

“Impact van de integratie van Elektrische
Voertuigen op de **CA**paciteit, **B**eveiligingen
en in de **NET**kwaliteit van elektrische
installaties”

EV-CABINET

Ing. Urkens, Idries
Universiteit Gent
EELab/Lemcko
Idries.Urkens@UGent.be

Ing. Azaioud, Hakim
Universiteit Gent
EELab/Lemcko
Hakim.Azaioud@UGent.be

Ing. Vanhove, Toon
Universiteit Gent
EELab/Lemcko
Toon.vanhove@UGent.be

Prof. dr. ir. Desmet, Jan
Universiteit Gent
EELab/Lemcko
Janj.Desmet@UGent.be



Zowel Universiteit Gent als de begeleidingsgroep van het project bezitten de eigendomsrechten op dit document en kunnen er naar hun oordeel intellectuele eigendomsrechten op vestigen. Zij verbinden zich hierbij tot een strikte naleving van de Europese regelgeving op de staatssteun zodat elk van hen bij elke toekenning van gebruiksrechten op de projectresultaten naar bedrijven een vergoeding ontvangt die overeenstemt met de marktprijs voor de betrokken projectresultaten.

In elk geval hebben alle bedrijven in de EU op een gelijke en niet-discriminerende basis en tegen een marktconforme vergoeding toegang tot de economisch valoriseerbare inzichten van dit document. Deze kunnen wel hun reeds betaalde bijdrage evenwel in mindering brengen op de prijs voor de gebruikersrechten.

Dit rapport citeren:

T. Vanhove, I. Urkens, H. Azaioud and J. Desmet, “Impact van de integratie van Elektrische Voertuigen op de CAPaciteit, Beveiligingen en in de NETkwaliteit van elektrische installaties – EV-CABINET”, Universiteit Gent - EELab/Lemcko, Howest, Kortrijk, 2024.

©2024 Universiteit Gent - Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, micro film, elektronisch of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of the publication may be reproduced in any form by print, photoprint, micro film, electronic or any other means without written permission from the publisher

Voorwoord

Deze praktische gids is opgesteld binnen het TETRA-project **EV-CABINET**: *"Impact van de integratie van Elektrische Voertuigen op de CAPaciteit, Beveiligingen en NETkwaliteit van elektrische installaties"*. De roadmap biedt een overzicht en samenvatting van het project, met als doel de opgedane kennis op een toegankelijke manier over te dragen aan studiebureaus, installateurs en andere belanghebbenden.

Het project is ontstaan naar aanleiding van de snelle uitrol van laadinfrastructuur in Vlaanderen, gestimuleerd door veranderingen in het fiscale beleid rond bedrijfsvoertuigen. EV-CABINET richtte zich op het beantwoorden van uiteenlopende vragen over de integratie van laadinfrastructuur, met bijzondere aandacht voor de laadprofielen van grotere laadparken. Op basis van deze profielen werden inzichten ontwikkeld rond aansluitcapaciteit, zelfvoorziening en dynamische tarieven. Daarnaast werden ook de aspecten van power quality en de elektrische beveiliging van laadinfrastructuur grondig onderzocht. Een derde belangrijk aandachtspunt van het project was het bepalen van de optimale topologie voor laadparken. In deze cruciale overgangsfase naar elektrisch rijden is het essentieel om na te denken over de meest efficiënte manier om voertuigen op te laden: een AC- of DC-topologie.

Een van de belangrijkste resultaten van het project is een gratis simulatieomgeving. Deze tool stelt bedrijven en installateurs in staat om gepersonaliseerde berekeningen te maken voor hun eigen bedrijventerrein. Zo kunnen zij vóór investeringen al belangrijke vragen beantwoorden over hun elektrische installatie en de impact op hun elektriciteitsfactuur. Deze tool is [hier](#) beschikbaar.

Finaal willen we graag **Vlaio** bedanken voor de financiering die dit onderzoek en de verspreiding van kennis mogelijk heeft gemaakt. Daarnaast gaat onze oprechte dank uit naar de begeleidingsgroep, die met hun betrokkenheid en inspanningen een actieve rol hebben gespeeld in het succes van dit project.



Inhoudsopgave

Inhoud

1.	Verbruiksprofielen van laadinfrastructuur	10
	Inleiding	10
	Opbouw simulatiemodel	11
	Aanpak	11
	De laadpalen	11
	De vaste voertuigen	12
	De onvoorspelbare voertuigen	13
	Restprofiel	14
	Piekgedrag van een (dom) laadpark	14
	Optredende jaarpiek	14
	Conclusies	21
2.	Slim laden	22
	Casestudie:	26
	Resultaten slim sturen	27
	Conclusies	31
3.	Impact van de laadinfrastructuur op de netkwaliteit	32
	Introductie	32
	Technologie	32
	Laadmodi	32
	Stekkertypes	32
	Power Quality	34
	Inleiding	34
	Definitie	34
	Wetgevend kader	35
	Harmonische	36
	Definitie	36
	Classificatie van harmonischen	37
	Harmonische emissie	38
	Casestudie: EV-parking Wilgenveld (Colruyt)	41
	Inleiding	41
	Analyse van de laadbeurtsessies	41
	Analyse van de On-site metingen	43

4. Bedrijfszekere werking van beveiligingen	48
Inleiding	48
Differentieelschakelaars	49
Gevoeligheid van de differentieelschakelaar	49
Werking van de differentieelschakelaar	49
Invloed van elektrische voertuigen op differentieelschakelaars	50
Problematiek bij frequenties boven de fundamentele	51
Problematiek bij supraharmonische	52
Types differentieelschakelaars	53
Opbouw van een differentieelschakelaar type B	54
Beveiligen van EV-laadpunten	55
Demonstrator: Differentieeltestbank	56
Inleiding	56
Literatuurstudie	56
Onderzoekopstelling	58
Resultaten	59
5. Uitbating van laadinfrastructuur op een DC-bus	61
Historiek van DC	61
Voordelen van DC	61
Topologie	63
Uitbatingsspanning	64
Belangrijke factoren	65
Veiligheid	65
Efficiëntie	66
Standaardisatie	68
Beveiliging	69
Pilotprojecten	70
EV laden op AC en DC	72
Literatuurstudie	72
Methodologie	78
Resultaten voor opportunistisch laden	83
Resultaten voor gecoördineerd laden	86
Discussie van de resultaten	89
Conclusies	90
Evolutie naar DC	90
Bestaande studies	90

Vergelijkende studie: EV laden op AC en DC.....	90
Referenties	92

Lijst van figuren

Figuur 1: (illustratief) de belangrijkste verdeling van de belangrijkste gedragsparameters van een wederkerend voertuig.....	12
Figuur 2: (illustratief) werkelijke laaddata op laadpaalniveau	14
Figuur 3: (illustratief) 1 week in 4 verschillende gesimuleerde laadparken, bestaande uit telkens een ander aantal laadpalen.	15
Figuur 4: (Links) optredende jaarpiek i.f.v. het aantal laadpalen in een gesimuleerd laadpark en (rechts) de optredende jaarpiek gedeeld door het aantal laadpalen.....	16
Figuur 5: (Links) optredende jaarpiek i.f.v. het aantal laadpalen in een gesimuleerd laadpark en (rechts) de optredende jaarpiek gedeeld door het aantal laadpalen.....	16
Figuur 6: de Invloed van 3 verschillende parameters op de optredende jaarpiek gedeeld door het aantal laadpalen.	17
Figuur 7: Gemiddeld weekprofiel van een bedrijf dat onderzocht werd binnen dit project.	17
Figuur 8: Invloed van de gemiddelde rijafstand in het weekend.....	18
Figuur 9: Jaarpiek i.f.v. gemiddelde laadbeurt en aantal laadpalen. Punten op een rode stippellijn zijn punten met dezelfde totale jaarvraag (in kWh).	19
Figuur 10: Invloed van de grootte van een pv-installatie op de optredende jaarpiek voor het voorbeeld laadpark.	19
Figuur 11: Voorbeeld van de spreiding op de jaarpiek voor 100 simulaties voor hetzelfde laadpark. Met de rode stippellijn wordt de optimale instelwaarde van het toegangsvermogen weergegeven.	20
Figuur 12: De drie basisstrategieën: (links) zelfconsumptie, (midden) piekbeperving en (rechts) dynamische tarieven	22
Figuur 13: Voorbeeld slim laadprofiel dat waar wordt ingezet op de combinatie van zelfconsumptie en piekbeperving.....	23
Figuur 14: Voorbeeld slim laadprofiel dat waar wordt ingezet op de combinatie van dynamische tarieven en zelfconsumptie.....	24
Figuur 15: Voorbeeld slim laadprofiel dat waar wordt ingezet op de combinatie van piekbeperving en dynamische tarieven.....	25
Figuur 16: Voorbeeld slim laadprofiel dat waar wordt ingezet op een combinatie van de drie strategieën.....	25
Figuur 17: Afname- en injectieprofiel transformator 2 Snowball site.	26
Figuur 18: Verdeling vermogens laadsessies voor zowel (links) de AC laadpalen als (rechts) de DC laadpalen.....	27
Figuur 19: (links) verloop aansluitgedrag gemiddelde weekdag en (rechts) verdeling connectietijd, laadtijd en flexibiliteit van de laadsessies.	27
Figuur 20: resultaat slim laden op basis van zelfconsumptie en piekbeperving, zowel het jaarprofiel (links) als het gemiddelde dagprofiel (rechts) worden weergegeven.	28
Figuur 21: resultaat slim laden op basis van zelfconsumptie en dynamische tarieven, zowel het jaarprofiel (links) als het gemiddelde dagprofiel (rechts) worden weergegeven.	30
Figuur 22: resultaat slim laden op basis van alle drie de strategieën, zowel het jaarprofiel (links) als het gemiddelde dagprofiel (rechts) worden weergegeven.....	31
Figuur 23: Overzicht laadmodi en stekkertypes.....	33
Figuur 24: Comptabiliteit tussen verschillende toestellen	35
Figuur 25: Onderverdeling van harmonische volgens frequentie	37
Figuur 26 Harmonische distorsie door line-commutated omvormer en active-front-end	38

Figuur 27: Spanningsvervorming door niet-lineaire belasting.....	39
Figuur 28: Frequency beating bij twee naburige omvormers en intermodulatie.....	40
Figuur 29: Bezetting van laadpark Wilgenveld gedurende 2022.....	41
Figuur 30: Aankomst-en vertrekverdeling met daarbijhorende connectietijd.....	41
Figuur 31: Dagelijkse benutting van de laadpalen.....	42
Figuur 32: Belastingsgraad van de transformator.....	42
Figuur 33: Geleverde stroom door transformator.....	43
Figuur 34: Connectietijd van EV's en opgenomen energie.....	43
Figuur 35: Stroomharmonische aan de secundaire van de transformator.....	44
Figuur 36: Spanningsharmonischen aan de secundaire van de transformator.....	45
Figuur 37: Correlatie tussen harmonische stroom en fundamentele stroom bij de transformator.....	45
Figuur 38: Stroom en spanningsonbalans aan de secundaire van de transformator.....	46
Figuur 39: Boxplot van de stromen door de secundaire van de transformator en de spanningsonbalans.....	46
Figuur 40: Harmonische emissie tijdens AC- en DC-laden.....	47
Figuur 41: Correlatie tussen harmonische stroom en fundamentele stroom bij AC-laden.....	47
Figuur 42: Correlatie tussen harmonische stroom en fundamentele stroom bij DC-laden.....	48
Figuur 43: Correlatie tussen harmonische stroom en fundamentele stroom bij de DC-laden....	48
Figuur 44: Opbouw van een differentieelschakelaar (Czapp et al. 2021).....	50
Figuur 45: B-H Curve bij verzadiging.....	51
Figuur 46: Schematische weergave van een EMC-filter met een differentieelschakelaar.....	52
Figuur 47: Tijd-stroomkarakteristiek volgens IEC 61008.....	53
Figuur 48: Signaal op de secundaire wikkeling van de tweede kern met en zonder lekstroom....	54
Figuur 49: Opbouw van een differentieel type B.....	55
Figuur 50: Schematische opbouw van een laadpaal inclusief beveiligingen.....	55
Figuur 51: Plaatsen van een laadpaal in een bestaand net (VOLTA).....	55
Figuur 52: Schematische weergave van opstellingen in de literatuur.....	57
Figuur 53: Onderzoekopstelling.....	58
Figuur 54: Opmeten van maximale lekstroom alvorens de differentieelschakelaar tript.....	59
Figuur 55: Maximale lekstroom in functie van merk van automaat en frequentie van lekstroom	60
Figuur 56 Weergave van (a) een unipolaire DC-backbone en (b) een bipolaire DC-backbone met zowel PV, BESS als EV.....	63
Figuur 57 Onderscheid tussen distributiedomein en installatiedomein zoals gedefinieerd door de IEC DC-werkgroep.....	69
Figuur 58 Een 2-level VSC waarbij de 3 fasen worden weergegeven bij een kortsluiting aan de DC-zijde.....	70
Figuur 59 Foutstroom bij een two-level VSC converter met verschillende foutweerstand.....	70
Figuur 60 3D-weergave van het RE/SOURCED-project.....	71
Figuur 61 SSI voor verschillende laadstrategieën toegepast op individuele huishoudens en geaggregeerde resultaten.....	74
Figuur 62 Absoluut efficiëntieverschil tussen EV-laden op AC en DC met variërend aantal EV's en PV-capaciteit.....	76
Figuur 63 Spanningsonbalans in functie van de kabelverliezen bij verschillende EV-penetraties zonder PV en met variërende EV-penetratie: (a) 0% EV-penetratie; (b) 50% EV-penetratie; (c) 100% EV-penetratie.....	77

