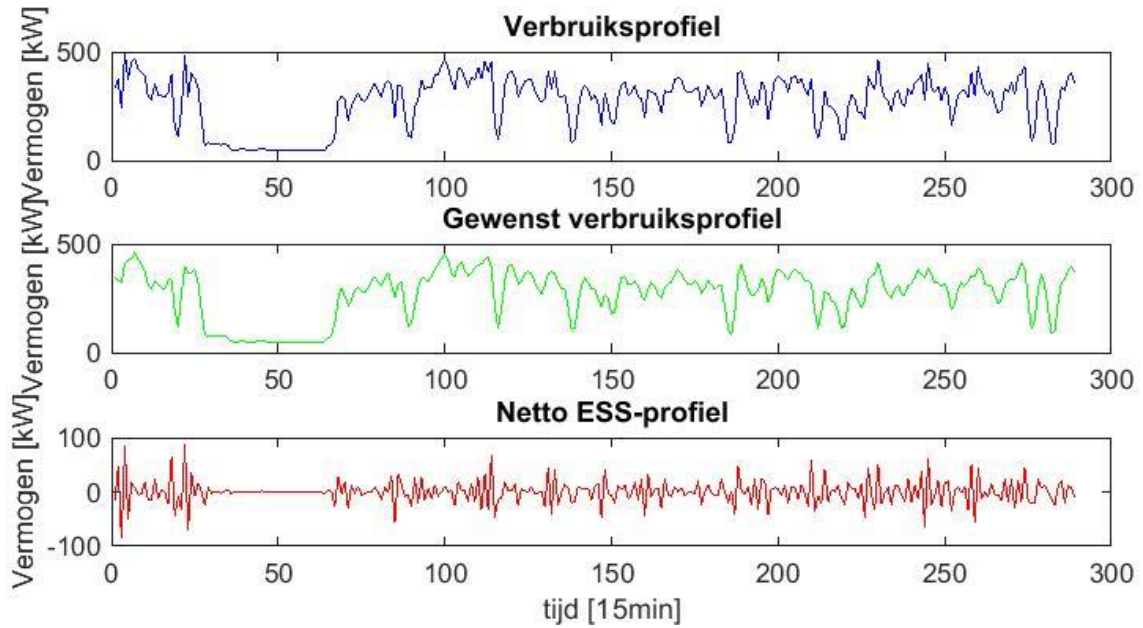
3. Stappenplan bij dimensionering van een HESS



Figuur 101: Stappenplan hybride opslag

3.1. Bepaling van gewenst lastprofiel

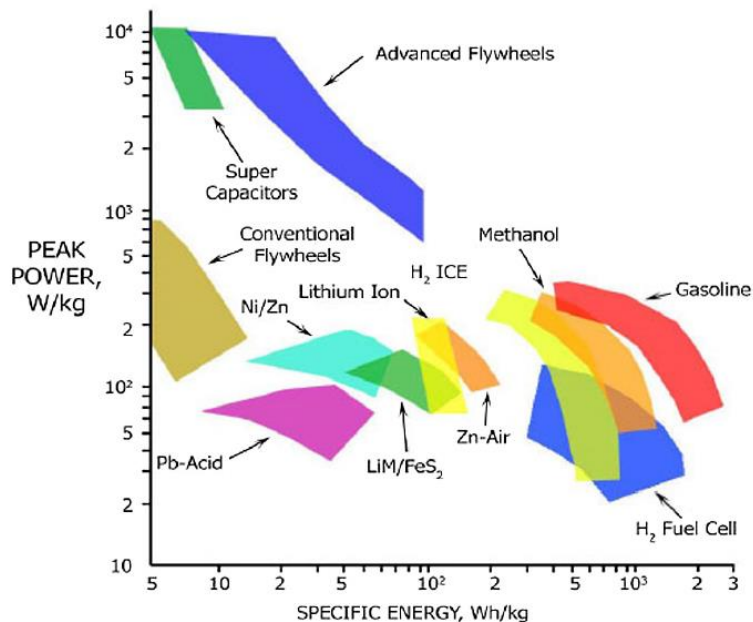
Eerst en vooral moet de gepaste regelstrategie worden bepaald in samenspraak met de klant. Wat is voor de klant prioritair? Is de klant aangesloten op een zwak distributienet waarop teveel uitval voorkomt of is het meer voor een optimalisatie van de energiestromen binnen het bedrijf zelf? Om te kunnen antwoorden op bovenstaande vraag voor een geschikt regelalgoritme te vinden is er natuurlijk ook data vereist. Aan de hand van de data kan opgemerkt worden indien er teveel afgenomen wordt van het distributienet,... en kan zo een geschikte regelstrategie gezocht worden. De klant kan vereisen dat vb. pieken in zijn profiel zoveel mogelijk worden afgevlakt om zo hoge boetes te vermijden. Zo wordt er een bepaald netto ESS-profiel verkregen die moet kunnen aangeleverd worden. Men moet er echter wel mee rekening houden dat niet alle regelstrategieën continue kunnen uitgevoerd worden. Er zullen moeten keuzes worden gemaakt dewelke prioritair zijn ten opzichte van andere. Zodanig wanneer er plots een uitval optreedt, dat er al niet teveel energie uit het systeem is door een optimalisatie van de zelfconsumptie en de zelfvoorziening en zo de uitval niet kan vermeden worden.



Figuur 102: Gewenst profiel HESS

3.2. Vermogen en energieomvang bepalen

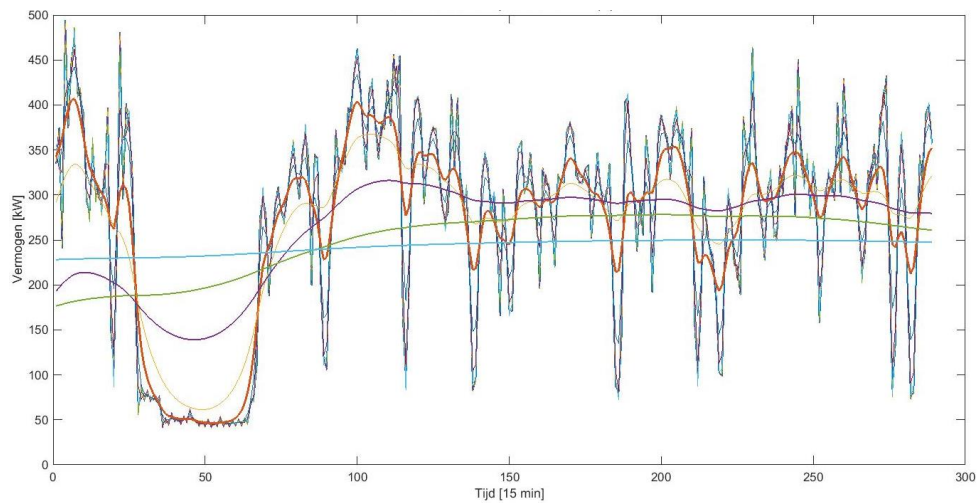
Om bovenstaand voorbeeld verder uit te diepen wordt hieronder een figuur weergegeven waarbij een verbruiksprofiel afgevlakt wordt in toenemende gradaties om zo te onderzoeken in welke mate piekafvlakking kan toegepast worden voor het bedrijf en welke opslagtechnologieën het netto profiel kunnen aanleveren.



Figuur 103: Ragone plot - Piekvermogen versus specifieke energie

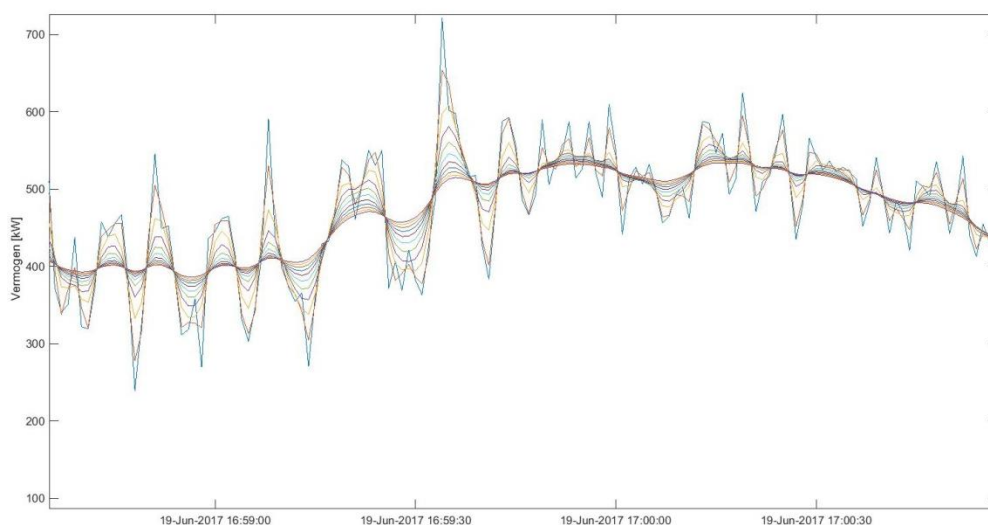
Het spreekt voor zich dat een beperkte afvlakking kan gerealiseerd worden met een opslagvariant die eerder vermogen ter beschikking stelt dan energie, terwijl een drastische afvlakking quasi evenveel

vermogen zal vergen maar nog veel meer energievolume. De verhouding vermogen t.o.v. energie zal dus wijzigen in functie van het gewenste eindresultaat.



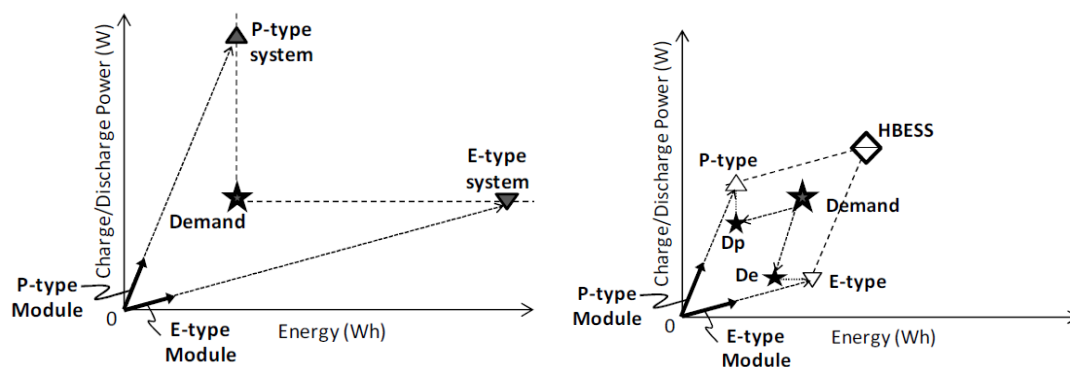
Figuur 104: Gradaties van piekafvlakking door korte en lange termijn opslag

Als vervolgens het gewenste profiel wordt bepaald volgens technische en economische overwegingen, betekent dit dat een bijkomende bouwsteen moet toegevoegd worden aan de elektrische installatie om dit wensprofiel te realiseren. Deze bouwsteen, een combinatie van één of meerdere opslagtechnologieën, zal energie opslaan en afgeven volgens een bovenliggend managementsysteem. Figuur 105 is een voorbeeldweergave van het profiel dat een hybride opslagsysteem dient te volbrengen om pieken te absorberen. Intern verdeelt dit hybride systeem de energie onder twee technologieën, waarbij de ene focust op energiedichtheid en de andere op vermogensdichtheid. Een instelbare grens bepaalt in dit voorbeeld wanneer welk subsysteem wordt aangesproken. Onder de grens wordt beroep gedaan op een minder dynamische technologie om energie uit te wisselen, bijvoorbeeld loodzuurbatterijen. Anderzijds wordt bij het overschrijden van de grens beroep gedaan op een technologie die de vereiste dynamica wel in zich heeft om vermogen te genereren of te leveren, zoals bv. vliegwheels. Dit voorbeeld is slechts een illustratie van één van de vele oplossingsstrategieën die kunnen gevolgd worden.



Figuur 105: Profiel HESS systeem met batterijen en vliegwheels

Ongeacht de strategie of behoefte van de eindgebruiker wordt telkens dezelfde oplossingsmethodiek toegepast: de wens van de eindgebruiker vertaalt het huidig lastprofiel naar een nieuw lastprofiel. Om deze hindernis te nemen is een opslagsysteem nodig dat afhankelijk van de wensen een bepaald vermogen en energievolume moet bezitten. Deze technische vereisten kunnen aangevuld worden met benodigde levensduur, duurzaamheid en investeringskost om tot één of meerdere technologieën te komen. Echter zal met 1 opslagsysteem nooit een optimum kunnen verkregen worden in zowel vermogen- evenals energie, maar zal een gulden middenweg moeten gezocht worden naar een gepast opslagtype die daar het dichtst bij aanleunt. Bij het combineren van opslagsystemen kan het ene opslagsysteem zich voornamelijk focussen op de vermogensvraag terwijl het ander gekozen wordt vanuit het standpunt energievraag om zo de werkelijke vraag van de klant beter te benaderen. Vervolgens wordt de procentuele bijdragen van elk subsysteem in het totaal systeem gevarieerd om een technisch optimum in te schatten van de grootte van elk bouwsteen.



Figuur 106: Vergelijking single storage en hybride storage

3.3. Technologiekeuze

Om technologieën uit te kiezen voor de P- en E-type componenten kan er gebruik gemaakt worden van selectiematrices. Die kunnen helpen door een bepaald gewicht te geven aan specifieke parameters van de opslagtechnologieën. Dit is natuurlijk een algemeen overzicht, dus indien specifieke gegevens aanwezig zijn van de technologie die men welk gebruiken, kan men deze gebruiken en zo een categorisatie maken van de opslageenheden en hun meerwaarde in het hybride opslagsysteem. In onderstaand voorbeeld wordt zo voor het vermogen te leveren, gekozen voor een supercapaciteit, terwijl een Li-ion batterij gekozen werd voor zoveel mogelijk aan de energievraag te voldoen.

Tabel 10: Keuze hybride

Criteria	Specific Energy	Specific Power	Energy Efficiency	Response time	Durability	Capital cost (\$/kWh)	Ease of Implementation	Total Points
Criterion Weight (ESS-E)	20	10	10	10	10	20	20	
Lead Acid	4	3	4	4	2	4	5	3.90
Li-ion	5	4	4	4	3	3	5	4.10
NaS	5	3	4	4	3	3	2	3.40
Flow Batteries	5	1	5	4	4	3	3	3.40
HSS	5	2	2	3	3	1	3	2.90
SC	2	5	5	5	5	2	4	3.60
SMES	2	5	5	5	5	2	3	3.30
Flywheel	3	5	4	5	5	2	2	3.40

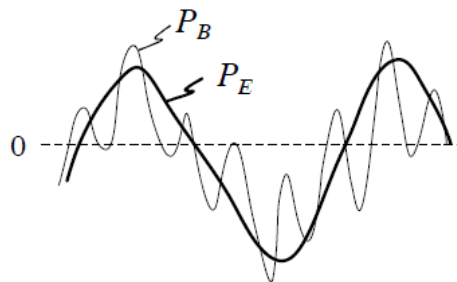
Criteria	Specific Energy	Specific Power	Energy Efficiency	Response time	Durability	Capital cost (\$/kW)	Ease of Implementation	Total Points
Criterion Weight (ESS-P)	10	20	10	15	10	20	15	
Lead Acid	4	3	4	4	2	3	5	3.55
Li-ion	5	4	4	4	3	2	5	3.75
NaS	5	3	4	4	3	2	2	3.10
Flow Batteries	5	1	5	4	4	2	3	2.85
HSS	5	2	2	3	3	1	3	2.70
SC	2	5	5	5	5	5	4	4.55
SMES	2	4	5	5	5	3	3	3.80
Flywheel	3	4	4	5	5	4	2	4.00

3.4. Optimalisatiemethodes

Om nu te bepalen hoe groot de P- en de E-component moeten zijn, kunnen diverse controle algoritmes toegepast worden. Hieronder worden 2 van deze algoritmes besproken:

3.4.1. Filtratie

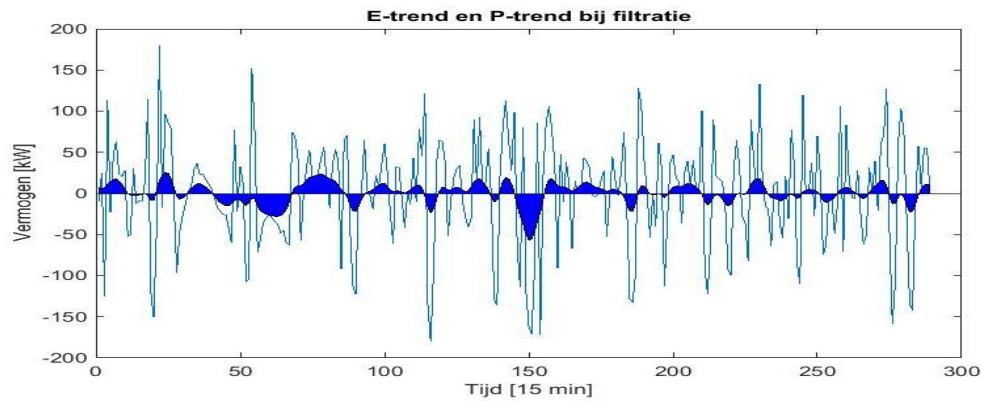
filtratie, ook wel eerste orde filtering genaamd, berekend het E-type vermogen P_E door het toepassen van een eerste orde filter op het totale vermogenstrend P_B , om zo een optimale afsnijfrequentie te vinden van snelle variaties.



Figuur 107: Eerste orde filtering

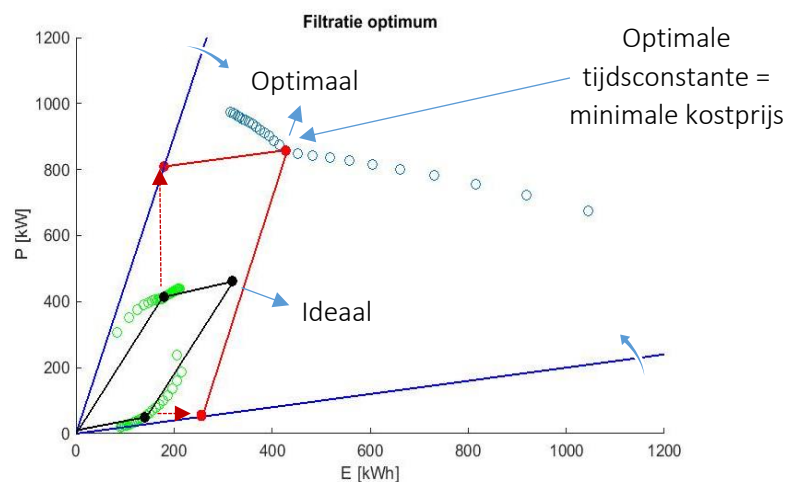
Het P-type vermogen kan berekend worden door het verschil van het totaal benodigd vermogen en het E-type vermogen. De E-component is voor trage variaties (vb. Loodzuurbatterijen) en kan terug gevonden worden door de oppervlaktes onder de signalen, terwijl de snelle variaties zullen opgevangen worden door de P-component (vb. supercaps) en kunnen bepaald worden door de amplitude van de signalen.

Figuur 107 en 108 tonen een voorbeeld van filtratie, waarbij de P en E-component bepaald worden om zo een optimaal hybride opslagsysteem te bekomen. De rode lijnen in figuur 108 tonen de optimale hybride opslag weer, terwijl de zwarte de ideale hybride opslagtechnologie weergeeft.



Figuur 108: Bepalen van de P- en E-trends

De dimensionering van een hybride opslagsysteem wordt vervolgens bepaald door het gewenste lastprofiel te bepalen en de mate van participatie van meerdere opslagsystemen om dit wensprofiel te bereiken. De coördinaat horende bij ideale HESS in figuur 109 wordt bepaald door het maximaal vermogen en de maximale energie die van het hybride systeem moet bezitten om het wensprofiel te bekomen. In feite is dus een gelimiteerde energieopslag en vermogenscapaciteit nodig om de worst case piek en het worst case energietekort op te vangen. In werkelijkheid moet dan een systeem ontwikkeld worden waarvan de specificaties zo dicht mogelijk in de buurt licht van deze coördinaat. Het is perfect mogelijk dat één technologie voldoet, maar het kan evengoed dat de combinatie van twee of meer technologieën ditzelfde optimum technisch/economisch eenvoudig benaderen.



Figuur 109: Filtratie optimum - Ideale versus optimale HESS

Indien zoals in bovenstaand voorbeeld twee technologieën gekozen worden (één om snelle variaties te reduceren, een andere om op trage variaties op te vangen), ontstaan twee rechten door de oorsprong. Hun helling wordt immers bepaald door hun technische specificaties nl. energie -en vermogensinhoud. Opslagtypes zoals supercaps en vliegwheels hebben eerder een steile helling, terwijl dit bij batterijtechnologieën minder steil zal verlopen.

Nu worden de theoretische specificaties aan de praktijk afgetoetst en wordt bepaald hoeveel elk subsysteem zal bijdragen aan het geheel. Daarvoor worden verschillende filters toegepast op het netto ESS-profiel uit figuur 102 of 111. Elke filter deelt het ESS-systeem op in twee subsystemen waarvan hun afzonderlijke bijdrage in energie en vermogen wordt aangegeven door de groene

coördinaten in figuur 109. Indien deze coördinaten zouden opgeteld worden, wordt terug de ideale coördinaat van het hybride systeem bekomen.

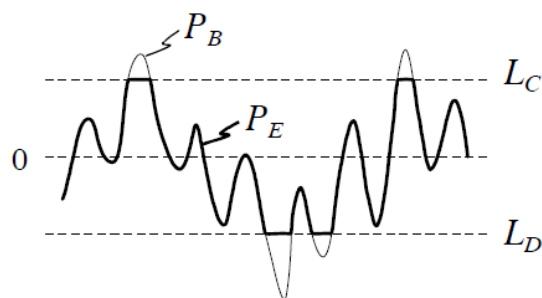
Deze ideale deelpunten moeten vervolgens gelinkt worden aan de werkelijke mogelijkheden van de gekozen technologie. Daarom wordt elk deelpunt gerefereerd naar de technologierechten door de oorsprong zoals in figuur 111. Een referentie wordt gemaakt door een horizontale of verticale snijlijn te tekenen, loodrecht met het assenstelsel. Het snijpunt van deze snijlijnen met de technologiecurves levert dan een werkelijke dimensionering op per technologie waarbij elk technologie zeker voldoende groot gedimensioneerd is om zijn voorziene bijdrage te leveren. Deze snijpunten worden de werkelijke coördinaten voor energie en vermogen en de som van hun vectoren levert het optimale hybride systeem op. De meetkundige afstand tussen het optimale en ideale systeem is het kleinst voor bij een welbepaalde filter en dit wordt als de optimale dimensionering aanzien.

3.4.2. Amplitude sharing

Amplitude sharing stelt een boven- en ondergrens aan het vermogen dat mag uitgewisseld worden door de E-component van het hybride opslagsysteem. Deze grenzen kunnen vast ingesteld worden of meedeinen met profielvariaties van de site. Bij het overschrijden van de bovengrens wordt het laadvermogen beperkt tot “Limit Charge” (LC), een overmatige ontlading wordt begrensd door de “Limit Discharge” (LD). De absolute waarde van LC en LD is gelijk.

$$P_e(t) = \begin{cases} L_D < P_B(t) < L_C & P_B(t) \\ P_B(t) < L_D & L_D \\ P_B(t) > L_C & L_C \end{cases}$$

Onderstaande figuur illustreert opnieuw het netto vermogen opgeslagen of geleverd kan worden door het hybride opslagsysteem. Deze vermogenstrendlijn is terug het verschil tussen het nettoprofiel (opbrengst – verbruik) zonder opslag van de eindverbruiker en het gewenste profiel. De E-component draagt bij aan de energielevering tussen opgelegde limieten, terwijl de P-component van het hybride systeem buiten deze grenzen dient bij te springen.

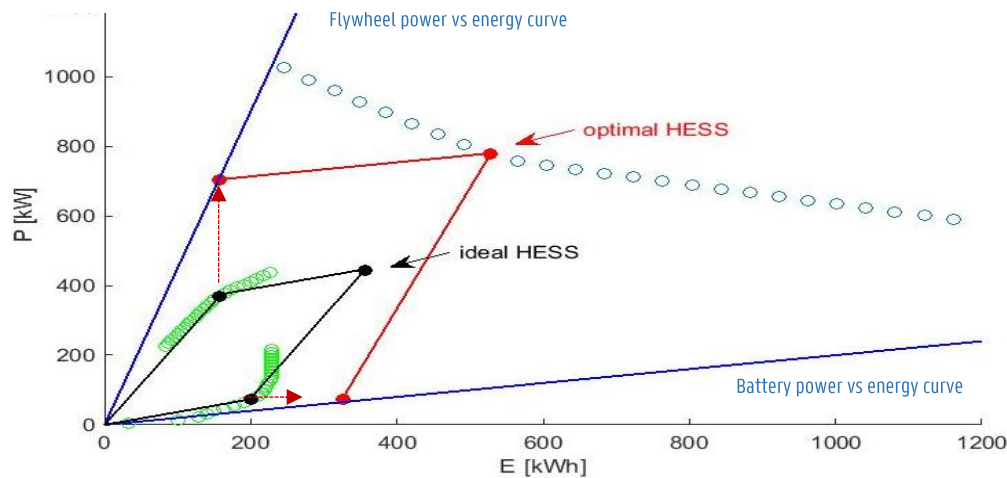


Figuur 110: Amplitude sharing

Het instellen van de grenzen is dus het optimalisatieproces dat moet voltooid worden. Eens deze grenzen zijn ingesteld, geldt dat het vermogen van de E-component gelijk is aan de limietwaarde LC, terwijl dit voor de P-component het verschil is van het maximaal uitgewisseld vermogen en de limietwaarde. De energie-inhoud van zowel de P- als E-component wordt berekend als de oppervlakte onder de respectievelijke PE en PB curves.

In onderstaande figuur wordt geïllustreerd hoe een ideaal wensprofiel terug een coördinaat oplevert in het ragone-diagram. Dit ideale hybride systeem wordt terug opgesplitst in twee deelsystemen met

variërende dimensies vanwege de zoektocht naar de optimale grensconfiguratie. Terug dienen de deelcoördinaten per grens weerspiegeld te worden naar de technologiecurves. Het optimum wordt uiteindelijk bereikt bij het punt waar de samengestelde opslag zich het dichtst bij de coördinaat van ideal HESS bevindt.



Figuur 111: Werkelijke versus ideale dimensionering HESS

Stel dat hierboven de combinatie bestaat uit een vliegwiel en een loodzuurbatterij. Hierbij bedraagt het maximaal benodigd vermogen en energie van de technologieën in het ideale geval respectievelijk 450kW en 350 kWh. Daartoe zou idealiter een oneindig schaalbare technologie gekozen kunnen worden met een vermogen versus energie ratio van 1,29. Vanwege de limitatie in energie- en vermogensdichtheid of andere technische beperkingen kan in werkelijkheid een gecombineerd systeem minstens evenwaardig zijn aan de keuze voor één technologie.

De groene cirkels zijn ideale waarden, maar moeten nog gereflecteerd worden naar de werkelijke karakteristieken van de gekozen technologieën. Deze werkelijke gedaante van elke technologie wordt weergegeven door een blauwe rechte door de oorsprong en is zoals aangehaald, een constante vermogen-energie verhouding van 1,29. In deze case benadert een vliegwiel van 700kW en een batterij van 300kWh het best het theoretische wenspunt.

4. Besluit

Kortom, spelen met energie en vermogen is dé sleutel tot succes. Een werkelijk systeem opbouwen dat perfect in lijn ligt met een theoretische dimensionering is echter geen sinecure en daarom kunnen hybride systemen een oplossing bieden. De dag dat één technologie in het energielandschap de bovenhand neemt, lijkt onrealistisch. Er zal steeds een compromis dienen gezocht te worden tussen verschillende opslagsystemen. Industriële verbruikers en KMO's, die met hun specifiek lastprofiel en schaalgrootte in aanmerking komen voor een dimensionering op maat, kunnen vandaag reeds beroep doen op dergelijke technologieën die sinds geruime tijd marktrijp zijn. Het spreekt weliswaar voor zich dat verdere technologische ontwikkeling en veranderende regelgeving de interesse naar opslag voor deze sectoren steeds meer zullen doen toenemen, maar de optimale dimensie ervan bepalen blijft zeker geen eenvoudig vraagstuk.

Hoofdstuk 4: 'Tijdsresolutie'

1. Inleiding

In het huidig energielandschap dirigeert hernieuwbare energie met een continue toename van verspreide energie-opwekkers uit wind en zon het net van morgen. Deze bronnen moeten continu in balans zijn met de energienoden van het moment, want oncontroleerbare productie genereert altijd te veel of te weinig energie. Zelf kunnen netgebruikers ook bijdragen aan het lokaal evenwicht door met hun energievraag flexibel te anticiperen op deze variabiliteit. Verbruikers kunnen in-of uitgeschakeld worden of een energiebuffer kan overtollige productie stockeren en terug injecteren op momenten van schaarste. Alvorens beroep te doen op opslagcapaciteit zoals batterijpacks dienen enkele weloverwogen keuzes gemaakt te worden. Een goed ontwerp berust op profieldata die via eigen metingen of via bovenliggende kanalen zoals energieleveranciers of netbeheerders te verkrijgen is. Om deze stap te volmaken, worden enkele tips en tricks geschetst zodat over-of onder dimensioneren wordt vermeden en de payback correct kan ingeschat worden. **Dus de hoofdvraag die hier zal beantwoord worden is wat het belang is van hoge resolutiedata in toekomstige slimme netten.**

Waarom groeit de aandacht voor opslag van energie? Steeds meer lokale afnemers stellen zich de vraag waarom ze nog steeds een aanzienlijke elektriciteitsfactuur krijgen voorgeschoteld, hoewel ze reeds geïnvesteerd hebben in decentrale productie. Echter houden ze geen rekening met de gelijktijdigheid van opbrengst en verbruik waardoor de netafname nog steeds navenant aanwezig blijft. Eén van de verdienmodellen van opslag is verhoogde zelfconsumptie van eigen geproduceerde energie. Dit berust op het prijsverschil tussen “behouden van gratis eigen energie via opslag” en “terug aankopen van geïnjecteerde energie op een later tijdstip”. Om deze rekensom te kunnen maken, moet dus een zo gedetailleerd mogelijk beeld verkregen worden van de energie die op elk moment voorradig of te kort zou zijn in functie van lokale opbrengst en verbruik. Het wijst voor zich dat binnen een kwartier het energieverloop heel wat schommelingen kan kennen door de gekende variabiliteit. Daarom kan alleen momentane data op secondenbasis een perfecte inschatting van de opslagbenutting opleveren. Vandaar rijst de vraag welke data moet gebruikt worden bij een dimensionering en wat de eventuele inschattingsfout bedraagt t.o.v. de ideale werkelijkheid.

Elke afnemer wordt gekarakteriseerd door de stroom die zijn verbruikers continu of sporadisch onttrekken. Verder tekent ook de eigen energieproductie de signatuur. Hoewel netsynchrone gensets wel al enige tijd ingeburgerd zijn, kwam eigen generatie met decentrale bronnen steeds meer boven water. Al deze inputs worden vertaald naar vermogens en kWh's om de ideale opslagcapaciteit voor verhoogde zelfconsumptie en –voorziening te bepalen. Echter kunnen datasamples op diverse tijdsbasis gekozen worden. Zo kan boekhoudkundig bijvoorbeeld gerekend worden met de jaarlijkse energiebehoefte, tarifeert de leverancier op basis van het maandverbruik terwijl piekgemeten klanten ook een bijdrage betalen volgens het jaarlijks en maandelijks maximaal gemeten kwartierverbruik. Het wordt snel duidelijk dat een goede tijdsbasis een belangrijke invloed zal hebben op een correcte dimensionering van opslag. Logischerwijs zullen meer meetpunten in een meetinterval het profiel gedetailleerder schetsen, maar het kan ook niet de bedoeling zijn om onnodig veel data op te nemen om conclusies te trekken. Jaar, maand en weekgemiddeldes maken afnemers eenvoudig vergelijkbaar, maar kunnen niet gebruikt worden om een het laad-en ontladgedrag van opslagmedium in te schatten.

Kwartiergegevens zijn bij veel niet-residentiële afnemers reeds geruime tijd beschikbaar voor de netbeheerder d.m.v. een AMR-meting (Automatic Meter Reading). Ook residentiële klanten zullen binnenkort over kwartierdata beschikken met de netbeheerder wanneer de digitale meter wordt

uitgerold. Eén sample die de energiestroom beschrijft van de voorbije 900 seconden is eerste stap in de goede richting in het ontwerpproces. Uiteraard kan dit resolutieniveau onmogelijk de payback volledig correct inschatten omdat het op- en ontladen ogenblikkelijk verloopt. Het is echter een utopie om telkens gebruik te kunnen maken van data op seconde niveau vanwege voornamelijk de onbeschikbaarheid van dergelijke permanente meetapparatuur en de noodzakelijke data-infrastructuur voor de verwerking van de gegevens. Toch zal hierna blijken dat kwartierdata opvragen bij de netbeheerder en een bijkomende tijdelijke meting op hogere resolutie uitvoeren voldoende gegevens beschikbaar stellen voor een dimensionering.

2. Herkomst van de vermogensvariaties

Daarstraks werd gesproken van de variabiliteit van opbrengstprofielen, hierbij zal nu iets dieper ingegaan worden voor zowel zon- als winddata. Welke parameters bepalen de variabiliteit en wat is de invloed van deze snelle variaties op deze profielen?

2.1. Zon

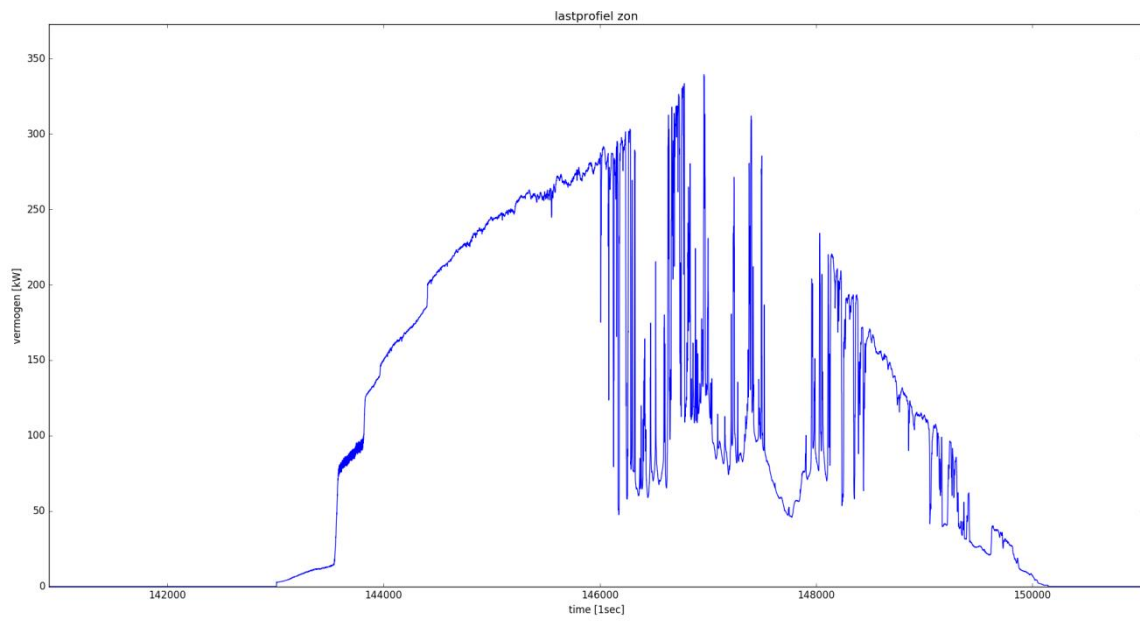
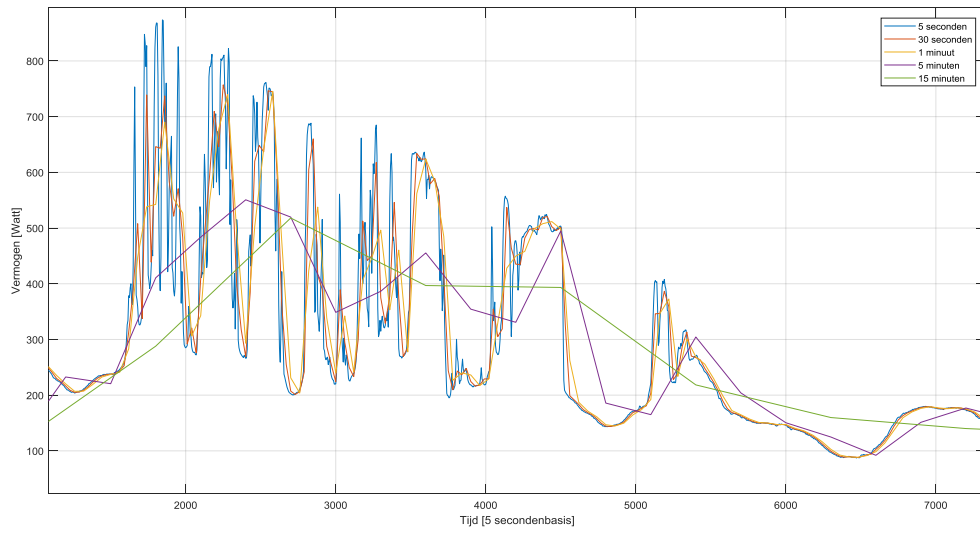
Zonne-opbrengst wordt op vandaag door energiemanagementsystemen in omvormers meestal al om de 15-minuten binnen gelezen, dus er is op zich wel al een inzicht verkregen omtrent de variatie in profielen. Echter kan gedurende een tijdsframe van 15 minuten steeds veel gebeuren. Zo kan op het ene moment het helder en zonnig zijn, terwijl 5 minuten erna er een wolkenveld voorbijkomt. Het verkregen punt zal een uitgemiddelde waarde van beide situaties zijn. Echter is het wel belangrijk om te weten in welke mate er dan een hoge piek of een verlaagde productie was om zo correct de opslagcapaciteit te kunnen bepalen.

Volgende stappen bepalen het PV-vermogen.

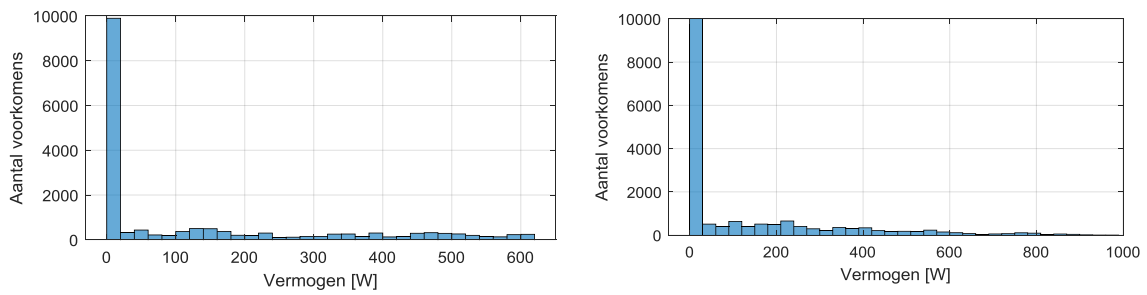
1. Tijdsmoment (uur, dag, seizoen) en weersinvloeden.
2. Paneelopbouw, schaduw en reflectie
3. Celtemperatuur
4. Module output
5. DC-mismatch en -verliezen
6. MPPT-bepaling
7. AC-DC conversie en verliezen

De grootste invloed op variabiliteit wordt toegewezen aan het weertype, voornamelijk wolkvorming. De overige zaken hebben geen invloed op fluctuaties, maar brengen wel verliezen teweeg. Schaduw en reflectie zijn meestal relatief klein ten opzichte van bewolking en worden vaak verwaarloosd. Celtemperatuur heeft een impact op module-efficiëntie. Een vuistregel voor Si-modules is ong. 0.5% verlies per graad Celsius. De I-V curve van een module verschilt van zijn nominale curve indien de instraling of temperatuur wijzigen. De efficiëntie van de omvormer kan wijzigen in functie van het AC-vermogen, de DC-spanning, power factor enz. Typisch ligt deze waarde in de buurt van 95%.