Figuur 64 Waarschijnlijkheidsfuncties en dynamische laadcurves, met: (a) verdeling van aankomsttijden op weekdays en weekends; (b) SoC bij aankomst. De rechterplots tonen een willekeurige dag met: (c) laadspanning en stroom en (d) de bijbehorende SoC-curve.	79
Figuur 65 Overzicht van de netarchitecturen geanalyseerd in deze studie met EV's, PV en BESS: (a) LVAC-netarchitectuur en (b) LVDC-netarchitectuur.	81
Figuur 66 Correlatie tussen RELD en zelfvoorziening in functie van de ogenblikkelijke PV-productie (boven) en het aantal EV-laders (onder), met 11kW-laders rechts en 22kW-laders links.	83
Figuur 67 RELD-resultaten voor 11kW (links) en 22kW (rechts) EV-laders, getoond voor drie verschillende PV-groottes met bijbehorende interkwartielbereiken (q25-q75).	84
Figuur 68 RELD-resultaten voor 11kW (links) en 22kW (rechts) EV-laders, gepresenteerd voor drie verschillende BESS-groottes met variërende PV grootte en aantal EV-laders	85
Figuur 69 Geaggregeerde EV-profielen voor opportunistisch en gecoördineerd laden in combinatie met PV-productie. Scenario: 20 EV-laders van elk 11 kW en een geïnstalleerde PV-capaciteit van 41 kW.	86
Figuur 70 EV-zelfvoorziening voor variërend n_{ev} en PV-groottes, vergelijking van opportunistisch en gecoördineerd laden in LVAC- en LVDC-architecturen met 11kW-laders.	86
Figuur 71 EV-zelfvoorziening voor variërend n_{ev} en PV-groottes, vergelijking van opportunistisch en gecoördineerd laden in LVAC- en LVDC-architecturen met 22kW-laders.	87
Figuur 72 Energieverliezen voor LVDC- en LVAC-architecturen: eerste rij toont opportunistisch laden, tweede rij gecoördineerd laden met 11kW EV-laders, en derde rij de RELD, met in alle situaties een variërende n_{ev} en PV-grootte.	88

Lijst van Tabellen

Tabel 1: Overzicht van types differentieelschakelaars	54
Tabel 2: Lekstromen waarvoor de differentieelschakelaar al of niet moet ingrijpen.	57
Tabel 3 Voor- en nadelen van unipolaire en bipolaire LVDC-netten.	64
Tabel 4 Voorlopig aanbevolen spanningen door de IEC DC-werkgroep.	68
Tabel 5 Overzicht van DC-pilootprojecten.	70
Tabel 6 Overzicht van beperkingen in studies over de integratie van EV's in LVDC-netten.	77
Tabel 7 Overzicht van de simulatiewaarden voor een AC- en DC architectuur met EV, PV en BESS.	82

1. Verbruiksprofielen van laadinfrastructuur

Inleiding

De basis van dit volledige project is een grondige kennis van het optredende verbruiksprofiel (15 minuten basis) van laadparken. Het is namelijk van hieruit dat cruciale parameters zoals de verbruikspieken, zelfconsumptie, gelijktijdigheid met het aanwezige verbruik,... kunnen worden bepaald. Dit is geen eenvoudige opgave, deze profielen zijn immers afhankelijk van een groot aantal variabelen, zoals:

- het aantal laadpalen;
- het laadvermogen van de laadpalen;
- het type voertuigen dat gebruik maakt van de laadinfrastructuur;
- het type bedrijf;
- en misschien het belangrijkste: het laadgedrag van de gebruikers van de infrastructuur.

Door deze grote hoeveelheid parameters, heeft het maar beperkt zin om verbruiksprofielen van laadinfrastructuur te verzamelen en te analyseren. De bevindingen zouden immers maar gedeeltelijk van toepassing zijn op andere laadparken.

Er is met andere woorden nood aan het ontwikkelen van een model voor het **simuleren van laadparken**. Op deze manier kunnen alle soorten laadparken, op het volledige spectrum van theoretische mogelijkheden, worden gesimuleerd en geanalyseerd. De data van bestaande laadparken krijgt op deze manier wel een andere functie: het valideren van de ontwikkelde modellen.

Dit hoofdstuk dient voornamelijk om aan te tonen hoe dit model werkt, en welke assumpties erin worden gemaakt. Een belangrijke output van het project is immers een krachtige softwaretool die dit model ter beschikking stelt aan het brede publiek zodat ze zélf deze berekeningen kunnen maken, om zo ook voor hun eigen unieke situatie ook antwoorden te kunnen bekomen. In dit hoofdstuk worden echter ook enkele belangrijke algemene inzichten aangehaald.

Opbouw simulatiemodel

Aanpak

Een simulatiemodel is een stukje code dat in staat is om een bepaalde werkelijke component of installatie na te bootsen. Het grote voordeel van zo'n model is typisch de grote hoeveelheid instelbare parameters, die de gebruiker in staat stellen om niet 1 soort, maar een breed scala aan verschillende van deze installaties na te bootsen. Het tweede grote voordeel aan een model, in tegenstelling tot een werkelijke testopstelling, is de mogelijkheid om een heel jaar (of langer) aan onderzoek in enkele seconden uit te voeren. In plaats van gedurende een lange periode metingen uit te voeren, simuleer je gewoon deze gebeurtenissen en de veronderstelde gevolgen.

Er zijn in 2 grote soorten groepen modellen voor laadparken. Een eerste groep vertrekt vanuit een laadpaal-centrisch idee. De gedragingen worden hierbij op laadpaalniveau bekeken: hoeveel laadsessies worden er verwacht per dag, hoe lang blijven voertuigen aan deze laadpaal staan, etc. Dit soort model is typisch makkelijker om op te bouwen, en kan makkelijk worden gevalideerd aan de hand van werkelijke data, die typisch op laadpaalniveau beschikbaar is. Dit soort modellen is het meest geschikt voor het simuleren van **publieke laadsessies**. Hét grote nadeel van deze aanpak is dat menselijk gedrag zich echter niet op laadpaalniveau voltrekt, maar veeleer op voertuigniveau. Dit is meteen de tweede grote groep laadparkmodellen: gedrag wordt op voertuigniveau geprogrammeerd. Deze aanpak is meer geschikt wanneer men veel informatie heeft over de gebruikers van het laadpark, zoals typisch het geval is bij **thuisladen of werkgerelateerd** laden. Publiek laden gaat meestal gepaard met gebrekkige kennis op voertuigniveau, waardoor deze aanpak minder geschikt is voor zulke laadsessies. Beide technieken worden toegepast in het model (en de publieke tool), afhankelijk van het type laadsessies.

Het model bestaat zo in totaal uit maximaal 5 componenten:

- De laadpalen zelf, eventueel bestaande uit verschillende groepen
- De vaste voertuigen en diens gedragingen, waarvan kan worden gekozen bij welke laadpaalgroepen ze mogen laden
- De publieke voertuigen, deze gedragingen worden op laadpaalgroepniveau geprogrammeerd
- Het eventuele restprofiel, zijnde al het verbruik - productie dat niet de laadsite zelf bedraagt.

De waarheidsgetrouwheid van een model, is onder andere afhankelijk van de tijdstap die wordt toegepast (de tijd tussen elke simulatiestap). Hoe fijnmaziger wordt gesimuleerd, hoe accurater. Door uit te middelen over een langere periode, worden bijvoorbeeld traagheden van de systemen over het hoofd gezien, kortstondige vermogenpieken gemist, en middelen injectie en afname elkaar enigszins uit. Deze accuraatheid stijgt echter niet lineair, terwijl de computationele tijd en ruimte voor data-opslag dat wel doen. Vandaar dat de pragmatische keuze van 15 minuten data werd gemaakt. Dit is bovendien ook de granulariteit waarop het restprofiel bij de meeste verbruikers wordt vastgelegd.

De laadpalen

Het opbouwen van een simulatie begint bij de keuze van laadpalen. Het model is in staat om met een onuitputbare combinatie van verschillende laadpalen te werken. In principe zou dus elke laadpaal apart kunnen worden geprogrammeerd, allemaal met zijn unieke eigenschappen. De belangrijkste eigenschappen van laadpalen zijn hun **type (AC of DC)** en hun **maximaal vermogen**. In het model is er bovendien voor gekozen om ook **eventuele slimme laadtechnieken** op laadpaalniveau te bepalen. In werkelijkheid zou dit dus inhouden dat er enkele laadpalen op een laadsite zijn waar er wél slim

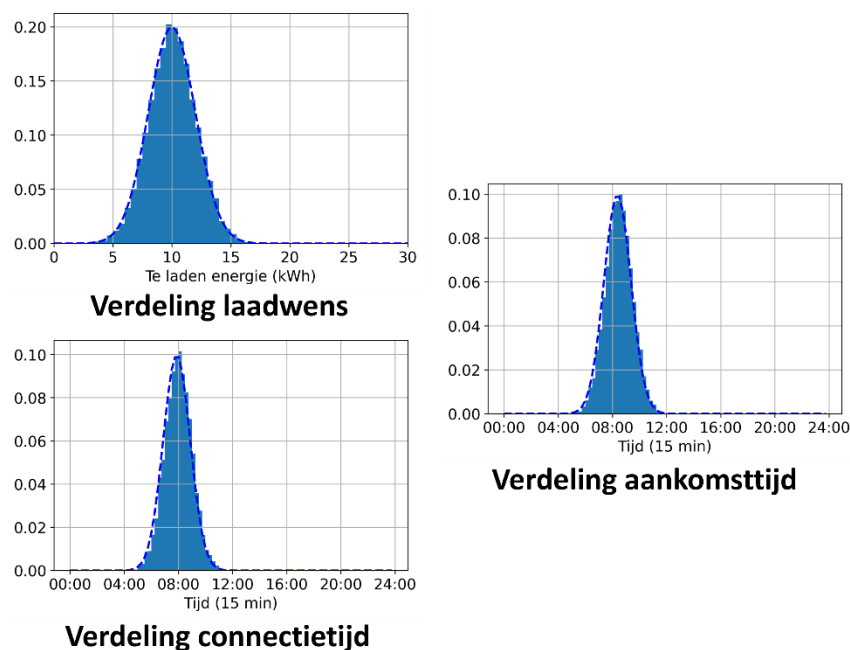
wordt geladen en enkele waar dit niet het geval is. Uiteraard kunnen ook alle laadpalen slim of dom zijn. Op deze mogelijkheid tot slim laden wordt later verder ingegaan.

Naast deze hoofdeigenschappen kan op laadpaalniveau ook nog volgende parameters worden gewijzigd:

- Wijze van aansluiting (wordt de voedingskabel al dan niet dubbel gebruikt)
- Maximale aansluittijd (bv voordat er een boete wordt toegekend)
- Lengte voedingskabel (i.v.m. kabelverliezen)
- Dikte voedingskabel (i.v.m. kabelverliezen)

De vaste voertuigen

De vaste voertuigen zijn deze groep voertuigen die met een bepaalde regelmaat terugkeren, waarvan het gedrag dus ook inschatbaar is. Typisch zijn dit bijvoorbeeld de eigen werknemers met een elektrisch voertuig. Deze komen bijvoorbeeld elke weekdag aan tussen 8u en 9u, blijven tot 16u – 17u en laden dan 20 tot 30 kWh. Hoewel deze gedragen dus enigszins in te schatten vallen, zijn ze niet deterministisch. Het zou dan ook een grove fout zijn om ze zo te programmeren. Deze kleine hoeveelheid spreiding die aanwezig is, zorgt op siteniveau voor gigantische verschillen in de optredende pieken en zelfconsumptie. In het model worden deze parameters dan ook stochastisch geprogrammeerd aan de hand van normaalverdelingen, zie Figuur 1.



Figuur 1: (illustratief) de belangrijkste verdeling van de belangrijkste gedragsparameters van een wederkerend voertuig

Een andere belangrijke veronderstelling in het model, is dat er per dag maximaal 1 aansluitevent plaatsvindt per voertuig (eventueel meerdere per laadpaal). Hierdoor kan simpelweg aan het begin van elke dag van het simulatiejaar worden nagegaan (stochastische keuze): welke voertuigen komen laden, hoeveel deze willen laden, en wanneer ze zullen aankomen en vertrekken.

Wanneer een vast voertuig 'toekomt' wanneer het laadpark reeds volzet is (of er geen laadpalen meer zijn waar dit voertuig mag laden), wordt er een bijkomend gedrag gesimuleerd: 'gedrag bij gebrek aan laadpalen'. De keuze is dan: laadt thuis of elders, laadt niet (in dat geval zal er de volgende

dag uitgegaan worden van een grotere laadwens) of probeer opnieuw over x uur. In dit geval komt het voertuig enkele uren later opnieuw checken of er een plaatsje vrij is.

Er kan bovendien ook geprogrammeerd worden wat het voertuig doet op niet-laad dagen, zoals in het weekend. Laadt het voertuig thuis, of zal het voertuig bij de volgende laadsessie op kantoor, een grotere laadvraag hebben?

Tenslotte kan er ook worden ingesteld wat de kans is dat het voertuig zal komen laden. Niet iedereen zal immers elke dag zijn voertuig naar de laadpaal rijden, als ze bijvoorbeeld weten dat er een niet-nul kans bestaat dat er daar geen parkeerplaats meer vrij is. Deze parameter kan dan ook apart worden ingesteld op basis van de huidige SoC, zodat de kans bijvoorbeeld steeds groter wordt naarmate de batterij leger is.