In figuur 112 werd via interpolatie achterhaald in welke mate data uitgemiddeld wordt gaande van 5 seconden resolutie tot 15 minutenresolutie. Het mag dan wel opmerkelijk zijn dat er een sterke uitmiddeling aanwezig is. Korte pieken worden niet meer gezien en zo kan direct ook de link gemaakt worden in welke mate opslag zo verkeerd gedimensioneerd wordt op basis van kwartierdata.



Figuur 112: Vermogen versus tijdsresolutie



Figuur 113: Histogram kwartier & vijf seconden basis

2.2. Wind

Het vermogen dat theoretisch beschikbaar is in wind is evenredig met de 3^e macht van de windsnelheid. Een windturbine kent daardoor een niet lineaire vermogenscurve i.f.v. de windsnelheid. Bijgevolg veroorzaakt het uitmiddelen van windsnelheden over een lange periode voor een onderschatting. De energie die inherent in de stroming van de wind vervat zit, is niet primordiaal, wel de energie die door de turbine kan gecapteerd en omgezet worden naar elektrische energie. De niet lineaire trend tussen windsnelheid en gegenereerd vermogen signaleert het belang van korte termijn data en fouten bij uitmiddeling van windsnelheden.

3. Verschil tussen data met kwartier- en secondenresolutie

3.1. Achtergrond

Tijdens het dimensioneringsproces is nood aan data en roept bijgevolg de vraag zich op aan welke tijdsresolutie deze data moet voldoen. In deze analyse stellen we daarom de volgende onderzoeksvraag voorop: “Wat is de tolerantie bij een dimensionering volgens 15min tijdsresolutie tegenover ogenblikkelijke data”. De gebruikerstool die in dit project wordt aangeleverd is gebaseerd op de alom verkrijgbare kwartierdata, maar een kritische kijk is nodig om de algemene correctheid in te schatten. Daaruit kan dan afgeleid worden hoe belangrijk een aanvullende meting wordt op hoge resolutie of dat de uitgemiddelde kwartierdata al in voldoende mate de werkelijke zelfconsumptie en –voorziening benaderd.

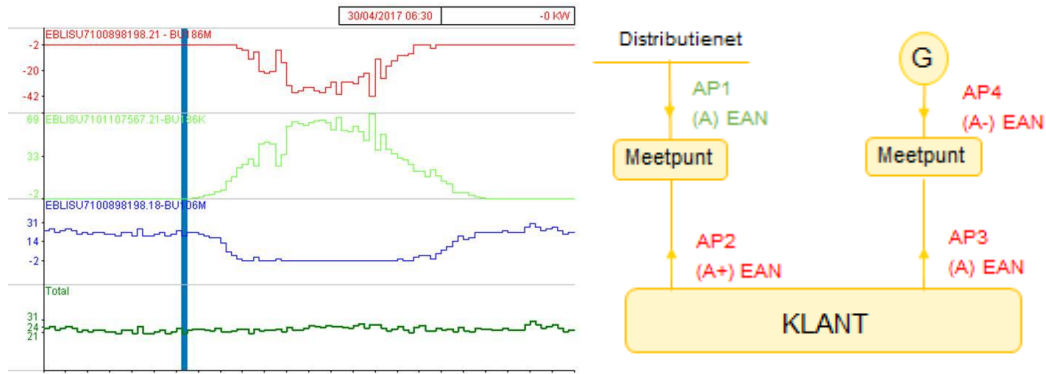
3.2. Simulatie met kwartierdata AMR

Als illustratief voorbeeld werden de metergegevens van een bedrijf opgevraagd voor een periode van één jaar bij de netbeheerder. Per kwartier werden volgende gegevens bekomen:

- Injectie
- Productie
- Afname
- (Eigenverbruik DP)

De AMR-meterdata registreert de werkelijk gecumuleerde energiestroom in beide richtingen en vertaalt dus de kWh's naar een factuurbedrag. Voor afname betaalt klant, voor injectie wordt een vergoeding voorzien die weliswaar kleiner is dan de afnameprijs. In deze case is de productie een PV-park van 100 kWp. Daar het eigenverbruik van een PV-installatie nihil is, wordt deze data verwaarloosd. Onderstaande figuur toont aan hoe de netbeheerder de meetgegevens structureert en welke profielen finaal verkregen worden.

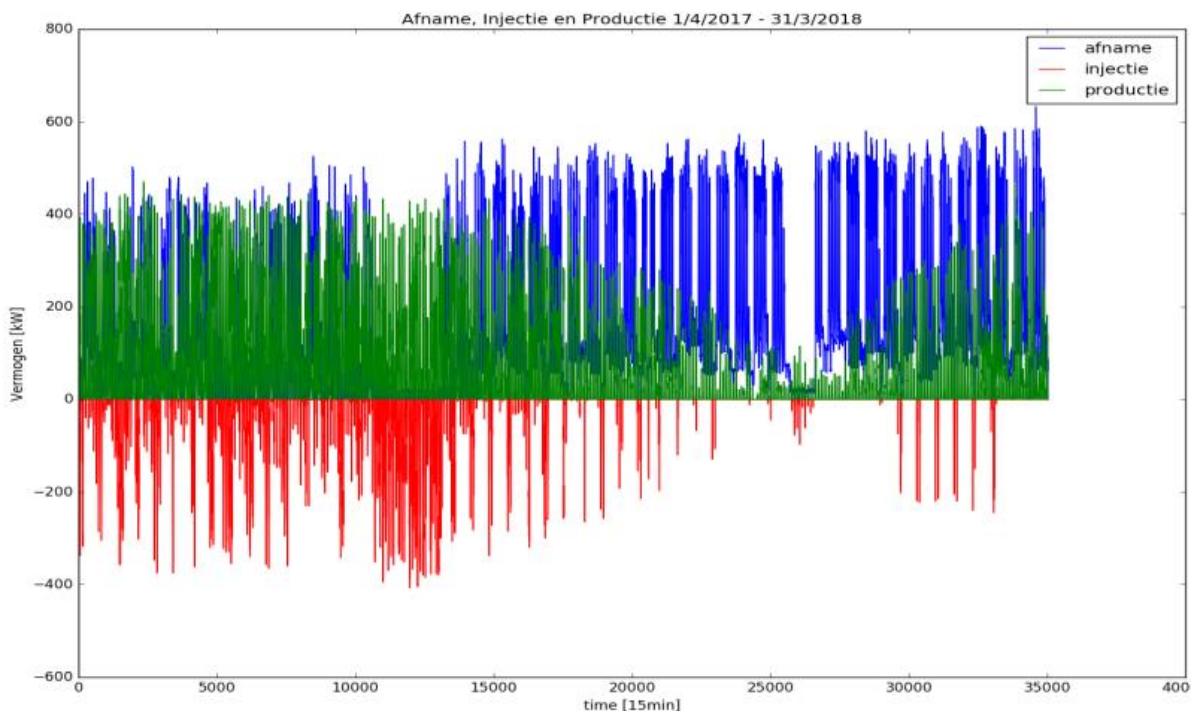
Hoofdstuk 4 - Tijdsresolutie



Om opslag te dimensioneren wordt in eerste instantie het verbruiksprofiel gereconstrueerd. Dit kan met behulp van onderstaande formulering:

$$\text{Reëel verbruik} = \text{afname} + (\text{productie} - \text{injectie})$$

Het voordeel hiervan is dat het bij simulaties het opbrengstprofiel kan worden gevarieerd om de impact van meer decentrale productie te onderzoeken bij hetzelfde verbruiksprofiel. Het verbruik wordt vervolgens getoetst aan de productie om overschot op te slaan en tekorten te leveren door opslag.



In een eerste simulatie, AS BUILD genaamd, wordt de data niet geschaald en wordt nagegaan of opslag interessant kan zijn voor deze case. Daartoe worden zelfconsumptie, zelfvoorziening, het aantal uitgevoerde cycli en de terugverdientijd (CAPEX) aanschouwt. Als referentie wordt de elektriciteitsfactuur berekend zonder opslag en nadien worden verschillende volumes van opslag, in dit geval Li-ion batterijen, toegevoegd.

Relatieve opslag/verbruik [kWh/MWh verbruik]					
0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
Absolute opslag [kWh]					
10,32	12,38	14,45	16,52	18,58	20,65
Zc en Zv [%]					
74.87 / 23,86	74,94 / 23,88	75 / 23,90	75,06 / 23,92	75,12 / 23,94	75,18 / 23,96
Aantal cycli					
244	238	233	230	226	223
Pay back hardware [jaar] CAPEX hardware [jaar]					
8.17	9,24	10,21	11,10	11,9	12,7

Als aanvulling bij de simulatie worden de randvoorwaarden meegegeven:

Prijs piek 0.1758 €/kWh Prijs dal 0.1481 €/kWh Prijs injectie 0 €/kWh Opbrengst/Verbruik = 0.32 DOD = 0.8 Lithium NMC Capaciteit cel = 4.8 kWh Zelfontlading Maand = 3 % Oplaadbegrenzing C-rate = 1 Efficiëntie = 0.98 % Batterijcycli = 6000 Kost omvormer = 100 €/kW Kost opslag = 600 €/kWh
--

In deze case valt de verhouding opbrengst/verbruik eerder klein uit. De 100 kWp PV-installatie heeft reeds een grote inherente zelfconsumptie en –voorziening omwille van baseload in de buurt van 300 kW tijdens de werkuren. Enkel een kleine batterijpack van 10 kWh zal relatief gezien nog genoeg energie uitwisselen om de terugverdientijd van de investeringskost te reduceren onder de 10 jaar. Daarom wordt in de volgende paragraaf de PV-bijdrage stelselmatig verhoogd door een schaalfactor toe te kennen aan deze opbrengst om na te gaan wat dit betekent voor andere optima.

3.3. Simulatie met variërende opbrengst op kwartierbasis

In tweede fase wordt een fictieve toename van decentrale productie gesimuleerd. Ook deze simulatie maakt nog steeds gebruik van de data die voorhanden was, nl. kwartiergegevens. Tijdens deze simulatie blijft het verbruik constant, maar wordt de kwartierdata opgeschaald en dus niet de ogenblikkelijke data! De onderstaande formulering geeft weer wat wordt gewijzigd t.o.v. de AS BUILD simulatie:

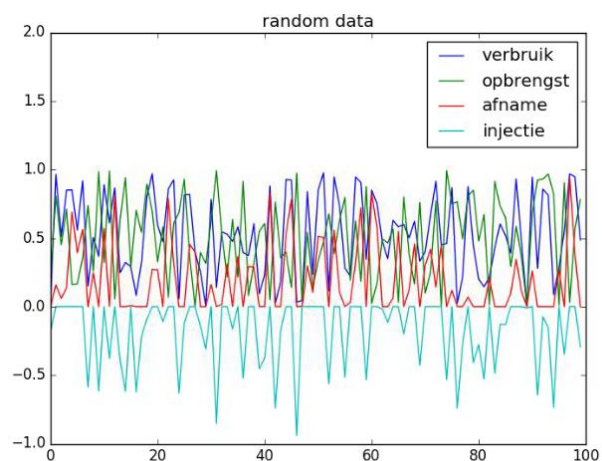
$$\begin{aligned} \text{Reëel verbruik(constant)} &= \text{afname}(\downarrow?) + [\text{productie}(\uparrow?) - \text{injectie}(\uparrow)] \\ &= \text{netgebruik} + \text{eigen opwekking} \end{aligned}$$

Dit wordt vertaald naar een nieuw simulatieprofiel dat voor de netbeheerder zichtbaar zou zijn op het aansluitpunt (PCC ofwel point of common coupling), het nettoprofiel genaamd. Dit profiel representeert een nieuwe combinatie van afname en injectie als een verschil tussen beiden en wordt door de netbeheerder gebruikt om de energiefactuur door te rekenen.

$$\begin{aligned} \text{netto profiel} &= \text{productie}(\uparrow) - \text{reëel verbruik(constant)} \\ &= \text{injectie}(\downarrow?) - \text{afname}(\uparrow?) \end{aligned}$$

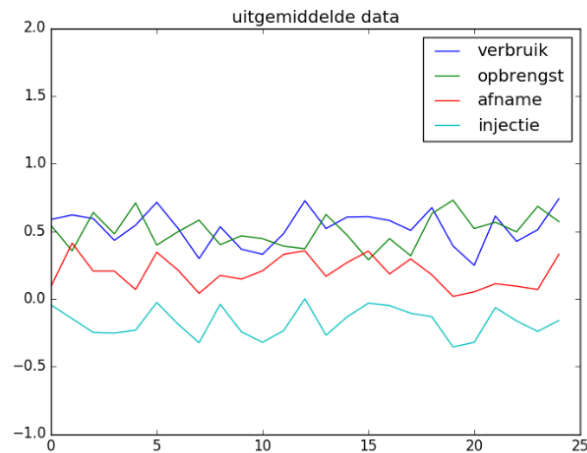
De simulatie berekent dus de waarde per kwartier van het netto profiel . Ofwel is de uitkomst van dit netto profiel positief (injectie groter dan afname) ofwel negatief (afname groter dan injectie) en zal dus resp. een laadproces of ontladproces optreden indien een batterij zou geïnstalleerd worden. Dit betekent ook in dat het verschil van injectie en afname kan ingeschat worden op kwartierniveau, maar stelt de vraag of de exacte waarde van zowel afname als injectie nog kan achterhaald worden na de simulatie. Indien dit niet te achterhalen valt, gaat info over de afzonderlijke hoeveelheid injectie en afname binnen elk kwartier verloren. Hiervoor wordt beroep gedaan op een eenvoudig voorbeeld.

Onderstaande figuur representeren willekeurige lastprofielen als een momentane datareeks met daaronder de som van elk profiel afzonderlijk. Deze som is equivalent aan wat een AMR-meter zou registreren



Dataset	Verbruik	Opbrengst	Afname	injectie
Som tijdinterval	52.6	50.4	19.6	17.4

Vervolgens worden deze datareeksen uitgemiddeld en stelt het resultaat zich voor zoals kwartierdata, aangevuld met het totaal gesommeerd verbruik tijdens dit tijdsinterval. Zoals verwacht zijn de resultaten van de som gelijk aan de resultaten van de momentane data.



Dataset	Verbruik	Opbrengst	Afname	injectie
Som tijdinterval	52.6	50.4	19.6	17.4

In een volgende stap wordt deze zogenaamde kwartierdata van de decentrale productie verhoogd en blijft het verbruik constant. De bepalende vraag luidt nu of de afname en injectie van de initiële kwartierdata kan vertaald worden naar correcte simulatiewaardes, gebaseerd de gekende productiestijging op kwartierbasis. Afname en injectie worden volgens onderstaande hypothese berekend:

Als afname zonder opbrengsttoename = 0:

Afname simulatie = 0

Injectie simulatie = injectie zonder opbrengsttoename + opbrengsttoename

Als afname zonder opbrengsttoename \neq 0:

Opbrengsttoename < afname zonder opbrengsttoename:

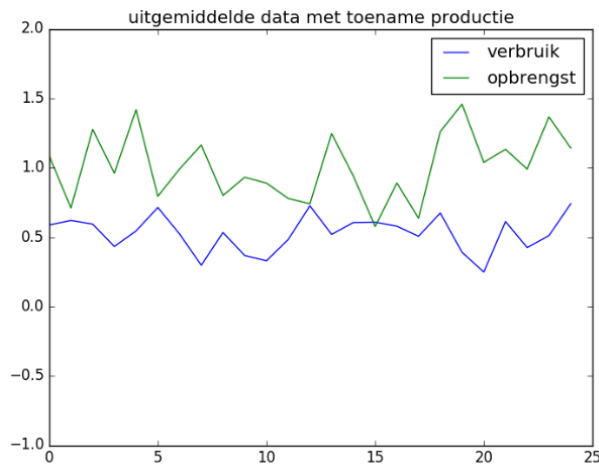
Afname simulatie = afname zonder opbrengsttoename – opbrengsttoename

Injectie simulatie = injectie zonder opbrengsttoename

Opbrengsttoename \geq afname zonder opbrengsttoename:

Afname simulatie = 0

Injectie simulatie = injectie zonder opbrengsttoename + opbrengsttoename - afname zonder opbrengsttoename



Dataset	Verbruik	Opbrengst	Afname	injectie
Som tijdinterval	52.6	100.8	0.48	48.7

Verbruik – opbrengst -48.2

Afname – injectie -48.2

Het opbrengstprofiel van de willekeurige momentane profielen kan ter controle eenvoudig geschaald worden met dezelfde factor en vervolgens kan ook de ogenblikkelijke afname en injectie berekent worden, alsook hun totale som gedurende deze periode. Het resultaat wordt weergegeven in onderstaande tabel.

Dataset	Verbruik	Opbrengst	Afname	injectie
Som	52.6	100.8	10.3	58.5

Verbruik – opbrengst -48.2

Afname – injectie -48.2

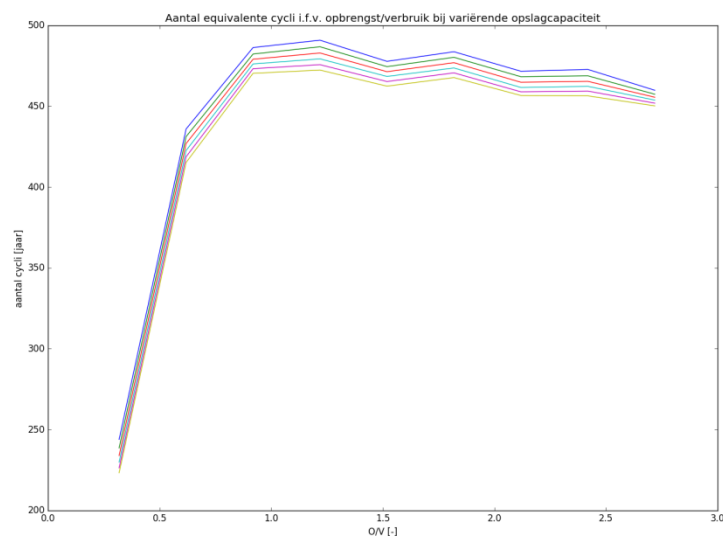
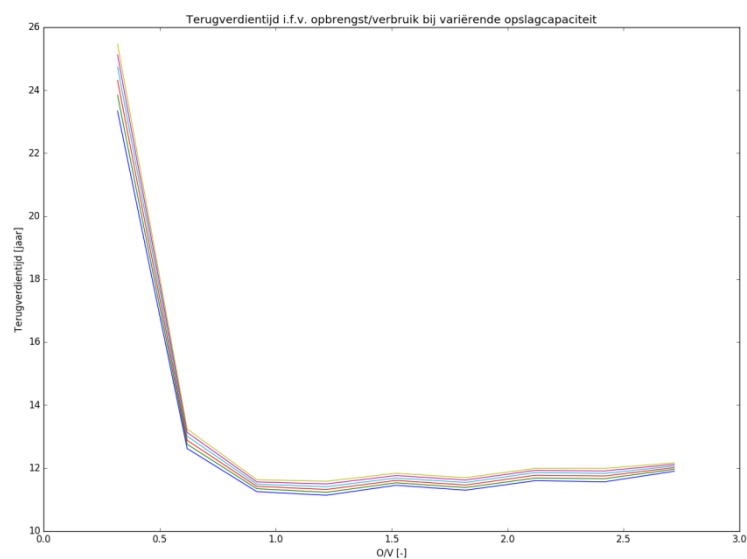
Uit deze simulatie valt af te leiden dat

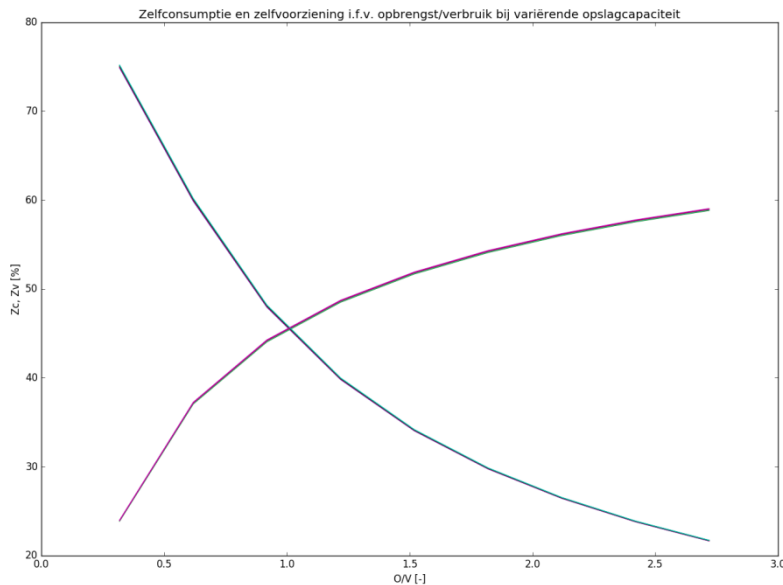
- De productiestijging een verwachte daling van afname en een toename van injectie genereert.
- Het verschil tussen enerzijds verbruik en opbrengst en anderzijds afname en injectie is zoals verwacht wel gelijk.
- De gesommeerde waarden van afname en injectie afzonderlijk zijn niet gelijk aan elkaar na het verhogen van de opbrengst. De hypothese is dus niet correct. De waarden veranderen wel in de verwachte richting bij een hogere opbrengst, maar weliswaar niet verhoudingsgewijs!

Het is dus onmogelijk om in te schatten dat een toename van de gemiddelde kwartierproductie de momentane afname gelijk, kleiner of nog steeds zal zijn dan nul tijdens het betreffende kwartier. Het is m.a.w. niet mogelijk om in te schatten wat de exacte bijdrage is van afname en injectie wordt,

gezien op ogenblikkelijke basis wordt uitgemaakt of de opbrengst groter of kleiner is dan het verbruik. Bijgevolg kan de simulatie maar benaderend veronderstellen dat bij een positieve waarde van het netto profiel deze waarde als injectie mag beschouwd worden en de afname nul bedraagt, gezien de exacte onderverdeling ongekend is. Bij een negatieve waarde van het netto profiel geldt dan het omgekeerde en wordt alles toegewezen als afname en wordt injectie nul verondersteld. Intuïtief maakt dit duidelijk dat simulatie met kwartierwaarden een grote vereenvoudiging teweeg brengt, gezien de ingebouwde logica van omvormers momentaan regelt en productievariaties ogenblikkelijk kunnen optreden.

Onderstaand worden de resultaten weergegeven van de simulatie waarbij de opbrengst van decentrale productie wordt gevarieerd. Zoals in de AS BUILD-simulatie worden telkens zes verschillende batterijgroottes gesimuleerd, gaande van 0.005 tot 0.01 kWh opslag per MWh verbruik en per stap van 0.01 kWh. De blauwe en gele curves stellen resp. de kleinste en grootste batterijcapaciteit voor.





Ook de initiële verhouding van 0.32 die werd afgeleid in de AS BUILD-simulatie (3.3.2) wordt nogmaals berekend volgens deze benaderende simulatiemethodiek voor toegenomen decentrale productie en dit leidt tot volgende vaststellingen:

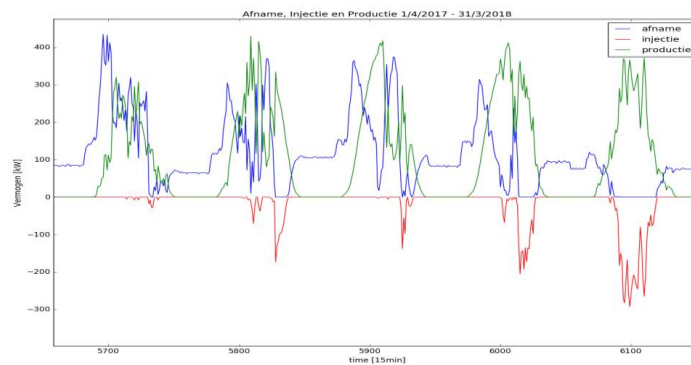
- De zelfconsumptie en – voorziening zijn gelijk in geval van de AS BUILD-simulatie en resp. dalen en stijgen bij toename van PV-vermogen. Energetisch gezien verandert er dus niets aan het resultaat als het gemiddelde van de kwartieropbrengst wordt gevarieerd.
- De terugverdientijd is bij de initiële opbrengst/verbruik verhouding van 0.32 niet meer gelijk aan het resultaat van de AS Build simulatie en bedraagt nu 24 jaar i.p.v. 8 jaar.

Dit verschil staft de verwachting omtrent de gemaakte vereenvoudigingen bij het opschalen van de initiële AMR-kwartierdata van de decentrale productie. Zoals aangegeven berekent de simulatie één waarde per kwartier. Ofwel is de uitkomst van het netto profiel in één kwartier positief ofwel negatief. In werkelijkheid kan het netto profiel zowel positief én negatief zijn binnen een kwartier. Dit valt fysisch te begrijpen wanneer een kleine wolk over de PV-panelen passeert en de opbrengst daalt. Bijgevolg zal even energie afgenomen worden uit het net om dit tekort te compenseren en kan terug een overschot van energie ontstaan nadat de PV-omvormers terug het volle vermogen leveren. Indien gerekend wordt met gemiddelde kwartiergegevens, zullen dergelijke schommelingen uitgemiddeld worden en finaal per kwartier tot één waarde herleid worden, nl. een overschot of een tekort. Een batterij zal uiteraard de werkelijkheid volgen en meer ontladen en opladen dan de veronderstelde kwartierberekeningen.

Als ultiem voorbeeld kan het perfect mogelijk zijn dat de kwartierwaarde van het netto profiel gelijk is aan nul en dat bijgevolg het verschil van afname in injectie ook nul bedraagt. Het vereenvoudigd model heeft geen zicht wat binnen het kwartier exact gebeurt en veronderstelt dat de batterij binnen dit kwartier traag en gelijkmatig laadt of ontlad. In werkelijkheid zal de injectie opgeslagen worden en zal de afname terug onttrokken worden. De batterij kan dus meer activiteit uitoefenen dan op kwartierniveau zichtbaar is!

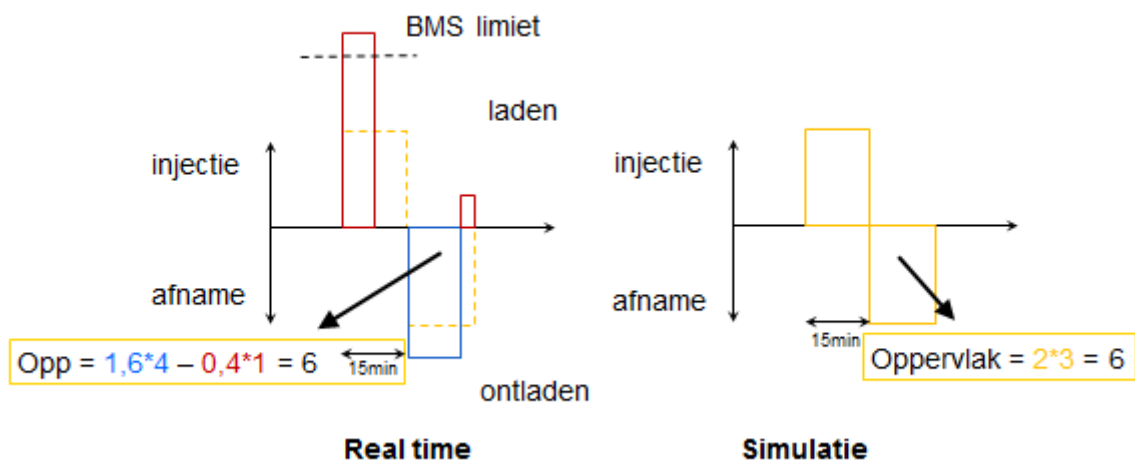
Waarom geeft de AS BUILD-simulatie nu een terugverdientijd van 8, gezien hier ook gebruikt wordt gemaakt van kwartierdata? De AS BUILD-simulatie maakt gebruik van de initiële AMR-data. Deze meter houdt ogenblikkelijk bij hoeveel afname en hoeveel injectie precies is opgetreden en geeft dan

één maal per kwartier de gecumuleerde waarde door aan de netbeheerder. Dit is te zien op onderstaande figuur. Er bestaan kwartieren waar injectie en afname een waarde aannemen die verschillend kan zijn van nul!



In de AS Build simulatie wordt dus wel rekening gehouden met de initiële afname en injectie, die in dit wel beiden kunnen verschillen van nul geval binnen het kwartier. De gesimuleerde terugverdiëntijd wordt bepaald door de combinatie van afname en injectie te berekenen zowel zonder en met opslag geïntegreerd.

Onderstaande figuur schetst een vereenvoudigd voorbeeld van de registratie van een AMR meting en wat bijgevolg verwaarloosd wordt indien kwartiergemiddeldes worden gebruikt in simulaties.



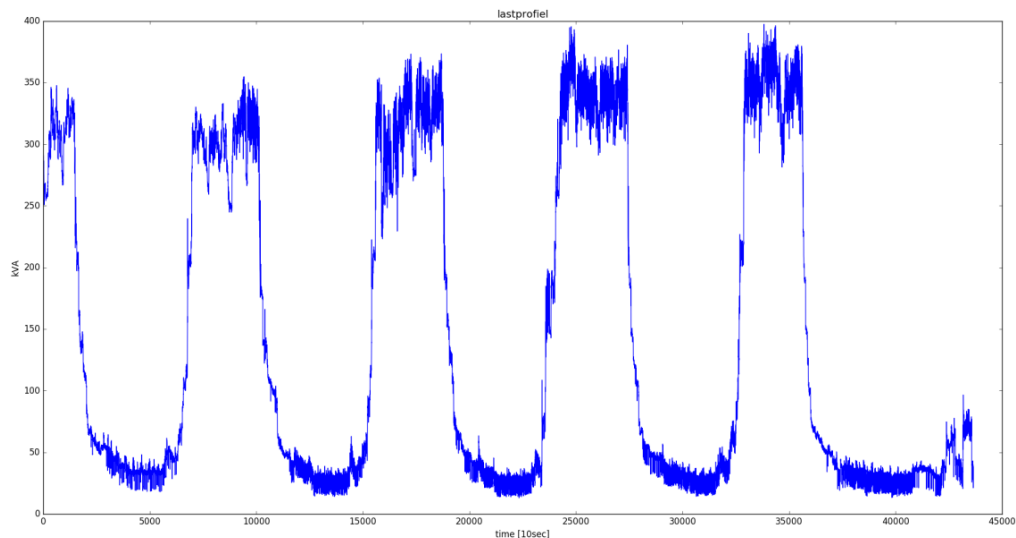
In de veronderstelling dat geen batterij aanwezig is, zal energie afgenomen of geïnjecteerd worden in het net ten gevolge van decentrale productie. Energie wordt in dit voorbeeld voorgesteld als een oppervlakte van een rechthoek. de real time situatie illustreert een simplistisch lastprofiel (volle lijn) en wat het kwartiergemiddelde zal aannemen (stippellijn). In het tweede kwartier is de blauwe en rode oppervlaktes resp. -6.4 en +0.4 eenheden groot. Samen vormen zij gemiddeld -6 oppervlakte-eenheden, zoals het kwartiergemiddelde.

Energetisch wordt dus geen hetzelfde resultaat bekomen, maar een AMR-meter zal in werkelijkheid een andere waarde toekennen aan deze energievolumes. Afname en injectie worden niet hetzelfde financieel gewicht gegeven. Rekening houden met een afnameprijs van 15 EUR/MWh t.o.v. 5 EUR/MWh voor injectie wordt duidelijk dat een AMR-meter die bidirectioneel energie cumuleert een andere prijs zal toekennen aan dit kwartier dan de vereenvoudigde simulatie van decentrale productie. In dit kwartier zal de prijs equivalent zijn met 94 [-] ($6.4 \cdot 15 - 0.4 \cdot 5$), terwijl de vereenvoudiging 90 [-] oplevert. Als nu een opslagunit aanwezig zou zijn en er binnen een kwartier

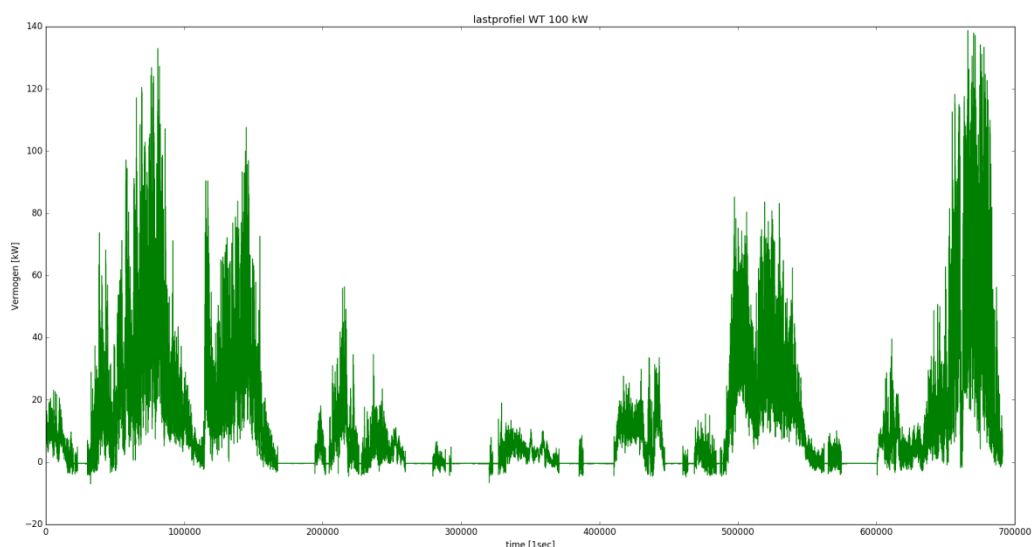
zowel afname als injectie optreedt, zal een opslagunit in werkelijkheid een ander laad- en ontladgedrag vertonen zoals aangenomen bij de kwartiersimulatie.

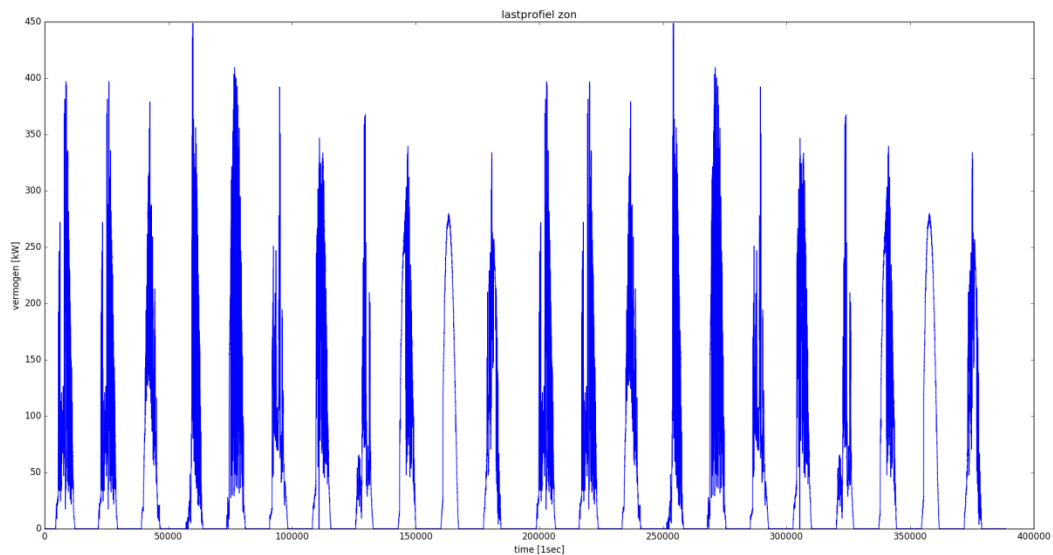
3.4. Vergelijking tussen 15min en 10sec resolutie

In dit laatste onderdeel worden datareeksen met secondenresolutie gebruikt om zelfconsumptie, zelfvoorziening, aantal cycli en de terugverdientijd opnieuw in te schatten. Dit heeft als doel om een zinvolle vergelijking te maken tussen kwartier- en secondendata. Real time meterdata met een sample-interval van 10 seconden werd gedurende één week geregistreerd van hetzelfde verbruiksproces.

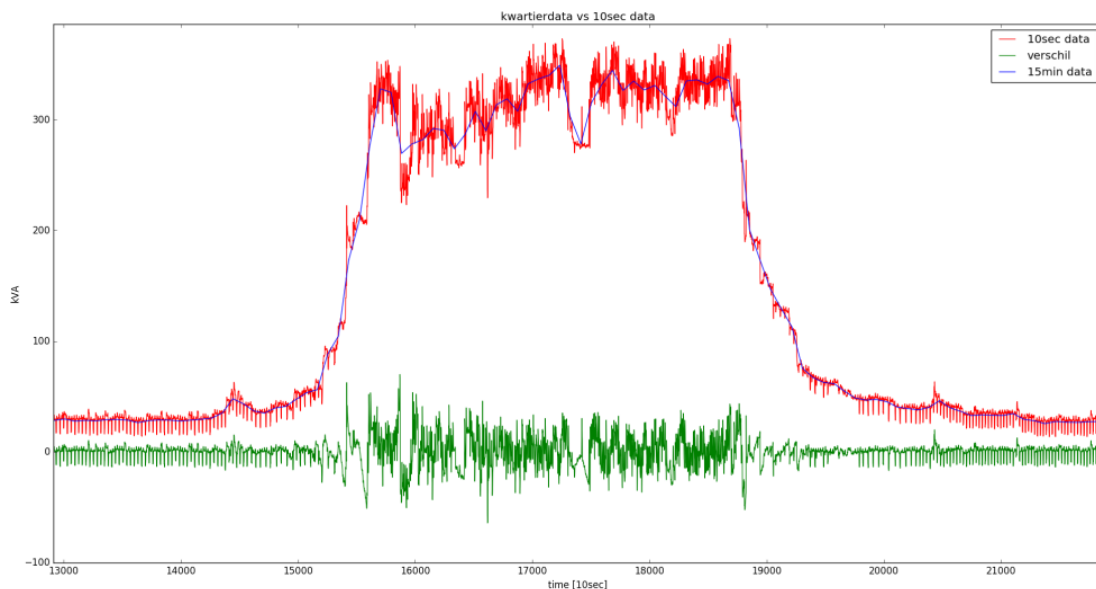


Voor opbrengstprofiel werd zowel gebruik gemaakt van wind en zon om de afzonderlijke impact te schetsen. Voor wind werd enerzijds gebruik gemaakt van een windprofiel van een 100 kW windturbine die gedurende 23 dagen werd bemeten met een samplerate van één seconde. Als zonneprofiel werd de opbrengstdata van een PV-omvormer uit het labo met een samplerate van 10 seconden bemeten.