Elk vast voertuig heeft dus volgende stochastische parameters:

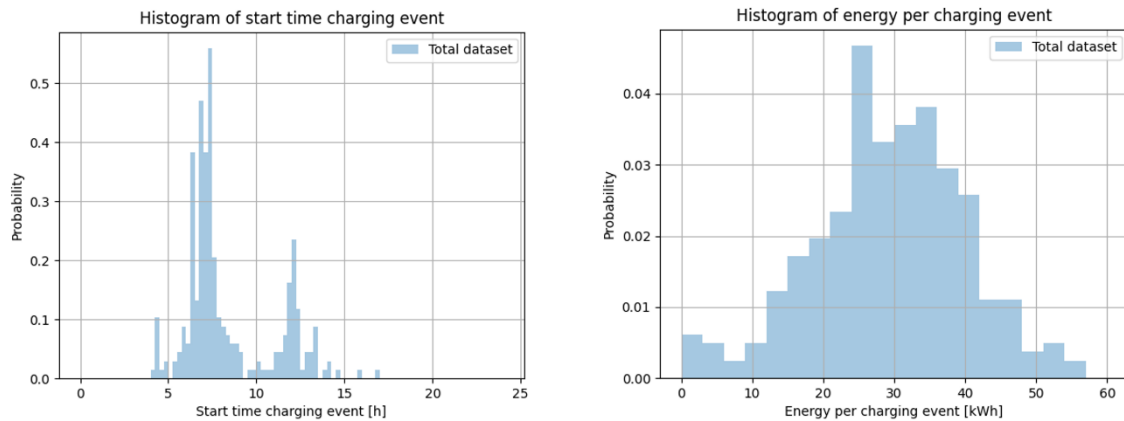
- Kansverdeling aankomsttijd
- Kansverdeling vertrektijd
- Kansverdeling laadwens (op basis van rij-afstand)
- Gedrag bij gebrek aan laadpalen
- Gedrag op niet laaddagen
- Kansverdeling inpluggen (o.b.v. SoC)

Naast deze stochastische parameters, hebben de vaste voertuig ook nog fysieke eigenschappen:

- Max AC laadvermogen (vast)
- Max DC laadvermogen (o.b.v. SoC)
- Batterijgrootte
- Energieverbruik/km
- Laad efficiëntie

De onvoorspelbare voertuigen

Bij deze voertuigen, geassocieerd met publiek laden, wordt een gelijkaardige aanpak gehanteerd. Het grote verschil is hier dat er per laadpaalgroep de **verdeling van het aantal laadsessies per dag** wordt gekozen. Er wordt dan bovendien niet langer gebruik gemaakt van normaalverdelingen, maar van meer complexe verdelingen voor aankomsttijd, connectietijd en laadwens. Deze verdelingen komen rechtstreeks voort uit een dataverzameling uitgevoerd door Elaad.NL, gelijkaardig aan Figuur 2. Buiten deze verschillen, worden de laadevents op dezelfde manier gesimuleerd als bij de vaste voertuigen.



Figuur 2: (illustratief) werkelijke laaddata op laadpaalniveau

Restprofiel

Wanneer het laadpark wordt geplaatst op een aansluiting waar al een profiel aanwezig is, zoals vaak het geval is wanneer het om een laadpark van een bedrijf zelf draait, is het cruciaal om dit profiel mee te nemen in de berekeningen. Hoewel dit profiel vaak niet langer bestuurbaar is, zal het wel mee bepalen of het de moeite loont om bijvoorbeeld een slimme sturing toe te voegen aan het laadpark, of dat er nog voldoende productie over is,...

Piekgedrag van een (dom) laadpark

Zoals reeds aangehaald in de inleiding van dit hoofdstuk, heeft het weinig zin om elk soort laadpark te simuleren en te analyseren. Door de zeer grote mogelijke verscheidenheid, zouden ontelbare simulaties moeten worden uitgevoerd, waarvan de resultaten nog moeilijk interpreteerbaar zouden zijn. In plaats hiervan wordt het model zelf ter beschikking gesteld aan het brede publiek, zo kan voor iedere individuele situatie, een unieke simulatie worden uitgevoerd wanneer iemand nood heeft aan deze informatie. Het is echter wel mogelijk om enkele basis ideeën af te leiden.

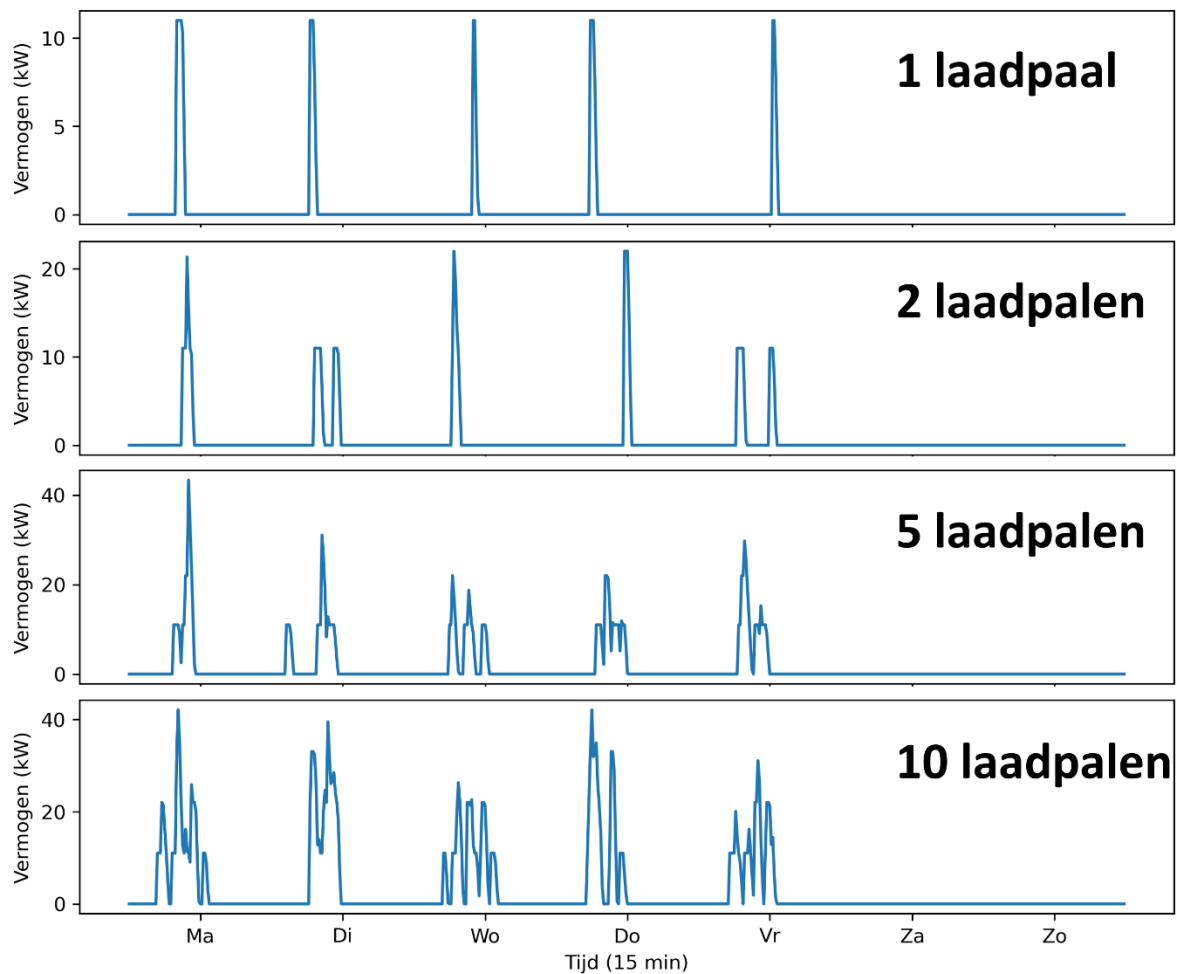
Een van de belangrijkste te analyseren parameters van een (dom) laadpark, is het optredende piekgedrag. Het piekgedrag, zijnde de hoogte, breedte en frequentie van pieken, is slechts voor een deel afhankelijk van de installatie (laadpalen) en de wagens die er komen laden. Een cruciale factor is het laadgedrag. In onderstaande analyse, wordt de invloed van de belangrijkste factoren op de optredende jaarpiek bekeken voor een fictief laadpark.

Optredende jaarpiek

De eerste factor die wordt onderzocht is het aantal laadpalen. Zoals te zien in onderstaande fictieve voorbeeld is het verband tussen de optredende piek en het aantal laadpalen, niet onmiddellijk duidelijk. Bij meer laadpalen, zien we inderdaad meer laadsessies, maar deze vallen natuurlijk niet per se samen. De kans dat *alle* laadsessies samenvallen, kent dan ook een omgekeerd verband met het aantal laadpalen. In dit voorbeeld werd onder andere van volgende eigenschappen uitgegaan (Met '±x' wordt steeds de dubbele standaardafwijking bedoeld, zijnde 95.8% van de waarden bevindt zich maximaal x verwijderd van het gemiddelde.):

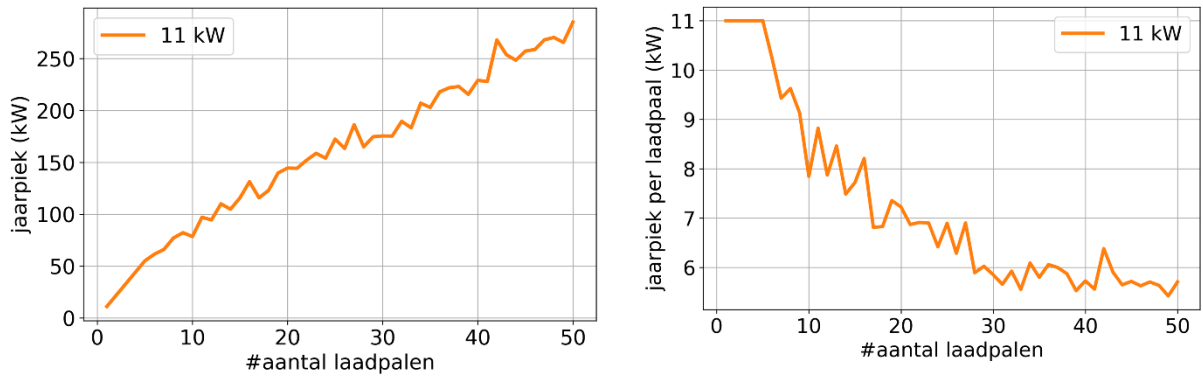
- 1 laadsessie per laadpaal per dag
- Aankomsttijd: 8u30 ± 2u
- Connectietijd: 8u30 ± 1u
- Enkel op weekdays
- Rijafstand: 55km ± 20km

- Laadvermogen wagens en laadpalen: 11kW



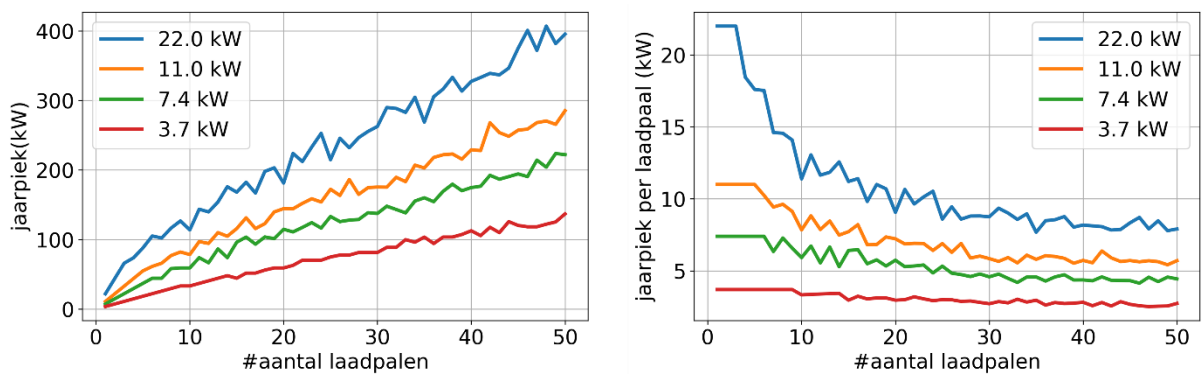
Figuur 3: (illustratief) 1 week in 4 verschillende gesimuleerde laadparken, bestaande uit telkens een ander aantal laadpalen.

We zien dus een eerste indicatie dat de totaal optredende jaarpiek, niet lineair zal zijn met het aantal laadpalen. Het gedrag dient mee te worden genomen om dit verband te kunnen bepalen. Het dient opgemerkt te worden dat in het triviale voorbeeld waarin iedereen steeds exact om 9u zijn wagen zou inpluggen, de optredende jaarpiek wél gelijk zal zijn aan het laadvermogen van 1 laadpaal, vermenigvuldigd met het aantal laadpalen (als alle wagens ook hetzelfde vermogen hebben). In onderstaande figuur werd deze oefening verder gezet tot en met 50 laadpalen. De rest van de voorwaarden bleven gelijk.



Figuur 4: (Links) optredende jaarpiek i.f.v. het aantal laadpalen in een gesimuleerd laadpark en (rechts) de optredende jaarpiek gedeeld door het aantal laadpalen.

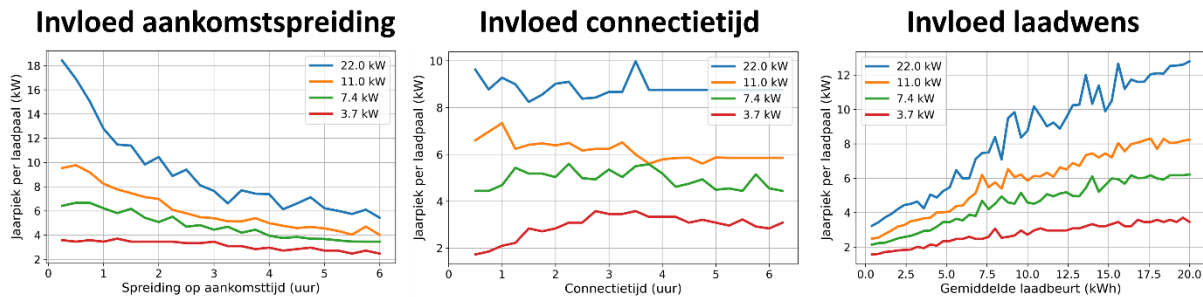
Hoewel op het eerste zicht een lineair verband zich alsnog lijkt te voltrekken, zien we op de linker figuur dat dit slechts gezichtsbedrog is. Hoeveel meer laadpalen men toevoegt, hoe minder de jaarpiek blijft stijgen. Vanaf een 30-tal laadpalen, lijkt het erop dat er wél een lineair verband ontstaat. In dit geval voegt iedere bijkomende laadpaal van 11 kW vanaf dat punt steeds rond de 6 kW toe aan de optredende jaarpiek.