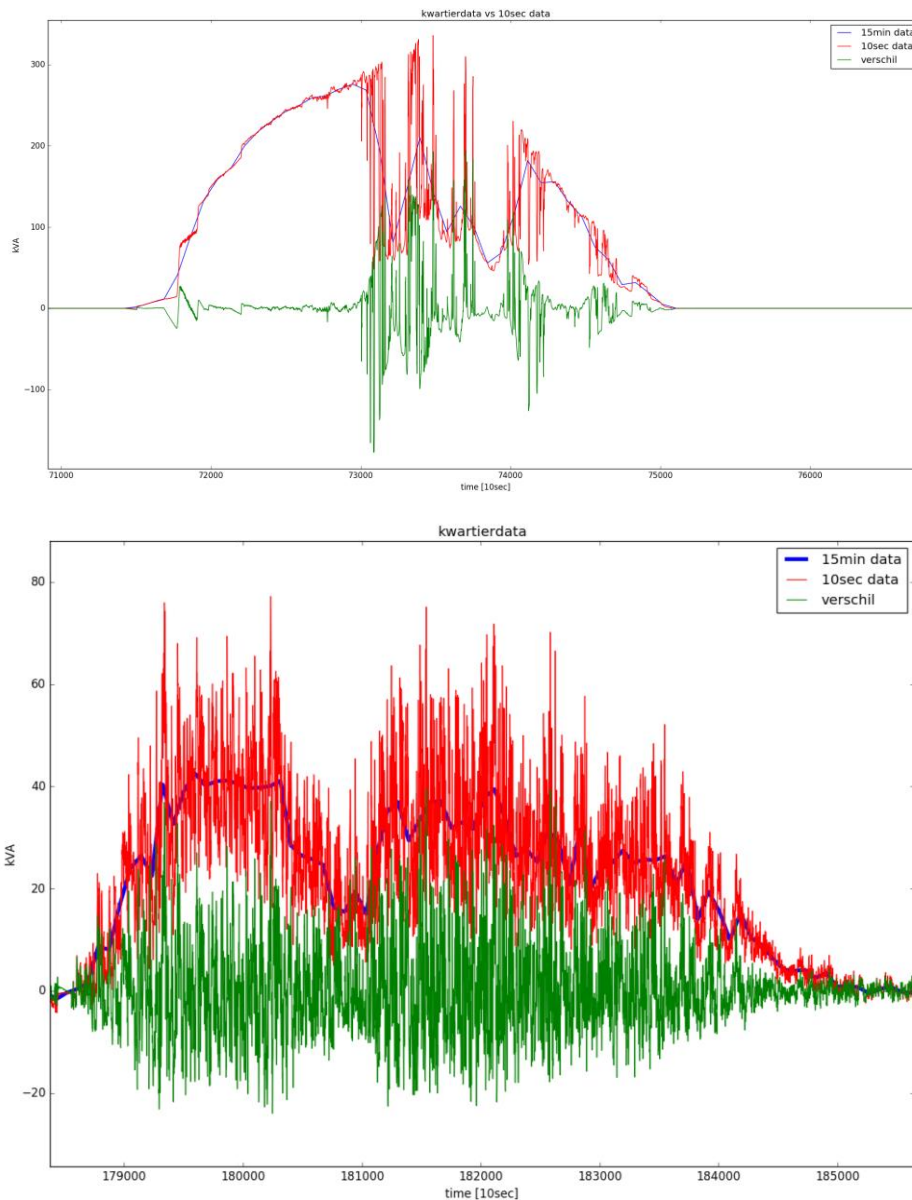


Om één maand data te bekomen van elk opbrengstprofiel werd de geregistreerde tijdsreeks herhaald zodat 30 dagen werd bekomen. De verbruiksdata daarentegen werd eerst uitgemiddeld zodat één sample per kwartier wordt bekomen. Nadien werden terug datasamples toegevoegd tussen de kwartiersamples via interpolatie om terug eenzelfde hoeveelheid datasamples te bekomen als de tienseconden tijdsreeks voorheen. Zo ontstaat m.a.w. een tweede tijdsreeks die hetzelfde profiel vertoont als kwartierdata, maar die toch evenveel samples bevat als de 10sec-reeks ter vergelijking. In de onderstaande figuur wordt dit voorgesteld door de blauwe trendlijn. Door vervolgens het verschil te nemen tussen deze kwartierreeks en secondenreeks werd de zogenaamde ruis berekend. Dit is een trend die in kwartierdata wordt uitgemiddeld maar zich wel ogenblikkelijk manifesteert in het verbruiksprofiel. Vervolgens werd deze ruis herhaaldelijk gesupponeerd op de kwartierdata om een benaderend verbruiksprofiel van 30 dagen te bekomen.



Dergelijk ruisprofiel kan ook voor zon en wind berekend worden en schetst de variabiliteit van het profiel. Om deze variabiliteit kwalitatief te vergelijken tussen verschillende profielen kan bij elk profiel een variabiliteitsindex berekend worden.

Hoofdstuk 4 - Tijdsresolutie



In onderstaande tabel wordt deze index berekend als het quotiënt van de RMSE en de gemiddelde waarde van het profiel. Uit de resultaten valt te merken dat de variabiliteit van het gebruikte verbruiksprofiel relatief beperkt is t.o.v. de productieprofielen. Uiteraard is deze variabiliteit geboden aan het bedrijfsproces en in elke case anders, maar toch kan al geconcludeerd worden dat het opbrengstprofiel een zeer bepalende impact zal uitoefenen.

Profiel	RMSE(ruis)/mean(profiel) [%]
Verbruik	7 → karakter van KMO
Zon	62 → "aard van zon"
wind	60 → "aard van wind"

In welke mate wijzigen de zelfconsumptie, zelfvoorziening, het aantal bereikte cycli en de terugverdiëntijd (CAPEX) indien naar secondenresolutie wordt gekeken. Hiervoor dient wel opgemerkt te worden dat de onderstaande simulaties gebaseerd zijn op jaardata. Hier wordt uitgegaan dat een dergelijke productie en verbruik maand zich twaalf keer herhaalt om zo één jaar te bekomen. Uiteraard is de productie van zon en wind niet constant doorheen het jaar, maar werd deze kunstgreep toegepast omdat hier vooral op de variabiliteit wordt geconcentreerd en de resultaten voortgaan op het procentueel verschil tussen 15min en 10sec data.

De eerste simulatie gaat uit van een opbrengst/verbruik van 1 en een capaciteit gaande van 0.005 tot 0.03 kWh opslag per MWh verbruik. Als conclusies kan gesteld worden dat

- 1) de zelfconsumptie en zelfvoorziening dalen.

Een valabele verklaring hiervoor kan toegeschreven worden aan limiteren van de oplaadstroom door BMS'n. De werkelijke data vertoont meer pieken dan de uitgemiddelde kwartierdata en begrensd de batterij om de levensduur te vrijwaren.

- 2) de benutting van opslag in werkelijkheid hoger ligt.

Een valabele verklaring hiervoor kan toegeschreven worden aan de verhoogde variabiliteit. Omwille van het feit dat het netto profiel veel frequenter de nullijn snijdt, zullen meer laad- en ontladcycli optreden omdat deze voorheen niet zichtbaar waren op kwartierniveau. In werkelijkheid wordt de case dus interessanter en kan een 15min analyse als worst case aanzien worden. Toch moet enige voorzichtigheid ingecalculeerd worden omdat het verloop van de variabiliteit doorheen het jaar niet gekend is.

- 3) Het verschil in benutting van wind veel groter is dan bij zon

Een valabele verklaring hiervoor kan toegeschreven worden aan het sterk modulair karakter van zon en wind doorheen de ganse dag. Een zonneprofiel kent sowieso een afgetekend dag-nacht patroon, terwijl wind continu kan variëren en een grotere absolute afwijking vertoont met haar equivalente kwartierreeks.

41 kWh systeem	Zon			Wind		
	10sec	15min	10sec/15min	10sec	15min	10sec/15min
PARAMETERS						
O/V	1	1	=	1	1	=
Zc en Zv [%]	50,1	52,3	0,96	41,2	42,3	0,97
Direct (excl. opslag)	48,3	51	0,95	38,88	41,1	0,95
Indirect (incl. opslag)	1,8	1,27	1,42	2,28	1,16	1,97
Cycli per maand	58	40	1,44	71,5	36,4	1,96
Payback [maanden]	75	99,5	0,75	65,1	128,9	0,51

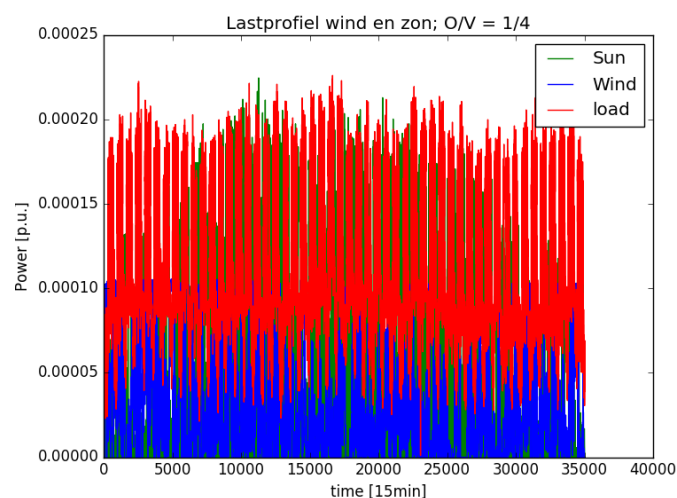
De tweede simulatie gaat uit van een variërende opbrengst/verbruik bij zon. Daar de data quasi ogenblikkelijk is en de variaties fysisch niet veel sneller optreden dan op secondenbasis (passage van wolken bij PV-productie), kan de decentrale productie probleemloos worden opgeschaald. De horizontale as representeert de opbrengst/verbruik verhouding en de verticale as geeft de terugverdientijd (CAPEX) en aantal cycli weer. In het bijzonder wordt de impact van de resolutie toegelicht bij een verhouding van 0.1 , 1 , 2.5 en 4.5 d.m.v. groene pijlen. Het verschil tussen de 10sec data en de kwartierdata wordt als een verhouding weergegeven. Als conclusies kan gesteld worden dat

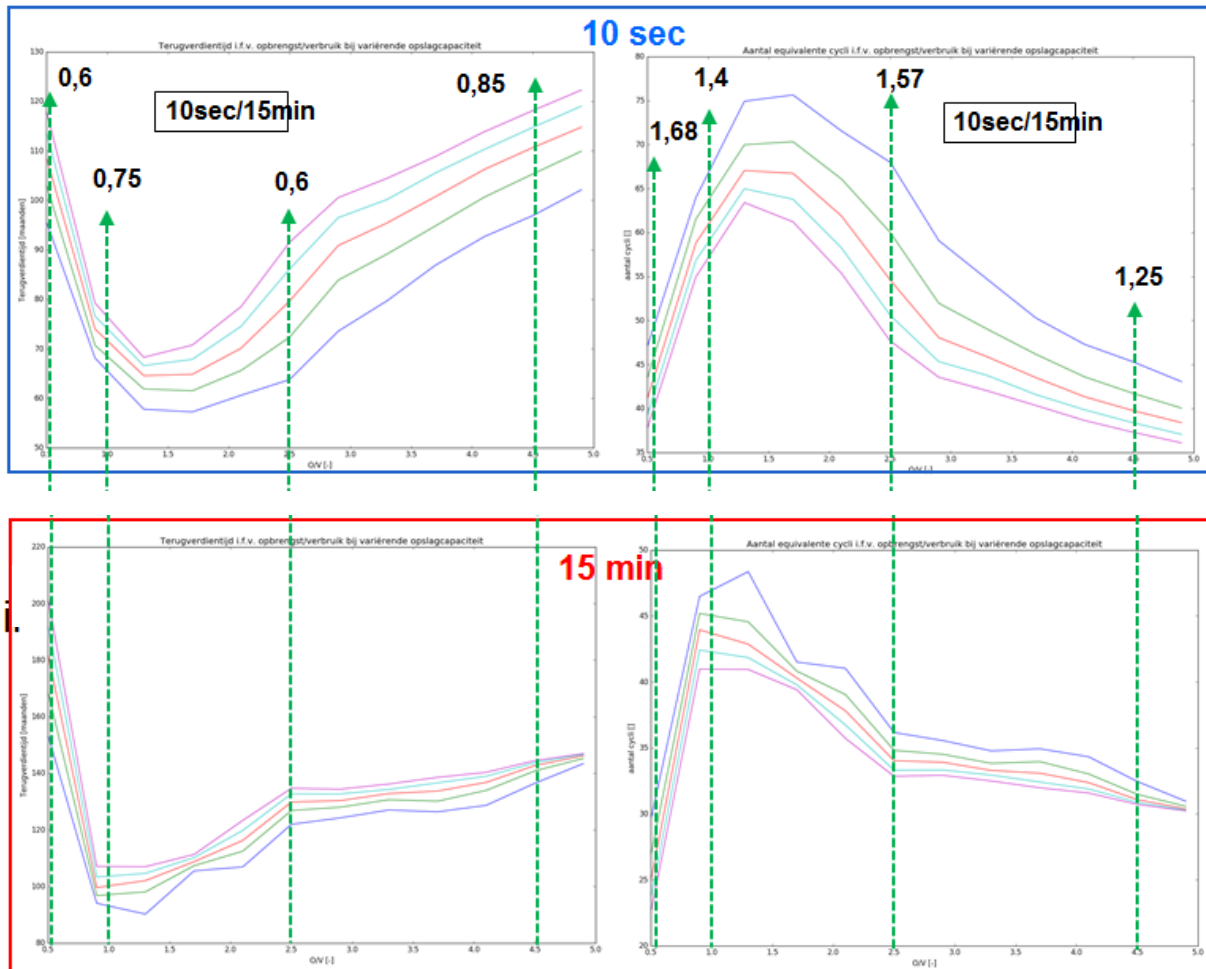
- 1) De terugverdientijd altijd lager zal uitkomen bij eender welke opbrengst/verbruik verhouding
- 2) Het aantal cycli zal altijd hoger uitkomen bij eender welke opbrengst/verbruik verhouding
- 3) Bij sterke overdimensionering ($OV > 4$) daalt het verschil tussen 15min en secondendata

Een valabele verklaring hiervoor kan toegeschreven worden aan het feit dat het opbrengstprofiel steeds veel groter wordt in amplitude dan het verbruiksprofiel. Indien deze profielen niet meer in verhouding zijn met elkaar, zal het netto profiel minder de nullijn snijden omdat het opbrengstprofiel in grote mate boven het verbruik komt te liggen. Dit betekent niet dat de ruis verdwijnt, maar dat de ruis merkkelijk een positieve offset krijgt en de gemiddelde kwartierwaarde ook vaak eenduidig boven het verbruik zal uitkomen.

- 4) Bij sterke onderdimensionering ($OV < 1$) stijgt het verschil tussen 15min en secondendata

Een valabele verklaring hiervoor kan toegeschreven worden de inherente vermogensmismatch bij een opbrengst/verbruiksverhouding van 1. Tijdens het project werd geïllustreerd dat de capaciteitsfactor van PV slechts 12% bedraagt. Dit betekent dat gedurende één jaar een PV-plant maar een continu vermogen van 12% van haar nominaal vermogen genereert. Onderstaande figuur toont dat bij een opbrengst/verbruik verhouding van 0.25 het nominaal vermogen in de buurt komt van het nominaal vermogen een gemiddeld lastprofiel (40-uren week patroon) op kwartierbasis. Dit illustreert dat bij onderdimensionering het amplitudes van opbrengstprofiel en een gelijkaardig verbruiksprofiel sterk in mekaars buurt komen te liggen op kwartierbasis. Op secondenbasis worden dus nog meer snijpunten verwacht van het netto profiel met de nullijn waardoor het verschil tussen 15min en secondendata nog duidelijker kan worden.





4. Algemene conclusie

Het antwoord op de onderzoeksvraag “Wat is de tolerantie bij een dimensionering volgens 15min tijdsresolutie tegenover ogenblikkelijke data?” kan dus niet eenvoudig veralgemeent worden tot één kengetal. De tolerantie van kwartierdata hangt af van casus tot casus en kan alleen met een bekomende meting ingeschat worden. Ook staat vast dat de afwijking tussen kwartierdata en absolute data het grootst worden als het netto profiel ongeveer gelijk wordt aan nul. Dit betekent dat het opbrengst- en verbruiksprofiel quasi gelijk zijn aan elkaar. In dit geval zal de ruis, het lastprofiel dat na een uitmiddelen niet meer zichtbaar is in het kwartierprofiel, zich net veel variaties rond nul vertonen. Veel variaties zijn gunstig voor opslag omdat deze dan maar heel kortstondig dienen opgenomen en terug afgegeven worden. Bijgevolg kunnen veel cycli uitgevoerd worden en kan de “duurdere” afname van externe energie en “goedkope” injectie van eigen energie deels vermeden worden. Telkens een cyclus optreedt, wordt immers geld verdiend!

Wat niet zichtbaar is op kwartierbasis zal in werkelijkheid wel leiden tot een verhoogde benutting opslag. Daarom kan aangenomen worden dat kwartiersimulaties een worstcase weergave zullen zijn van de realiteit. Een meting op hogere resolutie is dus zeker aan te raden om opslag te dimensioneren.

Hoofdstuk 5: ‘Demonstrator’

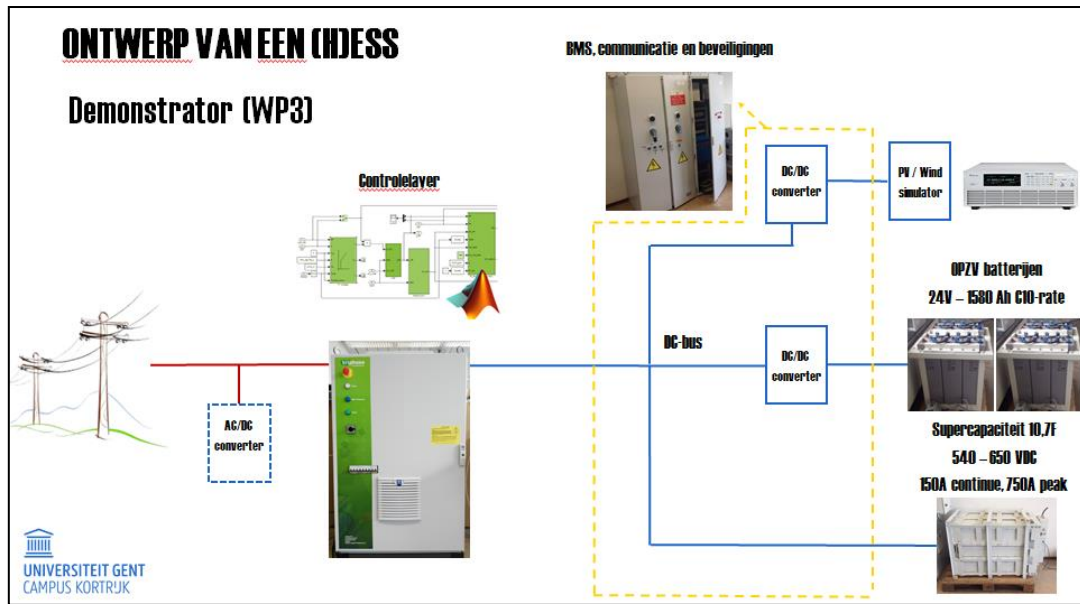
1. Inleiding

Binnen het TETRA-project omvatte het praktische luik onder meer de opbouw van een demo-opstelling voor hybride opslagtechnologieën, kortweg demonstrator hybride opslag genaamd. De voornaamste doelstelling was de opbouw van een bivalent systeem dat naast batterijen ook supercaps koppelt op een common DC-bus van ongeveer 600V. Voor de batterij wordt beroep gedaan op OPzV-technologie, terwijl de supercaps een combinatie vormden van serie geschakelde Electric Double Layer Capacitors (EDLC's). Een tweede basisvereiste was een gewenste industriële toepasbaarheid van enkele 10-tallen kW nominaal vermogen, 100 kW piek en enkele kWh's opslagcapaciteit. Daarnaast was ook een open Energie Management Systeem (EMS) wenselijk, zodat het ontwikkelen van eigen algoritmes niet belemmerd werd door voorgeprogrammeerde functies van fabrikanten. Het traject van basisidee tot operationele ontwikkeling leerde zo heel wat hindernissen en valkuilen ontdekken van dergelijke systemen.

Hardwarmatige proefopstellingen van opslag op realistische schaal is cruciaal tijdens testfase en voor verdere ontwikkeling. Om over de nodige hardware te kunnen beschikken werd beroep gedaan op materiaal van het afgelopen FLANSEA-project waar een boei werd ontwikkeld om golfenergie op te vangen. De voornaamste geschikte componenten waren een supercapbank van 10,7F op 750V en een OPzV batterij van 1600Ah op 24V, weliswaar met een DOD van 20%. Beide units werden aanvankelijk conceptueel geïntegreerd in een hybride systeem m.b.v. een triphase-platform dat ook reeds beschikbaar was. Onderstaand is de eerste conceptuele uitwerking terug te vinden.

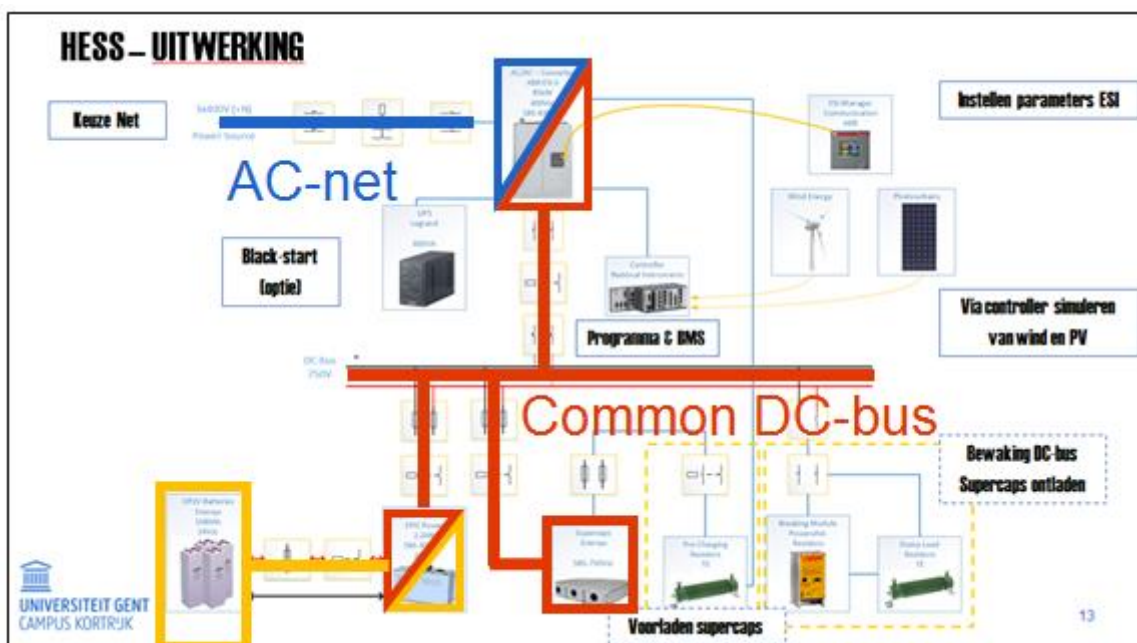


Figuur 114: FLANSEA-boei



Figuur 115: Eerste conceptuele uitwerking

Proefondervindelijk bleek dit simulatieplatform niet geschikt vanwege de lange leerfase, gebrekkige support en beperkte technische mogelijkheden (11kW, 16A AC&DC en 100-600VDC-range). Daarom werd beslist een netinteractieve omvormer aan te schaffen die het gebruiksgemak en mogelijkheden zou verruimen. Deze netomvormer alias Energy Storage Inverter (ESI) werd aangeschaft bij ABB en bezit 85kW vermogen, 120A ingangsstroom en een DC-bus range tussen 580 en 830V bij maximaal 150A. onderstaande figuur representeert het tweede conceptschema, waarbij de netomvormer de common DC-bus aanmaakt en daarop opslagunits worden gekoppeld.



Figuur 116: definitieve conceptuele uitwerking

Een initieel vraagteken was de werking van de netomvormer zonder direct gekoppelde batterij, maar met meerdere indirecte opslagmodules via omvormers. De betreffende netomvormer heeft namelijk

een geladen DC-bus nodig om op te starten. Dergelijke technische vragen kwamen aan bod en worden in de loop van dit hoofdstuk aangekaart en uitgewerkt.

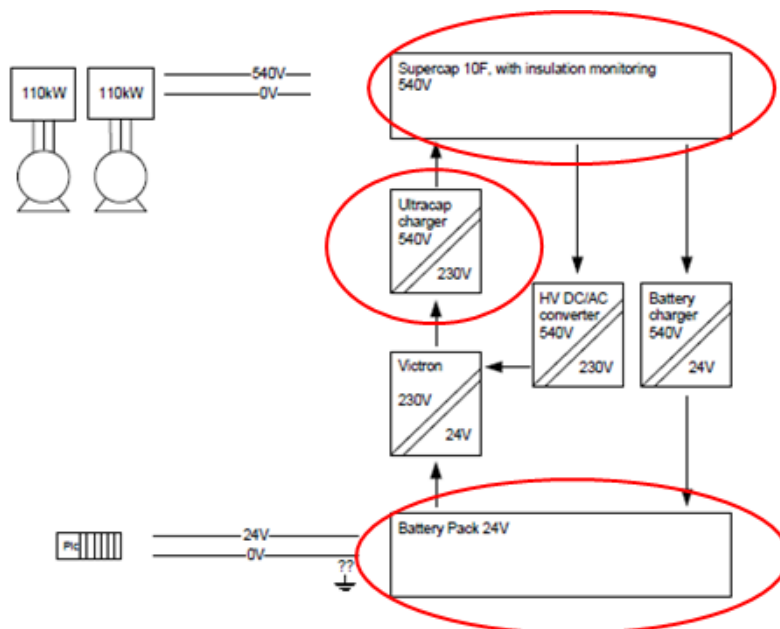
2. Dimensionering en ontwerp

Tijdens de ontwikkeling van de demonstrator werd niet het gebruikelijke dimensioneringspad gevolgd dat in dit document wordt voorgeschreven. Vanwege technische en budgettaire beperkingen was reverse engineering van de componenten uit de boei aangewezen. Bestaande componenten dienden zo flexibel mogelijk geïntegreerd worden in een hybride structuur om een golfenergieconvector om te bouwen tot opslagplatform.



Figuur 117: WEC

Onderstaand wordt kort een toelichting gegeven tot de oorspronkelijke topologie en wat daarvan nog bruikbaar was. Daaropvolgend kan aangevuld worden welke componenten nog ontbreken om de common DC-topologie te bekomen. [1]



Figuur 118: WEC layout

De gegenereerde energie van de aandrijflijn wordt initieel opgevangen door supercaps, waarna deze energie ook kan worden doorgegeven worden aan een dumpweerstand of een batterijpack die de

stuurspanning voorziet. Er is ook een 230VAC eilandnet aanwezig werd aangemaakt door een interactieve batterijvormer. Overigens was nog een voorlader aanwezig die gebruikt werd om de supercaps initieel op te laden. Alle technische specificaties van gerecupereerde componenten worden in de volgende paragrafen toegelicht.



Figuur 119: Ontwerp hybride opslag demonstrator

2.1. Recuperatie supercaps

De supercaps werden destijds aangeleverd door Enersys. De opbouw van een bank wordt zoals gebruikelijk modulair uitgevoerd. In dit geval werden 5 modules met elk 56 seriecellen in serie geplaatst. Elke module heeft een eigen EMS die monitoring en het balanceren van de cellen voor haar rekening neemt. Het gebruikte principe berust op capacitieve koppeling tussen cellen, een efficiënte methode die wel een relatief lange equalisatietijd vergt van minstens een uur. Elke cel heeft een nominale spanning van 2,7V en een capaciteit van 3000F. Dit betekent dat 280 cellen in serie gezamenlijk een equivalente capaciteit van 10,7F op 750V voorstellen. Het spanningsbereik kan perfect variëren van 0 tot 750V. Bij voorkeur wordt wel een spanningsmarge genomen om de maximale spanning en doorslag van de cellen te vermijden. [2]

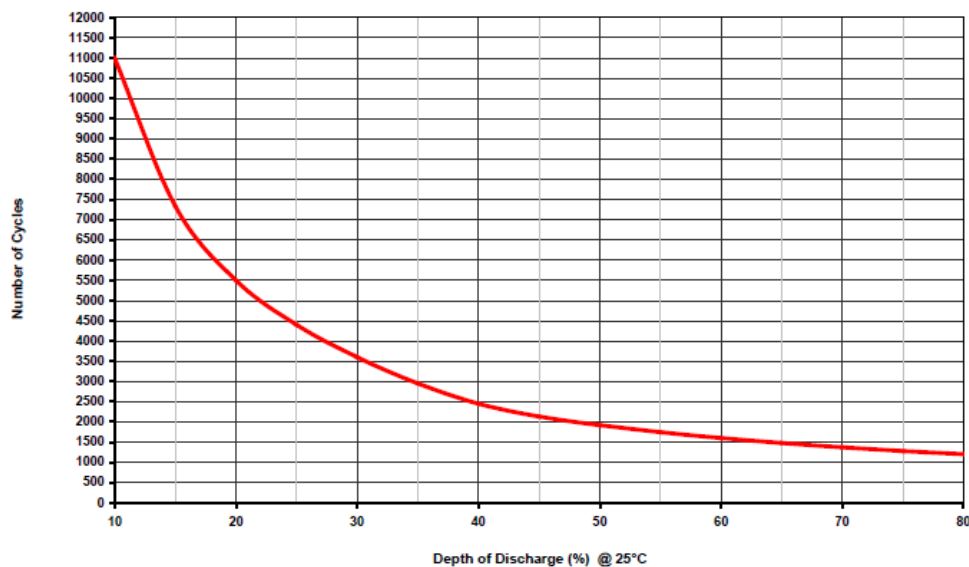
Verder zou elke cel in staat zijn om 150A continu te voeren en zijn piekwaardes tot 950 mogelijk gedurende enkele honderden milliseconden. Daarnaast kunnen de gebruikelijke parameters zoals spanning, stroom en temperatuur worden gemonitord via een CAN 2.0B interface op 125kbits/sec. Onderstaande figuur toont de opbouw van de cellen en de aanwezigheid van een module-EMS. Bij het aantreffen van de caps was de resterende spanning quasi gelijk aan nul en was de toestand volledig ontladen. Verder bleek dat geen impact had op de toekomstige werking van het systeem.



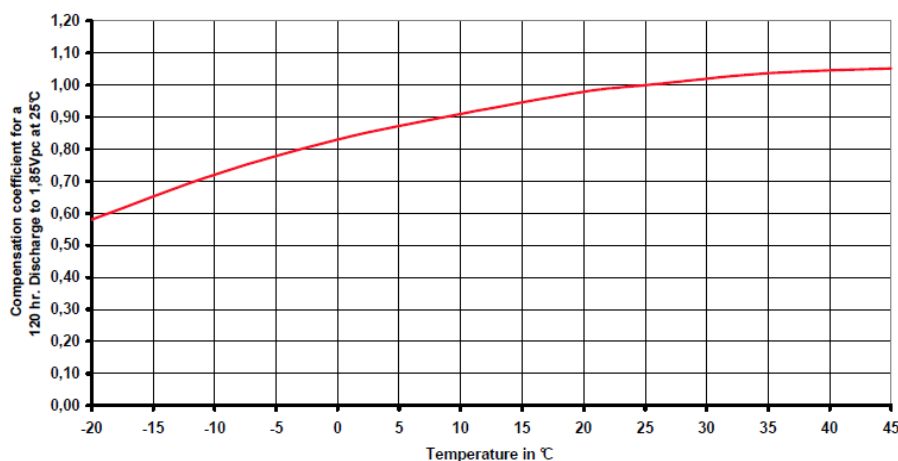
Figuur 120: Module layout

2.2. Recuperatie OPzV-batterij

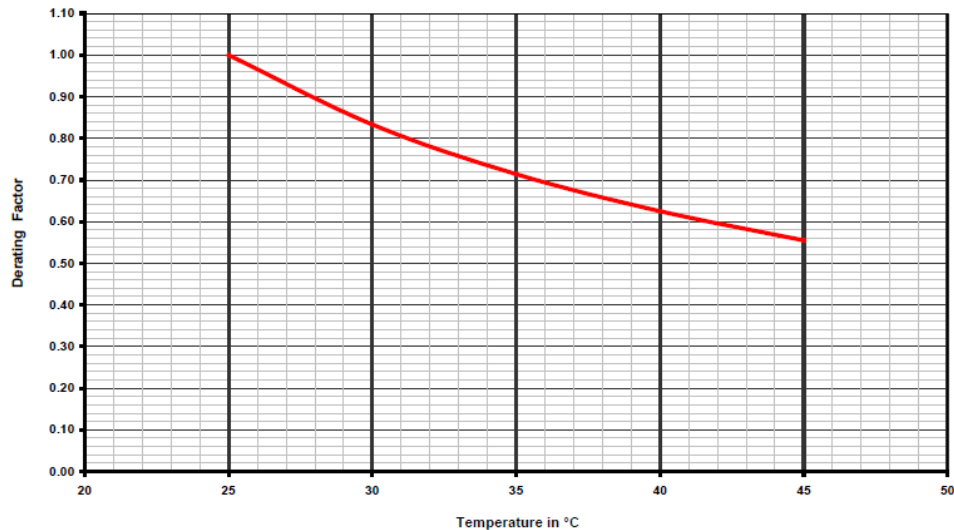
OPzV staat gekend als een robuuste loodzuurtechnologie. Ook deze batterij werd destijds aangeleverd door Enersys. De batterij kan betrekkelijk veel cycli aan als de DOD weliswaar wordt beperkt. In dit geval schrijft de datasheet een DOD voor tussen 2 en 20%. Hierdoor representeren de 12 serie geschakelde cellen van 1600 Ah en 2V een 24V systeem van ongeveer 8kWh. Daarbij hoort een efficiëntie van 90% bij een SOC van 75% en een zeer lage zelfontlading van 3% gedurende de eerste maand. De batterij had bij aanvang van de opbouw nog een restspanning van 24Vminstens en de kritische onderspanningsgrens was nog niet bereikt. De datasheet schrijft geen stroombeperking, tenzij de floatspanning boven de 27V wordt ingesteld. In dat geval moet ontladen beperkt worden tot 40% van de 0,1C-rate, zijnde 64A. Overladen is niet meteen fataal voor deze batterij. De capaciteit wordt uitgedrukt als C_{10} , wat dus betekent dat gedurende 10uur kan ontladen worden aan 160A. De datasheet vermeldt ook de C_{120} -waarde, zijnde 1967Ah. In dit geval kan 120 uur ontladen worden aan 16A alvorens de minimale spanning van 1,85V per cel wordt bereikt. Uiteraard heeft ook de temperatuur een belangrijke invloed op de capaciteit. Dit verband werd ook teruggevonden in de datasheet van de fabrikant. [3]



Figuur 121: levensduur i.f.v. DOD



Figuur 122: Capaciteit i.f.v. temperatuur



Figuur 123: levensduur derating i.f.v. temperatuur

State of charge	Voltage
100%	2.13 Vpc
70%	2.09 Vpc
50%	2.06 Vpc
20%	2.02 Vpc

Figuur 124: SOC i.f.v. open klemspanning

2.3. Ontbrekende componenten voor common DC-opstelling

2.3.1. Netomvormer en DC-bus niveau

De netomvormer vormt het hart van het hybride systeem. Een belangrijk criterium is de netconfiguratie aansluiting met of zonder N-geleider omdat hierdoor de DC-bus range wordt bepaald. Eveneens moet de omvormer in staat zijn voldoende stroom/vermogen te kunnen leveren voor het gebruik van de supercaps. Ook het spanningsniveau van de DC-bus zal bepalen hoe de DC-bus zal worden geconfigureerd. Gezien twee opslagsystemen met een verschillende nominale spanning aanwezig zijn, zal minstens één een bijkomende bidirectionele DC-DC-omvormer nodig zijn. De meest logische configuratie is om een directe koppeling te maken tussen de supercaps en de DC-bus van de netomvormer, gezien bij groot vermogen een stroom op 24V irreëel groot wordt. Netomvormers van dergelijke vermogen zijn gelijkaardig aan drives uit aandrijftechnologie die ook werken met een DC-bus van 600 à 800V. Daarom werd op deze DC-bus range gefocust

Uiteindelijk werd de keuze gemaakt voor de ESI-S netomvormer van ABB. Deze bezit volgende specificaties [4]:

- $P_{nom} = 85kW$
- UAC = 3x400V, Neutrale optioneel
- IDC = 150A
- UDC = 580VDC – 830VDC

- Netinteractief of eilandwerking
- Communicatie via Modbus
- Instelbaar vermogen en power quality
 - Actief
 - Reactief
 - Actieve filter



Figuur 125: ESI

Dergelijke common DC-bus dient beveiligd te worden met een overspanningsbeveiliging. De zeeboei bevatte reeds een instelbare externe chopper om de DC-bus te beschermen. Deze kon gerecupereerd worden en ingesteld worden op maat van het common DC-niveau.



Figuur 126: Breaking resistor chopper

Eveneens dient ook de vraag gesteld worden hoe het systeem zal opgestart worden. Er zijn voorlaadmechanismes nodig om de betreffende opslag initieel op te laden. De voorlader uit de boei is nog steeds perfect toepasbaar in deze topologie om eveneens de supercaps terug op te laden. Gezien de ESI-S een geladen opslagunit, zij het een batterij of supercap, nodig heeft om op te starten, wordt de voorlader cruciaal. Aanvankelijk worden de supercaps op spanning gebracht met deze lader en kan vervolgens de ESI koppelen met de supercaps.

2.3.2. DC-DC-omvormer

Een bidirectionele omvormer laadt toe de batterij te verbinden met het common DC-niveau. De stap van 24V naar 600 à 800V wordt uitgevoerd door een EPC 2k2 624 converter van EPIC power. Bij het aanschaffen van een DC-DC omvormer is het belangrijk dat de HV-specificaties zo goed mogelijk overeen komen met deze van de netomvormer. Dit laat immers de nodige vrijheid toe in de toekomst. In werkelijkheid verloopt de dimensionering van een batterij en een omvormer samen. De omvormer bepaalt meestal de gezamenlijke stroomlimiet, terwijl de spanning van de batterij de gezamenlijke spanningsgrens vastlegt [5]:

- Bidirectionele dual active bridge (DAB) convertor
- $I_{DC\ max} = 100A$
- $U_{DC\ low} = 21-29V$
- $U_{DC\ high} = 580VDC - 830VDC$
- DC low & DC high galvanisch gescheiden
- Communicatie via CAN



Figuur 127: DAB DC-DC-converter

Het nadeel van deze omvormer is dat deze enkel kan opgestart worden langs de LVDC-zijde. Bijgevolg is een bijkomende batterijlader geen overbodige luxe om de batterij vanuit het AC-net terug helemaal op te laden alvorens de eerste commissioning uit te voeren.

2.3.3. EMS-controller

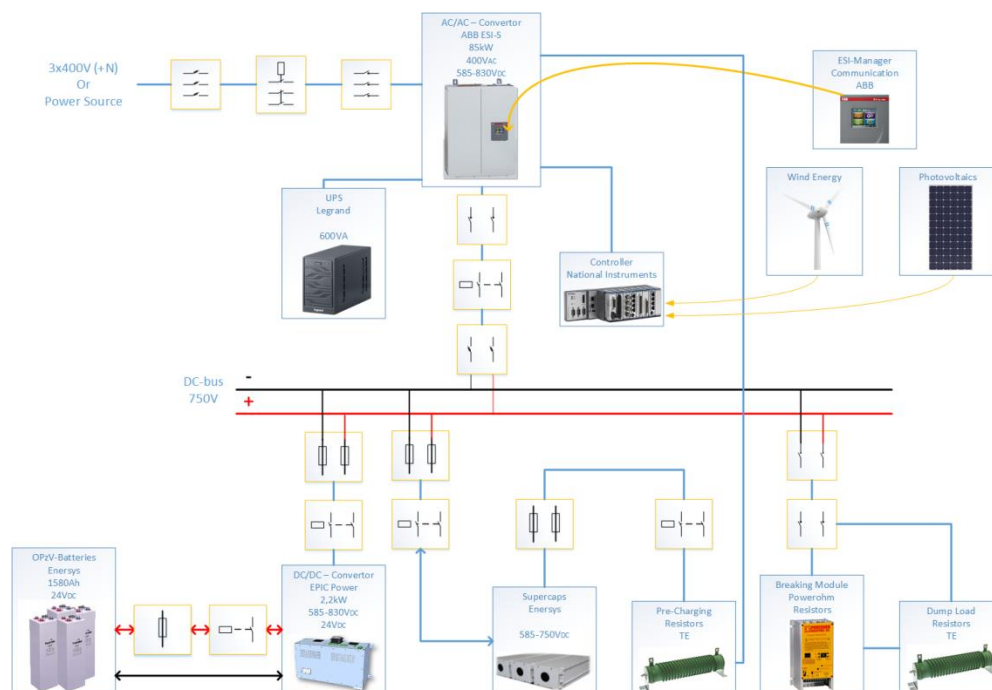
De laatste ontbrekende cruciale component is een controller voor het overkoepelende managementsysteem. Deze controller communiceert met alle subsystemen en bepaalt de interactie van elke opslagunit. Bij voorkeur wordt één uniform communicatieprotocol gebruikt, maar in praktijk is dit niet altijd mogelijk. Daarom ging de voorkeur naar een realtime controller die uitbreidbare

acquisitiekaarten bezit met het oog op toekomstige uitbreidingen. Uiteindelijk werd voor Compact Rio gekozen van National Instruments. De CPU is vrij te configureren in werd in dit geval uitgebreid met digitale i/o, een spanningsmeetkaart om batterijcellen op te meten, een temperatuurkaart en een CAN-interface. Via de standaard ethernetpoort kan met de ESI data uitgewisseld worden via Modbus TCP-IP. De controller is vrij te programmeren via Labview, een grafische omgeving die ondersteund wordt door een grote community [6].