Figuur 5: (Links) optredende jaarpiek i.f.v. het aantal laadpalen in een gesimuleerd laadpark en (rechts) de optredende jaarpiek gedeeld door het aantal laadpalen.

Deze oefening werd nog eens herhaald, maar met 4 verschillende types laadpalen. Hetzelfde effect lijkt zich af te spelen bij al deze types laadpalen, al treedt lineariteit wel eerder op bij de lagere laadvermogens. Dit is te verwachten: door het lagere laadvermogen zijn de laadpieken niet enkel lager, maar ook breder. Hierdoor is er meer kans dat individuele laadpaalpieken samenvallen met de collectief optredende pieken.

Zoals reeds aangehaald, is dit resultaat afhankelijk van het gedrag van de voertuigen die komen laden. De impact van het gedrag werd aan de hand van 3 parameters onderzocht in volgende analyse. Hierbij werd steeds uitgegaan van een laadpark van 30 laadpalen. De andere parameters (behalve degene die gevarieerd wordt), blijven dezelfde als in bovenstaande oefening.

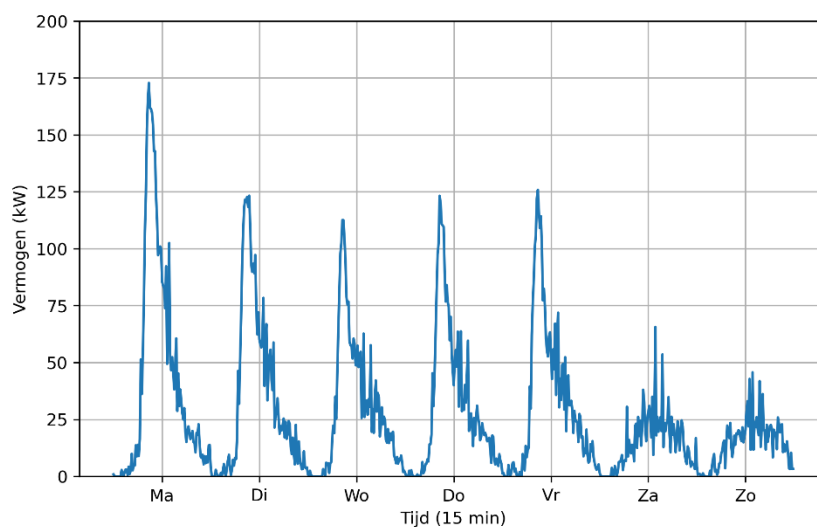


Figuur 6: de Invloed van 3 verschillende parameters op de optredende jaarpiek gedeeld door het aantal laadpalen.

De aankomstspread heeft duidelijk een grote invloed op de optredende jaarpiek. Zo zien we dat hoe meer de aankomst wordt gespreid, hoe lager de optredende jaarpiek is. Zeker voor hoge laadvermogens is deze spreiding van groot belang. Spreiding werd hier opnieuw gedefinieerd als de dubbele variantie op het aankomstuur. Bemerk dat het gemiddelde aankomstuur zelf niet wordt bekeken, deze heeft namelijk geen invloed op de optredende piek van het laadpark. Dit kan wél het geval zijn wanneer er reeds verbruik aanwezig is op de site.

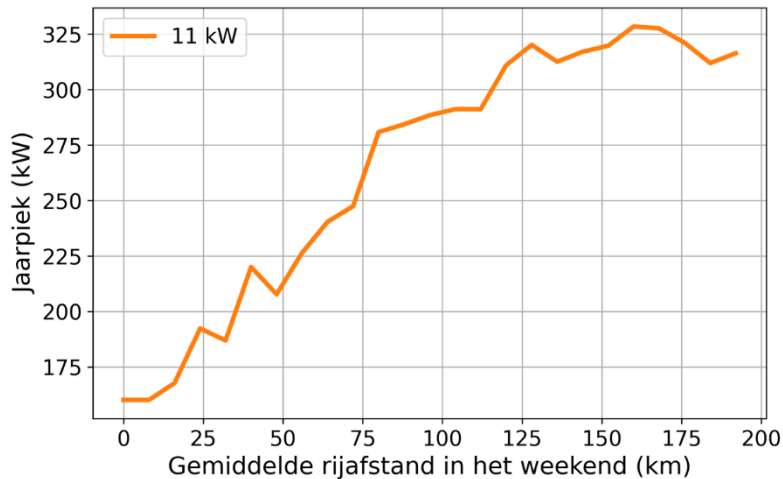
De connectietijd lijkt nagenoeg geen invloed te hebben op de optredende pieken. Dit is logisch, bij dom laden zal het volledige verbruik van de laadsessie zich in het begin van de connectieperiode bevinden. De rest van de connectietijd heeft in dit experiment daarom ook geen invloed, er is immers maar 1 laadsessie per laadpaal per dag. Bij erg korte connectietijden in verhouding tot het laadvermogen, zien we wel een invloed. Dit is logisch: in deze laadparken krijgt men onvoldoende tijd om de volledige wens bij te laden. Hierdoor zal de piek finaal ook kleiner zijn, maar is er uiteraard niet aan de laadbehoefte voldaan.

De gemiddelde laadwens blijkt daarentegen weer wel een groot belang te hebben. Wanneer men meer wil laden, duurt de laadsessie langer, en is de kans dat laadsessies overlappen dus ook groter. Dit resulteert zich in een stijgend verband. Dit verband verklaart onmiddellijk waarom de jaarpieken (en maandpieken) zich vaak voordoen op maandagen. Bij veel bedrijven wordt er doorheen het weekend weinig geladen op het bedrijfsterrein, maar rijden vele werknemers wel nog met de bedrijfswagen. Hierdoor moet er op maandagen typisch meer worden bijgeladen per laadsessie, waardoor hier meer overlap is tussen de individuele laadsessies, resulterende in een hoge gelijktijdige piek zie Figuur 7.



Figuur 7: Gemiddeld weekprofiel van een bedrijf dat onderzocht werd binnen dit project.

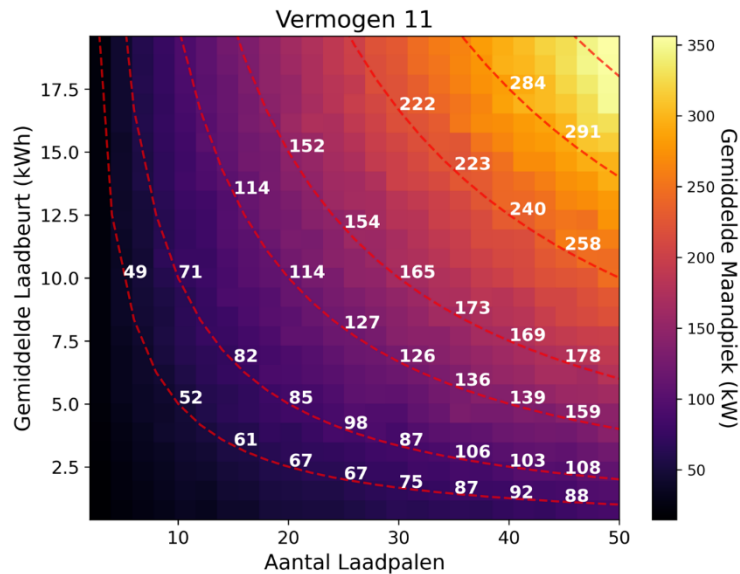
Dit effect werd ook iets uitgebreider onderzocht door de gemiddelde rijafstand in het weekend te vergroten. Een gelijkaardig effect als het vergroten van de gemiddelde rijafstand tijdens een weekdag kan worden waargenomen. Dit is niet onlogisch. Door het verhogen van de rijafstand in het weekend, vergroten enkel de pieken op maandag. Dit is echter voldoende om reeds een hogere jaarpiek te bekomen, die dan uiteraard op een maandag zal vallen.



Figuur 8: Invloed van de gemiddelde rijafstand in het weekend.

Nu het belang van de gemiddelde laadwens uitgebreid is geschetst, steekt zich een interessante vraag de kop op: “Wat heeft een grotere invloed: het aantal laadpalen of de gemiddelde laadwens”. Dit is geen compleet onzinnige vraag, aangezien de twee in sommige gevallen omgekeerd gecorreleerd zijn. Een klein maar overbevraagd laadpark kent vaak een grotere gemiddelde laadwens. Deze toename van de laadwens ontstaat doordat wagens die op dag 1 niet kunnen laden, dit moeten inhalen wanneer ze wel kunnen inpluggen op dag 2.

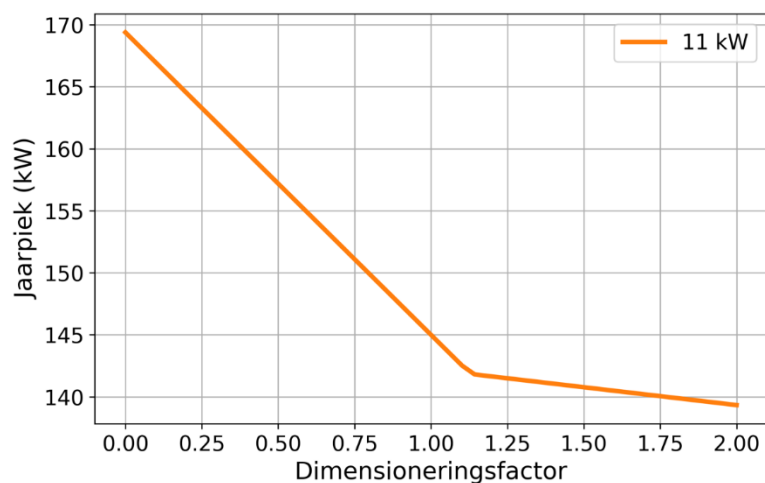
Er werd een analyse uitgevoerd waarbij beide parameters werden gevarieerd, zie Figuur 9. Uiteraard zijn de pieken het hoogst, daar waar zowel de laadbeurten als het aantal laadpalen het grootst zijn. Op deze punten, wordt ook een maximale hoeveelheid energie geladen per jaar. De rode stippellijnen vormen de *isojaarvraag-lijnen*. Op alle punten op deze lijnen, wordt dezelfde hoeveelheid energie geladen op jaarbasis. Punten op deze lijnen die een lagere jaarpiek hebben, zijn met andere woorden gunstiger, maar op een bepaalde manier toch equivalent. Voor alle groottes van laadparken (aantal kWh/jaar) luidt de conclusie dan: minder laadpalen is beter. Waar grote coördinatie tussen werknemers mogelijk is, kan zo bijvoorbeeld een beurtrol worden afgesproken, waarbij maar om de dag mag worden geladen. Op deze manier kan een laadpark bestaan uit minder laadpalen, waardoor de piek lager zal zijn. In theorie is echter nog steeds eenieders laadbehoefte voldaan (indien de batterijcapaciteit van de wagens voldoende groot is in vergelijking met het woonwerktraject).



Figuur 9: Jaarpiek i.f.v. gemiddelde laadbeurt en aantal laadpalen. Punten op een rode stippellijn zijn punten met dezelfde totale jaarvraag (in kWh).

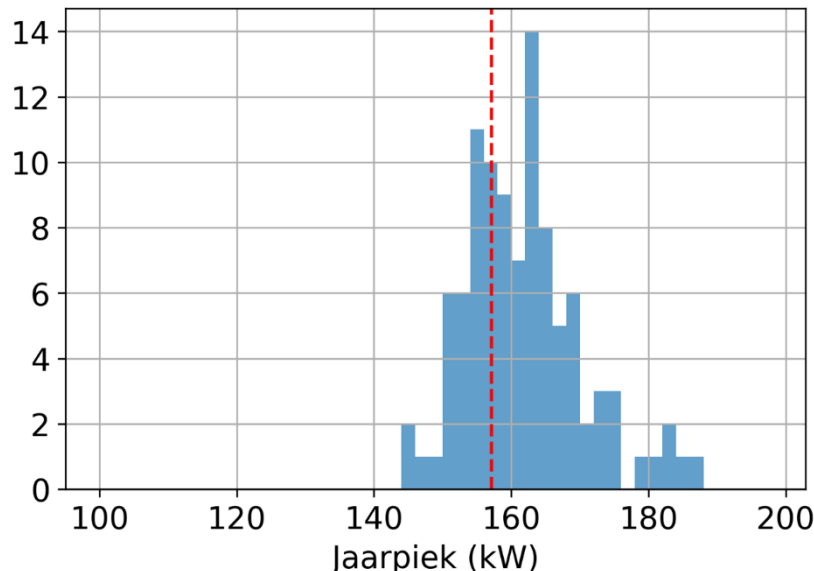
Finaal wordt voor hetzelfde voorbeeld laadpark nog bekeken wat de invloed kan zijn van een PV-installatie. Uiteraard is deze invloed sterk afhankelijk van het moment van de hoogste piek (valt deze in de nacht, dan heeft een pv-installatie uiteraard geen impact), de oriëntatie van de panelen, maar ook het weerkundig jaar dat gebruikt wordt voor de voorspelling van de productie. Het blijft echter interessant om dit toch eens voor dit voorbeeld te bekijken.