- NI CompactRIO 9068
- Labview RT met FPGA
- beschikbare modules:
 - CAN bus: supercaps-BMS en DC-DC-omvormer
 - ModBus TCP: netomvormer
 - Spanningssensoren
 - Thermokoppels

2.4. Common DC hybride demonstrator

Als resultaat wordt het onderstaande hybride systeem verkregen. Naast de bovenvermelde componenten dienen nog algemene beveiligingen, meetsensoren en mini-UPS toegevoegd worden. Ook wordt het systeem voorzien van een manueel ontladmechanisme waardoor de operator de DC-bus en de supercaps ten allen tijde veilig kan ontladen. De exacte werking en het finetunen wordt in de volgende paragrafen verder uitgewerkt.



Figuur 128: demonstrator hybride opslag

3. Functionaliteiten van componenten

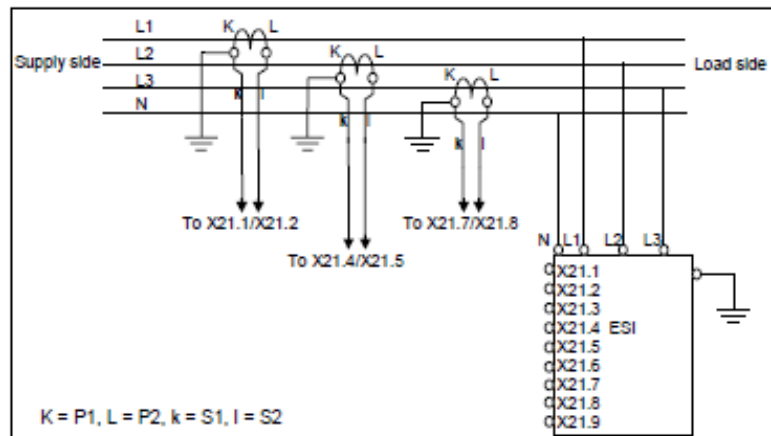
3.1. ESI-commissioning

De energy storage inverter van ABB kan zowel op 3- als op 4-leidernetten aangesloten worden. Er is een klem voorzien om de neutrale aan te sluiten. Indien er geen actieve nood is om de nullederstroom ten gevolge van faseonbalans weg te werken, wordt bij voorkeur voor een 3-draadsaansluiting gekozen. De reden hiervoor is het feit dat de aansluitconfiguratie de minimale DC-bus spanning bepaalt en dus de DC-bus range in het algemeen. De nuttige energie wordt bepaalt door het kwadratisch verschil van de minimale en maximale spanning [7].

$$E_{\text{bruikbaar}} = \frac{C \cdot (V_{\text{max}}^2 - V_{\text{min}}^2)}{2}$$

De minimale DC-spanning moet minstens groter zijn de piekwaarde van de lijnspanning in een 3-draadsaansluiting. In dit geval wordt de minimale DC-spanning berekent als het product van de RMS-lijnspanning en $\sqrt{2}$. Dit betekent dat deze ondergrens op 563 komt te liggen. Bij een 4-draadsaansluiting met neutrale moet het minimum minstens gelijk zijn aan de twee keer de piekwaarde van de RMS-fasespanning. In dat geval is het resultaat 649V. De minimale DC-spanning is dan 15% hoger waardoor 32% minder energie kan opgeslagen worden in de DC-bus.

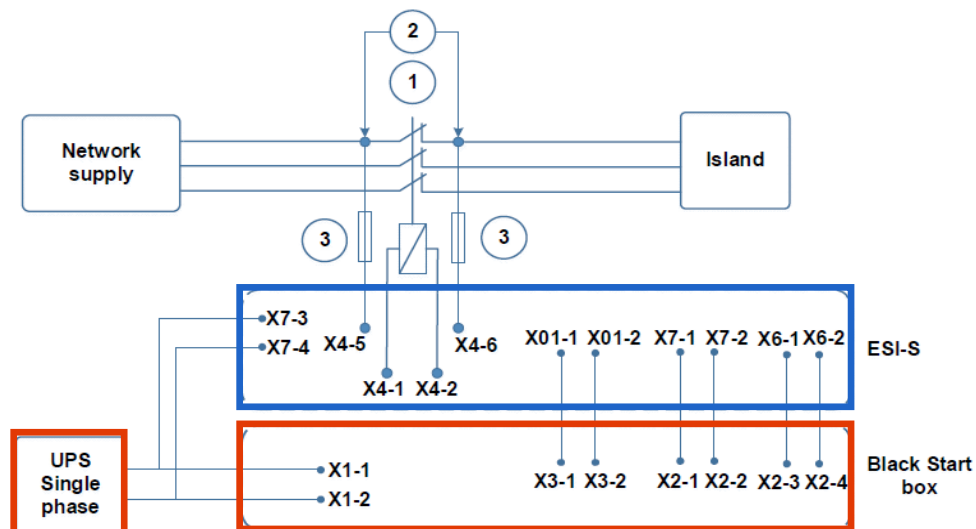
De ESI is in feite een omgebouwde actieve filter, een power quality apparaat dat het harmonisch spectrum opmeet en de tegenharmonischen injecteert om de harmonische distorsie te reduceren. De hardware is grosso modo dezelfde, alleen wordt de DC-bus nu daadwerkelijk gebruikt om er een opslagsysteem aan te koppelen. Om een closed loop controle te verkrijgen van het vermogen dienen stroomtransfo's extern geïnstalleerd worden. Ook voor de werking als filter zijn de meettransfo's cruciaal. Onderstaand wordt een aansluitschema weergegeven van de TI's (transformateur intensité). De juiste TI wordt gevonden door rekening te houden met de maximale piek- of inschakelstroom. De secundaire stroom en de maximale stroom laten toe de correcte wikkilverhouding en primaire stroom te kiezen. Een primaire stroom van 1000A en secundair van 5A levert een ratio op van 200. Voor het schijnbaar vermogen dient de lengte van de kabel in rekening gebracht te worden om de impedantie en bijhorende spanningsval te kennen. Dit verlies moet minstens gecompenseerd kunnen worden. In dit geval werd 15VA afgeleid uit richtwaarden van de manual. Tenslotte dient de nauwkeurigheidsklasse 1 gekozen. Dit betekent dat een primaire stroom ter waarde van de nominale stroom een amplitudfout bezit van 1%.



Figuur 129: Aansluitschema TI's

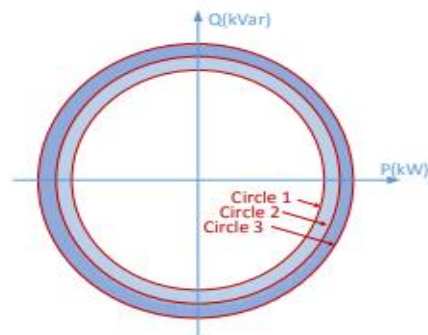
De ESI is in staat om netgekoppeld of in eiland te functioneren. Met deze kenmerken voldoet het toestel aan de belangrijkste functionaliteit van een netinteractieve omvormer. Netgekoppeld opereert het toestel als een stroombron die netfrequentie volgt en energie injecteert of opslaat. In eilandmodus neemt de omvormer de karakteristieken van een spanningsbron over door zelf de netfrequentie te dirigeren en de netspanning op te leggen aan het eilandnet. Frequentie en spanning kunnen vrij ingesteld worden in eiland.

Voor eilandwerking heeft de ESI een bijkomende UPS nodig omdat het moederbord van de ESI gevoed wordt langs de AC-netzijde. Tijdens overgang naar eiland verdwijnt de netspanning en is de hulpvoeding onbeschikbaar. Hier treedt de UPS dan op als een kortstondige overbrugging van de stuurvoeding. Daarnaast dient ook een externe eilandschakelaar te worden voorzien die door de ESI wordt bestuurd om naar eilandmodus over te gaan. Over de klemmen van de eerste pool van deze schakelaar wordt de spanning gemeten. Deze meetwaarde wordt gebruikt om het spanningsverschil tussen net en eiland te kennen. Tijdens de hersynchronisatie naar netgekoppeld is dit van belang, want alvorens terug in te koppelen dient het eilandnet synchroon te zijn met het bovenliggend net. De netomvormer kan eveneens een blackstart uitvoeren, een autonome start waarbij het voedingsnet niet aanwezig is. Hiervoor dient het opslagsysteem wel geladen te zijn en moeten de UPS en een bijkomende blackstartbox geïnstalleerd zijn. De blackstartbox functioneert als verbinding tussen batterij en het moederbord van de ESI via een weerstand.

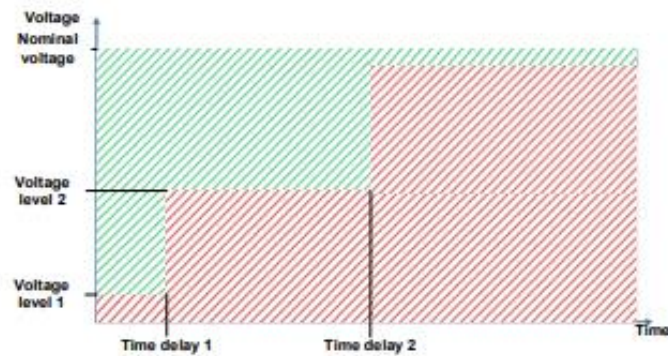


Figuur 130: UPS en blackstartbox

Elke decentrale bron en netinteractieve omvormer die parallel functioneert met het distributienet moet voldoen aan de richtlijnen die worden voorgeschreven in de C10/11 van het Synergrid. Dit betekent onder meer dat het systeem moet werken binnen opgelegde frequentie – en spanningsgebieden en dat in geval van een netstoring het opslagsysteem automatisch dient ontkoppeld te worden. Daar de ESI zelf geen gehomologeerde actieve bouwsteen bezit die deze taak op zich neemt, dient zelf een ontkoppelingsrelais voorzien te worden die is goedgekeurd door het Synergrid. Meer uitleg daaromtrent volgt in het onderdeel normering en veiligheid. Wel kunnen spannings- en frequentiegrenzen worden ingesteld waarbinnen de ESI netgekoppeld blijft en zelf het net ondersteunt tijdens foutsituaties (low voltage ride through). Onderstaande figuur schetst het werkingsbereik van de omvormer, die zowel actief als reactief vermogen kan leveren.

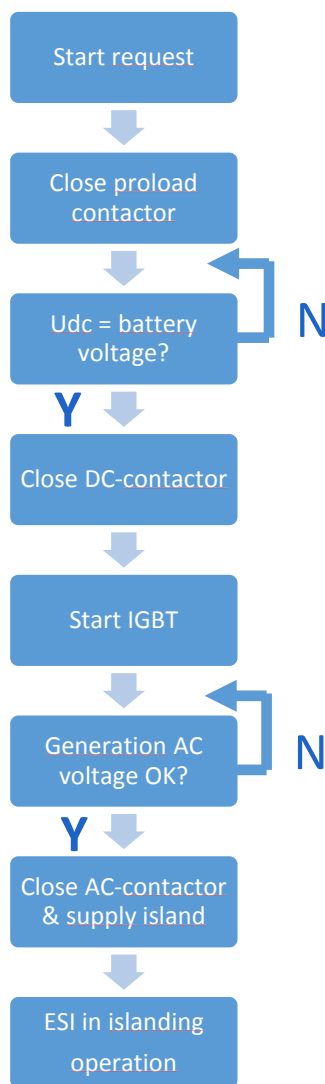


Figuur 131: Schijnbaar vermogen van ESI



Figuur 132: LVRT-instelgrenzen

Om de opstart en werking van de netomvormer beter te begrijpen wordt onderstaand de interne opstartprocedure geschetst. Daaruit valt af te leiden dat zolang de interne DC-bus van de ESI niet gelijk is aan het niveau van een aanwezige DC-bron, de interne DC-bus niet wordt gekoppeld met de externe opslag. Dit bepaalt dus de opstartprocedure van het gehele hybride systeem.



Figuur 133: opstartprocedure ESI

Eens de hardware is aangesloten en de stuurspanning wordt geactiveerd, komt de interne ESI-manager, de interne controller van ABB, online. Vanaf dan start de commissioning en moeten alle instelwaarden worden ingevoerd. Alles kan manueel of via Modbus TCP doorgegeven worden. Eerst en vooral worden de netspanning, frequentie, connectiewijze met het distributienet en de TI's geconfigureerd. Daarna dienen de opslagparameters worden ingevoerd. De parameters die van belang zijn voor de batterij omvatten drie grote groepen: battery data, setting en control. In data wordt in principe de data geschreven die afkomstig is van de batterij-BMS. In settings moet de operator de limieten van de batterij ingeven aan de hand van de manual alsook het schijnbaar vermogen en de LVRT-parameters instellen. In control tenslotte komen de actieve en reactieve setpoints terecht en ook de eilandcommando's. Onderstaande figuren tonen welke parameters precies ingevuld moeten worden.

Byte Offset	Description	Units	Data type	Size in bytes	Min value	Max value	Src	Modb (B)
0	State Of Charge	%	Float	4	0	100	ESI	46101
4	Battery voltage	V	Float	4	0	1e12	ESI	46103
8	Max cell voltage	V	Float	4	0	1e12	ESI	46105
12	Min cell voltage	V	Float	4	0	1e12	ESI	46107
16	Battery current	A	Float	4	-1e12	1e12	ESI	46109
20	Battery ambient temperature	°C/°F	Float	4	-500	500	ESI	46111
24	Cell battery average temperature	°C/°F	Float	4	-500	500	ESI	46113
28	Cell battery max temperature	°C/°F	Float	4	-500	500	ESI	46115
32	Cell battery min temperature	°C/°F	Float	4	-500	500	ESI	46117
36	Max charge current	A	Float	4	-1e12	1e12	ESI	46119
40	Max discharge current	A	Float	4	-1e12	1e12	ESI	46121
44	BATTERY setting 0	-	Float	4	-1e12	1e12	ESI	46123
48	BATTERY setting 1	-	Float	4	-1e12	1e12	ESI	46125
52	BATTERY setting 2	-	Float	4	-1e12	1e12	ESI	46127
56	BATTERY setting 3	-	Float	4	-1e12	1e12	ESI	46129

Figuur 134: Battery data

Byte Offset	Description	Units	Data type	Size in bytes	Min value	Max value	Src	Modb ®
0	fBat_Volt_Mfr_Chg	V	Float	4	0	1e12	ES1	46301
4	fBat_Volt_Mfr_Dch	V	Float	4	0	1e12	ES1	46303
8	fBat_Cur_Mfr_EOC	A	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46305
12	fBat_Cur_Mfr_EOD	A	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46307
16	Max battery voltage	V	Float	4	0	1e12	ES1	46309
20	Min battery voltage	V	Float	4	0	1e12	ES1	46311
24	Max cell voltage	V	Float	4	0	1e12	ES1	46313
28	Min cell voltage	V	Float	4	0	1e12	ES1	46315
32	Max cell temperature	°C/°F	Float	4	-500	500	ES1	46317
36	Min cell temperature	°C/°F	Float	4	-500	500	ES1	46319
40	Max SOC	%	Float	4	0	100	ES1	46321
44	Min SOC	%	Float	4	0	100	ES1	46323
48	P AC control		Byte	1	0	1	ES1	46325
49	Enable Set Q		Byte	1	0	1	ES1	46326
50	Enable Black Start		Byte	1	0	1	ES1	46327
51	Low Voltage Ride Through		Byte	1	0	1	ES1	46328
52	Min AC Voltage 1	V	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46329
56	Min AC Voltage 2	V	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46331
60	Min Time 1	ms	Float	4	0	1e12	ES1	46333
64	Min Time 2	ms	Float	4	0	1e12	ES1	46335
68	Ramp rate for active power	kW/s	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46337
72	BATTERY setting 0	-	Byte	1	0	255	ES1	46339
73	BATTERY setting 1	-	Byte	1	0	255	ES1	46340
74	BATTERY setting 2	-	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46341
78	BATTERY setting 3	-	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46343

Figuur 135: Battery settings

Byte Offset	Description	Units	Data type	Size in bytes	Min value	Max value	Src	Modb ®
0	Target Active Power	kW	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46201
4	Target Active Power P1	kW	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46203
8	Target Active Power P2	kW	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46205
12	Target Active Power P3	kW	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46207
16	Target Reactive Power Q	kvar	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46209
20	Target Reactive Power Q1	kvar	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46211
24	Target Reactive Power Q2	kvar	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46213
28	Target Reactive Power Q3	kvar	Float	4	-1e12	1e12	ES1	46215
32	Islanding	-	Byte	1	0	2	ES1	46217

Figuur 136: Battery control

3.2. DC-DC commissioning

Hardwarematig is de indienstname van de een DC-DC-omvormer zeer eenvoudig. Deze omvormer kan wel enkel via CAN-communicatie worden geconfigureerd. Alvorens van start te gaan dient de batterij voldoende geladen te zijn om daarna de koppeling te maken met de LVDC-zijde. Daarna kan de powerknop geset worden en een hardwarematige activatie uitgevoerd worden om de omvormer operationeel brengen. Vervolgens dient doorgegeven te worden hoe snel de berichtuitwisseling

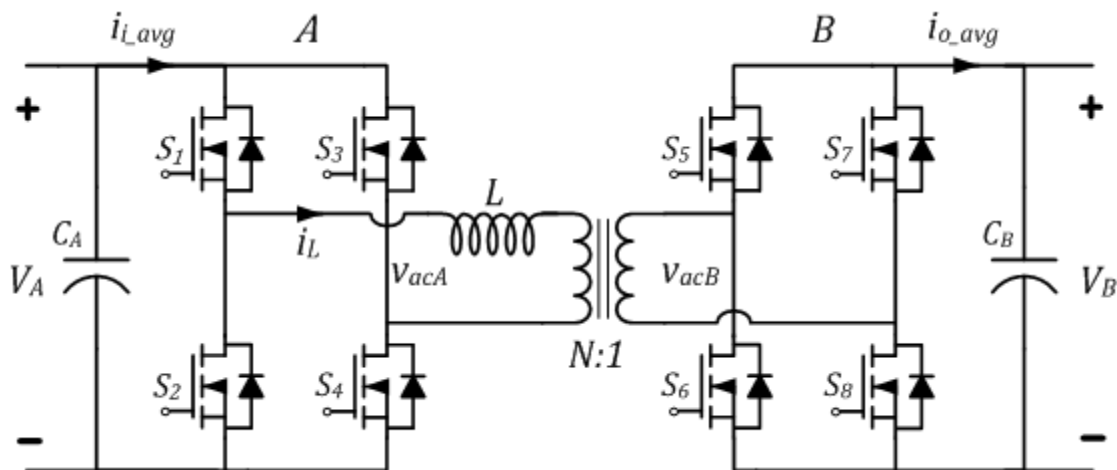
verloopt. Tenslotte zal na een softwarematige set de omvormer continu data uitwisselen en referenties kunnen uitsturen.

De omvormer heeft twee werkingsmodi. In autonome modus voedt de omvormer de batterij belastingen of worden overschotten opgeslagen. In feite werkt deze modus als een spanningsbron waarbij de belasting wordt gevolgd. De omvormer controleert de spanning en de energiestroom wordt bepaald door de belasting zelf. Standaard werkt de omvormer niet in autonome mode, maar volgens stroomcontrole. Indien de spanningen binnen de ranges liggen, zal de omvormer een opgegeven stroomreferentie kunnen uitvoeren. Positief betekent laden van batterijen, terwijl een omgekeerd teken een ontlading veroorzaakt. Onderstaand wordt een voorbeeld weergegeven van een communicatiebericht.

Message ID: 0xEB00; Message Name: EPC control; Message length: 3 bytes					
Variable Name	Start bit	Bit length	Scaling	Type	Description
Enable	0	1	-	unsigned	This signal enables the EPC to charge or discharge power from/to the HVDC (High Voltage DC) bus connected 0 = EPC disabled 1 = EPC enabled Default value: 0
Power direction	1	1	-	unsigned	This signal sets the current direction 0 = Charge 1 = Discharge Default value: 1
Current reference	8	16	0.1A/1	signed	Battery current reference Minimum value: -2000 = -200.0 A Maximum value: 2000 = 200.0 A Default value: 0.0 A

Figuur 137: EPC-control bericht

Vervolgens wordt nog even dieper ingegaan op het werkingsprincipe. Daar het spanningsverschil tussen hoog- en laagspanningszijde te groot is, wordt gebruik gemaakt van een galvanische scheiding. Dit betekent dat de LV- en HV-connector fysisch niet aan elkaar gekoppeld zijn, maar wel magnetisch via een transformatie. Dit is gebruikelijk bij een te groot spanningsverschil vanwege efficiëntieredenen. Uiteraard werkt de omvormer bidirectioneel zodat met dezelfde unit zowel opladen als ontladen mogelijk is. De schematische voorstelling ziet er als volgt uit.



Figuur 138: DAB DC-DC-converter [8]

Twee H-bruggen bestaande uit schakelende IGBT's generen een hoogfrequent wisselspanningssignaal dat door transformator kan doorgegeven worden. Ook valt op te merken dat een spoel wordt aangesloten aan één van de transformatorbenen. De spoel veroorzaakt een faseverschuiving tussen primaire en secundaire zijde en hiervan maakt de omvormer gebruik om zijn vermogensreferentie op te stellen. Deze configuratie wordt in de literatuur Dual Active Bridge (DAB) genoemd en heeft als

voornaamste voordeel de quasi verliesvrije werking en de mogelijkheid om een bidirectioneel vermogen in te stellen.

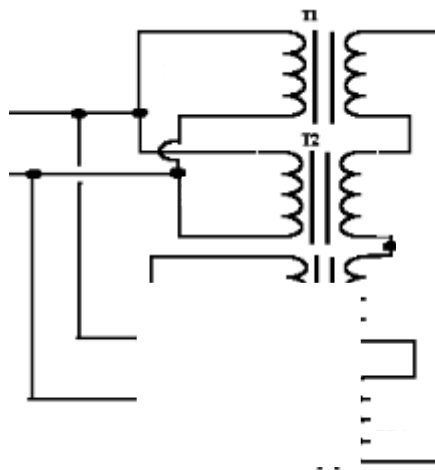
3.3. Voorlader

Een voorlader is noodzakelijk tijdens de eerste indienstname of na onderhoud het opladen van opslagunits te verwezenlijken. Daar de netomvormer veronderstelt dat een geladen batterij of een spanningsbron aanwezig is op de externe DC-bus, dient de EMS eerst de supercaps voor te laden alvorens deze direct kunnen gelinkt worden aan de interne DC-bus van de ESI zelf. Na een tijdelijke inactiviteit is het mogelijk dat door zelfontlading SOC en bijgevolg de spanning gedaald is tot onder de minimale DC-spanning van de netomvormer. Telkenmale zal de voorlader dan geactiveerd moeten worden. Mits een andere configuratie zou de DAB-DC-DC-omvormer ook in staat kunnen zijn om als voorlader te fungeren van de caps met behulp van de resterende energie in de batterij. In praktijk is de DC-DC-omvormer beveiligd tegen operationeel worden indien geen HVDC-spanning aanwezig is. Daarom werd een eigen voorlaadmechanisme ontwikkeld, bestaande uit een gelijkrichterbrug en voorlaadweerstanden.

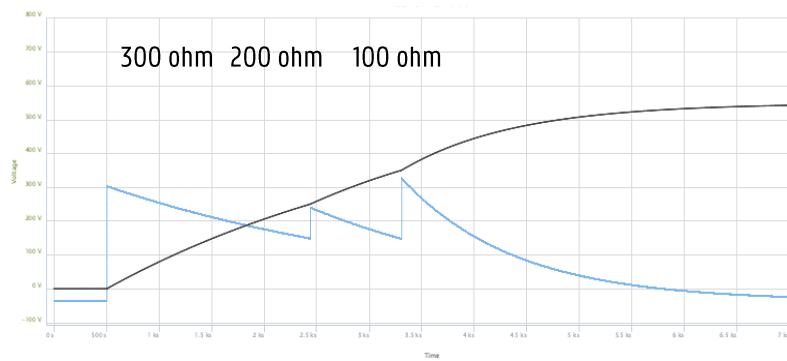
De voorlader kan eenvoudig bepaald worden door de oplaadtijd te definiëren. Aangezien de capaciteit constant is en de weerstandswaarde vrij gekozen kan worden, is de totale oplaadtijd gelijk aan

$$t_{\text{charge}} = 5 RC$$

De weerstandswaarde kan ook deels variabel gemaakt worden door gebruik te maken van een weerstandschakeling om de laadtijd te reduceren. Als voeding wordt een hulpcircuit afgetakt van het 230 VAC net. Door enkele transformatoren parallel te voeden en hun secundaire in serie te schakelen, kan een hoge spanningswaarde bereikt worden. Na een gelijkrichterbrug wordt een constante DC-spanning bekomen die zich in de range van de ESI-omvormer bevindt.



Figuur 139: Voorlaadcircuit



Figuur 140: Voorlaadschakeling

Terzijde kan ook nog meegegeven worden dan het voorladen van de batterij gebeurt met een Quattro van Victron Energy.

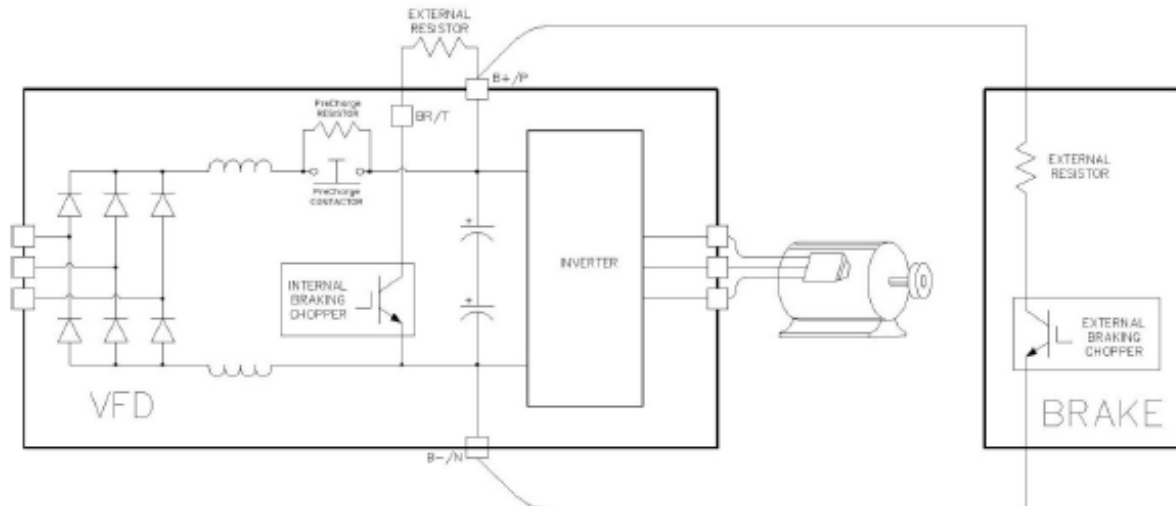


Figuur 141: Quattro 24V lader/omvoermmer

3.4. Overspanningsbeveiliging DC-bus

Hoge DC-spanningen brengen onherroepelijk gevaren met zich mee. Om de supercaps te beschermen tegen overspanning en doorslag dient de nodige zekerheid ingebouwd te worden. De keuze viel op het hergebruik van een DC-chopper, een schakelende IGBT-module die dient verbonden te worden met een externe weerstand. Dergelijke hardware is ook terug te vinden in aandrijftechnologie waar remweerstand de overmatige geregenereerde energie tijdens regeneratieve werking dienen te dissiperen zodat overspanning van de DC-bus wordt vermeden. De supercaps hebben een nominale spanning van 750V, maar de drempelspanning wordt vastgelegd op 700V om een veilige marge in te bouwen. Bovendien zorgt een reductie van de werkingsspanning van cellen voor een langere levensduur. De externe weerstand die de overmatige energie dient te dissiperen, wordt worst-case als volgt berekent:

$$R_{min} = \frac{U_{max}}{I_{continu}} = \frac{700}{50} = 35 \text{ ohm}$$



Figuur 142: DC-overspanningsbeveiliging [9]

PowerOhm Part No.	Nominal AC Line Voltage	Minimum Ohms @ listed Turn ON	Turn ON Voltage	RMS Cont Current	Max Peak Current	Max Watt Loss
BM2-50	240	1.95	390vdc	50	200	154
BM2-115*	240	1.95	390vdc	115	200	293
BM2-150*	240	1.3	390vdc	150	300	369
BM4-50	480	3.88	775vdc	50	200	163

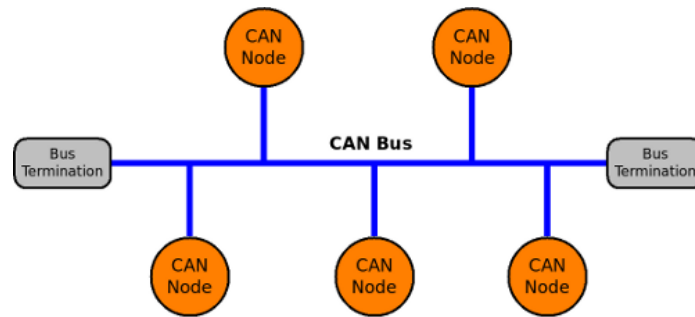
Figuur 143: Chopper specificaties

4. EMS-programma

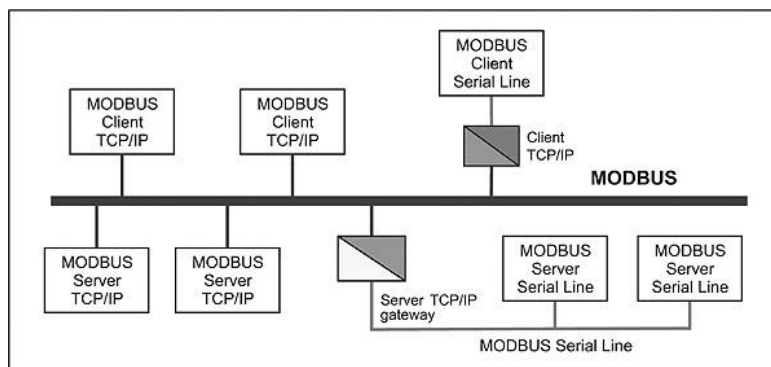
Het ontwerpen van een eigen EMS neemt heel wat tijd in beslag. Daartegenover staan de voordelen van eigen programmatie en de mogelijkheid om een multifunctioneel systeem volledig zelf te ontwikkelen. Welke controller ook wordt angewend, de opbouw en structuur van het programma dienen gebouwd te worden op dezelfde fundamenteën. Zo wordt het management systeem best opgedeeld in drie grote categorieën, nl. de initialisatie en veilige opstart van elke component, vervolgens het hoofdprogramma/algortme om vervolgens te eindigen met een veilige vergrendeling van het systeem. Een hybride opslagsysteem vertoont immers karakteristieken van een reactor. De werking kan niet altijd zomaar binnen de gewenste tijd stopgezet worden. Daarmee dient altijd rekening gehouden te worden in het ontwerp.

In de initialisatiefase dient de communicatie opgebouwd te worden. Datacommunicatie en protocollen zullen onherroepelijk enige studiewerk vereisen indien een volledig autonoom systeem gewenst is. De CAN-bus van de hybride demonstratiesetup bevat drie knooppunten: De CAN-interfacekaart van de NI-controller, de BMS van de supercaps en de controller van de DC-DC-omvormer. Het Modbus netwerk daarentegen bestaat uit twee knooppunten, nl. de NI-controller als

cliënt die data opvraagt van de server, zijnde de ESI-netomvormer. De server geeft toegang tot dataregisters die de cliënt nodig heeft om het EMS uit te baten.



Figuur 144: CAN-bus



Figuur 145: Modbus netwerk [10]

Eens de communicatie loopt zoals gewenst, kan toegewijd worden op de opstartprocedure van het hybride systeem, met daarin centraal de externe voorlader van de supercaps. De EMS-controller dient de gewenste contactoren of hulpcontacten te activeren om de onderstaande volgorde uit te voeren:

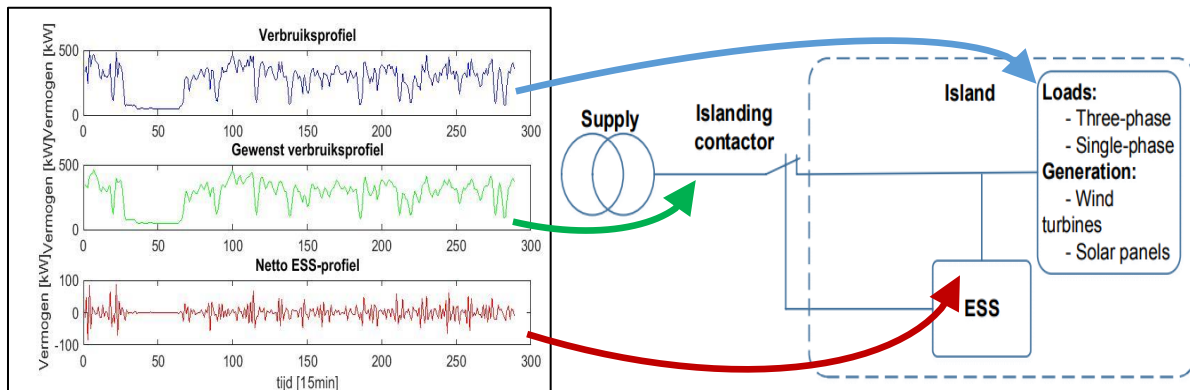
- 0) SC ongeladen, PB-batterij geladen, DC-DC functioneert pas wanneer HVDC aanwezig is
- 1) ESI stand-by en laadt interne DC-bus standaard op tot 630V
- 2) Precharger laadt SC stelselmatig op tot spanning groter is dan interne DC-bus ESI
- 3) EMS activeert interne voorlaadprocedure SC en geeft DC-spanning van ESI door
- 4) SC accepteert DC-spanning ESI en connecteert SC-spanning met externe common DC-bus
- 5) ESI kan ingeschakeld worden want opslag gekoppeld met common DC-bus
- 6) DC-DC-omvormer koppelen met common DC-bus en volledig operationeel

Het valt dus op dat veel componenten interne beveiligen hebben ingebouwd en dat hun interne controller pas de klemmen onder spanning brengt indien aan de nodige voorwaarden is voldaan.

Daarna volgt de normale werking van het systeem. Verschillende algoritmes kunnen geprogrammeerd worden waartussen de gebruikers kunnen kiezen. Voorbeelden zijn verhoogde zelfconsumptie/zelfvoorziening waarbij decentrale energie wordt opgeslagen, piekafvlakking wanneer belasting een instelwaarde overschrijden of back-up, waarbij het systeem gedurende een bepaalde tijd in eiland opereert.

Huidige algoritmes kunnen gebruik maken van deels gesimuleerde profielen en werkelijke hardware van een installatieonderdeel. Deze techniek wordt in de literatuur hardware in the loop (HIL) genoemd. Zo kunnen fictieve verbruik en/of opbrengstprofielen gesimuleerd worden en op basis van

hun ogenblikkelijke waarde kan het EMS een strategie hanteren. Dit kan zich bijvoorbeeld uiten in het aanspreken van één of beide opslagunits tegelijkertijd of aanvullend. Het opslagprofiel en de fictieve profielen vormen zo een nieuw wensprofiel dat zo goed mogelijk het voorspelde wensprofiel bereikt heeft.



Figuur 146: Demonstrator principe

Emulatie daarentegen wordt beschouwd als het werkelijk nabootsen van last-en opbrengstprofielen door belasting na te bootsen met variabele programmeerbare last en werkelijke gegenereerde opbrengstprofielen te gebruiken. Daartoe dienen nog enkele AC- en DC-uitbreidingen voorzien te worden op de schaalbare hybride demonstrator. Volgende uitbreidingen staan worden nog voorzien:

- Variabele belasting : installatie van 30 kW weerstandsbank, aangestuurd door SCR
- Opslag met extra batterijpack (Li-ion): 200 Ah @ 72V, 1C
- 10 kW PV-productie van Lemcko-park bundelen en m.b.v. DC-DC-omvormer rechtstreeks op DC-bus integreren
- 50 kW genset parallel integreren met ESI-netomvormer

5. Literatuurlijst

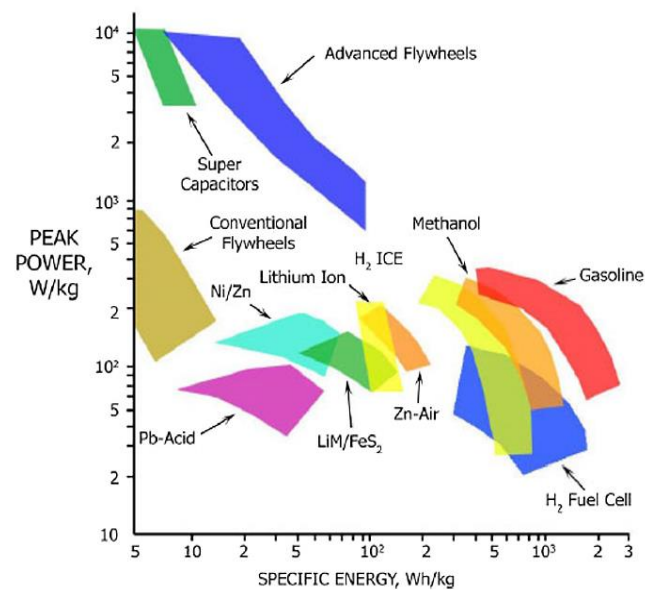
- [1] G. C. B. M. M. V. L. V. Kristof De Koker, „Energy storage system for off-grid testing of a wave energy converter,” 2016.
- [2] Nescap, „http://www.nescap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/Large_cell_supercapacitor_family/cylindrical_supercapacitor_cell.jsp,” [Online].
- [3] Enersys, „<http://www.enersys-emea.com/reserve/downloadarea/download.asp#PowersafeOPzS>,” [Online].
- [4] ABB, „<https://new.abb.com/high-voltage/capacitors/lv/bess-products/esi>,” [Online].
- [5] EPIC_POWER, „<http://epicpower.es/en/products/power-converters/>,” [Online].

- [6] National_Instruments, „<http://www.ni.com/nl-be/support/model.crio-9068.html>,” [Online].
- [7] ABB, „<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A1625&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>,” [Online].
- [8] Texas_Instruments, „https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-components-userfiles/00-00-15-97-63-Attached+Files/7288.dab.png,” [Online].
- [9] PowerOhm, „https://www.powerohm.com/pdfs/brakingmod_lg_bm.pdf,” [Online].
- [10] Industrial_Ethernet_book, „<http://www.iebmedia.com/index.php?id=5643&parentid=63&themeid=255&hft=42&showdetail=true&bb=1>,” [Online].
- [11] Enersys_Benelux_&_4eSys, „Precharger”.

Hoofdstuk 6: ‘Instellingen en configuraties’

1. Inleiding

Het kiezen van de juiste instellingen en configuraties is cruciaal voor een opslaginstallatie. Daar er ontzettend veel technologieën zijn tegenwoordig, beperkt deze gids zich tot batterijen en supercaps. De instelparameters van elektrochemische en elektrische opslag verschillen niet zozeer. In dit geval dienen vooral minimale en maximale stromen, spanningen en temperaturen van de opslagmodules ingegeven te worden in de controller. Mechanische opslag zoals vliegwielen en gecompresseerde tankopslag daarentegen zal meer gelijkenissen vertonen met het instellen van een aandrijflijn.



Figuur 147: Ragone plot [1]

Om een overzicht te tonen welke instellingen dienen gekozen te worden voor de indienststelling, de hybride demonstrator gebruikt als praktisch voorbeeld. De focus zal liggen op het instellen van een Energie of Batterij Management Systeem (BMS/EMS en de configuratie van supercaps. Stapsgewijs worden datasheets en handleidingen overlopen om finaal een correcte configuratie te bekomen.

2. Instellen BMS/EMS

Een batterij wordt altijd samen met een omvormer gedimensioneerd. Daarom dienen ook hun instellingen op elkaar afgestemd te worden. Een batterij beschikt tegenwoordig meestal een BMS om een goede werking te garanderen. De parameterlijst van deze controller en van de netomvormer zal worden toegelicht. Alvorens de werking van de BMS en een datasheet te overlopen, wordt de gebruikelijke nomenclatuur herhaald die verband houden met capaciteit en stroom.

- Capaciteit: hoeveelheid ladingen die kunnen opgeslagen worden in een batterij [Ah]
- C-rate: de stroom die correspondeert met een volledige batterijontlading in 1 uur.
- I_t-rate: de stroom overeenkomstig met een opgegeven gebruiksduur in datasheets van fabrikanten
- C_n: de geschatte capaciteit volgens gebruiksduur [aantal uur =n]

- Capaciteit bij supercaps duidt het proportionele verband tussen spanning en stroom aan in Farad [F]. Dit geeft weer hoeveel lading bij een bepaalde spanningswaarde wordt opgeslagen.

Vaak worden capaciteit en stroom door elkaar gebruikt. Het is belangrijk deze bovenstaande gebruikelijke termen goed uit elkaar te houden. De nominale stroom wordt vaak uitgedrukt in termen van batterijcapaciteit. De capaciteit is echter niet constant maar onderhevig aan het gebruiksprofiel en de temperatuur. Bij Li-ion is de capaciteit quasi onafhankelijk van de stroom, maar wel van de temperatuur. Dit is bijvoorbeeld niet het geval bij loodbatterijen en NiMn, waar het gulzig opnemen van energie minder beschikbare lading veroorzaakt.

2.1. Literatuurstudie BMS

Om de levensduur en het goed gebruik van batterijen te vrijwaren wordt een pack in vele gevallen voorzien van een batterij management system (BMS). Naast het bewaken van een goede gebruiksconditie van batterijen, monitort dit toestel ook allerlei parameters zoals spanning, stroom en temperatuur op celniveau. Ook het berekenen van de SOH, SOC en thermisch management wordt toegewezen aan de BMS. Via communicatieprotocollen wordt de data van dit acquisitiesysteem doorgegeven aan de algemene ESS-controller. Daarnaast voert de BMS nog een cruciale taak uit, namelijk het balanceren van cellen zodat evenwichtig gebruik en belasting verzekerd is. Onevenwicht of onbalans tussen cellen is de hoofdreden van vroegtijdig falen van batterijpack. [2]

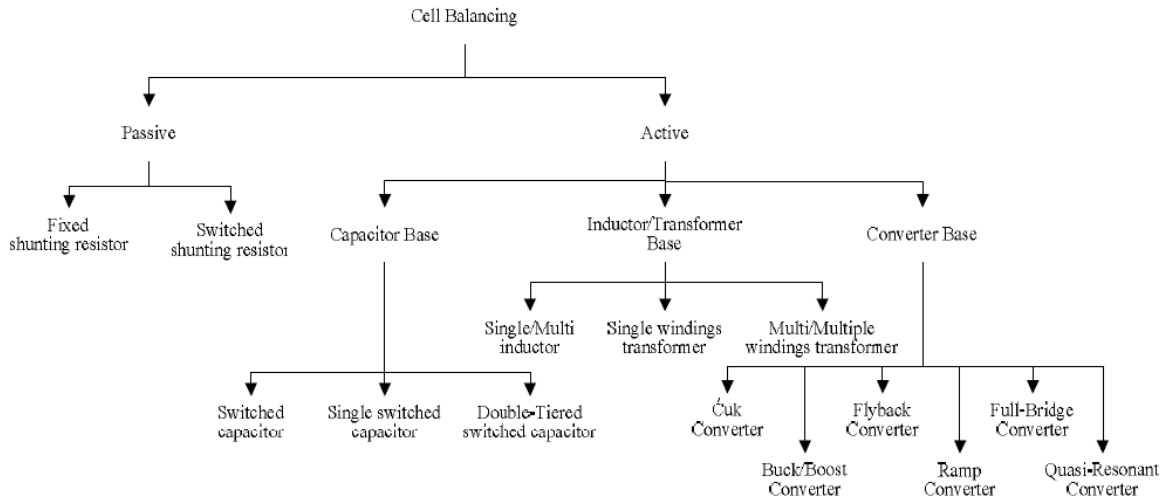
2.1.1. Zelfontlading

Cellen zonder balanceringsmechanisme zullen na verloop van tijd wegdrijven van de nominale celspanning. De capaciteit van de ganse pack zal ook dalen. Onbalans ontstaat door interne en externe factoren en moet trachten weggewerkt te worden met een accuraat regelmechanisme. Een interne oorzaak is bijvoorbeeld het feit dat cellen niet exact identiek zijn vanwege minieme verschillen tijdens de productiefase. Hierdoor alleen al kan de interne impedantie en de zelfontlaadsnelheid verschillen. Externe bronnen van onbalans zijn voornamelijk te wijten aan elektronische bewakings-IC's die per string geïnstalleerd worden bij parallele configuraties. Deze IC's laden parallele cellen niet exact gelijkmatig. Deze onbalans veroorzaakt niet alleen een thermisch verschil tussen de cellen, maar leidt ook tot een verschillende zelfontlaadsnelheid tussen cellen onderling.

2.1.2. Strategieën

Verschillende typologieën om cellen te balanceren zijn toepasbaar en worden opgedeeld in actieve en passieve strategieën. Passief balanceren berust op het reduceren van overmatige cellading door een deze energie te consumeren in een weerstand totdat alle cellen eenzelfde lading bezitten. Weerstanden kunnen permanent in parallel geschakeld verbonden zijn met de cellen. Bij actieve balancering daarentegen wordt de overmatige lading van de ene cel overgebracht naar cellen met minder lading via een energie dragende bouwsteen. Hierdoor treedt geen dissipatieverlies op zoals bij passieve regelingen.

De overdracht van energie gebeurt via condensatoren of spoelen die ofwel rechtstreek door elektronische schakelingen met de betreffende cellen worden verbonden ofwel m.b.v. converteren. Naast de energie-efficiëntie geldt de equalisatietijd als tweede belangrijke parameter in het ontwerpproces van de BMS. Een schematisch overzicht van balanceertechnieken wordt op onderstaande figuur weergegeven [3].



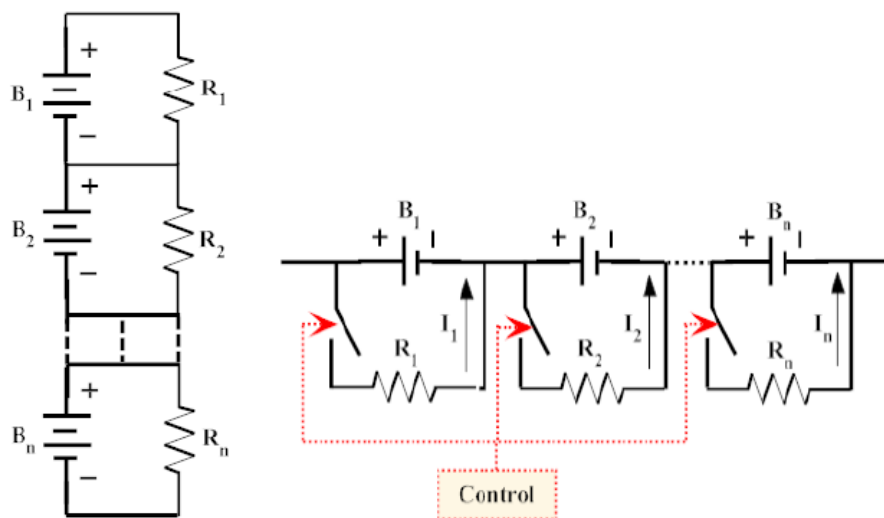
Figuur 148: Balanceertechnieken

2.1.2.1. Passief balanceren

Dissipatie in parallelle weerstanden is een eenvoudig concept. De spanning van alle cellen wordt gemonitord en elke celspanning moet als streefdoel gelijk worden aan de ogenblikkelijke laagste celspanning. Er gelden twee subcategorieën:

De eerste categorie hanteert een vaste weerstand. De stroom wordt continu gebypassed door een parallelweerstand die de spanning van alle cellen limiteert. Deze methode kan enkel gebruikt worden voor loodzuur en Nikkel batterijen omdat overladen van dergelijke cellen geen onherroepelijke schade toebrengt. Deze oplossing is goedkoop, eenvoudig uit te voeren, maar genereert een continu bewust energieverlies in quasi alle cellen. Bovendien heeft de warmteontwikkeling een nefaste invloed op de prestaties van de batterij.

De tweede methode maakt gebruik van een gecontroleerde schakelaar die de parallelweerstand aanstuurt. Zo wordt continue energiedissipatie vermeden, maar worden enkel de kritische cellen aangestuurd. Deze strategie kan dus ook gebruikt worden bij Li-ion omdat overladen niet mogelijk is. Vanwege de beperkte dissipatie is er dus nog steeds nood aan thermische controle. Een richtwaarde van de equalisatietijd is in grootteorde een 30-tal minuten tijdens het laden.



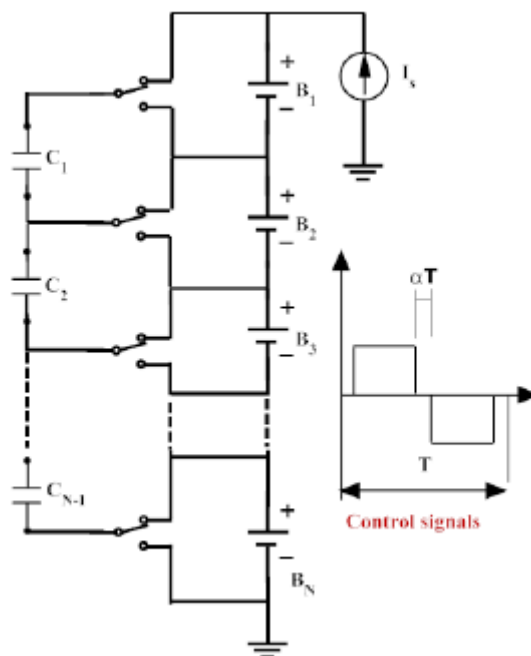
Figuur 149: Bypass en geschakeld passief balanceren

2.1.2.2. Actief balanceren via Capaciteit

Capacitief balanceren maakt gebruik van een condensator of algemeen een capaciteit als een extern opslagelement om energie te verplaatsen tussen cellen onderling. Deze capacitieve koppelingen hebben als algemeen kenmerk dat het energieverlies zeer beperkt is maar dat de balancetijd relatief hoog is. Onderstaand worden enkele subcategorieën opgesomd:

1. Meervoudige geschakelde capaciteit

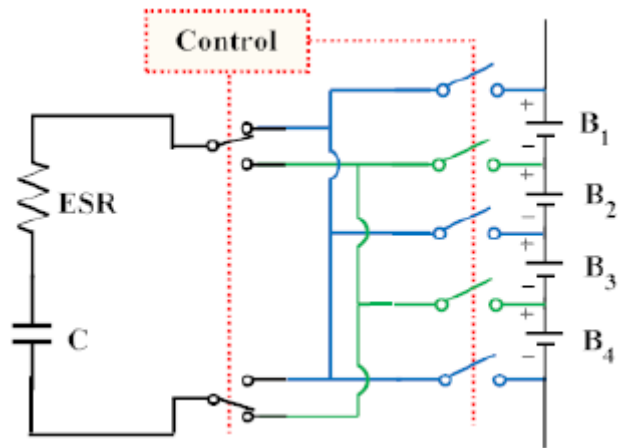
Om n cellen te balanceren zijn $n-1$ capaciteiten en $2n$ schakelaars vereist. De strategie omvat simpelweg twee schakeltoestanden, waardoor geen intelligente controle vereist is. Afwisselend wordt tussen de twee toestanden geschakeld om energie tussen de capaciteiten te verdelen. De bijhorende lange equalisatietijd wordt als nadelig beschouwd. Indien het procentueel spanningsverschil tussen cellen groter is dan 6%, loopt de balancetijd al snel op in de buurt van $5u$. Het balanceren vertraagt immers naarmate de het spanningsverschil daalt omdat de stroom dan ook kleiner wordt. Bijgevolg wordt de lading ook minder snel gedeeld met de capaciteit.



Figuur 150: MCS

2. Enkelvoudige geschakelde capaciteit

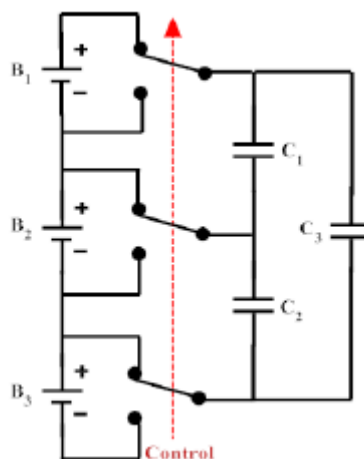
De techniek met enkelvoudige capaciteit is een afgeleide variant van de meervoudige schakelende capaciteiten. In dit geval is slechts één capaciteit en $n+5$ schakelaars nodig voor n cellen. De controller selecteert in dit geval de hoogste en laagste celspanning en activeert de schakelaars die zich op het tussenliggend pad bevinden om de energieoverdracht te voltooien. Deze methode verhoogt de equalisatietijd i.v.m. MCS. De balancetijd bedraagt in dit geval ongeveer $3,25u$ tijdens het laadproces.



Figuur 151: SSC

3. Dubbelvoudig geschakelde capaciteit

Deze strategie is eveneens een afleiding van de meervoudig schakelende capaciteiten en minimaliseert de balanceertijd tot 75% in de buurt van $3u$. In dit geval worden nu twee capaciteiten gebruikt om energie over te dragen tussen cellen. Voor n cellen zijn $2n$ schakelaars vereist. Ook hier vertraagt het balanceerproces naarmate de stroom daalt.



Figuur 152: DTSC

4. Actief balanceren via inductiviteit

Inductief balanceren verloopt op een gelijkaardige manier als de capacatieve variant. Ook hier zijn terug enkele subcategorieën terug te vinden die principieel niet zozeer verschillen van de voorgaande technologieën. Alleen wordt de energie nu opgeslagen in een magnetisch veld van een spoel i.p.v. een elektrisch veld van een condensator. Het optredend energieverlies is wel groter dan bij capacatieve koppelingen.

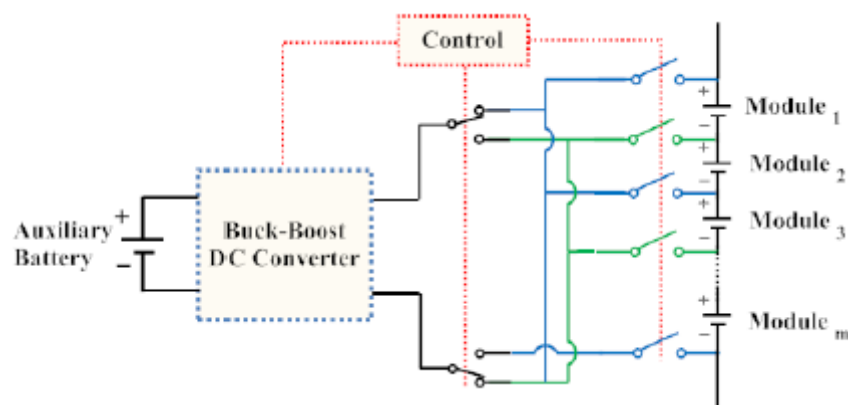
Bij meervoudige schakelende spoelen is de equalisatietijd sneller dan voorheen, nl. in de buurt van 40min. De enkelvoudige spoelschakeling halveert de tijd nog verder. De oorzaak voor deze drastische inkorting is het gebruik van een constante hoge verdeelstroom die het op- en ontladen versnelt.

Er bestaan ook enkele typologieën met transformatoren. Deze bezitten een snelle equalisatietijd, maar berusten op een relatief hoog spanningsverschil tussen cellen onderling. Bij Li-ion cellen is de

spanningsrange eerder vlak in het werkingsgebied en is het gebruikelijke onderlinge spanningsverschil tussen de cellen te beperkt voor een efficiënte werking. Daarom wordt hierop niet dieper op ingegaan.

5. Converter based

Tegenwoordig maken state-of-the-art-BMS'n gebruik van DC-DC-converteren om de equalistietijd nog verder te reduceren. Ook hier bestaan heel wat varianten, waaronder de buck-boost, cuck en flyback converter. De principiële werking van deze omvormers wordt hier achterwege gelaten, maar als basisgedachte optimaliseren ze de laad- en ontlaadstrategie van de onderlinge celbalancering. Dit vertaalt zich als een gepaste spannings- of stroomreferentie die de ideale balanceertijd benadert. De nadruk wordt hier gelegd op de buck-boost converter, de topologie met de kleinste equalisatietijd nl. 1 à 2ms. Hier wordt echter wel gebruik gemaakt van een externe hulpvoeding bv het LVDC-circuit van een elektrisch voertuig. Het gebruik van de controller maakt deze BMS'n een stuk duurder, maar omwille van de efficiënte werking zijn is deze strategie uitermate geschikt bij modulair ontwerp van grote installaties.



Figuur 153: Buck-boost balanceren

2.1.2.3. Vergelijking tussen strategieën

Onderstaande tabel geeft een overzicht tussen de verschillende topologieën op basis van balanceertijd en energieverlies. Als algemene conclusie geldt dat:

- Een schakelende weerstand een goede balanceertijd levert, maar het meeste energie dissipeert.
- Transfo-topologieën zijn niet toepasbaar op Li-ion.
- Capaciteiten hebben een beperkt energieverlies, maar een lange balanceertijd. De eenvoudige schakelende capaciteit geldt als beste subcategorie
- De buck-boost converter heeft de snelste balanceertijd en accepteerbare energieverliezen.

Topology	Balance time (hr)	Sum. of cells energy (Wh)		
		Σ @ Start	Σ @ End	Σ Losses
SR	0.6 (36 min)	-	-	5.5
SC	5.25	145.35	145.29	0.06
DTSC	2.8	145.35	145.3	0.05
SSC	3.25	145.35	145.32	0.03
SSI	0.4 (24 min.)	145.35	144.1	1.25
MSI	0.67 (40 min)	145.35	145.25	0.1
BBC	.028 (1.7 min)	145.35 + 730.8	145.5 + 730.354	0.296
Smallest		Highest		

Figuur 154: technologie-analyse

2.1.3. SOC bepalen

Een bijzondere aandacht wordt besteed aan het bepalen van de effectieve ladingstoestand van de batterij. Het is niet zo eenvoudig om de SOC correct te kennen door rechtstreekse meting. Daarom worden enkele methodes voorgesteld om deze waarde in te schatten.

2.1.3.1. Opzoektabelen

Er bestaat een direct verband tussen de SOC en enkele statische karakteristieke parameters van de batterij. Zo kan de waarde van de SOC gemapt worden aan de open klemspanning of impedantie. Door deze parameters op te meten of te benaderen, kan dus een inschatting gemaakt worden van de SOC.

Het is echter ook niet eenvoudig om continu de openklemspanning op te meten omdat een precieze waarde enkel te verkrijgen is na het uitschakelen van de omvormerverbinding en een rustperiode af te wachten. Hetzelfde nadeel geldt ook bij het gebruik van de interne impedantie. Deze opzoektabelen zullen dus nooit een exacte waarde van de SOC weergeven.

2.1.3.2. Ladingcalculatie

Indien de initiële maximale lading van de batterij gekend is en een nauwkeurige stroommeting wordt toegepast, kan principieel de SOC ingeschat worden. Dit door stroom te integreren in de tijd, wordt de ladingsvariatie berekend en bijgevolg de SOC. Daartoe is het wel van belang de initiële SOC te kennen zodat nadien geen fout wordt meegerekend. Onderstaande formule geeft de ogenblikkelijke SOC weer:

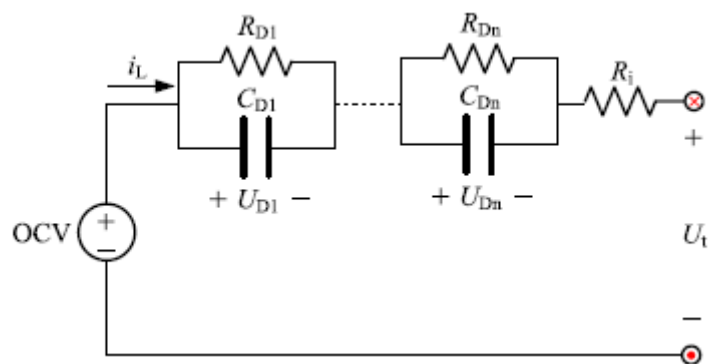
$$SOC_{nu} = SOC_{ini} - \int_{t_0}^{t_{nu}} \frac{\eta i(t_{nu}) dt}{Q}$$

De SOC is kan dus berekend worden met de initiële SOC, de coulomb-efficiëntie en de initiële batterijcapaciteit. De capaciteit van batterijen is onderhevig aan gebruiksomstandigheden en veroudering, waardoor de correctheid van deze parameter ook weer het resultaat beïnvloedt. In feite zou daarom de capaciteit herhaaldelijk gekalibreerd moeten worden. Ook eventuele fouten in de stroommeting beïnvloeden het resultaat. Deze methode is zeker bruikbaar, maar blijft dus berusten op een inschatting.

2.1.3.3. Modelgebaseerde methodes

Een diepgaand alternatief is het opbouwen van een batterijmodel. Dit verhoogt de betrouwbaarheid, maar vereist heel wat achtergrondkennis en studiewerk om een degelijk model te valideren in de praktijk. In de literatuur worden drie types onderscheiden van elkaar: elektrochemisch equivalente circuits, equivalente elektrische circuits en elektrochemische impedantiemodellen. [4]

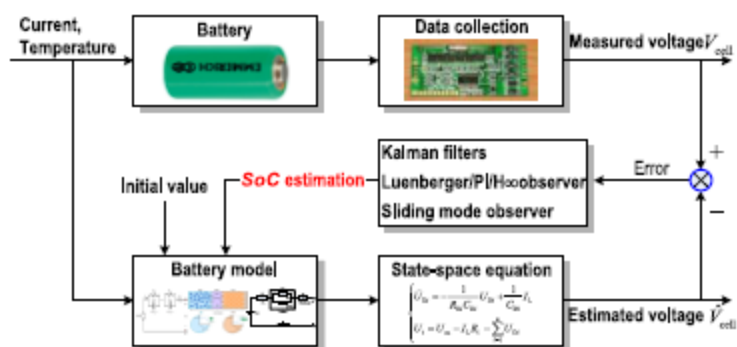
Meer specifiek maken modellen gebruik van status vergelijkingen die de toestand van de huidige batterij afleiden m.b.v. enkele meetbare parameters. Het is geenszins de bedoeling hier dieper op in te gaan, maar met behulp van onderstaand voorbeeld wordt geschetst hoe een batterij elektrisch kan worden voorgesteld en hoe een bijhorende model wordt opgebouwd. Vanuit elektrisch oogpunt is een batterij een variabele spanningsbron die in serie staat met weerstanden en capaciteiten. Deze subnetwerken beschrijven het gedrag tijdens het laden en ontladen. Verder kan ook een weerstand parallel over de spanningsbron geplaatst worden om de zelfontlading te beschrijven.



Figuur 155: Equivalent batterijcircuit

$$\begin{cases} \dot{U}_{Di} = -\frac{1}{R_{Di}C_{Di}}U_{Di} + \frac{1}{C_{Di}}I_L \\ U_t = U_{oc} - I_L R_i - \sum_{i=1}^n U_{Di} \end{cases}$$

Figuur 156: Statusvergelijkingen



Figuur 157: flowchart van een modelgebaseerde SOC-bepaling

Onderstaand wordt een specsheet van een state-of the art BMS weergegeven. Daaruit valt op te merken dat een convertergestuurde topology wordt gebruikt, aangezien een hulpvoeding noodzakelijk is. Daarnaast is het aantal cellen, de communicatiesnelheid en de updaterate van belang. Een kleine

meetfout (0.1%) is af te leiden uit de conversion accuracy van 4mV in combinatie met een gemiddelde celspanning van 3,5V. Ook een isolatiebewaking is aanwezig waardoor verhoogde veiligheidsmaatregelen kunnen uitgewerkt worden. [5]

BattSense specifications	
Power requirement	< 15 mW/cell (not powered from individual cell)
External power supply	18..32 VDC
Current draw from cell	~ 5µA
Number of cells	Up to 42 cells per master, up to 31 masters
Dimension	171.5(W) x 263(L) x 103(H) mm (max. 42 cells)
Conversion accuracy/resolution	4mV/2.44mV
Sampling rate	5Hz at system level
Conversion time	0.25 ms
Cell voltage range	0 – 5V
Measurement voltages/current	simultaneous
Master data interface	CAN bus 500kbit/s - 11bit IDs
Remote access interface	UTP, GPRS
Digital I/O	4 isolated inputs, 2 relay outputs
Analog inputs	Redundant voltage for LV-25P Hall current sensor
VBU temperature sensor	Input for NTC 10kOhm (max. 1/cell)
Temperature input range	-20°C..80°C, 0.5°C resolution
Isolation voltage (power)	1500 V
Isolation voltage (CAN bus)	2500 V
Ambient temperature	-20°C..65°C
Certifications	- Low Voltage Directive EMC compliance tested: - (EU) For Emission: EN 61000-6-3:2007 + A1:2011 (Light Industrial) - (EU) For Immunity: EN 61000-6-2:2005 (Industrial) - (US) FCC Title 47.Part 15 - (CA) ICES-003 Issue 6:2016
Cell connection interface	DB25
Patents	- EP 3061197 A1: Method and system for providing pulsed power and data on a bus - EP 2101388 B1: Charge balancing circuit for ultra-capacitors and lithium batteries - EP 2302757 A1: Method and system for balancing electrical energy storage cells - EP 2230529 B1: A power cell system with means for detecting a discontinuity - EP 1265076 B1: Safety device for monitoring a DC bus insulation

2.2. Analyseren van batterijspecificaties

Een datasheet bevat heel wat informatie over de batterijen, maar het is desondanks niet altijd even gemakkelijk de gewenste info eruit te destilleren om correcte interpretaties te maken. Er bestaat geen algemene norm of richtlijn voor fabrikanten wat precies moet meegedeeld worden. Daarom wordt als voorbeeld de specificaties een Li-ion cel gebruikt van Panasonic [6].

2.2.1. Algemene specs

Alle gegevens worden vooreerst overlopen met de nodige uitleg.

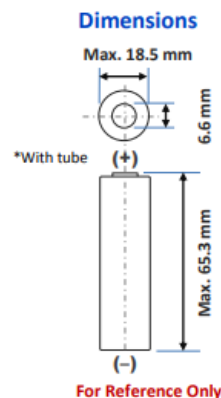
- Rated capacity: 3200mAh = geschatte minimale capaciteit tijdens ontladen @ 20°C. Echter ontbreekt de tijdsbasis waarbinnen de capaciteit volledig wordt ontladen. Dit wordt verder in de toelichting opgenomen.
- Nominal voltage: 3,6V = gemiddelde spanning tijdens ontladen (bij rated capacity)
- Capacity: 3250mAh = minimale capaciteit @ 25°C
- Charging: 1625mA tweetraps laadkarakteristiek waarbij standaard wordt opgeladen tot 4,2V met een maximale stroom van $C/2$ gedurende max 4h.
 - Ong. 2h constante stroom (CC)
 - Ong. 2h constante spanning (CV)
- Weight: max gewicht, mediaan komt ook vaak voor
- Temperatuur: laden, ontladen en opslag als max of min gemeten op het celoppervlak
- Energy density: de worst case waarde bij een capaciteitswaarde @ 25°C en maximale dimensies

Aansluitend worden nog de ontbrekende zaken meegedeeld:

- Interne weestand
- Piekvermogen (tijdens laden/ontladen)
- Maximale continue stroom en piekstroom
- Spanningslimieten
- Vermogensdichtheid
- Materiaaldikte van connectoren
- Materiaal van cathode en anode

Lithium Ion
NCR18650B

Panasonic



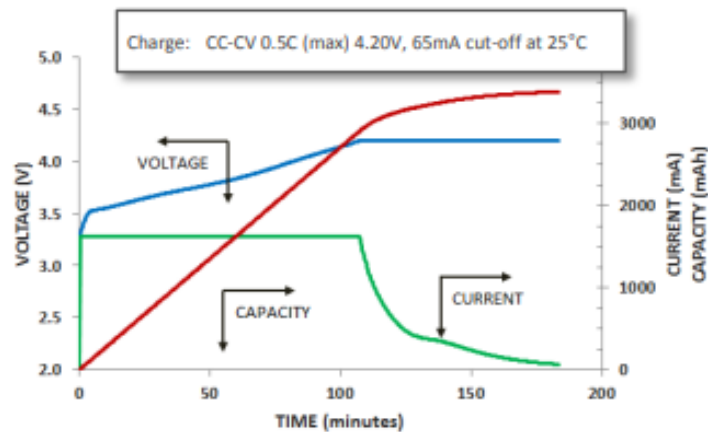
Features & Benefits	Specifications	
<ul style="list-style-type: none"> • High energy density • Long stable power and long run time • Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc. <p>* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.</p>	Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh
	Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
	Nominal voltage	3.6V
	Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
	Weight (max.)	48.5 g
	Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
	Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg
⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions		

Figuur 158: Panasonic specsheet

2.2.2. Laadkarakteristieken

Het valt meteen op dat de opgegeven laadkarakteristiek niet overeenkomt de opgegeven parameters bij charging. Dit wijst erop dat vaak een verschil aanwezig is tussen het effectief gebruik en de kenplaatgegevens.

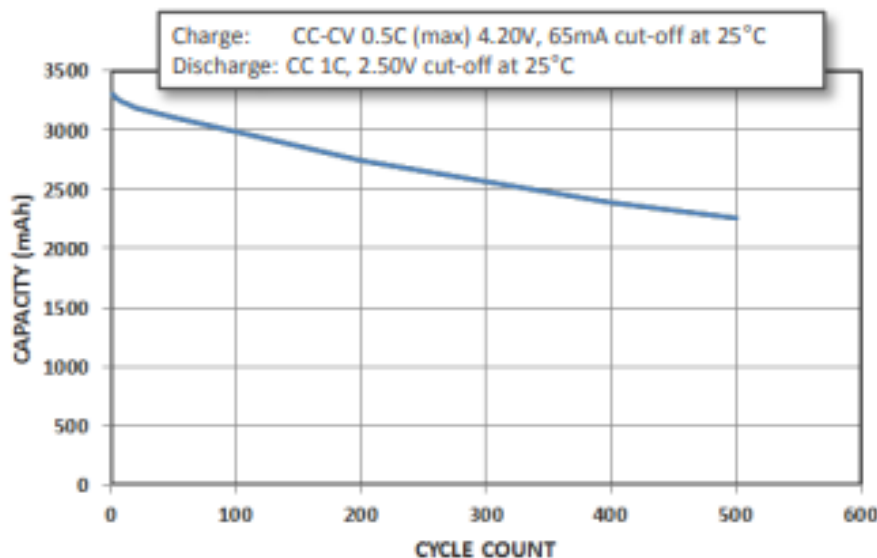
- Stroom: C/2 constant current (CC) laden gedurende 105 min
- Spanning: constant voltage (CV) laden op 4,2V gedurende 75 min
- Laadproces van 3 i.p.v. 4 uur
- Capaciteit: 3300mAh
- Einde laadproces: Cut-off stroom C/50 = 65mA
- Temperatuur: 25°C



Figuur 159: Laadkarakteristieken

2.2.3. Levensduur karakteristiek

Onderstaande figuur beschrijft de degradatie van de capaciteit doorheen de levensduur, uitgedrukt in aantal cycli. De batterij wordt einde levensduur beschouwd indien de resterende capaciteit 80% bedraagt van de initiële capaciteit, in dit voorbeeld 3300mAh. Alle cycli wordt in onderstaande grafiek als gelijk beschouwd. Dit betekent dat de ontladingsdiepte (DOD) uniform is. Uit de gegevens blijkt ook dat de DOD quasi 100% bedraagt, gezien het ontladen beëindigd wordt als de stroom tot onder 0.65mA gedaald is. Gezien het beperkt aantal cycli is dit type van cel niet toepasbaar voor energieopslag in combinatie met decentrale productie. Uit de datasheet blijkt ook dat het toepassingsgebied eerder gericht is op draagbare toestellen zoals laptops en telefonie. Het omrekenen van dit aantal cycli naar een levensduur van 3 jaar lijkt een realistisch richtwaarde indien één cycli om de 2 à 3 dagen wordt uitgevoerd.

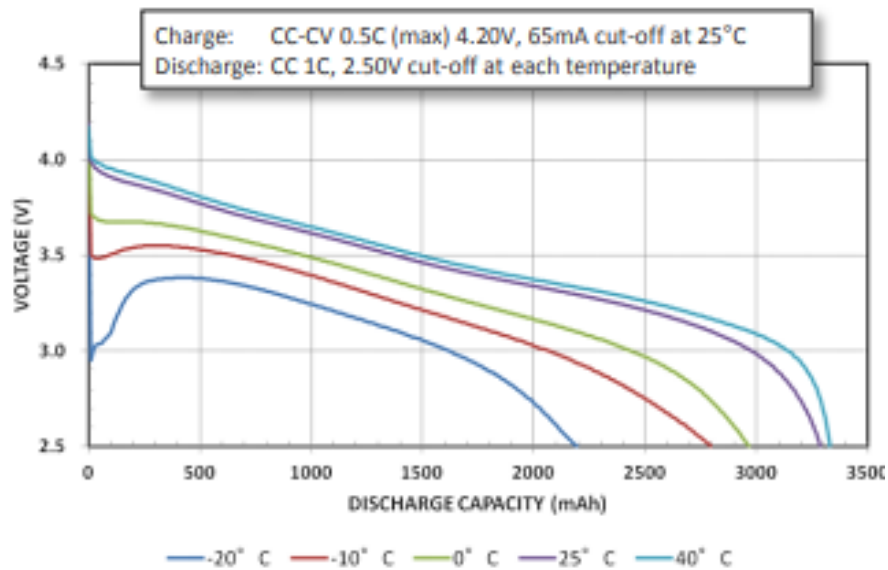


Figuur 160: levensduurcycli

2.2.4. Ontlaadkarakteristiek

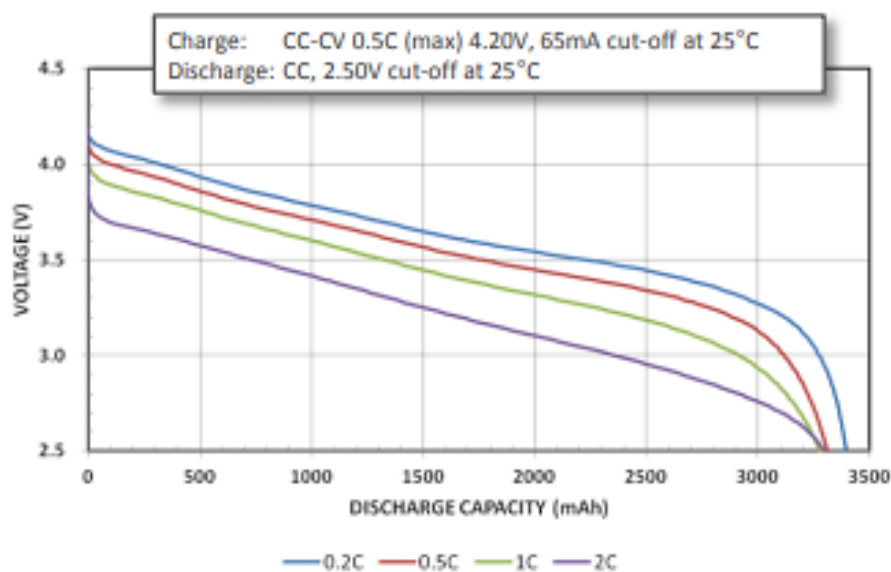
Uit het verband tussen de spanning en capaciteit bij een constante ontladingsstroom en verschillende temperaturen kan veel nuttige info gewonnen worden. Zo kan afgeleid worden dat de gewenste celtemperatuur bij voorkeur 25°C bedraagt. De figuur illustreert dat de minimale temperatuur een

capaciteitsreductie veroorzaakt van 30%. De rated capacity van 3200mAh krijgt nu ook een tijdsduur toegewezen namelijk 1uur. Dit valt af te leiden uit de gebruikte ontladstroom van 1C.



Figuur 161: Ontlaadkarakteristiek constante stroom

Aanvullend wordt dezelfde plot uitgezet met variërende ontladstroom en constante temperatuur. Hieruit blijkt dat een hogere ontladstroom een capaciteitsdaling veroorzaakt omwille van de aanwezigheid van interne weerstand. Hieruit blijkt dat een ontladstroom van 0.2C optimaal is naar beschikbare capaciteit, hoewel het capaciteitsverschil zoals aangegeven bij Li-ion niet zoveel verschilt bij toenemende stroom. Als algemene conclusie volgt dat thermisch management zeer belangrijk is bij deze technologie.



Figuur 162: Ontlaadkarakteristiek constante temperatuur

2.3. Testprocedures voor parameterdeterminatie

Indien datasheets onduidelijk zouden zijn over de richtwaarde van bepaalde parameters, kunnen altijd enkele eenvoudige testprocedures uitgevoerd worden om meer info te verkrijgen. [7]

2.3.1. Standaardcyclus

Het uitvoeren van een standaardcyclus is altijd een goede eerste test. Verschillende normen schrijven voor hoe dit in realiteit dient uitgevoerd te worden. Een goede methode is een constante 1C ontlading tot de voorgeschreven nominale spanning van de fabrikant. Daarna start de absorptiefase waarbij met constante spanning wordt geladen tot de laadstroom C/25 bedraagt. Als bijkomende test kan i.p.v. een 1C stroom de C/25-waarde gebruikt worden tot dezelfde spanning wordt bereikt. De capaciteitswaarde zal dan een goede referentiecapaciteit zijn omdat bij dergelijke laadstromen de invloed van de weerstandstoename t.g.v. veroudering nihil bedraagt. Onderstaand worden de courante standaarden weergegeven van een standaardcyclus.