Zoals te zien in Figuur 10, daalt de jaarpiek in eerste instantie lineair met de dimensioneringsfactor (grootte van de pv installatie). De oorspronkelijke jaarpiek, valt met andere woorden samen met een moment van pv-productie. Op een gegeven moment bevindt zich een knik in het verloop. Dit is het moment waarop de oorspronkelijke jaarpiek zo sterk is verminderd, dat er een andere piek de hoogste is. Deze piek wordt minder verlaagd door pv-productie, bijvoorbeeld omdat ze zich in de avond of ochtend bevindt. Dit resulteert dan in een minder stijle, maar lineaire afname. Dit beeld gaat in principe door totdat de volgende hoogste piek zich bevindt tijdens een moment van 0 pv-productie, bijvoorbeeld de nacht (hier niet afgebeeld).



Figuur 10: Invloed van de grootte van een pv-installatie op de optredende jaarpiek voor het voorbeeld laadpark.

Nu de belangrijkste invloeden op de jaarpiek zijn geschetst, loont het ook om een te bekijken met welke zekerheid deze jaarpieken eigenlijk optreden. De optredende jaarpieken zijn immers een stochastisch verschijnsel. Het in te stellen toegangsvermogen is echter wel vast. Het wordt dan ook vaak aangeraden om dit vermogen iets te kiezen boven de voorgaande jaarpiek, bij wijze van zekerheidsmarge. Het is echter maar de vraag of dit de optimale strategie is.



Figuur 11: Voorbeeld van de spreiding op de jaarpiek voor 100 simulaties voor hetzelfde laadpark. Met de rode stippellijn wordt de optimale instelwaarde van het toegangsvermogen weergegeven.

In Figuur 11 wordt de jaarpiek van 100 simulaties van hetzelfde laadpark weergegeven. Er is duidelijk een aanzienlijke spreiding. Met een minimum van 144.7 kW tot een maximum van 187 kW, is het niet meteen vanzelfsprekend om het correcte toegangsvermogen in te stellen. Risico-averse energie-managers zullen misschien geneigd zijn om 187 kW te kiezen als het toegangsvermogen. Op deze manier zal dit bedrijf theoretisch gezien nooit een overschrijdingstarief betalen. Ze betalen echter ieder jaar een hogere kost voor het toegangsvermogen. De gemiddelde prijs per kW voor toegangsvermogen bedraagt €25. Het overschrijdingstarief is exact 1.5 keer duurder, zijnde 37.5 €/kW. Deze risico-averse strategie kost dus ieder jaar exact $187 \times €25 + 0 \times 37.5 = €4675$. Kijken we naar het andere extremum, zijnde een toegangsvermogen van 144.7 kW, komen we tot volgende gemiddelde kost: $144.7 \times €25 + 17 \times €37.5 = €4226$. Iets wat onverwacht blijkt dus dat het onderschatten van de jaarpiek lucratiever is dan deze overschatten. Deze prijs is slechts een gemiddelde waar grotere extrema achter schuilgaan. Zo zal in een piekjaar van 187kW de rekening €5203,75 bedragen.

Het optimum (ook aangeduid op de figuur) bevindt zich op het 33% percentiel (€4149.5). Dit betekent dan ook dat in 67% van de jaren er een overschrijdingstarief zal moeten worden betaald. Wanneer de toekomst kan worden gesimuleerd, is dit dus de beste instelparameter voor het toegangsvermogen. Wanneer men geen aanpassingen wenst te doen in de nabije toekomst, kan ook naar de eigen historische data worden gekeken en dezelfde redenering worden toegepast. In veel gevallen is er echter een beperkte kennis van het verleden. Wanneer bijvoorbeeld enkel de jaarpiek van het voorgaande jaar gekend is, is het dus niet gek om het toegangsvermogen nét iets onder deze waarde te nemen, in de hoop te belanden rond het 33% percentiel. De veelvoorkomende strategie van de veiligheidsmarge, kost op de lange termijn wellicht alleen maar geld. Wel is er een soort zekerheid dat men ieder jaar even veel zal betalen, wat voor risico-averse bedrijven de meerkost waard kan zijn.

Conclusies

Laadparken hebben, in vergelijking met het restverbruik van de site, een erg gepiekt gedrag. Dit betekent dan ook dat ze inefficiënt gebruikmaken van hun netaansluiting. Het piekgedrag wordt in grote mate bepaald door het laadgedrag van de laadparkgebruikers. Zo is voornamelijk de spreiding op de aankomsttijd en de gemiddelde laadwens van groot belang. Ook of er al dan niet in het weekend wordt geladen is van groot belang, vermits anders de laadvraag wordt verschoven naar maandag. Hierdoor ontstaan op de meeste laadparken de typische maandagpieken.

Het kiezen van het toegangsvermogen is niet eenvoudig. De belangrijkste tip hierbij is dat het incalculeren van een veiligheidsmarge in de meeste gevallen onnodig is, en zal leiden tot hogere gemiddelde facturen. Dit voornamelijk omdat de “boete” van het overschrijdingstarief eigenlijk maar 1.5 keer hoger ligt dan de prijs voor het toegangsvermogen zelf.

2. Slim laden

Optimalisatie van laadstrategieën voor laadinfrastructuur

Laadinfrastructuur leidt vaak tot een sterke toename van het elektriciteitsverbruik. Voor residentiële gebruikers kan het verbruik zelfs verdubbelen, terwijl ook middelgrote en grote verbruikers een aanzienlijke stijging van hun elektriciteitsfactuur kunnen ervaren. Naast het hogere energieverbruik (kWh) zal ook het piekgedrag toenemen, wat leidt tot hogere netkosten. Toch biedt deze nieuwe verbruiker een groot voordeel: **flexibiliteit**.

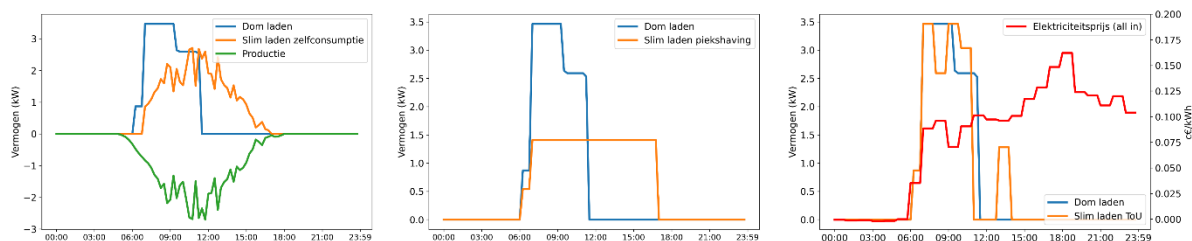
Bij een gemiddelde laadsessie is een voertuig vaak langer dan 8 uur aangesloten, terwijl de effectieve laadtijd slechts 30 minuten tot 1 uur bedraagt. Door het optimale tijdstip en vermogen te kiezen om te laden, kunnen de elektriciteitskosten aanzienlijk worden verlaagd. In sommige gevallen leidt dit zelfs tot **meer laadcomfort**.

Inkomstenstromen en barrières

De laatste jaren zijn er steeds meer inkomstenstromen beschikbaar dankzij de toenemende variabiliteit van energieopwekking en -afname. De toegangsbarrières voor deze stromen verschillen echter.

Aggregatoren en **energieleveranciers** die toegang bieden tot de onbalansmarkt, maken de barrières kleiner. Binnen dit project zijn enkel de drie inkomstenstromen met de **laagste barrières** onderzocht:

1. **Zelfvoorziening:** Vereist een eigen productie-eenheid (bv. zonnepanelen).
2. **Piekbepanking:** Vereist een digitale meter.
3. **Dynamische tarieven:** Vereist een digitale meter en een dynamisch energiecontract.



Figuur 12: De drie basisstrategieën: (links) zelfconsumptie, (midden) piekbepanking en (rechts) dynamische tarieven

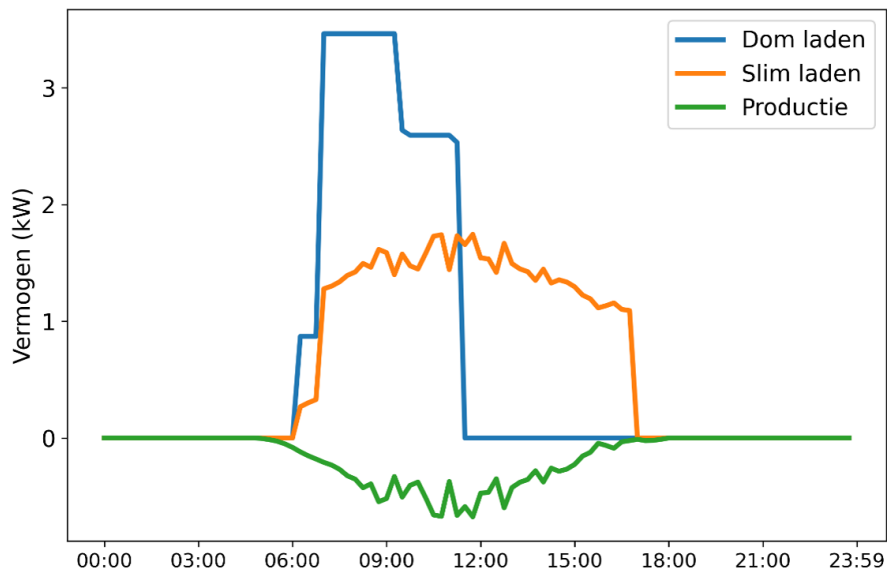
V2G-mogelijkheden (terugleveren van energie vanuit het voertuig naar het net) zijn buiten beschouwing gelaten wegens het beperkt aantal beschikbare praktische toepassingen tot op heden.

Strategieën en combinaties

Onderzoek toont aan dat **combinaties van strategieën** de grootste besparingen opleveren. Binnen dit project zijn verschillende combinaties van zelfvoorziening, piekbepanking en dynamische tarieven onderzocht.

1. Piekbepanking en zelfvoorziening

Deze combinatie zorgt voor een **natuurlijke synergie**. Door te laden tijdens momenten van eigen productie, voorkom je een afnamepiek én verhoog je de zelfconsumptie. Bij een perfecte voorspelling van verbruik en productie zijn er geen conflicten tussen deze twee strategieën. Het prioriteren van eigen energie leidt dus tot louter voordelen.

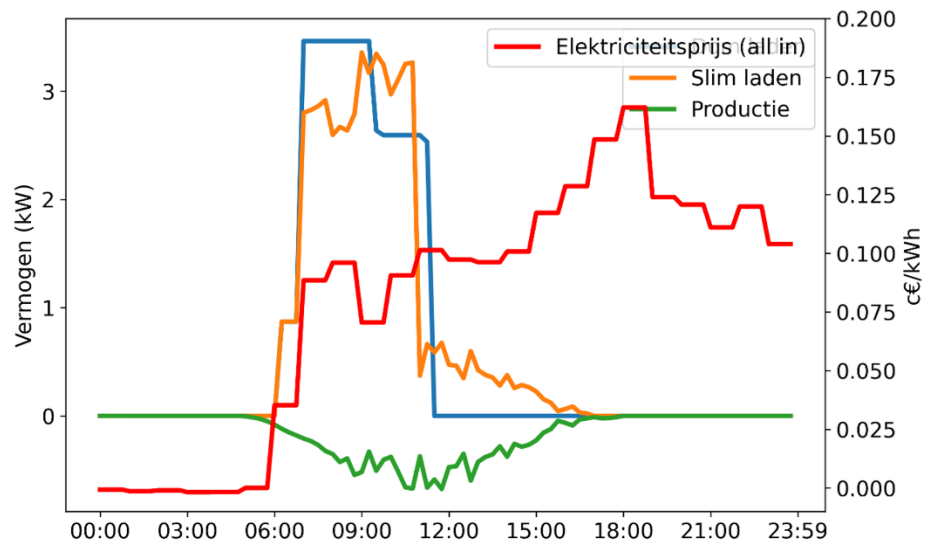


Figuur 13: Voorbeeld slim laadprofiel dat waar wordt ingezet op de combinatie van zelfconsumptie en piekbeperking.

2. Zelfvoorziening en dynamische tarieven (ToU)

Bedrijven met een dynamisch tarief voor afname hebben vaak ook een dynamisch tarief voor injectie. Dit betekent dat zowel de afnamemomenten als de injectiemomenten geoptimaliseerd moeten worden.

- In de meeste gevallen verhoogt dit de zelfconsumptie: laden gebeurt wanneer eigen productie beschikbaar is.
- Zeldzame uitzonderingen: Op specifieke momenten kan het voordeliger zijn om energie te injecteren en later aan een lager tarief te laden. Door nettarieven en heffingen (enkel op afname), zijn deze situaties echter beperkt. Binnen dit project, waar werd gewerkt met **perfecte voorspellingen**, zijn deze zeldzame momenten meegenomen. In de praktijk is het ToU-aspect eerder **secundair** en wordt pas gebruikt als de eigen productie is uitgeput.



Figuur 14: Voorbeeld slim laadprofiel dat wordt ingezet op de combinatie van dynamische tarieven en zelfconsumptie.

3. Piekbeperking en dynamische tarieven

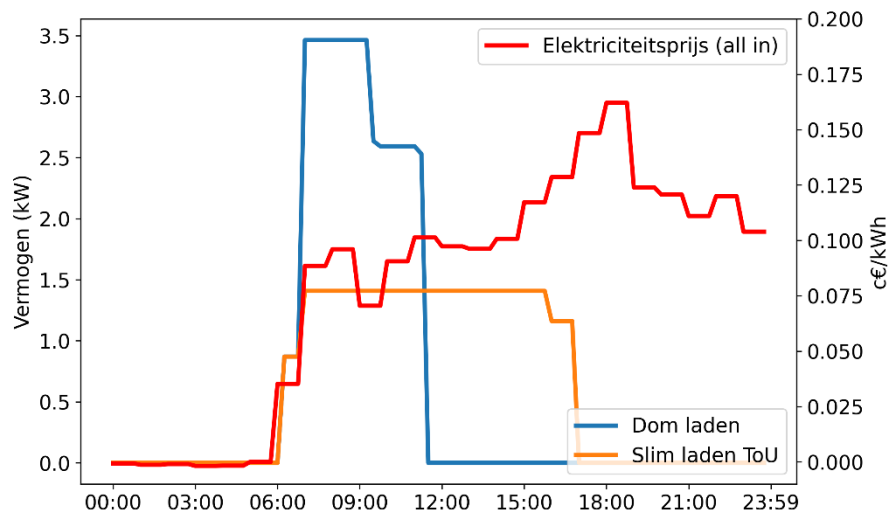
Deze combinatie is **minder evident** door de tegenstrijdige doelstellingen:

- Bij lage (of negatieve) energietarieven wil je idealiter aan maximaal vermogen laden, maar dit leidt tot hoge pieken.
- Hogere pieken betekenen echter hogere netkosten, wat de voordelen van het lage tarief gedeeltelijk tenietdoet.