Tabel 11: Normen over standaardcyclussen BMS-systemen

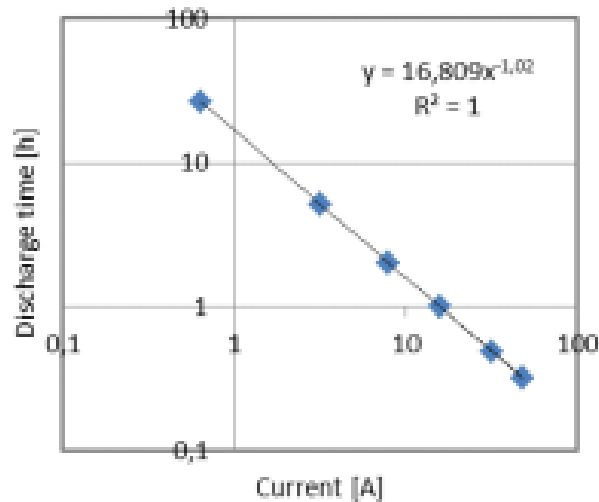
Standard	Test name	Discharge rate	Temperature
ISO 12405-1	Standard cycle	1 I _t	
ISO 12405-2	Standard discharge	I _t /3 or by specified manufacturer	
IEC 62660	Capacity	I _t /3 for BEV application and 1 I _t for HEV application	20±5°C
IEC 61690	Discharge performance at 20°C	I _t /5	20±5°C
IEC 62620	Discharge performance at 25°C	I _t /5	25±5°C
DOE battery test manual for plug-in hybrid electric vehicles (2014)	Static capacity test	10 kW	30±5°C
DOE battery test manual for electric vehicles (2015)	Static capacity test	I _t /3	30±3°C

2.3.2. Capaciteitstest

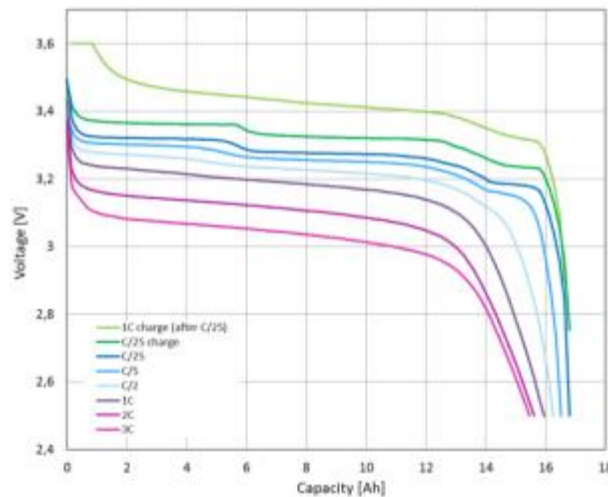
De capaciteitstest plot de beschikbare energie i.f.v. de stroom en temperaturen. Voor verschillende stroomwaardes kan de cyclusefficiëntie en de peukertcoëfficiënt berekend worden. Het rendement wordt berekend als de energieverhouding tussen laden en ontladen aan dezelfde C-rate en binnen dezelfde spanningsgrenzen. Uit het verband tussen de onlaadtijd en de onlaadstroom kan de peukertwaarden gefit worden. Eveneens kan ook de celspanning tegelijk geregistreerd worden om de spanningsrange bij verschillende stroomprofielen te ontdekken. Uit onderstaande figuur blijkt de range te lopen van 2.5 tot 3.6V.

$$n = 100 \frac{E_{ontlaad}}{E_{laad}}$$

$$Capaciteit = \frac{time}{peukert\ capaciteit} \frac{-1}{peukert\ exponent}$$



Figuur 163: Peukert fit



Figuur 164: Ontlaadkarakteristieken bij 25°C en verschillende stromen

2.4. Parameterconfiguratie

Nu de voornaamste parameters duidelijk zijn, kunnen de controllers ingesteld worden. De BMS-monitort en begrensd de batterij volgens de gegeven waarden. Daarnaast kunnen de meetwaarden ook van belang zijn voor de netomvormer en dienen deze bijgevolg doorgegeven worden. Toegepast op de Panasonic-cellen worden alle voorname instelparameters overlopen.

- SOC
- Spanning → 4,2V
- Stroom → 7A piek; 1,6 A continu
- limieten
 - Celspanning → 2,5 – 3,6V
 - Temperatuur → 20 – 40°C
 - Laad/ontlaadstroom → 0,2-0,5C

- Omvormer instellingen
- Batterijspanning
 - Min en max totaal of per cel → $2n * 2,5 - 3,6V$
 - @ VC charging → 4,2V
 - @ VC discharging → 2,5V
- Batterijstroom
 - Min en max → 7A piek; 1,6 A continu
 - End of charge @ VC → 0,65A
 - End of discharge @ VC → 0,65A

3. Indienstname supercaps

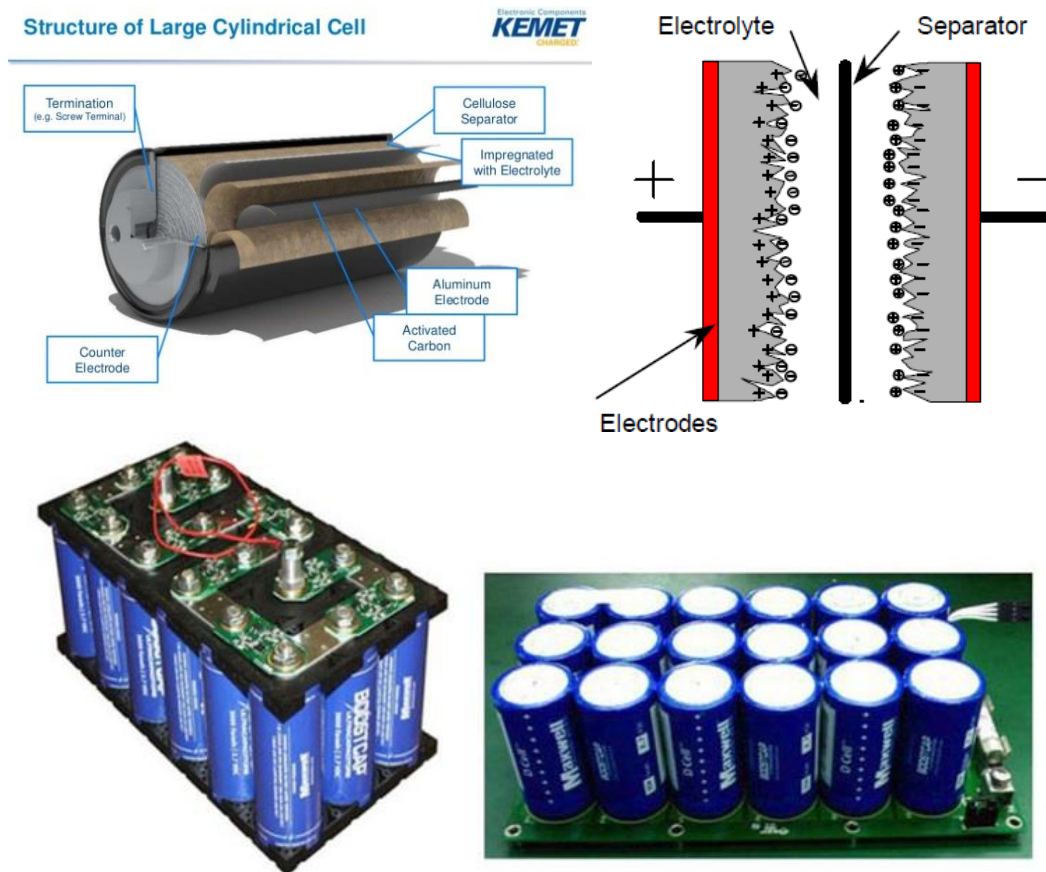
Supercaps, ultracaps of gewoon caps verwijzen allemaal naar hetzelfde opslagsysteem. Het zijn in feite condensatoren die speciaal ontwikkeld werden om meer energie te kunnen stockeren. Een cap is elektrisch opgebouwd uit een capaciteit en een interne weerstand. Energie wordt opgeslagen in een elektrisch veld dat ontstaat door ladingen elektrisch van elkaar te scheiden door middel van een separator. De meest gebruikte cap is de Electrolytic Double Layer Capacitor (EDLC), waarbij het elektrolyt wordt uitgevoerd als een dubbele laag. Supercaps zijn modulair opgebouwd uit cellen van ongeveer 2,7 à 2,8V. In evenredigheid met de spanning wordt lading opgeslagen volgens de grootte van de capaciteit C, die wordt bepaald door het type materiaal, de oppervlakte van de collectoren en de afstand tussen de collectoren.

$$Q = C V$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{D}$$

ϵ_0 = elektrische veldconstante ($8,85 * 10^{-12}$ [F/m])

ϵ_r = relatieve permitiviteit, materiaalconstante

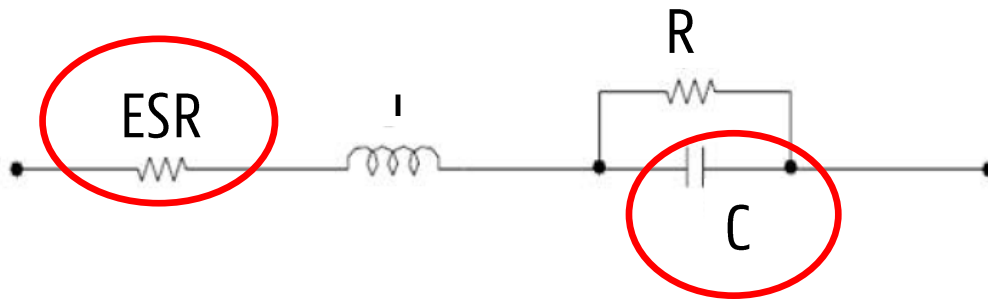


Figuur 165: lay-out supercaps [8] [9]

3.1. Equivalent vervangschema

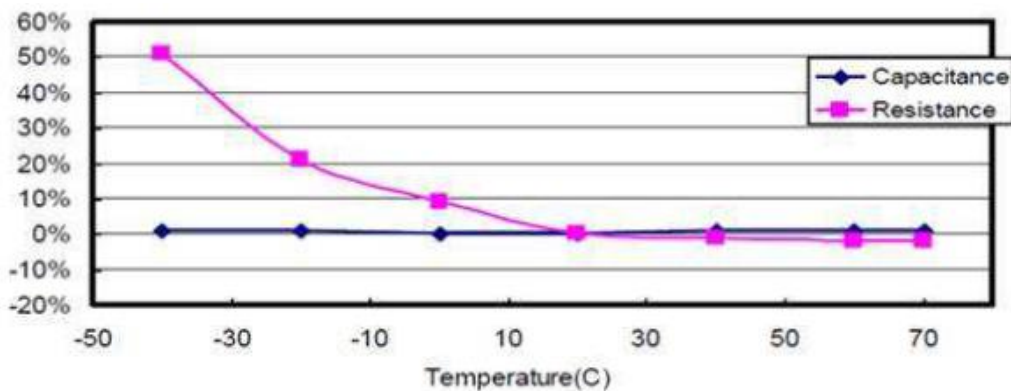
Om supercaps elektrisch te begrijpen, wordt deze vereenvoudigd tot een combinatiestructuur van een verwaarloosbare spoel, weerstanden en uiteraard een capaciteit. [10]

- Capaciteit
 - $C \sim \text{oppervlakte}$
 - $C \sim \epsilon_r$
 - $C \sim \frac{1}{\text{afstand tussen elektrodes}}$
- Weerstanden
 - ESR: equivalente serieweerstand
 - Zelfontlaadweerstand



Figuur 166: Equivalent vervangschema van caps

Voornamelijk de equivalente serieweerstand wordt even uitgediept. Deze parameter is afhankelijk van de temperatuur, in tegenstelling tot de capaciteit. De weerstandwaarde wordt bepaald door de elektrodeweerstand (25%), contactweerstand (16%), separatorweerstand (8%) en elektrolytische weerstand (50%). De aanwezigheid van resistieve elementen hebben als nadeel dat thermische controle bepalend zal zijn. De ontwikkelde warmte volgt immers de wet van Joule en genereert een warmtestroom kwadratisch met de stroom.



Figuur 167: capaciteit en ESR-verandering i.f.v. temperatuur

In een datasheet worden vaak meerdere waarden toegekend aan de ESR, afhankelijk van de meetmethode. Als voorbeeld wordt een datasheet getoond van Skeleton. Deze verschillen zijn niet verwaarloosbaar, dus het kiezen van de juiste methodiek wordt dus van belang voor een correcte benadering van de ESR. Onderstaand worden twee methodes opgegeven om de ESR te achterhalen. [11]

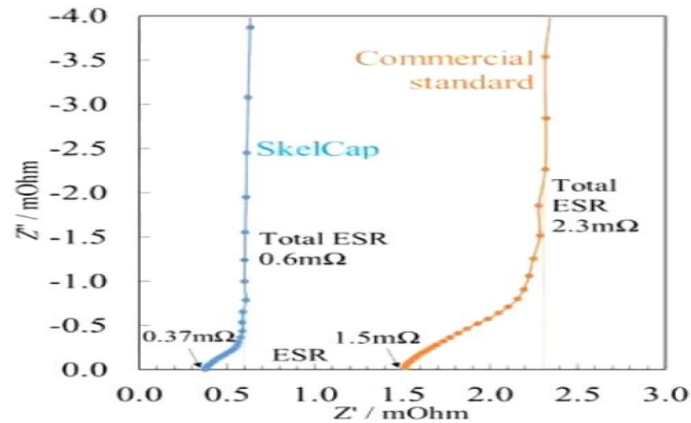
- AC-methode: impedantie spectografie
- DC- charge/discharge methode met rustperiode

Technical specifications	UNIT	102V-89F
Electrical		
Nominal voltage	V	102
Absolute maximum voltage	V	108
Rated capacitance, initial	F	89
ESR (AC 0.1 Hz)	mΩ	5.9
ESR (DC 10 ms)	mΩ	4.8
ESR IEC	mΩ	5.5
Maximum serial voltage ¹⁰	VDC	1500
Maximum peak current (for 1 s duration) ¹¹	A	2.980
Short circuit current	kA	18.5
Maximum stored energy	Wh	128
Cells in total	#	36
Cell type	SCA3200	

Figuur 168: Skeleton specsheet

3.1.1. Impedantie spectrometrie

Met een Impedantiemeting doorheen frequentiegebied (1MHz – 10 mHz) kan de capaciteits- en weerstandwaarde achterhaald worden. Het resultaat uit zich zoals het onderstaande bodeplot. Elk meetpunt bevat een andere frequentiewaarde. Daarbij valt op dat de weerstandswaarde stijgt bij toenemende frequentie. Dit betekent dat een snel variërende laad-en ontladprocedure tot een hogere ESR zal leiden en dus meer opwarming zal veroorzaken. Ook de capaciteit is afhankelijk van de frequentie. De snijlijn met de horizontale as levert de DC-resultaten op.



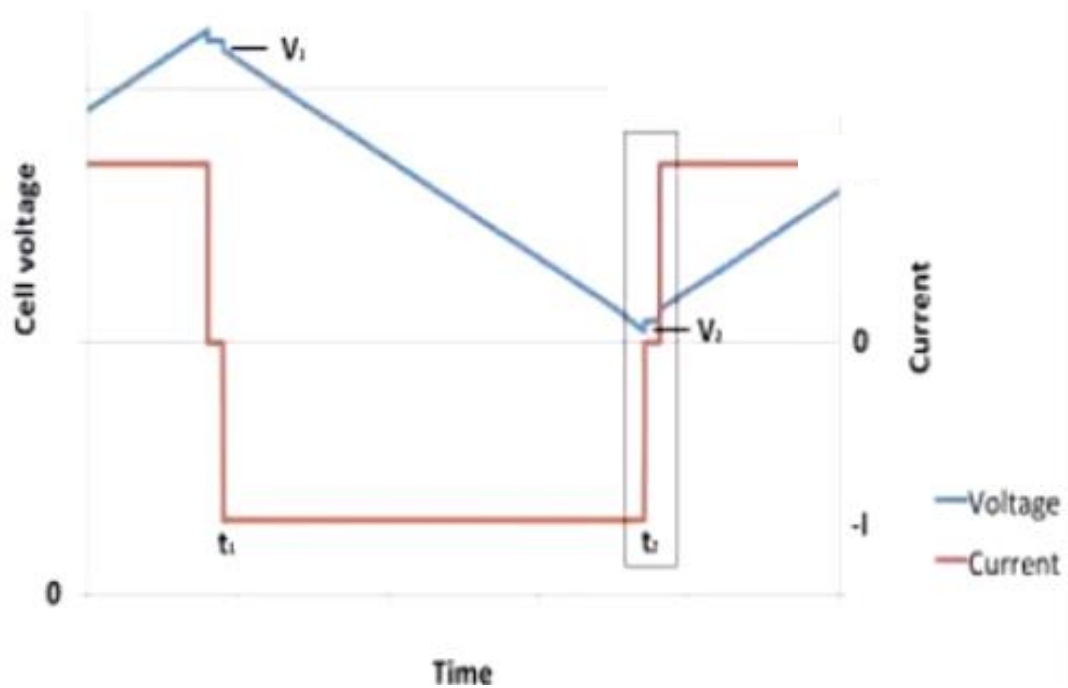
Figuur 169: Bodeplot ESR en C

3.1.2. DC methode met rustperiode

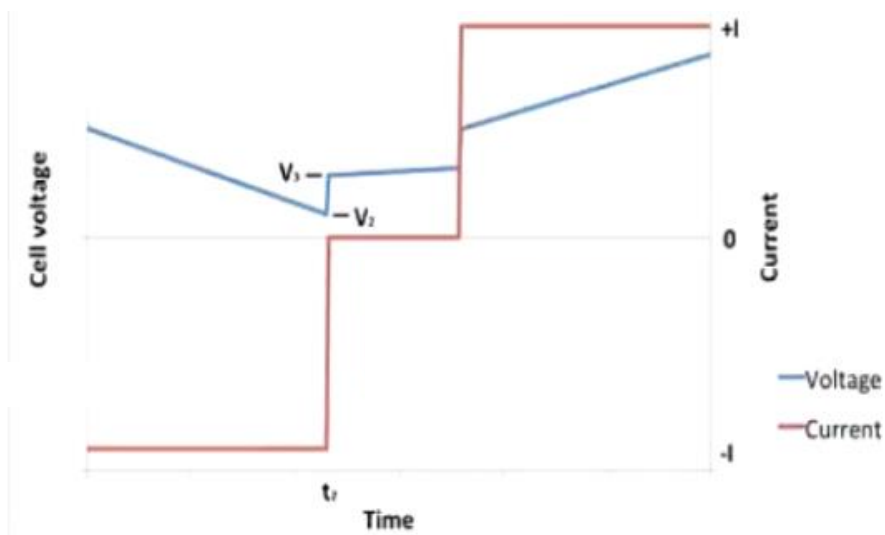
Een tweede methode is eveneens gebruikelijk bij verschillende fabrikanten. Binnen een spanningsbereik van 50 en 100% van de nominale celwaarde wordt een cel opgeladen en ontladen met een constante DC-stroom. Tijdens de overgang van opladen naar ontladen en omgekeerd wordt een rustperiode ingelast van 5 seconden. Deze rustperiode laadt toe om de spanningsval in te schatten over de ESR. In combinatie met de constante stroom wordt zodus de ESR-waarde berekend.

$$C = \frac{I * (t_2 - t_1)}{V_2 - V_1}$$

$$ESR_{10ms} = \frac{(V_3 - V_2)}{I}$$



Figuur 170: DC-rust methode



Figuur 171: DC-rust methode detail

3.1.3. Rekenvoorbeeld equivalente parameters

Als voorbeeld wordt de equivalente capaciteit en weerstand van supercaps berekend.

- 5 modules in serie
- 56 cellen per module in serie
- 280 cellen in serie
 - $R_{eq} = R_{cel} * 280 = 0,0728 \text{ ohm}$
 - $C_{eq} = C_{cel} / 280 = 10,7 \text{ F}$

Rated Voltage (V,DC)	Rated Capacitance (F)	MAX ESR(mΩ)	Dimension(mm)				Volume (ml)	Weight (g)
		DC	D	L	W	T		
2.7	3000	0.26	60.2	138.0			410	530

Figuur 172: SpecsHEET Nescap [12]

3.2. Energiespecificaties

Onderstaande formules worden gebruikt om de energie-inhoud van de supercapbank te berekenen. De minimale DC-spanning die hiervoor gebruikt wordt kan nul zijn, maar wordt in combinatie met een omvormer bepaald door de ondergrens van deze omvormer. Indien een directe koppeling wordt gehanteerd is een ondergrens van 50% van de nominale spanning gebruikelijk. Dit betekent dat 75% van de totale energie nuttig is.

$$\text{➤ } E_{\max} = \frac{C * V^2_{\max}}{2} = \frac{10,7 * 750^2}{2} = 2,8 \text{ MJ} = 780 \text{ Wh}$$

$$\text{➤ } E_{\text{bruikbaar}} = \frac{C * (V^2_{\max} - V^2_{\min})}{2}$$

De zelfontlading van supercaps is relatief groot, maar in absolute waarde blijft het energieverlies eerder beperkt. Gedurende enkele uren kan de spanning reeds met 100V dalen. Dit betekent een energieverlies van 25% indien de initiële spanning een nominale waarde had.

3.3. Vermogensspecificaties

Supercaps stelt een eerste orde RC-kring voor. Na volledig oplading en het kortsluiten van de klemmen kan het worst case kortsluitvermogen afgeleid worden. Het vermogen in datasheets wordt berekend a.d.h.v. vuistregels. Zo wordt het maximaal vermogen afgeleid in onderstaande formulering. Hieruit blijkt dat vermogen kan gelinkt worden aan de tijdsconstante van het eerste ordesysteem. Deze datasheet gebruikt twee keer de tijdsconstante als laad- of ontlaadtijd.

$$P_{\max} = \frac{E_{\max}}{2 * \text{tijdsconstante}} = \frac{\frac{C * V^2}{2}}{2 * ESR * C} = \frac{V^2}{4 * ESR}$$

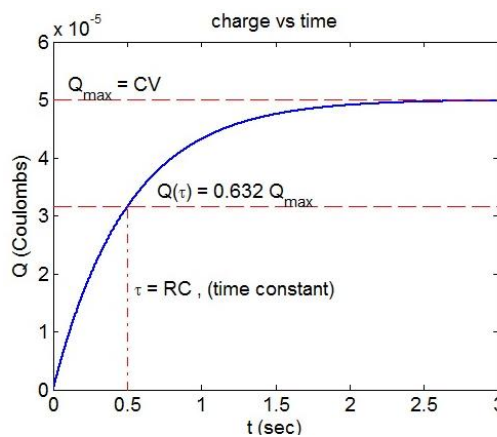
POWER*		
Power, (matched impedance), typical ⁵	kW	8.8
Specific power, matched impedance, minimum ⁵	kW/kg	61
Specific power, matched impedance, typical ⁵	kW/kg	80
Power density, matched impedance, minimum ⁷	kW/L	86
Power density, matched impedance, typical ⁷	kW/L	112

$$\begin{aligned}
 (1) \text{ Maximum peak current (1 sec)} &= \frac{1/2 CV}{C \times \text{ESR} + I_s} & (2) E_{\text{total}} &= \frac{1/2 CV^2}{3,600} & (3) E_{\text{mass}} &= \frac{1/2 CV^2}{3,600 \times \text{mass}} & (4) E_{\text{volume}} &= \frac{1/2 CV^2}{3,600 \times \text{volume}} \\
 (5) P_{\text{max}} &= \frac{V^2}{4 \times \text{ESR}} & (6) P_{\text{mass}} &= \frac{V^2}{4 \times \text{ESR} \times \text{mass}} & (7) P_{\text{volume}} &= \frac{V^2}{4 \times \text{ESR} \times \text{volume}} & (8) I_{\text{max}} &= \sqrt{\frac{\Delta T}{\text{ESR} \times R_{\theta}}}
 \end{aligned}$$

Figuur 173: Power specificaties Skeleton [13]

Indien dan vijf keer de tijdsconstante wordt genomen om een volledige ontlading te bekomen, kan dit aanzien worden als een tijdelijk korstluitvermogen dat gemiddeld gezien tijdens het ontladproces berekend kan worden.

$$P_{\text{max}} = \frac{2,8 \times 10^6}{5 \times \text{tijdsconstante}} = \frac{2,8 \times 10^6}{5 \times 0,0728 \times 10,7} = 720 \text{ kW gedurende } 364 \text{ ms}$$

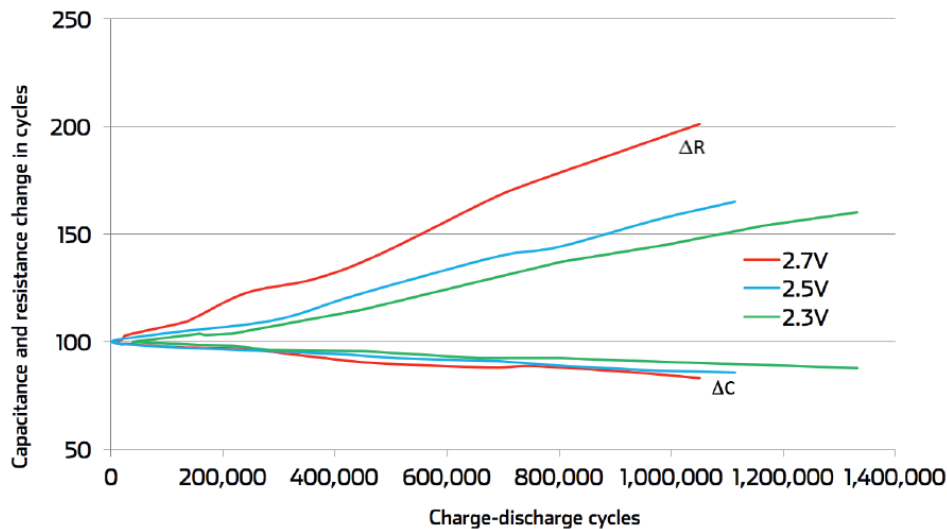


Figuur 174: Tijdsconstante en oplaadkarakteristiek van een RC-circuit

Meer algemeen wordt het vermogen berekend als de energieverandering gedurende een tijdsinterval. De duur van dit tijdsinterval speelt een cruciale rol. De gemiddelde spanning gedurende dit interval laadt toe de stroom en de opwarming te berekenen. Dit zal cruciaal blijken in het dimensioneren van supercaps. Een klein tijdsinterval zal de supercaps dermate opwarmen dat de levensduur gereduceerd zal worden. Opwarming controleren vormt dus de sleutel tot succes. De thermisch range van supercaps loopt van -40°C tot 60°C, maar kamertemperatuur wordt als ideaal beschouwd.

3.4. Levensduur

Het einde van de levensduur wordt vastgesteld wanneer de weerstandstoename 200% bedraagt t.o.v. de initiële waarde ofwel wanneer de capaciteit met 20% is afgenomen. Dit betekent dus niet dat cellen stuk zijn, maar hun prestaties zijn niet meer voldoende. Levensduur wordt ofwel uitgedrukt in aantal cycli ofwel in levensjaren. Standaard wordt het aantal cycli geraamd op 1M in ideale omstandigheden. Deze richtwaarde moet gecorrigeerd worden afhankelijk van de gebruikte celspanning en werkingstemperatuur.



Figuur 175: Levensduur van caps [10]

3.5. Stappenplan dimensionering SC

Onderstaand worden verschillende stappen doorlopen die noodzakelijk worden geacht in het ontwerp van supercaps.

- 1) Lastprofiel uitzetten en ΔE berekenen per periode. Daaruit kan de maximaal benodigde energie bepaald worden.
- 2) Bepalen of herbepalen van het aantal cellen/modules serie/parallel, rekening houdend met de maximale benodigde energie uit stap 1. (zie aanvulling)
- 3) Stroom- en spanningsprofiel berekenen. De spanning kan afgeleid worden uit de energieformule, terwijl stroom uit het quotiënt van vermogen en spanning wordt bekomen.

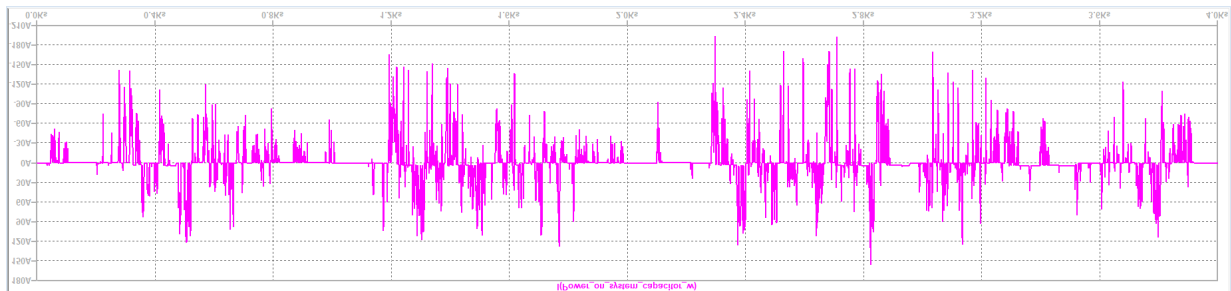
$$\Delta U = \sqrt{\frac{2\Delta E}{C}}$$

$$I = \frac{P}{U}$$

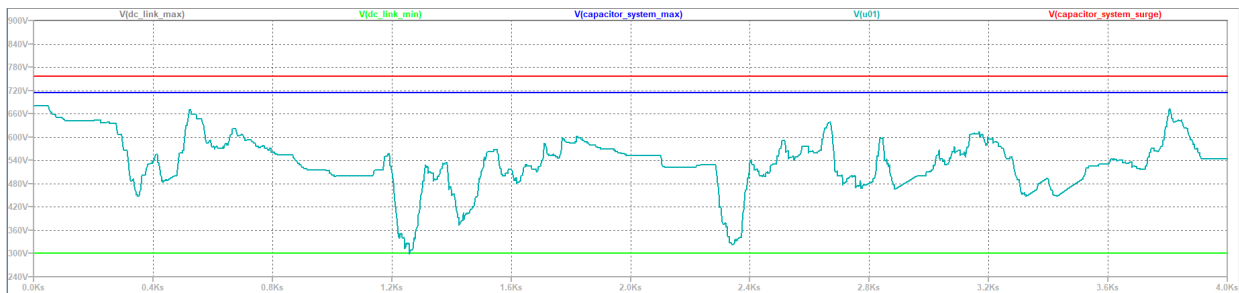
- 4) Indien de stroom- of spanningswaarden hun maximale waarden overschrijden, dient een nieuwe serie en/of parallelconfiguratie gekozen te worden zoals in stap 2.
- 5) Eens de modules in staat zijn om binnen hun stroom en spanningsgrenzen te werken, kan de piekstroom en de continue gemiddelde stroom berekend worden. De piekstroom moet kleiner zijn dan de opgegeven piekstroom uit de datasheet.
- 6) De temperatuurstijging wordt afgeleid door de thermische weerstand uit de datasheet en de ESR te integreren in onderstaande formule. (zie aanvulling)

$$\blacktriangleright \Delta T = ESR * R_{thermisch} * I_{RMS}^2$$

- 7) Tenslotte is het aan de gebruiker of de temperatuurstijging en de bijhorende levensduurreductie toegelaten is. Zoeniet dient het koelvermogen berekend te worden om de temperatuur constant te houden.



Figuur 176: Stroomprofiel voorbeeld



Figuur 177: Berekend spanningsprofiel voorbeeld



Figuur 178: Berekend temperatuurprofiel voorbeeld

3.5.1. Toelichting serie- en parallelconfiguratie van cellen

Het aantal cellen of modules in serie wordt bepaald door de gegeven DC-bus spanning. Bijgevolg kan de equivalente ESR en de capaciteit van een celconfiguratie berekend berekenen met onderstaande formules.

$$R_{serie} = R_{cel} * n$$

$$R_{parallel} = \frac{R_{cel}}{n}$$

$$C_{serie} = \frac{C_{cel}}{n}$$

$$C_{parallel} = C_{cel} * n$$

De maximale en minimale DC-spanning zijn afhankelijk van de DC-bus of de eventuele DC-DC-omvormer. Stap leidt tot nieuwe equivalente capaciteits- en weerstandswaarden van een seriekring. De werkelijk benodigde energie en de vastgelegde spanningsniveaus resulteren in de effectief benodigde equivalente capaciteit. indien deze capaciteit kleiner is dan de equivalente capaciteit van één seriekring, is te weinig capaciteit beschikbaar en dient deze vergroot te worden door parallelle kringen toe te voegen aan de initiële configuratie.

$$E = \frac{C_{eq}(U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2} \rightarrow C_{eq} = \frac{2 \cdot E}{(U_{max}^2 - U_{min}^2)}$$


De opbouw van supercaps is meestal niet vrij modulair, maar wordt vastgelegd door standaardproducten van fabrikanten. Vaak wordt een configuratie uitgevoerd op moduleniveau en niet op celniveau. Als conclusie zorgen seriemodules voor het gewenste spanningsniveau en parallelle kringen voor de nodige stroom.

SkelRack 3.5U

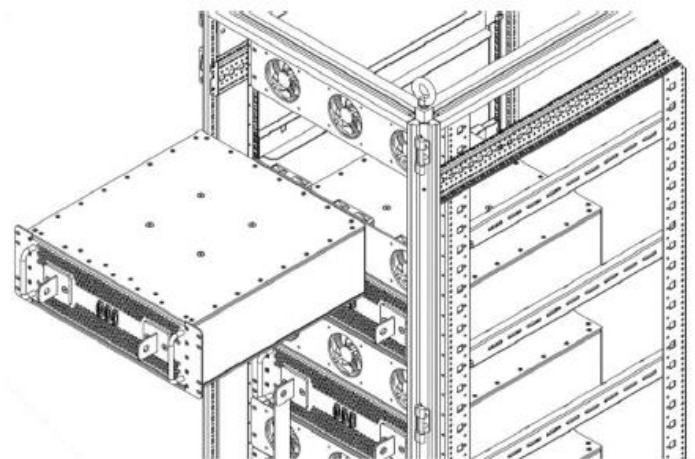
FOR 19 INCH RACK

DATA SHEET

Technical specifications	UNIT	102V-89F
Electrical		
Nominal voltage	V	102
Absolute maximum voltage	V	108
Rated capacitance, initial	F	89
ESR (AC 0.1 Hz)	mΩ	5.9
ESR (DC 10 ms)	mΩ	4.8
ESR IEC	mΩ	5.5
Maximum serial voltage ¹⁰⁾	VDC	1500
Maximum peak current (for 1 s duration) ¹⁾	A	2 980
Short circuit current	kA	18.5
Maximum stored energy	Wh	128
Cells in total	#	36
Cell type	SCA3200	

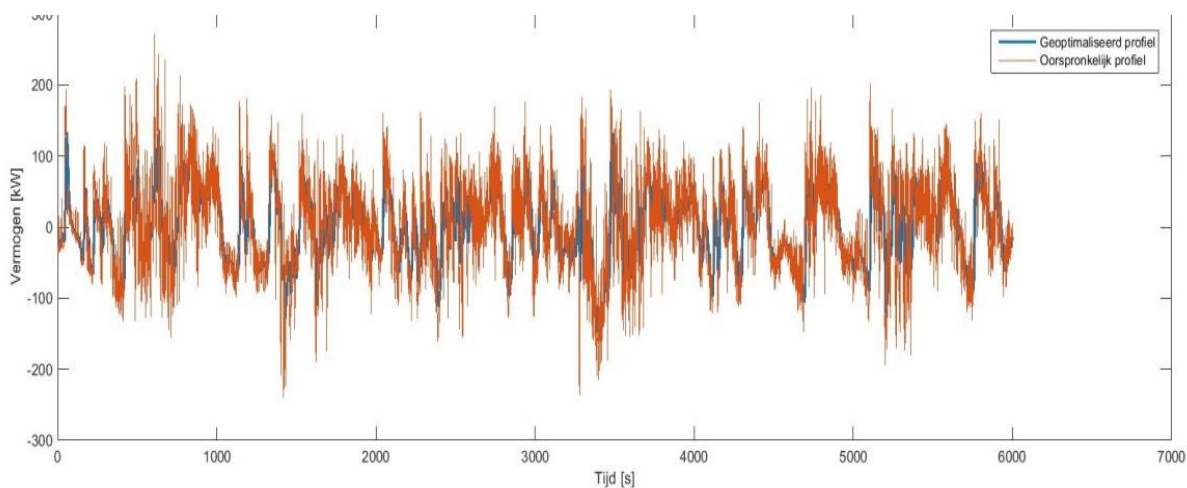


Figuur 179: Skeleton Skelrack module

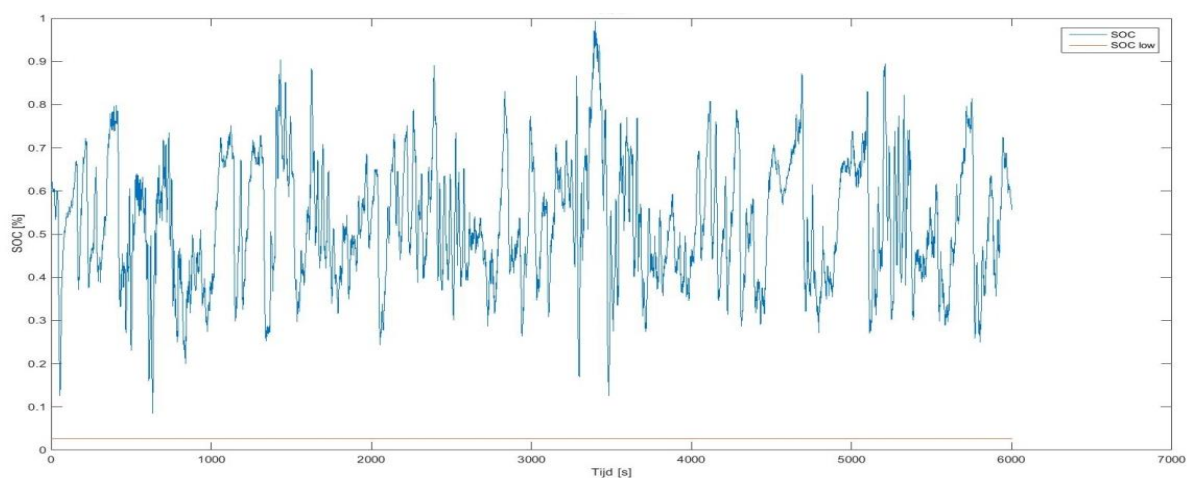


Figuur 180: Modulaire serieopbouw [13]

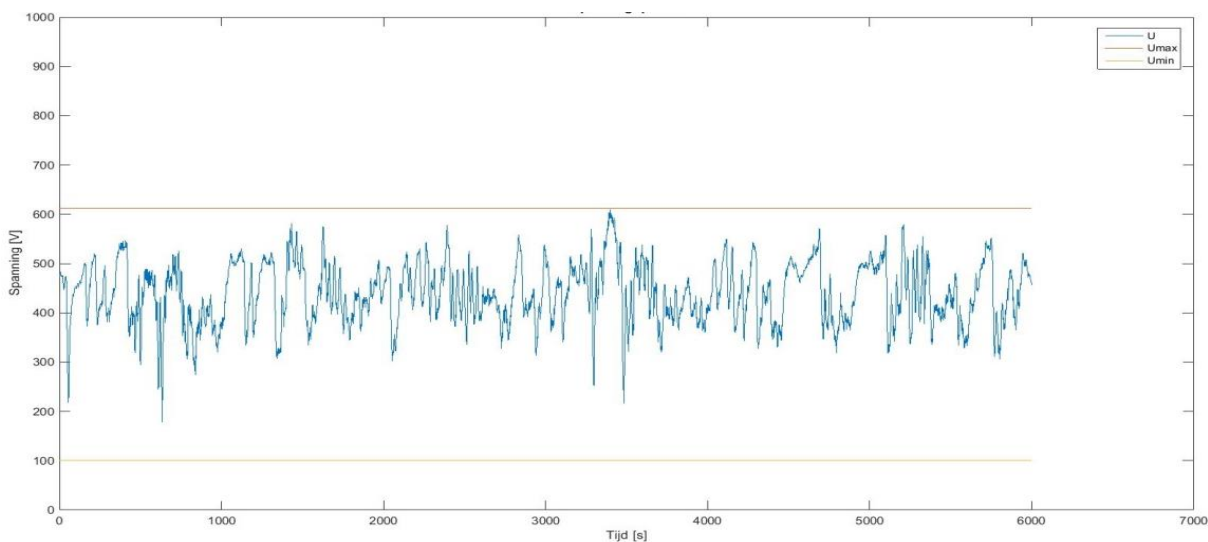
Onderstaand wordt het lastprofiel weergegeven met een geoptimaliseerd profiel. Het ontwerp werd zodanig gekozen dat de supercaps de ruis reduceren om zo een stabiel lastprofiel te bekomen. Eveneens wordt ook de SOC, het spanningsprofiel en het stroomprofiel. Zoals gewenst bestrijkt de configuratie bijna de volledige beschikbare spanningsrange en SOC.



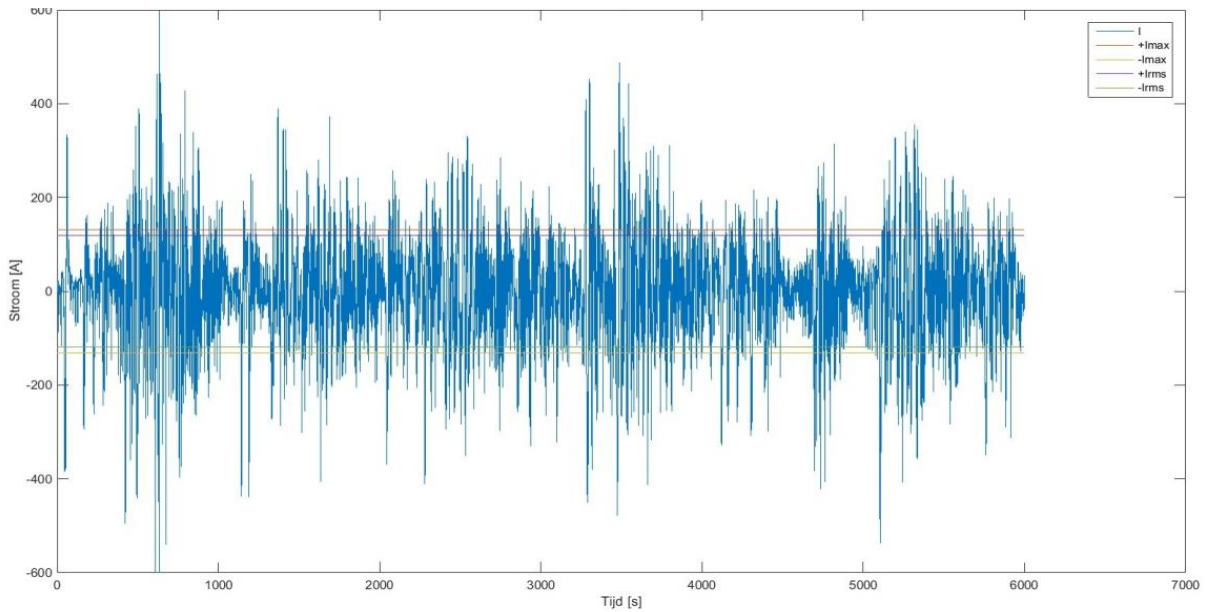
Figuur 181: Lastprofiel en wensprofiel na integratie van supercaps



Figuur 182: SOC volgens opgelegd wensprofiel



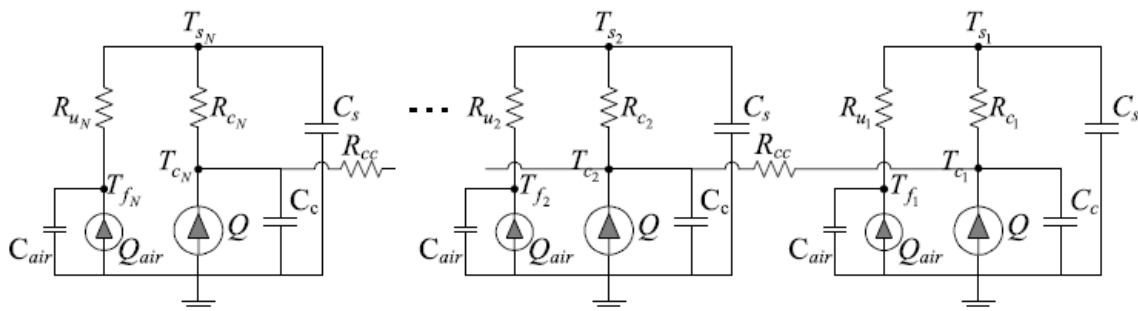
Figuur 183: Spanningsprofiel volgens opgelegd wensprofiel



Figuur 184: Stroomprofiel volgens opgelegd wensprofiel

3.5.2. Toelichting temperatuur en koelvermogen

De temperatuurstijging wordt zoals aangehaald beïnvloed door de interne weerstand, de thermische weerstand en het kwadraat van de stroom. Een gebruikelijke waarde voor thermische weerstand is $7.1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ bij de Skelrack 3.5u. Vervolgens kan het resultaat ingevuld worden in onderstaande formule om het koeldebiet te berekenen. Hierbij werd wel verondersteld dat alle warmte dient afgevoerd te worden via de lucht. In werkelijkheid zullen thermische overgangsweerstanden ervoor zorgen dat de uitwendige warmte beperkter zal zijn, daar ze deels wordt tegengehouden en opgeslagen door materiaal binnen.



Figuur 185: Equivalent thermisch circuit van supercaps [14]

$$C_{cap} \frac{dT}{dt} \approx Q_{opwarming} - Q_{cond} - Q_{conv} - Q_{air}$$

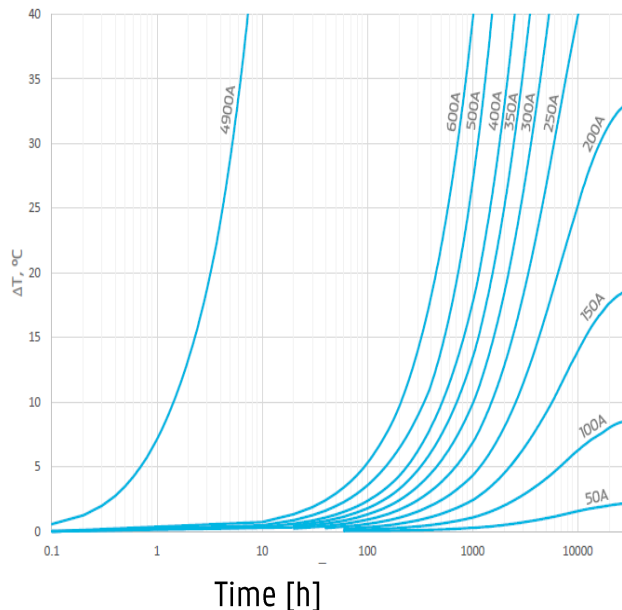
$$Q_{lucht} = \rho_{lucht} C_{lucht} \dot{V} \Delta T$$

$$\dot{V} = \frac{I_{rms}^2 ESR}{\rho_{lucht} C_{lucht} \Delta T}$$

Indien toch een temperatuurstoename wordt getolereerd, zal het aantal cycli dalen. Hieronder volgt een rekenvoorbeeld.

$$\# \text{ Cycli } N = \frac{N_R}{2 \left(\frac{U - U_r}{0,2} + \frac{T - T_r}{10} \right)}$$

- $U_{\text{ref}} = 2,85\text{V}$
- $N_{\text{ref}} = 1 * 10^6$
- $T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$
- verwachte temperatuur $T = 40^\circ\text{C}$
- verwachte levensduur $N = 420448$ cycli



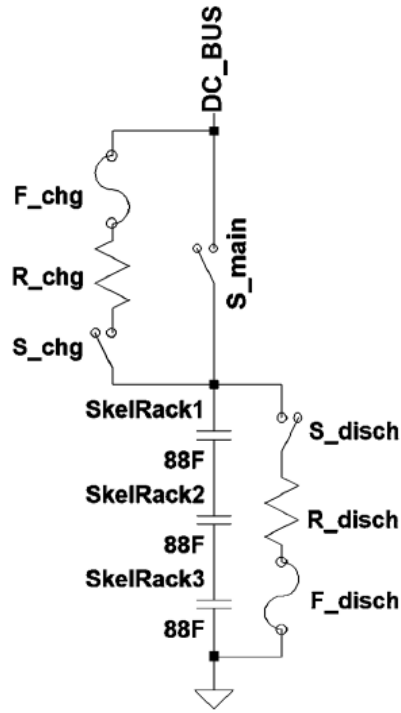
Figuur 186: Temperatuurstijging i.f.v. opgelegde belastingsstroom [11]

3.5.3. Voorlaadcircuit

Om de piekstroom van de supercaps te begrenzen bij het inschakelen op een ongeladen DC-bus, is een voorlader vereist. De stroom is immers evenredig met in dit geval een zeer grote spanningsstijging en zou grote schade kunnen aanrichten aan de cellen. Een voorlader bestaat uit schakelende elementen, beveiligingen en vermogensweerstand. Het ontwerp kan volgens twee strategieën uitgevoerd worden. De tijdsconstante, het product van de capaciteit en de interne weerstand bepaald de oplaadtijd en hiermee wordt gespeeld.

- Methode 1: vaste weerstand en oplaadtijd berekenen
 - $R_{\text{charge}} = \frac{t_{\text{charge}}}{5 * C}$
 - $t_{\text{charge}} = 5 * R_{\text{charge}} * C$
- Methode 2: Vaste laadvermogen en laadweerstand berekenen
 - $P_{\text{charge}} = \frac{V_{DC}^2}{R_{\text{charge}}}$
 - $V_{DC} = \sqrt{P_{\text{charge}} * R_{\text{charge}}}$

Ontladen kan in principe met dezelfde weerstand en is wenselijk bij onderhoud of om het systeem manueel in rust te brengen. Kies ontladduur zodat spanning tot onder de absoluut conventionele grensspanning daalt alvorens onderhoud uit te voeren. Voor de demonstratieopstelling werd een apart ontladcircuit voorzien waarbij de spanning na ongeveer 30 minuten onder de conventionele grensspanning daalt.



Figuur 187: prinsieschema voorlader en ontlader [11]

4. Literatuurlijst

- [1] Y. K. T. a. S. K. Panda, „Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable Wireless Sensor Network 15 0 Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable Wireless Sensor Network,” 2010.
- [2] N. O. P. V. D. B. J. V. M. Mohamed Daowd, „A Review of Passive and Active Battery Balancing based on Matlab/Simulink,” *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*.
- [3] U. S. M. S. F. E. T. H. S.-D. I. Thomas Szalai, „Design of an active battery management system for electric vehicle,” *PCIM*, 2014.
- [4] J. C. Q. Y. H. H. A. F. S. RUI XIONG, „Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles,” *IEE Access*, 2017.
- [5] Verheust, „Battsense BMS”.
- [6] Panasonic, „<https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf>,” [Online].
- [7] VITO/AIT/FiveVB, „Test methods for improved battery cell understanding”.
- [8] J. Lewis, „Supercapacitor Applications by Kemet,” <https://www.slideshare.net/KEMETElectronics/supercapacitors-transportation-r2>.
- [9] Maxwell, „<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/cells/documents>,” [Online].
- [10] Tecate_group, „<https://www.tecategroup.com/ultracapacitors-supercapacitors/ultracap-white-papers.php>,” [Online].
- [11] Skeleton, „<https://www.skeletontech.com/downloads>,” [Online].
- [12] Nescap, „http://www.nescap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/Large_cell_supercapacitor_family/cylindrical_supercapacitor_cell.jsp,” [Online].
- [13] Skeleton, „<http://skeletontech.com/datasheets/skelcap-energy-en.pdf>,” [Online].
- [14] B. H. V. G. A. V. S. D. Vita Lystianingrum, „On Estimating Instantaneous Temperature of a supercapacitor string using an observer based on experimentally validated lumped thermal model,” *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 2015.

Hoofdstuk 7: ‘Veiligheid en normering’

1. Algemeen

Algemeen wordt gesteld dat op vlak van veiligheid en normering, de installatie moet voldoen aan de Synergrid voorschriften C10/11 [1] *“Specifieke technische voorschriften voor elektriciteitsproductie-installaties die parallel werken met het distributienet”*. De voorschriften zijn van toepassing voor elke decentrale productie-installatie die in parallel met het openbaar laagspannings- of middenspanningsdistributienet werkt. Bijkomend aan de C10/11 dient de installateur ook rekening te houden met de voorschriften van het AREI en van het gewest alsook andere normen.

Binnen de C10/11 liggen de wetten vast wanneer een systeem van het distributienet dient ontkoppeld te worden, bijv.: zodra een probleem zich op het elektriciteitsnet voordoet dient de installatie zich los te koppelen. Hierbij is het van belang dat decentrale productie-eenheden zoals fotovoltaïsche panelen of windmolens niet meer injecteren. Hiervoor dient de ont koppeling te worden gegarandeerd, door een extra ‘ontkoppelrelais’ in de installatie op te nemen. Tot voor kort was en is nog steeds wisselspanning de standaard bij elektrische installaties. Echter is interesse in gelijkspanningsnetten door de toename aan hernieuwbare energieopwekking opgedreven. De voorbije decennia heeft onderzoek binnen de hernieuwbare energiesector zich voornamelijk beziggehouden met de slimme netten van de toekomst ‘Smart Grids’. Daarin kwam het belang aan energieopslag alsmear meer naar voor. Doordat zowel energieopwekking als energieopslag gebaseerd zijn op gelijkspanning (DC – direct current), komen DC microgrids meer en meer in de belangstelling te staan.

Wetgeving over gelijkspanningsinstallaties komt te weinig voor of dient dringend een update te krijgen. Hierdoor krijgt de vertrouwde C10/C11 een grondige herziening. Tot op het moment van het schrijven van dit praktische gids is het nog in ontwerpfas e (reeds publiekelijk voor revisie gesteld). Het voorstel maakt een onderscheid tussen:

- hoog- of laagspanningsdistributienet met een maximaal vermogen ≤ 10 kVA (C10/11 LV-1)
- laagspanningsdistributienet met een maximaal vermogen > 10 kVA (C10/11 LV-2)
- hoogspanningsdistributienet met een maximaal vermogen < 25 MW (C10/11 MV-1)

Het document is gratis beschikbaar via de site van Synergrid [2]. Binnen het document wordt vaak naar andere voorschriften vanuit het AREI of Synergrid verwezen. De C10/11 bespreekt enkel de voorschriften voor een parallelwerking, hierdoor is er nog steeds nood aan een Belgische normering i.v.m. aardingsystemen en beveiligingsmaatregelen rond (al dan niet DC) microgrids.

Onafhankelijk van de grote van de decentrale productie-eenheid, dient de distributienetbeheerder (DNB) ten allen tijde aangesproken te worden. Voor grote installaties met een vermogen > 10 kVA is het noodzakelijk een schriftelijke toestemming van de DNB te bezitten.

In Nederland volgt uit de NEN 1010 norm een praktische richtlijn NPR 9090 ‘DC installaties voor laagspanning’ die de gevaren en belangen van DC-netten bespreekt. Op basis van deze praktische richtlijn zal er een nieuw ontwerp voor een internationale norm komen (vanuit de stuurgroep IEC – International Electrotechnical Commission).

2. Bespreking van de C10/11

Zoals eerder aangegeven splitst het nieuw voorstel van de C10/11 regulering zich op in 3 delen. Onderstaand tabel (Tabel 12: Overzicht indeling C10/11 revisie) geeft een overzicht van de reeks met de drie toepassingsgebieden.

Tabel 12: Overzicht indeling C10/11 revisie

C10/11 LV-1 [2] Kleine elektriciteitsproductie-installatie die parallel werkt met het openbaar distributienet (laagspanning of hoogspanning) waarvoor een vereenvoudigde installatieprocedure gebruikt kan worden die gebaseerd is op een meldingsplicht.

Indicatief betreft dit elektriciteitsproductie-installaties met een gecombineerde maximaal schijnbaar vermogen van 5 kVA¹ (enkelfasig) of 10 kVA (driefasig).

C10/11 LV-2 [3] Elektriciteitsproductie-installatie die parallel werkt met het openbaar laagspanningsdistributienet en waarvoor C10/11 LV-1 niet van toepassing is.

C10/11 MV-1 [4] Elektriciteitsproductie-installatie die parallel werkt met het openbaar hoogspanningsdistributienet en die een maximaal actief vermogen heeft kleiner dan 25 MW en waarvoor C10/11 LV-1 niet van toepassing is.

Afhankelijk van het toepassingsgebied, kennen de verschillende voorschriften andere voorwaarden. Deze worden per hoofdstuk besproken in dit document. Overkoepelende delen die van toepassing zijn voor de volledige reeks, worden hieronder vermeld.

De volgende voorschriften hebben betrekking op elektriciteitsproductie-installaties:

- de duur van de parallelwerking met het openbaar distributienetwerk,
- de energiebalans van de aansluiting,
- de mogelijkheid om daadwerkelijk energie te kunnen leveren aan het distributienet,
- de aard van de primaire energie van de elektriciteitsproductie-eenheid,

Het document beschouwt energieopslagsystemen als elektriciteitsproductie-eenheden. Tevens zijn alle vereisten van toepassing op elektriciteitsproductie-installaties met opslagsystemen, ongeacht of ze gecombineerd zijn met andere productie-eenheden. De documenten zijn geldig vanaf 27 april 2019 en hebben betrekking op:

- Nieuwe elektriciteitsproductie-eenheden met meldingsplicht voor LV-1 en die goedkeuring vereisen van de DNB voor LV-2 en MV-1 na de datum van uitgifte.
- Bestaande elektriciteitsproductie-eenheden (met meldingsplicht LV-1) die aangepast worden na de datum van uitgifte.

¹ Dit is de gecombineerde maximumcapaciteit van de productie-eenheden bij een productie-installatie zonder de energieopslagsystemen in overweging te nemen. Desalniettemin vallen deze energieopslagsystemen binnen het toepassingsdomein van deze technische voorschriften.

De voorschriften gelden enkel bij de Belgische DNB. Daarnaast handelen LV-1 en LV-2 de norm 50549-1 terwijl MV-1 de norm 50549-2 handelt.

2.1. C10/11 LV-1 – Kleine elektriciteitsproductie-installatie die in parallel werkt met het openbaar distributienet.

Tenzij anders vermeld, hanteren de voorschriften enkel situatie LV-1.

2.1.1. Veiligheidsonderbreking

Voor zowel LV-1 als LV-2 is het niet toegelaten een elektriciteitsproductie-eenheid met stekkeraansluiting parallel te laten werken met het distributienet.

De Synergrid C10/11 – LV-1 voorschrift stelt geen eis tot het inrichten van een aanvullende veiligheidsonderbreking. Echter verwacht Synergrid wel dat aandacht wordt besteed aan de juiste installatie- en parameterinstellingen van het automatisch scheidingssysteem (zie Tabel 13 : Installatie- en parameterinstellingen auto. scheidingssysteem). De veiligheidsonderbreking vervult eveneens de rol van netontkoppelbeveiliging.

Tabel 13 : Installatie- en parameterinstellingen auto. scheidingssysteem

<i>Functie</i>	<i>Tripinstelling</i>
Overspanning gemiddeld 10 min	230 V + 10% geen vertraging
Overspanning	230 V +15% geen vertraging
Onderspanning	230 V -20% geen vertraging
Overfrequentie	51,5 Hz geen vertraging
Onderfrequentie	47,5 Hz geen vertraging
LOM	volgens EN 62116

2.1.2. Spanningsstijging in de installaties van de distributienetgebruiker (DNG)

De elektriciteitsproductie-eenheid kan in de installatie van de DNG een spanningsstijging veroorzaken, hiermee dient bij het ontwerp van de bekabeling rekening mee gehouden worden. De spanningsstijging moet steeds kleiner zijn dan 1% van de nominale spanning. Het automatisch scheidingssysteem geïntegreerd in de elektriciteitsproductie-eenheid is ingesteld op de toegelaten spanningsgrenzen van het aansluitingspunt. Spanningsstijging in de installaties van de DNG kan dus een vroegtijdige afschakeling van de elektriciteitsproductie-eenheid veroorzaken. Dit voorkomen kan door de verbinding tussen het algemeen verdeelbord en de aansluitingsklemmen van de elektriciteitsproductie-eenheid in een voldoende dikke kabelsectie te verwezenlijken.

2.1.3. Storingen veroorzaakt door parallelname (toepasbaar op LV-1, LV-2 en MV-1)

Parallelwerking mag op voorwaarde dat de spanning en frequentie op het distributienet zich binnen de marges bevinden. Algemeen mag een parallelkoppeling geen plotse spanningsvariaties groter dan 4% veroorzaken. Automatische (her)koppeling is toegestaan indien aan onderstaande voorwaarden wordt voldaan.

Tabel 14: Voorwaarden herkoppeling bij parallelname

<i>Parameter</i>	<i>Herkoppeling na werking netontkoppelrelais</i>	<i>Start van normale werking</i>
Onderfrequentie	49,9 Hz	49,9 Hz
Bovenfrequentie	50,1 Hz	50,1 Hz
Onderspanning	90 % Un	85 % Un
Overspanning	110 % Un	110 % Un
Observatietijd	60 s	60 s
Max. gradiënt van toename van actief vermogen	10%/min	20%/min

2.1.3.1. Onevenwicht

Voor zowel LV-1 als LV-2 zegt Synergrid dat geen intentioneel onevenwicht mag optreden tussen de opgewekte vermogens op verschillende fasen. Bij aanwezigheid van verschillende elektriciteitsproductie-eenheden op eenzelfde driefasige LS-netaansluiting moet het maximaal onevenwicht tussen de verschillende fasen lager zijn dan 5 kVA, hierdoor dienen de productie-eenheden optimaal verdeeld te zijn over de drie fasen.

2.1.3.2. Aansluitwijze

Enkelfasige of driefasige aansluiting

Ingeval de aansluiting op het distributienet éénfasig is, mag het maximale wisselstroomvermogen van alle elektriciteitsproductie-eenheden niet groter zijn dan 5 kVA, tenzij de DNB het anders vermeldt. Voor driefasige aansluitingen, mag het maximale wisselstroomvermogen bij de productie-installatie niet groter zijn dan 5kVA. Te allen tijde dient het onevenwicht tussen de fasen zich te beperken tot 5 kVA (maximale limiet). Eenheden met een maximaal wisselstroomvermogen groter dan 5 kVA moeten verplicht meerfasig uitgevoerd worden. Vanaf 3,6 kVA is het bij voorkeur meerfasig.

Aansluiting van de elektriciteitsproductie-installatie op het hoogspanningsdistributienet

Het maximaal vermogen mag de 10 kVA niet overschrijden. Dit is ook geldig voor de som van alle elektriciteitsproductie-eenheden die een individueel maximaal vermogen hebben van ten hoogste 10 kVA (reeds bestaande of nieuwe), deze som mag niet meer bedragen dan 10 kVA tenzij anders vermeld op de website van de DNB [6].

Indien het maximaal schijnbaar vermogen in overweging wordt genomen bij het evalueren van de voorwaarden zegt Synergrid het volgende:

“Een begrenzing van het maximale vermogen (bv. door software of firmware) is geen geldige manier om aan de vermogensgrenzen te voldoen.” – Synergrid C10/11

Energieopslagsystemen zoals bijvoorbeeld een batterijsysteem

Wanneer een energieopslagsysteem wordt gecombineerd met andere productiemethoden (bestaande of nieuwe), kan de vereenvoudigde installatieprocedure worden gebruikt voor additionele energieopslagsystemen, mits aan specifieke voorwaarden worden voldaan met betrekking tot:

- maximale vermogensgrens voor het energieopslagsysteem (Tabel 15: Maximale vermogensgrens - energieopslagsysteem),
- inachtnaam van het faseonevenwicht,
- gebruik van een EnFluRi-sensor².

Tabel 15: Maximale vermogensgrens - energieopslagsysteem

	Aansluiting op het laagspanningsdistributienet		Aansluiting op het hoogspanningsdistributienet
	Elektriciteitsproductie-installatie met een enkelfasige aansluiting op het distributienet	Elektriciteitsproductie-installatie met een driefasige aansluiting op het distributienet	
Maximale vermogensgrens voor aanvullende energieopslagsystemen	≤ 5 kVA	≤ 10 kVA	≤ 10 kVA

2.2. C10/11 LV2 – Elektriciteitsproductie-installatie die parallel werkt met het openbaar laagspanningsdistributienet

Deze voorschriften hebben betrekking op elektriciteitsproductie-installaties die stroomafwaarts opgesteld staan van een aansluiting op het openbaar laagspanningsdistributienet. Tenzij anders vermeld, zijn de volgende aspecten voor zowel LV-2 als MV-1 van toepassing.

2.2.1. Bijzondere gevallen

Noodvoedingssysteem

Synergrid definieert een noodvoedingssysteem als “*een elektriciteitsproductie-eenheid die technisch in staat is om elektrische energie te leveren in de richting van het distributienet maar die in stationaire situatie een eiland voedt dat losgekoppeld is van het distributienet*”.

Opdat het kan beschouwd worden als een noodvoedingssysteem, mag deze dus slechts kortstondig en sporadisch gekoppeld worden met het distributienet. Voorwaarden zijn terug te vinden in het document. Alle parallelnames dienen geregistreerd te worden in een logboek. Technische voorschriften waar voor dergelijke noodvoedingssystemen een uitzondering wordt verleend of waar specifieke technische vereisten van toepassing zijn, worden expliciet vermeld en aangeduid met een icoon:



² Een EnFluRi-sensor is een directionele vermogenssensor met een communicatiekoppeling met het energieopslagsysteem.

Gecombineerde warmtekrachtkoppelingproductie (WKK) op een industriële site

Over het algemeen valt een WKK-unit binnen het toepassingsdomein van de technische voorschriften. Aandacht dient gevestigd te worden bij de vereisten met betrekking op het moduleren van het vermogen van de WKK.

2.2.2. Aanvullende installatievereisten

Zolang de spanning en de frequentie zich binnen de grenzen bevinden van de technische vereisten, mag de parallelwerking niet onderbroken worden. Elementen die vroegtijdige afschekeling kunnen veroorzaken mogen niet worden opgenomen. Uitzonderingen zijn:

- afschakeling door de werking van het netontkoppelbeveiligingsrelais,
- een normale netontkoppeling die op geen enkele wijze – (on)rechtstreeks – in verband staat met het optreden van een netstoring.

Veiligheidsonderbreking

De installatie moet voorzien zijn van een vergrendelbare veiligheidsonderbreking, deze moet permanent toegankelijk zijn voor de DNB. (AREI Art. 235). Het is aan de beheerder toegestaan een afzonderlijke vergrendeling toe te voegen voor zijn eigen behoeften.

Afwijking voor elektriciteitsproductie-installaties ≤ 30 kVA

Indien de volgende voorwaarden voldaan zijn, is het inrichten van aanvullende veiligheidsonderbreking geen noodzaak:

- totaal geïnstalleerde vermogen ≤ 30 kVA,
- elke eenheid is voorzien van een automatisch scheidingsstelsel,
- elk type is gehomologeerd door Synergrid (lijst van Synergrid [7]), in dat geval vervult het automatisch scheidingsstelsel tevens de rol van netontkoppelbeveiliging.

Aansluitingswijze op het lokale netwerk van de DNG (enkel LV2)

Als basisvoorschrift geldt dat een elektriciteitsproductie-eenheid met een maximaal vermogen groter dan 5 kVA verplicht over meerdere fasen aangesloten moet worden, waarbij het onevenwicht tussen de fasen steeds beperkt blijft tot maximaal 5 kVA.

2.2.3. Combinatie van energieopslagsystemen met andere productievoorzieningen

Energieopslagsystemen moeten ook voldoen aan de technische vereisten van voorschrift C10/11. Voor optimale vermogensuitwisseling met het distributiesysteem moet bijzondere aandacht worden geschonken aan de volgende aspecten:

- fase-onevenwicht,
- vermogensbeheersysteem met een EnFluRi-sensor.

2.2.4. Netontkoppelbeveiliging

De netontkoppelbeveiliging (verplicht) heeft als belangrijkste doel de productie-eenheid los te koppelen van het distributienet:

- indien de werking ervan leidt tot een overspanning in het distributienet;
- bij ongeplande eilandwerking waarbij een deel van het distributienet onder spanning blijft;
- indien de spanning en/of frequentie op het distributienet te veel afwijken.

Daartegenover is de netontkoppelbeveiliging niet bedoeld om:

- van het distributienet los te koppelen in het geval van defecten (bijv. kortsluitingen) intern en/of aan de elektriciteitsproductie-eenheid zelf;
- schade aan de elektriciteitsproductie-eenheid te voorkomen.

Keuze van netontkoppelbeveiligingsrelais en instelwaarde

Ieder installatie is verplicht om uitgerust te zijn met een netontkoppelbeveiligingsrelais (gehomologeerd door Synergrid en opgenomen in C10/21 [8]). De beveiligingsfuncties ervan moeten worden ingesteld volgens de richtlijnen van de DNB. De keuze van de netontkoppelbeveiligingsrelais en de instelwaardes ervan hangen af van de backup-werking (voldoende digitale inputs etc.) en het gebruik ervan zoals de verschillende meetcriteria (frequentieregeling, eilandwerkingsdetectie,...)

Netontkoppelschakelaar

Dit is een vermogensschakelaar die geactiveerd wordt door het uitschakelbevel (Trip 1) van het netontkoppelbeveiligingsrelais. Een onrechtstreeks uitschakelbevel (bijv. via PLC) is niet toegestaan.

Voor de functie van netontkoppelschakelaar te vervullen, is het volgende vereist:

- 'making and breaking capacity' van minimaal de maximale stroombijdrage;
- 'short-term withstand capability' voor de kortsluitstroom bij een defect.

Bij lijnstromen kleiner dan 80 A, mag i.p.v. een vermogensschakelaar een contactor gebruikt worden.

Backup-werking

De netontkoppelbeveiliging moet verplicht voorzien zijn van een backup-werking. Bij falen van het uitschakelbevel wordt (na 0,3s) een nieuw uitschakelbevel gestuurd naar een stroomopwaarts gelegen backup-vermogensschakelaar.

2.2.5. Wisselwerking met het distributienet

Kortstondige loskoppelingen in het distributienet (t.g.v. geautomatiseerde schakelingen in het net)

Om de duur van de onderbrekingen in het openbaar distributienet zoveel mogelijk te beperken en dus de continuïteit zo goed mogelijk te verzekeren, worden in dit net op geautomatiseerde wijze snelle schakelingen uitgevoerd. Parallelname met dit losgekoppelde deel van het openbaar distributienet, leidt ook tot een transiënte vorm van eilandbedrijf waarbij een deel van het distributienet betrokken is. Op het ogenblik van deze koppeling is het mogelijk dat beide delen van het distributienet asynchroon zijn.

Instellingen netontkoppelbeveiligingsrelais

Onderstaande tabel (Tabel 16: Instellingen netontkoppelbeveiligingsrelais) bevat een overzicht van de richtlijnen voor de instellingen van het netontkoppelbeveiligingsrelais. De DNB kan andere instelwaardes opgeven, deze zijn dan ook prioritair.

Tabel 16: Instellingen netontkoppelbeveiligingsrelais

Functie	Instelmarges (Instelwaarde tijdsvertraging *)		Standaardinstellingen (Instelwaarde tijdsvertraging *)	
	U>>	> 110% Un	0s	115% Un
U>	≤ 110% Un	0 à 3s	110% Un	1s
U<	50 – 85% Un	0 à 1,5s	70% Un	1,5s
U<<	25 – 50% Un	0s	25% Un	0s
f>	51,5 Hz	0s	51,5 Hz	0s **
f<	47,5 Hz	0s	47,5 Hz	0s **
Minimaal 1 van volgende eilanddetectiefuncties (in functie van gekozen relais)				
$\frac{df}{dt}$ (RoCoF)		1 Hz/s 200 ms **		
Vectorsprong		7° (driefasig) 0 s		
Activering van een nauwer frequentievenster op basis van lokale spanningscriteria.***				

* Een tijdsvertraging van 0s betekent dat geen enkele vertraging wordt toegevoegd aan de technische maximumduur die vereist is om de uitschakeling uit te voeren. De totale duur van de uitschakeling mag in ieder geval de 0,12 seconden niet overschrijden.

** Afhankelijk van de meettechniek van het beveiligingsrelais, kan het nodig zijn een extra tijdsvertraging toe te voegen opdat de ‘operate time’ overeenstemt met

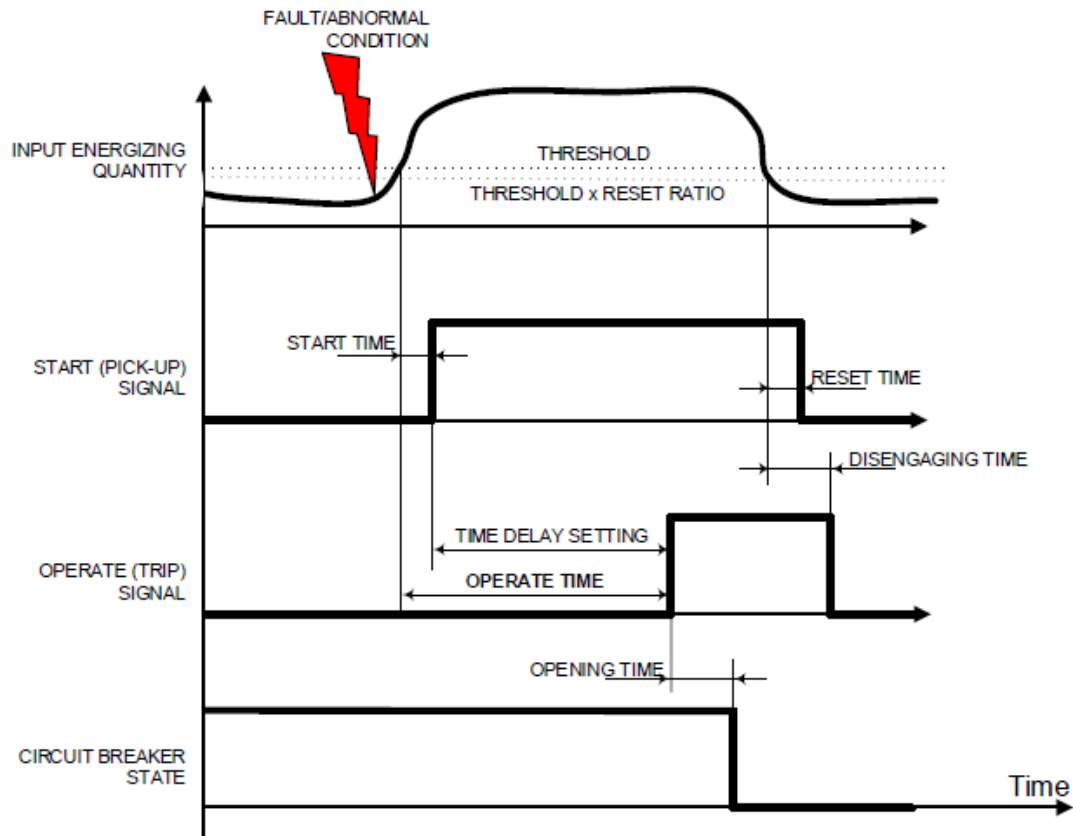
- 100 ms voor de functies f< en f>
- 300 ms voor de functie RoCoF

Opmerking: de term ‘operate time’ wordt verduidelijkt in de grafiek hieronder.

*** Deze methode stemt overeen met deze beschreven in de Europese normalisatiedocumenten EN 50549-1 en EN 50549-2 als ‘Example strategy 1’ in hun bijlage ‘Examples of protection strategies’

Onderstaande figuur (Figuur 188: Operate-time) geeft verduidelijking bij het hierboven gebruikte begrip ‘operate time’. Uit de grafiek is duidelijk te zien dat de bedrijfstijd de som is van de volgende onderdelen:

- de starttijd die bepaald wordt door het werkingsprincipe van het beveiligingsrelais;
- de instelwaarde tijdsvertraging die overeenstemt met de hierboven bedoelde tijdsvertraging.



Figuur 188: Operate-time

Vermogenrespons op spanningswijzigingen – Spanningsondersteuning door reactief vermogen

Voor een noodvoedingssysteem moet de arbeidsfactor zo dicht mogelijk bij 1 liggen en mag zeker niet onder de grens van 0,85 komen tijdens parallelwerking. Er wordt door de DNB dan ook geen enkele regelmodus opgelegd voor het reactief vermogen.



De elektriciteitsproductie-installatie moet voldoen aan de relevante vereisten van EN 50549-1 (in uitgave 2018). Het is de taak van de DNG om de capaciteit tot het leveren van reactief vermogen te communiceren, te demonstreren en ter beschikking te stellen aan de DNB tijdens de aansluitingsprocedure. Daarbovenop mag de DNG het gebruik van de capaciteit niet weigeren zonder technische rechtvaardiging. De module zal de volledige capaciteit ter beschikking stellen ter ondersteuning van de systeemstabiliteit.

2.3. C10/11 MV-1 – Elektriciteitsproductie-installatie die parallel werkt met het openbaar hoogspanningsdistributienet

Deze voorschriften hebben betrekking op elektriciteitsproductie-installaties die stroomafwaarts opgesteld staan van een aansluiting op het openbaar hoogspanningsdistributienet:

- met een maximaal vermogen lager dan 25MW,
- met spanningsniveau waarop de elektriciteitsproductie-eenheid zelf is aangesloten op het lokale net van de DNG,
- met de nominale spanning op het openbaar HS-distributienet (1 tot 36kV).

2.3.1. Omschakeling naar lokale eilandwerking met kritieke belastingen

De algemene regel houdt in dat bij normale uitbating (parallelwerking met het distributienet), het verplicht is om binnen de limieten – in het geval van bepaalde netstoringen – gekoppeld te blijven met het distributienet en in zekere mate ondersteuning te bieden. In specifieke gevallen kan de DNB, in coördinatie met de TNB, een uitzondering toestaan om een elektriciteitsproductie-eenheid toch los te

koppelen van het distributienet bij het optreden van netstoringen. 

Een DNG die van deze uitzondering gebruik wil maken, richt deze vraag schriftelijk aan de DNB die deze aanvraag zal evalueren, samen met de TNB.

2.3.2. Vergrendeling en minimumspanningsrelais

De DNB kan vergrendelingen opleggen om zo ongewenste parallelwerking te vermijden. Daarnaast kan de netbeheerder ook een minimumspanningsrelais opleggen om negatieve gevolgen voor het net en de beheerders te voorkomen. Parameters van het relais dienen ingesteld te worden volgens de instructies van de DNB. Situaties die de noodzakelijkheid van een minimumspanningsrelais kunnen beïnvloeden zijn:

- toevoegen van een elektriciteitsproductie-eenheid bij een bestaande die voorzien is van oudere beveiligingen met andere principes;
- situaties met slechte toegankelijkheid van het netontkoppelbeveiligingsrelais.

2.3.3. N-1 situaties

In een N-1 situatie³ van het net mag het totale vermogen van de elektriciteitsproductie-installaties het maximale toegestane vermogen van de HS/MS-transformatoren niet overschrijden.

2.3.4. Parallelnames in het distributienet door DNB

Dit is van kracht op elektriciteitsproductie-eenheden vanaf 250 kVA.

Bij normale uitbating van de distributienetten worden door de DNB soms parallelnames verwezenlijkt in het distributienet. Aanwezigheid van elektriciteitsproductie-installaties kan deze parallelnames bemoeilijken of zelfs onmogelijk maken. Daarom kan de beheerder van de installatie door de DNB opgelegd worden om kortstondig het opgewekte vermogen te beperken en/of te werken met een aangepaste arbeidsfactor.

2.3.5. Aarding (geldig voor LV-1, LV-2 en MV-1)

Op voorwaarde dat er een galvanische scheiding is met het distributienet (d.m.v. een transformator) mag de nulgeleider van de productie-eenheid geaard worden. Zo niet, is het verboden de nulgeleider van de elektriciteitsproductie-eenheid te aarden.

Opmerking: Indien een elektriciteitsproductie-eenheid zonder mogelijkheid tot galvanische scheiding in lokaal eilandbedrijf werkt en dus niet parallel werkt met het distributienet, is het mogelijk dat lokaal wel een aardverbinding gemaakt wordt. Deze aarding moet dan ook vóór een parallelname met het distributienet verbroken worden. Echter dient deze situatie vergrendeld te zijn tijdens parallelwerking met het distributienet.