In de praktijk moeten er **afwegingen** worden gemaakt:

- Enerzijds wil je pieken zoveel mogelijk beperken.
- Anderzijds wil je ruimte behouden om te profiteren van gunstige ToU-tarieven.

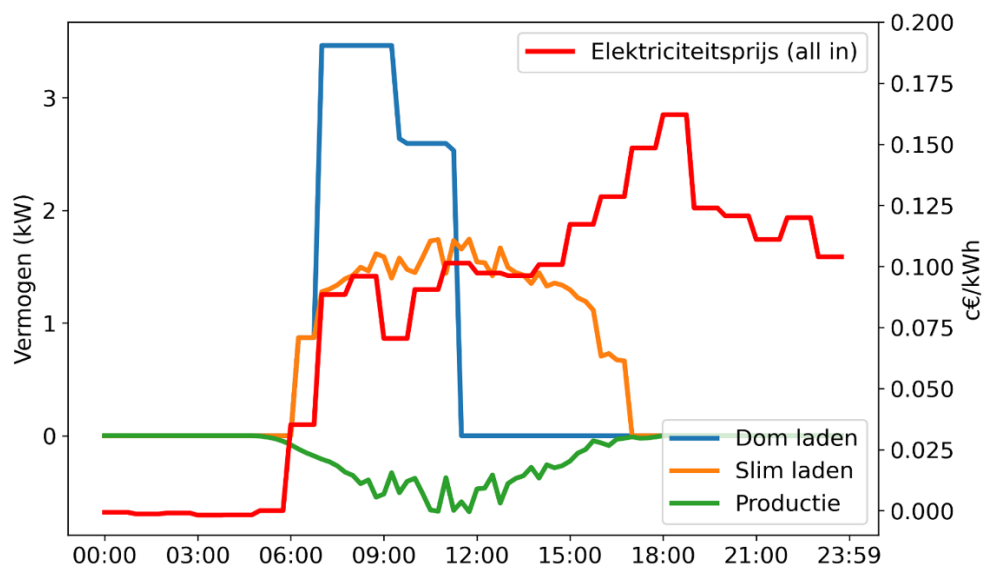
Het is moeilijk om op voorhand te bepalen wat het maximale toegestane laadvermogen moet zijn. Hoewel je het piekvermogen zo laag mogelijk wilt houden, is enige speelruimte noodzakelijk voor de ToU-strategie. Dit werd binnen het project opgelost door enkele sweeps (incrementeel verhogen van de toegestane piek om te kijken of het tarief nog verder kan reduceren).



Figuur 15: Voorbeeld slim laadprofiel dat waar wordt ingezet op de combinatie van piekbeperking en dynamische tarieven.

4. Toevoegen van zelfvoorziening aan combinaties

Het toevoegen van zelfvoorziening aan combinaties van piekbeperking en ToU is **triviaal** door de synergie tussen met de andere strategieën.



Figuur 16: Voorbeeld slim laadprofiel dat waar wordt ingezet op een combinatie van de drie strategieën.

Binnen dit hoofdstuk zullen 3 strategieën worden vergeleken met elkaar, waarbij telkens gebruik werd gemaakt van combinaties. In de simulatietool is het ook mogelijk om enkel zelfconsumptie te bekijken. Voor de analyse binnen dit hoofdstuk werd gebruik gemaakt van de data uit 1 van onze case studies.

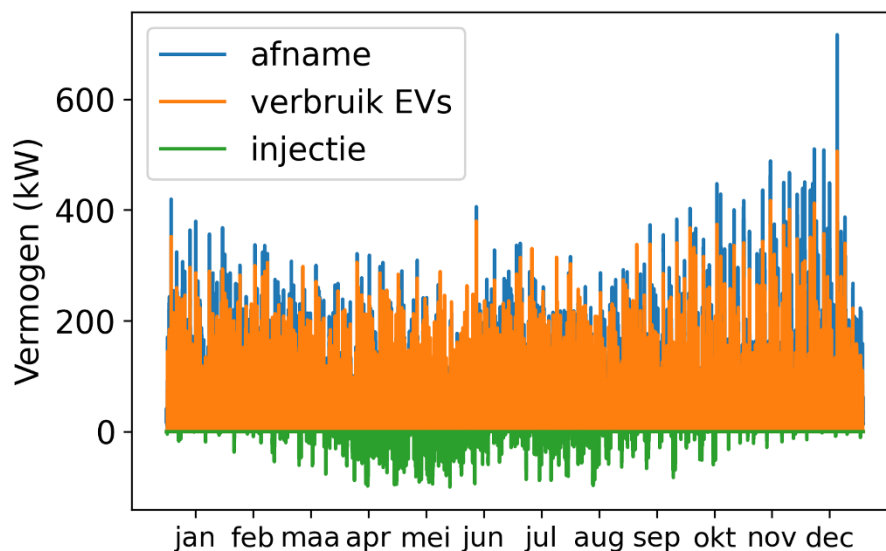
Casestudie:

Al vroeg in het project werd besloten om samen te werken met de Snowball site te Harelbeke voor een casestudie. Deze cleantech site, opgericht door Smappee, is het kantoorgebouw van de toekomst. Zo beschikken ze over een grote hoeveelheid zonnepanelen, een batterij, een ijsbuffer, maar ook over een groot laadpark van 50 laadpunten (waarvan 3 DC fastcharges). Dit maakt deze site de ideale kandidaat voor een casestudie rond slim laden.

Van de site werden drie datasets bekomen:

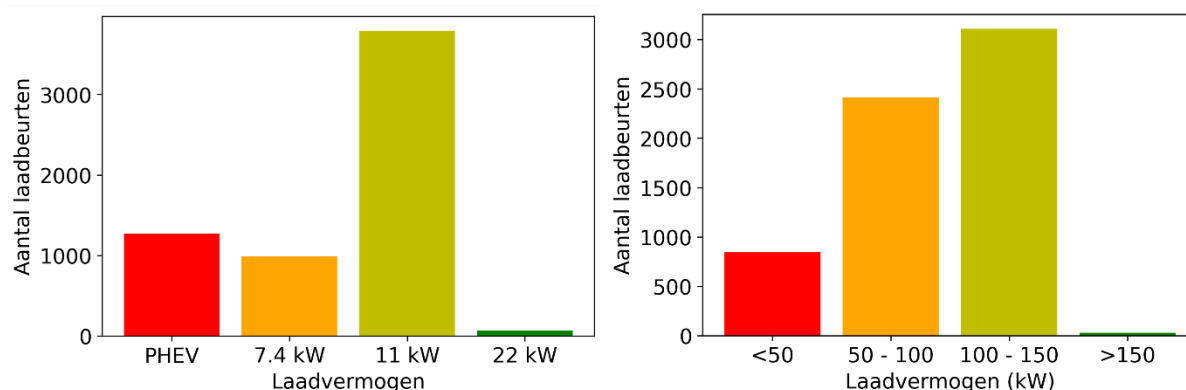
- Het totale profiel op transformatorniveau. Deze data werd op 15 minuten basis aangeleverd.
- De individuele laadsessies in de vorm van event data. Deze data omvat de meta data van de laadsessies.
- De profielen van de laadpalen zelf op 5 minuten basis.

Door de combinatie van deze datasets, kon zo zelfs per laadsessie worden gekeken wat het maximale vermogen van de individuele wagens was, hoe lang er effectief werd geladen tijdens de aansluittijd en zelfs de laadcurves van de EV-batterijen konden worden achterhaald. Al deze data werd aan onze simulatiemodellen gevoed.



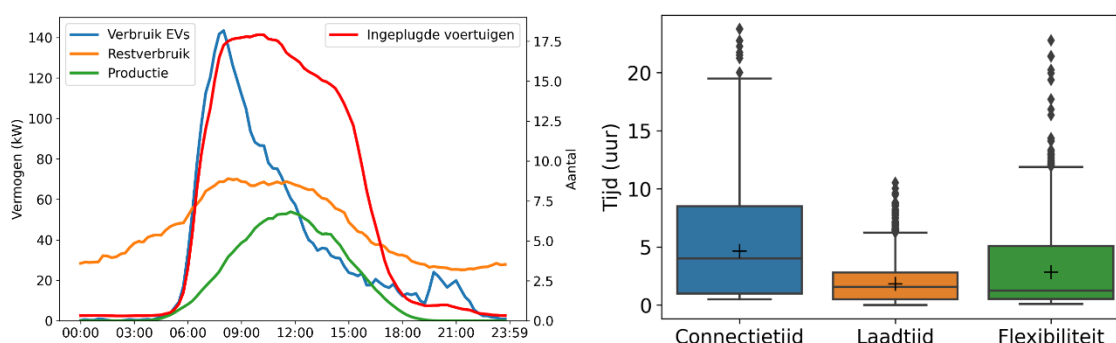
Figuur 17: Afname- en injectieprofiel transformator 2 Snowball site.

In totaal gaat het over zo'n 12000 laadsessies in het jaar 2023. Er werd opmerkelijk vaak geladen aan de DC fast chargers. Zowat de helft van de laadsessies vond plaats aan deze 3 laadpunten. In Figuur 18 wordt deze opsplitsing verder gemaakt, waarbij er ook wordt gekeken naar de maximale vermogens die optraden tijdens de laadsessies. De overgrote meerderheid van de AC laadsessies kende een maximumvermogen van 11 kW, terwijl de laadpalen elks tot 22 kW kunnen leveren. Bij de DC-laadsessies wordt dan weer waargenomen dat er zelden laadsessies uitkwamen boven een (5 minuten durend) maximaal vermogen van 150 kW. Dit terwijl de laadpalen tot 350 kW kunnen leveren. Het lijkt erop dat tenminste voorlopig, de laadpalen overgedimensioneerd zijn ten opzichte van de gebruikers.



Figuur 18: Verdeling vermogens laadsessies voor zowel (links) de AC laadpalen als (rechts) de DC laadpalen.

Naast de vermogens van de laadsessies, zijn vooral de gedragingen van de laadparkgebruikers van groot belang voor het slagen van een slimme sturing. Ten eerste dient er sprake te zijn van voldoende flexibiliteit. In de praktijk betekent dit dat de laadsessies langer dienen te duren dan het opladen van de wagen zelf. Zo is er immers ruimte voor het verschuiven van de laadsessies in de tijd, wat flexibiliteit is. Anderzijds is het niet onbelangrijk dat men is aangesloten tijdens financieel interessante tijdstippen. In de praktijk is dit overdag, het is dan dat de grootste prijsfluctuaties zich voordoen en dat eventuele eigen pv-installaties de productie leveren. Zoals te zien in Figuur 19, is er op de Snowball-site aan beide voorwaarden voldaan. De gemiddelde laadsessie heeft zo'n 3.5 uur aan flexibiliteit, er kan dus veel worden geschoven in de tijd. Bovendien komen veruit de meeste wagens reeds aan voor 8u 's ochtends en blijven deze zeker tot na 15u, vaak zelfs langer.



Figuur 19: (links) verloop aansluitgedrag gemiddelde weekdag en (rechts) verdeling connectietijd, laadtijd en flexibiliteit van de laadsessies.

Gezien de sterke aansluitpiek om 8u 's ochtends en aangezien het laadpark tot op heden zonder intelligentie wordt aangestuurd, piekt ook de elektriciteitsvraag enorm op dit tijdstip, om tegen 12 uur al terug te zijn gedaald tot een derde van de piekvraag. Dit is alvast een eerste indicatie dat een intelligente sturing veel impact zal hebben op deze site.