³ De situatie N stelt de situatie van het openbaar distributienet voor zonder defecte elementen, de situatie N-1 stelt de situatie van het net voor met een (1) defect element.

Een parallelname mag enkel gebeuren als de spanning en de frequentie op het distributienet zich binnen de marges bevinden. Bovendien geldt als algemene regel dat een parallelkoppeling geen plotse spanningsvariaties groter dan 4% mag veroorzaken. Automatische koppeling of herkoppeling is toegestaan indien aan onderstaande voorwaarden wordt voldaan (Tabel 17: Voorwaarden automatische herkoppeling).

Tabel 17: Voorwaarden automatische herkoppeling

Parameter	Herkoppeling na werking netontkoppelrelais	Start van normale werking
Onderfrequentie	49,9 Hz	49,9 Hz
Bovenfrequentie	50,1 Hz	50,1 Hz
Onderspanning	90 % U_n	85 % U_n
Overspanning	110 % U_n	110 % U_n
Observatietijd	60 s	60 s
Maximale gradiënt van toename van actief vermogen	10%/min*	20%/min

3. Bespreking van de NPR 9090

Het Nederlands normalisatie-instituut (NEN) is momenteel bezig met het reviseren en goedkeuren van een nieuwe Nederlands praktische richtlijn die richtlijnen en voorschriften voor “*DC installaties voor laagspanning*” – NPR 9090 [5]. De richtlijn bevat uitleg over het beveiligen van gelijkspanningsinstallaties. Naast het beveiligen bespreekt de NPR ook het ontwerpen van een DC-installatie. Technische aspecten opgenomen in de praktische richtlijn worden ingebracht bij de IEC “*Low Voltage Direct Current (LVDC) & Low Voltage Direct Current for Electricity Access*”.

De NPR is van toepassing op het ontwerp en de installatie van DC-installaties voor laagspanning (LVDC, tot 1500 V_{DC}) die behoren tot het onderwerp en toepassingsgebied van NEN 1010. Ook gecombineerde AC- en DC-installaties behoren tot het toepassingsgebied van deze NPR, mits er een galvanische scheiding is aangebracht tussen de AC- en DC-delen van de installatie.

Daarnaast is de NPR een toelichting op NEN 1010:2015 betreffende een aantal aspecten die een bijzondere rol spelen bij DC-installaties en behoort te worden gebruikt naast de NEN 1010. Volgende aspecten zijn bepalend voor het ontwerp van DC-installaties:

- de mate van autonomie van de componenten en toestellen (di/dt beperken);
- het beschikbare kortsluitvermogen;
- de polariteit.

3.1. Terminologie

3.1.1. Onderscheid tussen actieve en passieve DC-installaties

Actieve DC-installaties beschikken over een installatiebeheersysteem (aansturing en controle van de componenten) en zijn ook gekenmerkt door een netcode voor het gedrag van autonome of via communicatie met elkaar verbonden componenten. Installatiebeheersysteem vervullen functies als:

- congestiemanagement (vraag en aanbod op elkaar afstemmen);
- communicatie naar de netbeheerder (statusmonitoring en/of netwerkconfiguratie);
- bewaken en regelen van energieneutrale (mini-)grids;
- (beveiligings)functies van passieve componenten.

De aansturing laat toe stroomveranderingen (di/dt) in de DC-stroomketens te beperken en dus overspanningen te voorkomen.

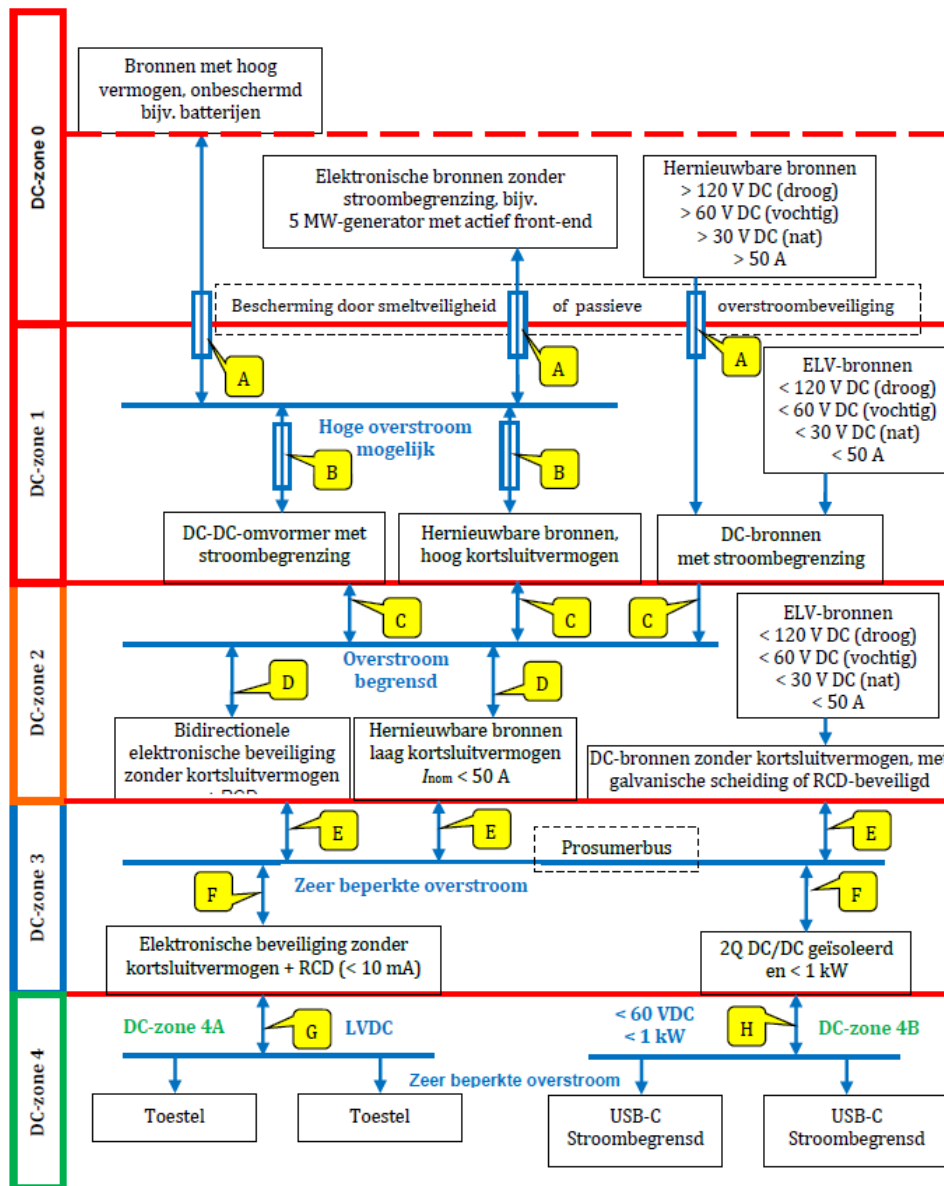
Passieve DC-installaties kenmerken zich door de aanwezigheid van autonoom werkende componenten en toestellen. Geheel afhankelijk van de eigen intrinsieke functie van de desbetreffende component of toestel, deze reageert i.f.v. de aangelegde spanning en/of stroom. Schakelgedrag van dergelijke installaties kan leiden tot forse stroomveranderingen (di/dt).

3.1.2. AC-koppelingen

Afhankelijk van de aard van de installatie kunnen in de DC-installatie koppelingen met AC-installaties voorkomen. Dit zowel voor vermogensoverdracht vanuit de AC-installatie naar de DC-installatie als andersom.

3.2. Risicoclassificatie van systemen

Door middel van Figuur 189 wordt een overzicht weergegeven van de verschillende risico-zones. Zo wordt een classificatie gemaakt binnen een DC-installatie (NPR 9090:2017).



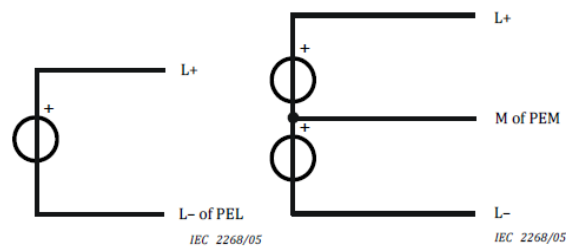
Figuur 189: Zone-indeling binnen een DC-installatie afhankelijk van het aanwezige risico

3.3. Wijze van aarding van het stelsel

3.3.1. DC-stelsels

Bij het ontwerp van de aarding van een DC-installatie behoort bijzondere aandacht te worden geschonken aan mogelijke corrosie van de betrokken materialen. DC-lekstromen in betonnen constructies kunnen elektrochemische reacties veroorzaken die destructief zijn voor de desbetreffende constructie. Het toepassen van anti-parallelgeschakelde diodes in serie met de aardleiding kan dergelijke problemen voorkomen.

In de volgende paragrafen worden mogelijke DC-installaties en hun aarding behandeld. De norm onderscheidt de uitvoering met twee of drie stroomvoerende geleiders, of anders gezegd een tweepolige of driepolige installatie:



Figuur 190: Onderscheid twee- of drie geleider systemen

Opmerking: PEL- en PEM-leidingen zijn geen actieve geleiders hoewel zij een belastingsstroom voeren. Vandaar de typering met twee geleiders of met drie geleiders van toepassing is.

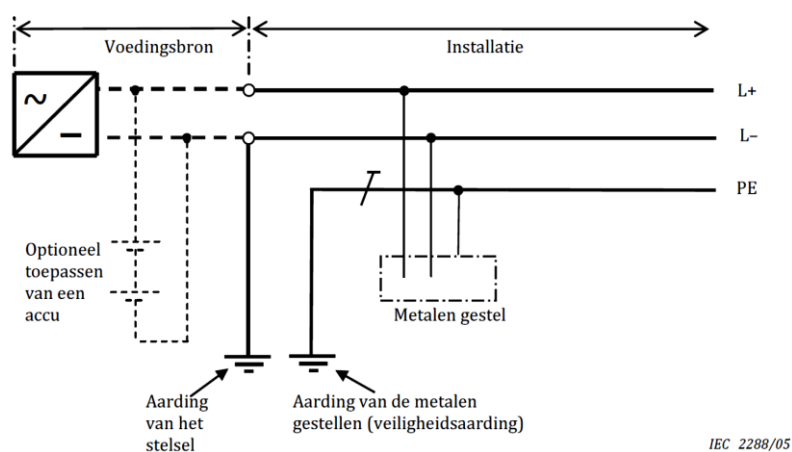
3.3.2. Netstelsels

Hieronder worden de verschillende netstelsels voor DC-toepassingen aangekaart, dit document hanteert enkel de tweepolige tenzij de richtlijn eveneens de driepolige installaties bespreekt:

Tabel 18: Symbolen IEC 60617-11

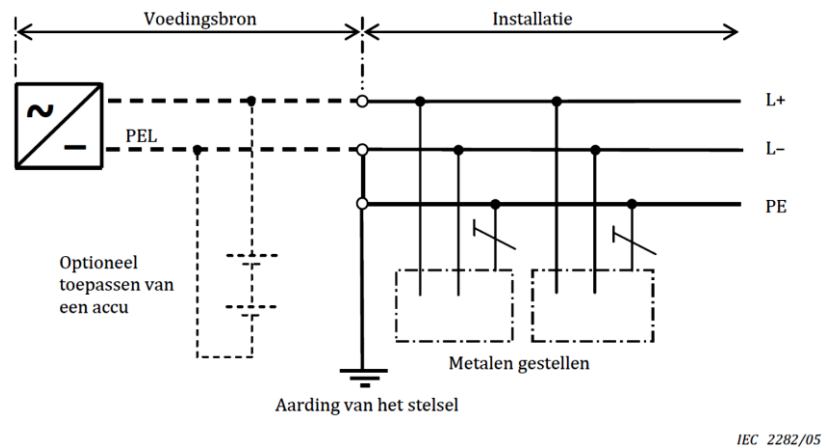
Symbolen volgens IEC 60617-11	
	Neutrale geleider (N)
	Beschermingsgeleider (PE)
	Gecombineerde beschermings- en neutrale geleider (PEN)

1. TT-netstelsel



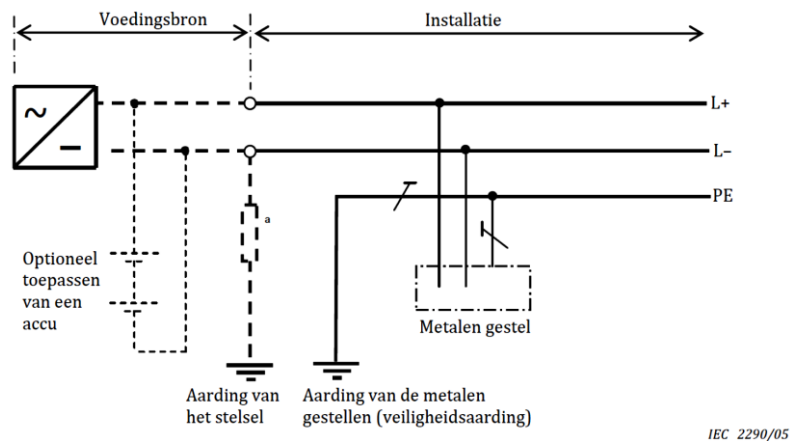
Figuur 191: Eenpolig TT-DC stelsel

2. TN-netstelsel



Figuur 192: Eenpolig TN-S-DC stelsel

3. IT-netstelsel



Figuur 193: Eenpolig IT-DC stelsel

3.4. Voedingsbronnen

3.4.1. Nominale spanning

Voor gelijkspanning zijn geen standaard DC-spanningsniveaus gedefinieerd:

- extra lage spanning (ELV): van $0V_{DC}$ tot en met $120V_{DC}$;
- lage spanning (LV): van $120V_{DC}$ tot en met $1500V_{DC}$.

De keuze voor de nominale spanning heeft een invloed op de lengte van de kabels en de te nemen beschermingsmaatregelen tegen elektrische schokken.

NPR 9090 stelt een een nominale spanning van $350V_{DC}$ ten opzichte van aarde voor (of $+350V_{DC}$ en $-350V_{DC}$ met gearde middengeleider), met als voornaamste argumenten:

- $350V_{DC}$ t.o.v. aarde biedt vergelijkbare bescherming aan als bij $230V_{AC}$ -systemen;
- $350V_{DC}$ en $700V_{DC}$ bieden een vergelijkbaar systeem als $230V_{AC}$ (1F) en $400V_{AC}$ (3F);
- bestaande bekabeling voor $400V_{AC}$ (3F) staat toe hetzelfde vermogen over te dragen.

Tabel 19: Vergelijking DC- en AC-systeemspanningen

U_{nom} DC	U_{nom} AC	Pmax bij 16 Arms
350V _{DC}	230 V _{AC} 1f	5,6 kW (DC) / 3,7 kW (AC)
700 V _{DC} of +/-350 V _{DC}	400 V _{AC} 3f	11,2 kW (DC) / 11,1 kW (AC)
+/-700 V _{DC}	690 V _{AC} 3f	22,4 kW (DC) / 19,1 kW (AC)

3.4.2. Spanningstoleranties

Indien de spanningsvariaties niet kunnen worden berekend of indien accugegevens ontbreken, moet worden uitgegaan van de volgende toleranties:

- maximale spanning: $1,2 * U_{nom}$;
- minimale spanning: $0,8 * U_{nom}$;

In actieve DC-installaties waar optredende spanningen en stromen worden bewaakt, behoren afspraken te worden gemaakt over de maximaal toelaatbare spanningsvariaties.

3.5. Beschermingsmaatregelen

3.5.1. Bescherming tegen elektrische schokken

In analogie met een AC-installatie behoort ook een DC-installatie bescherming te bieden tegen elektrische schok. Dit betreft zowel basisbescherming als foutbescherming (respectievelijk bescherming tegen directe en indirecte aanraking). Stroomdoorgang door het menselijk lichaam veroorzaakt bij DC-stromen deels andere reacties dan bij AC-stromen, hierdoor verschillen de waarden zoals Tabel 20 het aantoont:

Tabel 20: Maximale afschakeltijden <tabel 41.1 van NEN 1010:2015>

Stelsel	$50 \text{ V} < U_0 \leq 120 \text{ V}$ s		$120 \text{ V} < U_0 \leq 230 \text{ V}$ s		$230 \text{ V} < U_0 \leq 400 \text{ V}$ s		$U_0 > 400 \text{ V}$ s	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
TN	0,8	a	0,4	5	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3	a	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

Algemeen gesteld, kan het menselijk lichaam een langere blootstelling aan hogere stroomwaarden verdragen bij DC bij AC. Langdurig contact met lage spanning kan vanwege bloedvergiftiging ook een gevaar vormen!

De maximale aanraakspanning die als veilig mag worden beschouwd bij DC-installaties is vergelijkbaar met wat het AREI beschrijft in Art. 31:

Tabel 21: Maximale aanraakspanning

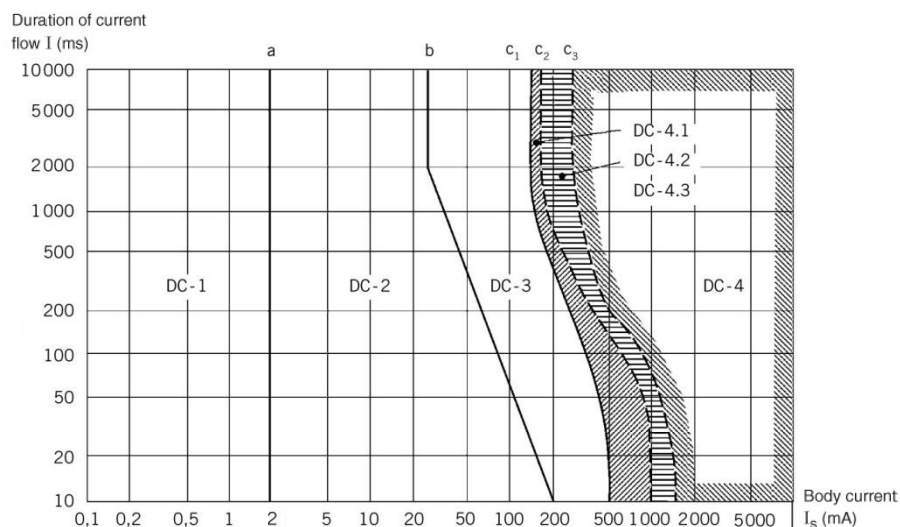
Code	AC	DC	
		Met rimpel	Zonder rimpel
BB1	50	75	120
BB2	25	36	60
BB3	12	18	30

Bij het optreden van een fout behoort de aanraakspanning op het desbetreffende punt in de installatie binnen de gestelde tijd onder de grenswaarde te worden gebracht. Dit kan door het afschakelen van de desbetreffende stroomketen. Hierbij worden geen eisen gesteld aan galvanische scheiding, zodat het afschakelen met elektronische componenten kan worden uitgevoerd.

Daarnaast beschrijft de norm *IEC 603641-1* de maximale tijd waaraan het menselijk lichaam aan een DC-stroom mag blootgesteld worden (zie figuur Figuur 194). Ieder zone heeft haar eigen betekenis:

- **AC-1:** Geen merkbare effecten, ongeacht de duur van de stroomdoorgang. Curve A geeft de gewaarwordingsdrempel aan en is afhankelijk van o.a. de oppervlakte van de huid in contact met een elektrode, de toestand van het contact.
- **AC-2:** Gewaarwording van de stroomdoorgang maar geen gevaarlijke effecten. Curve B vormt de bovengrens van de zone en staat ook gekend als de veiligheidscurve.
- **AC-3:** De zone gaat gepaard met spiersamentrekkingen, ademhalingsproblemen en een omkeerbare verstoring van de hartfunctie.
- **AC-4:** In dit gebied is er kans op onomkeerbare effecten zoals hartfibrillatie, hartstilstand, ademhalingsmoeilijkheden en brandwonden.

Curve C1 markeert de grens tussen zone AC-3 en 0% waarschijnlijkheid op hartfibrillatie. De C2- en C3-curve duiden op respectievelijk 5% en 50% waarschijnlijkheid op hartfibrillatie.

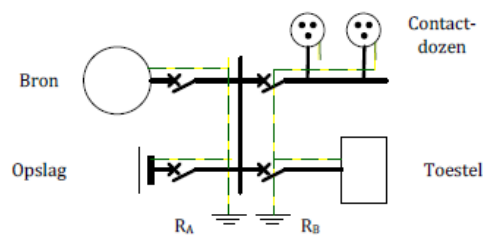


Figuur 194: Stroominvloedsfactoren volgens IEC 603641-1

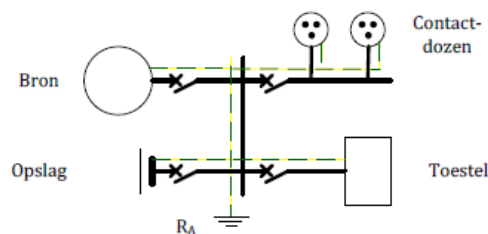
Na het scheiden van een stroomketen wordt aanbevolen deze stroomketen kort te sluiten – enkel geldig indien er geen voedingsbron in de keten aanwezig is! – en te verbinden met de veiligheidsaarde, om mogelijke effecten van parallel aangesloten voedingsbronnen te voorkomen. Bij stroomketens met één of meerdere voedingsbronnen aanwezig, is het beter eerst de bronnen te scheiden van de stroomketen alvorens de stroomketen kort te sluiten. Voedingsbronnen zelf mogen niet worden kortgesloten.

3.5.2. Bescherming afhankelijk van het type netstelsel

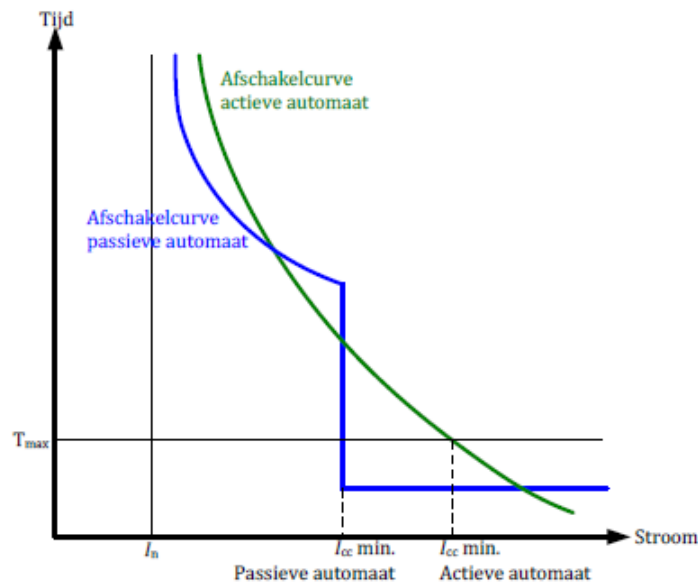
In TT-stelsels beperkt de weerstand naar aarde (R_A en R_B) de foutstroom tot een lage waarde. Vandaar beveiligingen tegen korsluiting niet tegen elektrische schokken worden toegepast. Een overstroombeveiliging overschrijdt de tijdslimiet waardoor het ook niet beschermt tegen elektrische schokken. Hierdoor dienen aardlekstroombeveiligingen (RCD) te worden toegepast. Hieruit volgt dat DC-installaties voor woningen niet als TT-stelsel mogen uitgevoerd worden, ongeacht de werkingsmodus (volgens de NPR 9090).



Bij een TN-stelsel is de foutstroom vergelijkbaar met de kortsluitstroom tussen beide polen. Normaal gesproken beveiligen kortsluitbeveiligingen tegen elektrische schokken, maar indien de bron alleen uit een PV-installatie bestaat, is de kortsluitstroom niet groot genoeg om de kortsluitbeveiliging binnen de tijdslimiet te laten aanspreken.



Waar vast opgestelde secundaire accu's permanent zijn gekoppeld met de elektrische installatie, wordt de kortsluitstroom ook door deze accu's gevoed, hierdoor neemt de waarde van de kortsluitstroom toe. In dat geval is het mogelijk de kortsluitbeveiligingen toe te passen als bescherming tegen elektrische schok. Figuur 195 toont dit aan, in dat geval zal de minimale kortsluitstroom altijd groter blijven dan de geschatte minimale kortsluitstroom voor installatieautomaten of smeltveiligheden.



Figuur 195: Schatting van de kortsluitstroom in een TN-stelsel

Bij TN-C en TN-C-S netstelsel zijn de functies van geaarde leiding in de gehele installatie gecombineerd in een enkele PEL-leiding of geaarde middenleiding (M) en beschermingsleidingen in één enkele PEM-leiding. Raakt de PEM- of PEL-leiding los of vertoont deze een breuk, dan komen geleidende metalen delen onder lijnspanning te staan. Daarom mogen DC-installaties voor woningen niet worden uitgevoerd als TN-C-stelsel, ongeacht de werkingsmodus of het type. Daartegenover is de PE gescheiden van de pool bij TN-S, waardoor dit de enigste toegestane manier is om huishoudelijk toe te passen (volgens NPR 9090).

De verhoogde bedrijfscontinuïteit verantwoordt vaak de keuze van een IT-netstelsel. IT-netten worden als aanraakveilig beschouwd, dit is zeker niet het geval bij DC-installaties, waar een condensatorfunctie ontstaat door aanwezige kabels maar ook door condensatoren. Ook kunnen ladingen ontstaan door atmosferische oorzaken. Capacitieve koppelingen naar aarde zorgen ervoor dat IT-stelsels niet de voorkeur krijgen in DC-installaties.

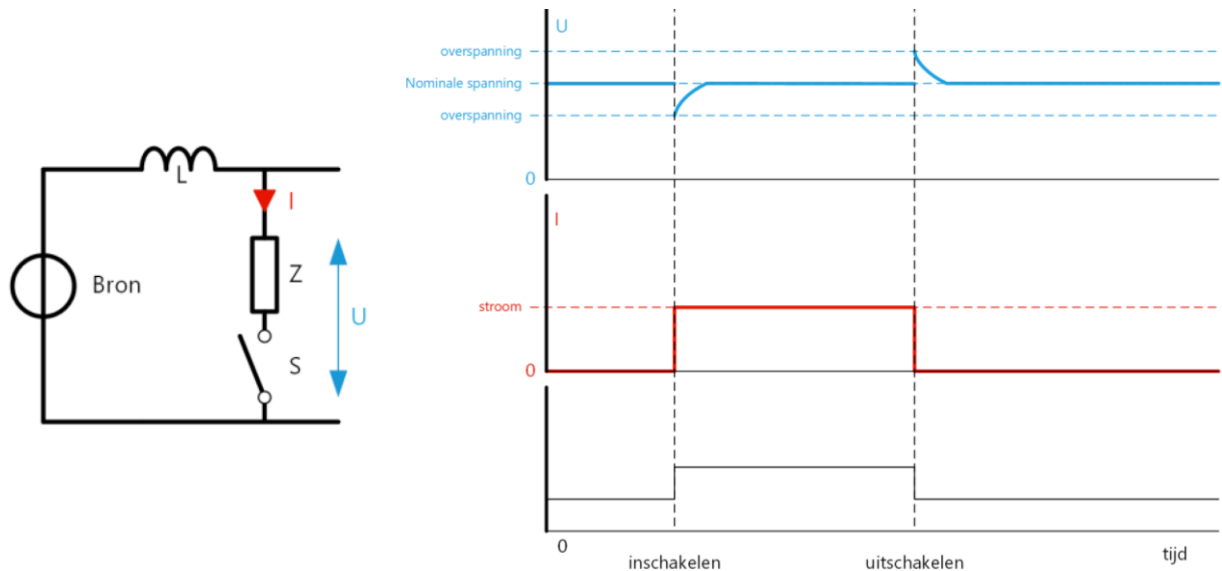
Op basis van de risicoclassificatie en de daarbij behorende zone-indeling verdienen in zone 1 t/m 3 en 4A geaarde systemen (TN-S) de voorkeur (figuur Figuur 189).

3.5.3. Beveiliging tegen overstroom en overspanning

De beveiliging tegen overstroom van DC-installaties is gebaseerd op dezelfde eisen als voor AC-installaties. Elk leidingsysteem (met meeraderige kabels of met enkele, geïsoleerde geleiders) moet zijn voorzien van een overstroombeveiliging die geschikt is voor DC (vermogensschakelaar, installatie-automaat of smeltveiligheid). Overstroombeveiligingen – die bedoeld zijn om geleiders te beschermen – moeten zo dicht mogelijk bij de voedingsbron(nen) geïnstalleerd zijn.

Oorzaken van overspanningen bij AC-installaties gelden ook voor DC-installaties, evenals de te treffen maatregelen. Door snelle stroomveranderingen (di/dt) genereren DC-installaties meer overspanningen en zijn ze er ook gevoeliger voor door de toegepaste elektronica. Bij het ontwerpen is

het ook van belang de zelfinductie L in rekening te brengen – namelijk omdat deze bij een stroomverandering di/dt in een spanning ($dU = -L * di/dt$) opwekt. Deze wordt gesuperponeerd op de aangelegde spanning en kan leiden tot een overspanning of onderspanning.

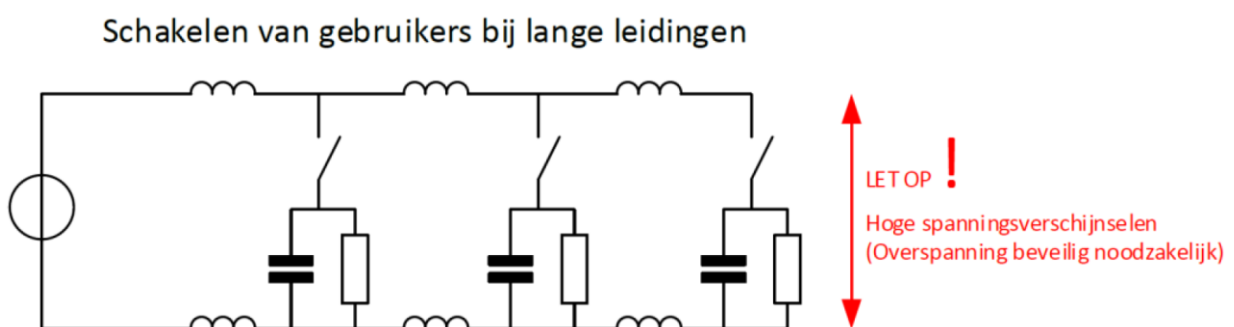


Figuur 196: Overspanningen ten gevolge van snelle stroomveranderingen

Waar nodig kunnen overspanningen worden beperkt door:

- snelheid van stroomveranderingen di/dt , zowel bij in- als afschakelen beperken;
- beperken van kabellengtes of van de zelfinductie van bedrading en kabels;
- toepassen van overspanningsbeveiligingstoestellen (geschikt voor DC).

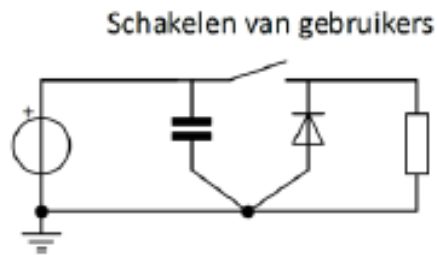
In omvangrijke DC-installaties met lange leidingen (= grote zelfinducties) kan het schakelen van toestellen leiden tot overspanningen die schade kunnen toebrengen aan andere toestellen in de stroomketen, zie figuur Figuur 197.



Figuur 197: Lange leidingen en overspanningten gevolge van schakelhandelingen

Geschikte overspanningsbeveiligingen zoals “transorbs” dienen toegepast te worden op elektronische componenten. AC-toestellen zoals vonkbruggen, bieden niet de benodigde mate van bescherming.

Ook dienen blusdiodes over (inductieve) belastingen te worden toegepast om het ontstaan van overspanningen in de DC-installatie te voorkomen.



Figuur 198: Toepassen van een blusdiode

3.5.4. Bescherming tegen corrosie

1. Algemeen

Lekstroomcorrosie is te vergelijken met galvanische corrosie (waarbij de stroom intern wordt gegenereerd), de tegenmaatregelen zijn echter verschillend. Twee belangrijke oorzaken van corrosie:

- DC-retourstromen door aarde of DC-lekstromen,
- galvanische stromen.

Lekstroomcorrosie treedt op waar de lekstromen het metaal verlaten naar een elektrolyt of vochtige aarde. DC-lekstromen kunnen wel 100 keer zoveel schade aanrichten als AC-lekstromen van dezelfde grootte, daar ionen of atomen altijd dezelfde richting volgen.

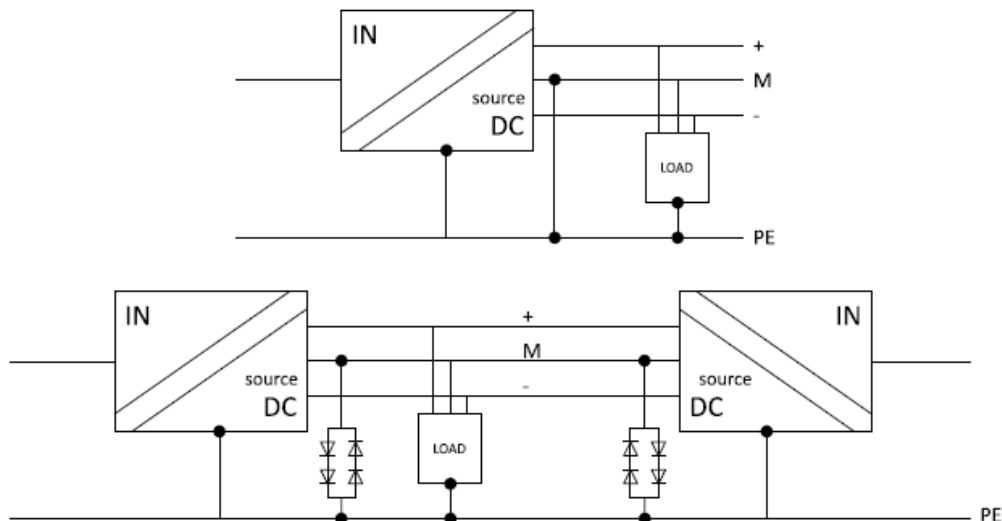
Wanneer twee verschillende metalen via elektrolyt elektrisch met elkaar in contact komen, ontstaat galvanische corrosie. Metalen hebben t.o.v. het elektrolyt een verschillend elektrochemisch potentiaal (corrosiepotentiaal). Bij de combinatie van twee metalen gaat het onedele metaal in oplossing en wordt het edele metaal beschermd. Hoe meer de potentialen van de metalen verschillen, hoe sneller het proces verloopt.

2. Minimaliseren van corrosie

Een oplossing om metaalcorrosie te verminderen is het bekleden van metalen met materialen die corrosie tegengaan. Andere mogelijkheid is kathodische bescherming, hierbij wordt het spanningsverschil verkleind zodanig de corrosiestroom verwaarloosbaar wordt. De aangelegde spanning zorgt ervoor dat elektronen dicht bij de anode geïnjecteerd worden, zodanig de anode de elektronen zelf niet moet leveren.

3. Systemaarding

Aardvoorzieningen bij het ontwerp voorkomen de aanwezigheid van lekstromen en verschilstromen. Het aanbrengen van anti-parallel geschakelde diodes (bij het aarden) kan dit bewerkstelligen, deze diodes blokkeren de lekstromen zolang de aangelegde spanning onder de diodespanning blijft.



Figuur 199: Systeemaarding

Deze oplossing is alleen mogelijk in DC-zones 3 en 4 waar de bronnen stroombegrensd zijn. De componenten moeten geschikt zijn voor de maximale foutstroom.

3.6. Keuze van elektrisch materiaal en beveiligingsapparatuur

3.6.1. Het toepassen van AC-apparatuur in DC-installaties

Veel apparatuur is niet geschikt voor zowel wissel- als gelijkspanning. Echter bestaat er ook apparatuur die wél geschikt is voor beide spanningen. Installatieautomaten gemaakt voor AC-toepassingen, zijn – mits ze enige beperkingen vertonen – ook toepasbaar in DC-installaties.

1. Smeltpatronen

Smeltzekeringen kunnen zowel bij AC als DC overstroom onderbreken, hierbij speelt de spanning een belangrijke rol. In de meeste gevallen zal de DC-spanning lager moeten zijn dan de AC-spanning, daarnaast zal ook het kortsluit-onderbrekingsvermogen bij DC lager zijn.

2. Vermogenschakelaars

Niet alle vermogenschakelaars zijn geschikt om DC-stromen te onderbreken, raadpleeg steeds de specificaties van het toestel. In het algemeen werken elektromechanische automaten met bi-metaaltechniek hetzelfde voor zowel AC als DC ten aanzien van beveiliging tegen overbelasting. De magnetische afschakeling (B-, C- of D-curve) werkt door middel van een spoeltje en kan dus verschillen bij AC en DC. Dit kan voor een afwijking zorgen in de afschakelkarakteristiek.

Automaten zijn vaak stroomrichtinggevoelig. Let er daarom op wat de normale stroomrichting is, bij stroomrichting-gevoelige automaten staat aangegeven wat de voedende zijde ('Line') is, en wat de belastingszijde ('Load') is.

3. Aardlekbeveiligingen

Een aardlekbeveiliging is een apparaat bedoeld om foutstromen naar aarde voldoende snel af te schakelen en zo mens en dier te beschermen tegen onder andere aanraakspanning. Het type A schakelt AC-foutstromen, maar ook pulserende DC-foutstromen af. Type B schakelt AC-foutstromen,

pulserende DC-foutstromen en continue DC-foutstromen af, maar is niet ontwikkeld voor DC-installaties. Het type B is bedoeld voor toepassing in circuits waarin door het aangesloten apparaat DC-aardfoutstromen kunnen ontstaan. DC-aardfoutstromen kunnen ontstaan in bijvoorbeeld frequentieregelaars, PV-omvormers, gelijkrichters zonder galvanische scheiding en sommige medische apparatuur. Normen zijn in ontwikkeling voor aardlekbeveiligingen specifiek voor DC-installaties. Werkelijke DC-producten zijn nog vrijwel niet in de markt verkrijgbaar. Let daarom goed op of een aardlekbeveiliging geschikt is voor DC-installaties.

3.6.2. Beveiliging tegen corrosie door lekstromen

Om corrosie door lekstromen te beperken, kan het zinvol zijn de aanspreekwaarden van toestellen voor aardlekbeveiliging lager te kiezen dan de waarden die noodzakelijk zijn voor bescherming tegen elektrische schok.

3.6.3. Parallele voedingsbronnen

Binnen een DC-installatie is het niet nodig om voedingsbronnen af te schakelen bij het wegvallen van een van de voedingsbronnen. Wel behoort rekening te worden gehouden met in- en afschakeffecten binnen de DC-installatie, omdat met het bij- en afschakelen van voedingsbronnen de impedantie verandert.

4. Literatuurlijst

- [1] Synergrid, „C10/11 - Specifieke technische aansluitingsvoorschriften voor gedecentraliseerde productie-installaties die in parallel werken met het distributienet,“ revisie 2012.
- [2] Synergrid, „C10/11 LV-1 - Specifieke technische voorschriften voor elektriciteitsproductie-installaties die parallel werken met het hoog- of laagspanningsdistributienet met een maximaal vermogen $\leq 10\text{kVA}$,“ 2018 Draft versie NL v0.2.
- [3] Synergrid, „C10/11 LV-2 - Specifieke technische voorschriften voor elektriciteitsproductie-installaties die parallel werken met het laagspanningsdistributienet met een maximaal vermogen $> 10\text{kVA}$,“ 2018 Draft versie NL v0.2.
- [4] Synergrid, „C10/11 MV-1 - Specifieke technische voorschriften voor elektriciteitsproductie-installaties die parallel werken met het hoogspanningsdistributienet met een maximaal vermogen $< 25\text{MW}$,“ 2018 Draft versie NL v0.2.
- [5] „NPR 9090:2017 - DC-installaties voor laagspanning,“ Template versie 2017-1.