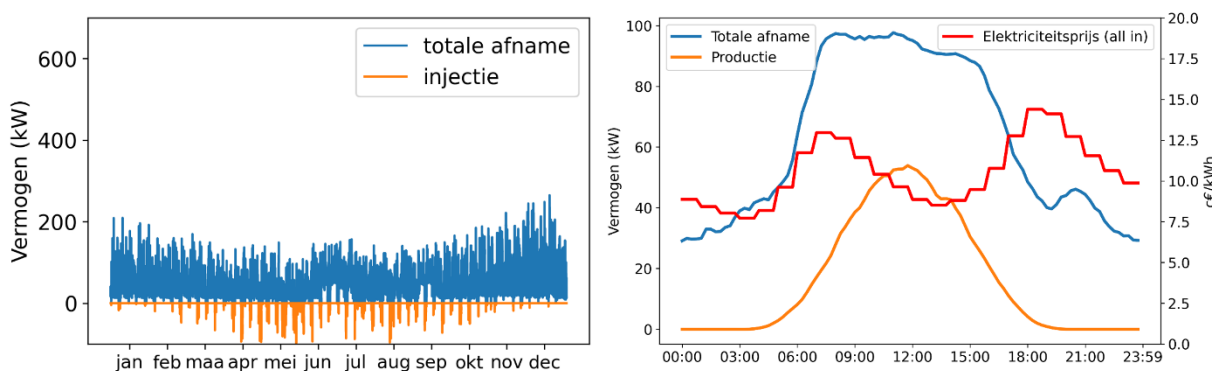
Resultaten slim sturen

Zelfconsumptie + piekbeperking

In Figuur 20 wordt het resultaat van een jaar slim laden op basis van zelfconsumptie en piekbeperking weergegeven. In de plots kan duidelijk worden waargenomen dat zowel de jaarpiek als gemiddelde maandpieken drastisch zijn verminderd. Bovendien is het verbruik grotendeels verplaatst naar de middaguren. Deze trend vertaalt zich ook in de cijfers:

- **Zelfconsumptie: 91,8% +5,5%**
- **Afname: 460 676 kWh - 8 147 kWh**
- **Gemiddelde maandpiek: 175,0 kW – 222,5 kW**
- **Jaarpiek: 264,9 kW – 451,6 kW**
- **Jaarfactuur: € 86 657 - €23 069**

Het algoritme slaagt erin om de jaarfactuur met zo'n €23 039 te verlagen. Dat doet het vooral door in te spelen op de netkosten en de pieken te verlagen. Alle "bereikbare" injectieoverschotten worden bovendien gebruikt voor het laden van de voertuigen. De stijging van de zelfconsumptie is niet uitzonderlijk hoog, dit is voornamelijk te wijten aan de eerder kleine pv-installatie in verhouding tot het verbruik. De zelfconsumptie was dan ook reeds enorm hoog, zelfs zonder slim sturen. Het dient opgemerkt te worden dat er geen enkel comfortverlies werd geleden door de ladende voertuigen. Het laden werd verschoven in de tijd, maar elke oorspronkelijk gevraagde kWh werd ook werkelijk geleverd gedurende de aansluittijd.



Figuur 20: resultaat slim laden op basis van zelfconsumptie en piekbeperking, zowel het jaarprofiel (links) als het gemiddelde dagprofiel (rechts) worden weergegeven.

Zelfconsumptie + dynamische tarieven

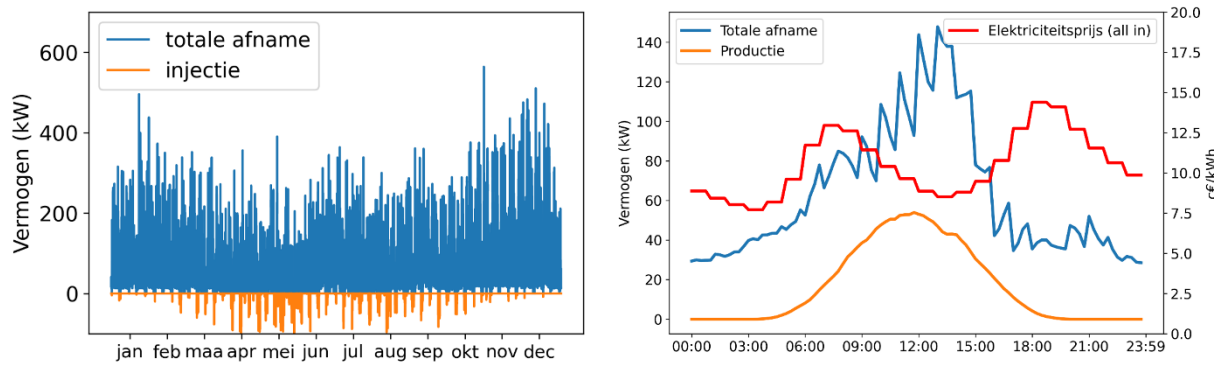
Dezelfde analyse werd herhaald voor de combinatie van de zelfconsumptie en dynamische tarieven strategie. Hoewel piekbeperking nog niet werd meegenomen in deze analyse, werd wel als randvoorwaarde genomen dat het nieuwe slimme profiel geen hogere piek mag trekken als het oorspronkelijke domme profiel. Het is immers geweten dat strategieën rond dynamische tarieven vaak als neveneffect hebben dat tijdens goedkope uren, het verbruik piekt. Er worden dus geen bijkomende inspanningen geleverd om de piek verder te verlagen, maar er wordt ook niet toegestaan dat ze hoger uitkomt. De resultaten zouden anders immers ten onrechte uitwijzen dat inzetten op dynamische tarieven geen lucratief model is. De resultaten van deze strategie waren de volgende:

- **Zelfconsumptie: 91,6% + 5,3%**
- **Afname: 460 973 kWh -7851 kWh**
- **Gemiddelde maandpiek: 404,8 kW + 7,3 kW**
- **Jaarpiek: 564,2 kW – 152,3 kW**
- **Jaarfactuur: €104 549 – €5 117**

Hoewel ook deze strategie tot sterke reducties van de jaarfactuur leidt (ondanks de beperkte rest-productie om op in te zetten), zijn ze veel minder sterk dan deze waar ook op piekbeperving werd ingezet. Hieruit kan een eerste les worden getrokken: inzetten op het capaciteitstarief is van groot belang voor het verdienmodel van slimme sturingen. Uiteraard gaat het hier slecht over 1 casestudie, waar toegegeven een sterk piekgedrag aanwezig was in het domme profiel. Deze pieken reduceren vormt dan ook een laaghangend fruit dat zeker dient geplukt te worden alvorens verder wordt gekeken.

Bij de analyse van het optredende gemiddelde dagprofiel (Figuur 21), kan een eigenaardig emergent gedrag worden waargenomen. Zo zien we kleine piekjes in het gemiddelde profiel. Aangezien de prijs gedurende het hele uur hetzelfde is, en dat de kans op aanwezigheid voor elk kwartier even groot is, lijkt dit in eerste instantie een vreemd fenomeen. Een belangrijke eerste hint is dat de piek zich bevindt in het eerste kwartier van elk uur wanneer de prijzen aan het dalen zijn, en in het laatste kwartier wanneer de prijzen aan het stijgen zijn. De pieken bij het dalende gedrag worden veroorzaakt door de wagens die tijdens dat uur zullen vertrekken. Deze proberen nog zo veel mogelijk bij te laden in dat uur (het goedkoopste uur dat ze tot dan gezien hebben). Als ze bijvoorbeeld zullen vertrekken om 10u45, dan laden ze nog om 10u, om 10u15 en om 10u30. Een wagen die vertrekt om 10u30 laadt enkel om 10u en 10u15. Een wagen die vertrekt om 10u15, laadt enkel om 10u. Statistisch gezien komen deze 3 gedragingen even vaak voor, maar 3 van hen laden om 10, 2 om 10u15 en maar 1 om 10u30. Vandaar de piek richting het eerste kwartier. Deze verklaring werd gegeven aan de hand van de gemiddelde dagprijzen. Het fenomeen is hier dus al uitgevlakt doordat niet op elke dag er een dalend patroon is op dezelfde uren. Op een willekeurige dag zal dit fenomeen uitgesprokener zijn. Dit fenomeen vormt dus een onderbelicht probleem, dat eventueel in de toekomst tot bijkomende netcongestie zal zorgen. Niet alleen is er een vraagpiek op uurniveau op het uur met de laagste prijs, er is bovendien een extra kwartierniveau.

Om dan de pieken naar het einde van het uur wanneer er stijgende prijzen zijn te verklaren, moet worden gekeken naar wagens die aankomen halverwege een uur. Als de prijs het uur erop hoger is (en ze blijven niet tot een nieuw dal), dan zullen ze nog zo veel mogelijk tijdens het goedkopere aankomstuur proberen te laden. Verder is dezelfde redenering hier van toepassing. Het effect is hier minder groot voornamelijk doordat er maar weinig wagens aankomen rond deze uren met stijgende prijs.



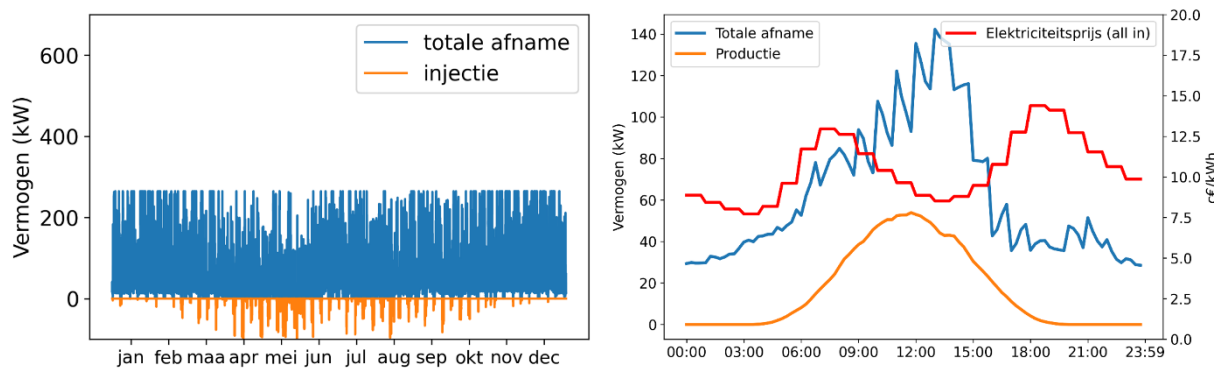
Figuur 21: resultaat slim laden op basis van zelfconsumptie en dynamische tarieven, zowel het jaarprofiel (links) als het gemiddelde dagprofiel (rechts) worden weergegeven.

Zelfconsumptie + dynamische tarieven + piekbeperking

Finaal werden alle drie de controlestrategieën gecombineerd. In de praktijk werd dit bekomen door verschillende piek drempelwaarden in te stellen, en dan telkens de dynamische tarieven optimalisatie uit te voeren. Bij sommige 'oplossingen' van dit algoritme blijkt dan toch dat niet alle laadwensen volledig worden ingewilligd. De dagen waarop dit zo is, worden opnieuw geoptimaliseerd maar dan met enkel piekbeperking als doel. Vrij vertaald zet dit algoritme dus volledig in op piekbeperking op de dagen waarop het erg krap is. De dagen met wat speelruimte worden dan gebruikt voor ToU initiatieven.

- **Zelfconsumptie: 91,6% - 5,3%**
- **Afname: 460 971 kWh - 7 853 kWh**
- **Gemiddelde maandpiek: 264,9 kW - 132,6 kW**
- **Jaarpiek: 264,9 kW - 451,6 kW**
- **Afname: € 88 743 - €20 983**

Enigszins teleurstellend wordt bekomen dat de winst minder hoog is dan wanneer enkel op piekbeperking en zelfconsumptie wordt ingezet. De verklaring is te zoeken bij de gemiddelde maandpiek. Het beperken van de pieken werd immers enkel op jaarniveau bekeken. In de andere maanden de maandpiek verder verlagen zou echter mogelijk zijn geweest, zoals ook te zien in het piekbeperkende algoritme. In de finale versie van de tool is dit ook hoe deze combinatiestrategie wordt geïmplementeerd, waardoor de combinatie van de drie strategieën wel steeds voor grotere reducties zorgt dan enkel de piekbeperking + zelfconsumptie strategie. Het kan echter worden beperkt dat in de meeste gevallen dit maar voor beperkte bijkomende winsten zorgt. De performantie van deze strategie is sterk afhankelijk van het jaar van de Belpex dat wordt gebruikt voor de berekeningen. In jaren met hogere prijsvolatiliteit zoals in 2022, scoort de strategie aanzienlijk beter.



Figuur 22: resultaat slim laden op basis van alle drie de strategieën, zowel het jaarprofiel (links) als het gemiddelde dagprofiel (rechts) worden weergegeven.

Conclusies

Laadparken kunnen sterk worden geoptimaliseerd door middel van slim laden. In eerste instantie zorgt het slim laden voor een grotere laadcapaciteit (met minder aansluitcapaciteit kunnen meer wagens worden geladen), maar kan het ook zorgen voor sterke reducties van de elektriciteitsfactuur. Hiervoor werden 3 belangrijke basis strategieën bekeken: piekbeperving, zelfconsumptie en dynamische tarieven.

Piekbeperving blijkt veruit de lucratiefste strategie om op in te zetten. Het sterke piekgedrag van een laadpark kan worden vermeden door het verbruik meer te verplaatsen in de tijd. A la limite kan zo met de verplaatsing van 1 kW tot €28 worden bespaard, oftewel €112/kWh. Dit kan door de jaarpiek te verlagen waardoor ook een maandpiek zal verlagen. (naarmate men meer aan piekbeperving doet, daalt dit getal drastisch doordat er steeds meer energie dient verplaatst te worden). Dit is veruit de sterkste flexibiliteitsprikkel die tot op heden bestaat. Ter vergelijking, de hoogste waarde die de Belpex aannam tussen 2018 en 2023, is €0,871/kWh.

Toch kan bijkomend inzetten op deze dynamische tarieven wel lucratief zijn. Zo schiet er ook na het piekbeperving namelijk nog veel flexibiliteit over om in te zetten op dynamische tarieven. Het blijkt wel zo dat elke ambitieuzere instelwaarde van de piekbeperving threshold, zorgt voor meer winst dan een bepaalde hoeveelheid capaciteit vrij te houden om aan dynamische tarieven te doen. Piekbeperving krijgt dus in alle gevallen de prioriteit, tenminste met de huidige prijzen.

3. Impact van de laadinfrastructuur op de netkwaliteit

Introductie

Elke gemeten elektrische grootte is het resultaat van een complexe interactie tussen elektrische apparatuur en de omgeving waarin deze functioneert, namelijk het elektrische netwerk. Om een bruikbare analyse te maken van de impact van elektrische voertuigen op het netwerk, is het van essentieel belang zowel de kwantitatieve parameters als de eigenschappen van de gebruikte apparatuur te begrijpen en te analyseren. In de volgende sectie worden de laadpaalstandaarden toegelicht. Daarna volgt een korte uiteenzetting over Power Quality. Vervolgens worden de uitgevoerde metingen van de Casestudie: laadpark Wilgenveld beschreven en de verkregen resultaten gepresenteerd.

Technologie

In dit onderdeel wordt de standaardisering van de laadinfrastructuur toegelicht. De standaardisatie van laadmodi en stekkertypes zijn beschreven in respectievelijk de IEC 61851-1 en IEC 62196. Eerst worden de verschillende laadmodi besproken waarna een beschrijving van de stekkertypes volgt. Tenslotte worden de besproken standaarden samengevat in.

Laadmodi

Momenteel bestaan er vier laadmodi. Het laden van het voertuig van mode één tot en met drie gebeurt door de omvormer van het voertuig en wordt AC-laden genoemd. Mode vier wordt ook wel DC-laden genoemd en hierbij is de elektronica in de laadpaal verantwoordelijk voor de AC/DC omzetting. Hieronder volgt een meer uitgebreide beschrijving van deze modi.

Bij Mode een wordt standaard huishoudelijk stopcontact gebruikt (enkelfasig 230 V, 16 A). Hierbij laadt de wagen op aan maximaal 2,3 kW (enkelfasig 230V, 10 A). In deze laadmodus worden geen additionele beschermingsmaatregelen voorzien, waardoor deze modus uit veiligheidsoverwegingen in de praktijk nauwelijks wordt gebruikt.

Mode 2 voegt een In-Cable Control Box/In-Cable Control- and Protecting Device toe aan de standaardopstelling als extra beveiliging. Deze modus is geschikt voor thuisladen en levert vermogens van 3,7 kW (enkelfasig 230V, 16A) tot 7,4kW (enkelfasig 230V, 32A). Mode 2 wordt voornamelijk geïnstalleerd bij particulieren.

Bij mode 3 Deze laadmodus maakt gebruik van speciale laadpalen of wallboxen en biedt vermogens van 11kW (driefasig 230V, 16A) tot 22 kW (driefasig 230V, 32A) aan. Dankzij een Control Pilot-signaal kunnen voertuigen communiceren met het laadstation, wat slimme laadoplossingen mogelijk maakt. Mode 3 de standaard geworden voor publieke en semi-publieke laadpalen.

Mode 4 is ontworpen voor snelle laadbeurten, waarbij vermogens tot 350 kW kunnen worden geleverd. Hierbij vindt de omzetting van wisselstroom naar gelijkstroom plaats in het laadstation, waardoor voertuigen in korte tijd een grote hoeveelheid energie kunnen laden. Daarnaast biedt mode 4 de mogelijkheid tot Vehicle-to-grid.

Stekkertypes

Internationaal worden de volgende stekkertypes gebruikt:

Power Quality

Inleiding

De opkomst van elektrische voertuigen brengt ingrijpende veranderingen teweeg in het energielandschap. Elektrische voertuigen gebruiken lithium-ion batterijen die opgeladen worden met gelijkstroom, wat een omzetting vereist van de gedistribueerde wisselstroom naar gelijkstroom. Deze omzetting introduceert op grote schaal niet-lineaire belastingen op het elektriciteitsnet. Het laadvermogen van dergelijke systemen varieert van 3,7 kW tot meer dan 150 kW, waarbij het energieverbruik per laadbeurt kan oplopen tot meer dan 100 kWh.

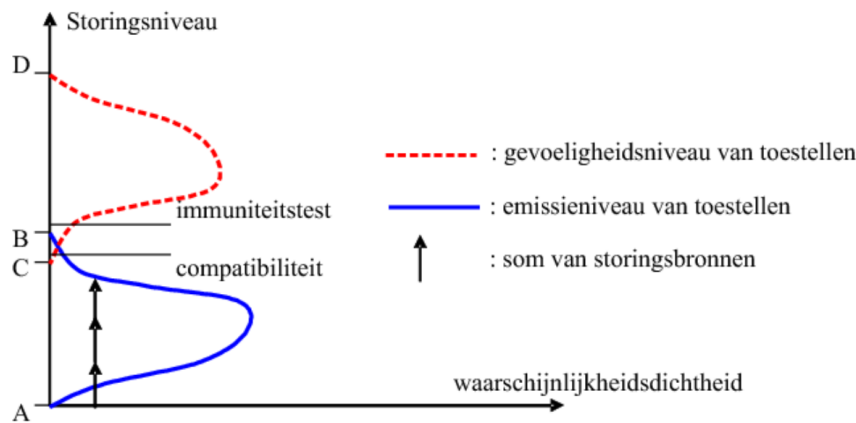
Historisch gezien bestonden elektrische verbruikers voornamelijk uit passieve componenten die zich volgens de wet van Ohm gedragen. Minder recente netten en beveiligingssystemen zijn niet ontworpen om met deze nieuwe realiteit om te gaan. Als gevolg kunnen er problemen ontstaan in de kwaliteit van het geleverd vermogen door het net of met andere woorden de Power Quality. In dit deel wordt een analyse gepresenteerd van de impact van het laden van elektrische voertuigen op de Power Quality van het elektriciteitsnet.

Definitie

Power Quality is een omvangrijk begrip, maar het kan worden samengevat tot het volgende concept: “Elke variatie van de elektrische voeding die slechte werking of beschadiging van de uitrusting kan tot gevolg hebben.” Het ideale voedingsnet heeft de volgende eigenschappen: Het is 100% van de tijd beschikbaar. De spanning en frequentie van het bevindt zich altijd tussen de geldende toleranties. Het signaal is daarbij zuiver sinusvormig en het systeem is perfect evenwichtig en symmetrisch.

De mate waarin een net mag afwijken hangt af van de toleranties die door de gebruiker toegestaan worden m.a.w. de immuniteit van de andere verbruikers. Stoorproblemen in een toestel ontstaan wanneer het emissieniveau het susceptibiliteits- of gevoeligheidsniveau overtreft. Een apparaat moet enerzijds zelf weinig ontoelaatbare storing produceren: lage elektromagnetische emissie en anderzijds storingsvrij kunnen functioneren: hoge elektromagnetische susceptibiliteit. Dit concept wordt principieel weergegeven op Figuur 24.

Storingen kunnen binnendringen via de elektrische voeding. Door de in-en uitgangen van elektrische apparatuur of door instraling. Een storing kan impact hebben op de spanning, de frequentie en de golfvorm van het signaal. Hieronder volgt een opsomming van de enkele mogelijks voorkomende Power Quality problemen bij elektrische voertuigen.



Figuur 24: Compatibiliteit tussen verschillende toestellen

1. Harmonische distorsie: Niet-lineaire verbruikers zorgen voor een vervormd stroombeeld. Harmonische bestaan uit reactief vermogen en veroorzaken extra warmteverliezen in transformatoren en kabels, wat kan leiden tot vroegtijdige slijtage. In het volgende onderdeel wordt harmonische distorsie uitgebreid besproken.
2. Spanningsdips en -stijgingen: Het hoge energieverbruik bij het laden van elektrische voertuigen, vooral bij snel laadstations, kan spanningsdalingen of schommelingen veroorzaken. Dit kan leiden tot knipperende verlichting, storingen in apparatuur en problemen in het bredere distributienetwerk. Daarnaast dient apparaat bij een lagere spanning meer stroom te onttrekken, hierbij nemen de jouleverliezen kwadratisch met de stroom toe
3. Spanningsonbalans: In driefasige systemen moet de spanning over de fasen gelijkmatig verdeeld zijn om een goede werking apparatuur te waarborgen. Onbalans gaat gepaard met verhoogde verliezen en verminderde efficiëntie van elektrische apparaten.
4. Storing en Ruis: Elektromagnetische interferentie kunnen de werking van elektronische apparaten verstoren. Het beïnvloedt met name communicatie- en besturingssystemen binnen het netwerk en kan leiden tot ongewenst gedrag van apparatuur.

Wetgevend kader

Voor een correcte werking van het net draagt zowel de netwerkkoperator, de verbruikers als de producent van de apparaten een gedeelde verantwoordelijkheid. De netwerkkoperator moet zorgen voor de kwaliteit van de spanning en dient te allen tijde te voldoen aan de eisen die zijn vastgelegd in de EN50160-norm. Deze norm specificeert parameters zoals frequentie, spanningsvariaties en harmonische vervorming, waarmee de kwaliteit van de geleverde elektriciteit wordt gewaarborgd.

De verbruiker is verplicht het elektrische systeem uit te baten in overeenstemming met het AREI. De producent van elektrische toestellen moet ervoor zorgen dat deze voldoen aan de vereisten op het gebied van emissie en immuniteit. De generieke emissienormen zijn vastgelegd in de IEC 61000-3-x-reeks (met $x = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13 \dots$), die onder andere harmonische emissies en flicker specificeren. Wat betreft immuniteit worden de vereisten gespecificeerd in IEC 61000-4-11 en EN 61000-4-34, die respectievelijk de immuniteit van huishoudelijke en commerciële apparatuur tegen spanningsdips, -onderbrekingen en flikkeringen behandelt. Voor industriële apparatuur gelden de normen zoals EN 50082-2 die de elektromagnetische immuniteit in industriële omgevingen bepaald.

Harmonische

Harmonische analyse is een essentieel hulpmiddel voor het beoordelen van Power Quality in elektrische netwerken. In dit onderdeel wordt het concept van harmonische toegelicht in combinatie met de een uitgebreidere classificatie van de verschillende harmonische. Dit onderdeel zal minder technische onderlegde lezers in staat stellen om de bespreking van de casestudies te volgen.

Definitie

Het frequentiespectrum van een signaal wordt geanalyseerd met behulp van Fourieranalyse. Voor een Fourieranalyse dient het signaal periodiek zijn¹. Dit houdt in dat deze analyse voornamelijk wordt gebruikt voor stationaire signalen. Volgens de Fourier-analyse kan elk signaal die aan de voorwaarden voldoet worden geanalyseerd met behulp van een de Fourier-reeks of -transformatie om de frequentiecomponenten bloot te leggen. Deze frequentiecomponenten worden de harmonischen genoemd. De definitie van Fourieranalyse wordt weergegeven in de onderstaande vergelijking:

$$u(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin k \omega t + B_k \cos k \omega t$$

Waarbij de termen A_0 , A_k , B_k gelijk zijn aan:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot d\omega t$$

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot \sin k \omega t \cdot d\omega t$$

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot \cos k \omega t \cdot d\omega t$$

De mate van harmonische vervuiling in een stroom wordt gekwantificeerd door de Total Harmonic Distortion (THD). De THD wordt berekend door de som van alle harmonische componenten in het kwadraat, de Total Harmonic Content (THC), te delen door de fundamentele stroom I_1 .

$$THD_I = \frac{THC}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1}$$

In tegenstelling tot bij spanningsvervorming, domineert bij stroomvervorming de absolute grootte van de harmonische die vloeit om de impact te evalueren en niet de afwijking ten opzichte van de ideale sinusoidale. Om dit te kwantificeren wordt de Total Demand Distortion (TDD) gebruikt. In tegenstelling tot de THD, wordt de THC ten opzichte van de nominale stroom die door een apparaat mag vloeien berekend (I_{max}).

$$TDD = \frac{THC}{I_{max}}$$

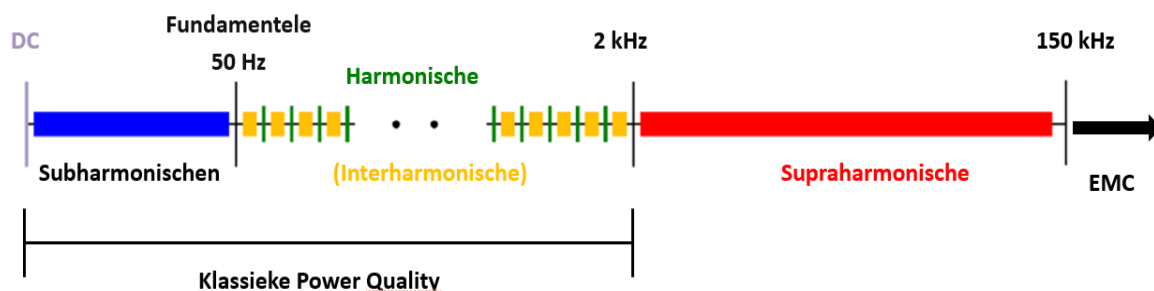
¹ Daarnaast dient het signaal absoluut integreerbaar te zijn (integraal convergeert), en mag het signaal slechts een eindig aantal discontinuïteiten, maxima, en minima bevatten.

Classificatie van harmonischen

Binnen Power Quality wordt een onderscheid gemaakt tussen twee gebieden: het laagfrequente en het hoogfrequente gebied. Het laagfrequente gebied strekt zich uit van 0 tot 2 kHz en omvat de traditionele Power Quality. Over het algemeen neemt de amplitude af naarmate de frequentie toeneemt. Om deze reden worden volgens de IEC61000-4-30-norm uitsluitend de eerste 40 harmonischen in rekening gebracht.

Het hoogfrequente PQ-gebied, wordt omschreven als het gebied tussen het traditionele PQ-gebied en het gebied voor elektromagnetische compatibiliteit. Deze signalen hebben een frequentie die tussen 2 kHz en 150 kHz. Deze emissies ontstaan vaak door de werking van vermogenselektronica en worden niet gereguleerd door harmonische emissienormen, aangezien deze zich meestal richten op frequenties onder 2 kHz. De emissies van deze frequenties zijn afhankelijk van de netimpedantie en achtergrondemissies en kunnen communicatie zoals power-line communication in dezelfde frequentieband kunnen verstoren, wat de betrouwbaarheid van netwerksystemen kan beïnvloeden.

Harmonischen kunnen verder worden onderverdeeld in. De voornaamste categorieën zijn subharmonischen, even harmonischen, oneven harmonischen en interharmonischen.



Figuur 25: Onderverdeling van harmonische volgens frequentie

Subharmonischen omvatten alle signalen met een frequentie tussen 0 Hz en 50 Hz. Deze frequenties ontstaan vaak als gevolg van apparaten die werken met variabele snelheden, zoals windturbines, sommige typen omvormers of andere apparatuur die pulsbreedtemodulatie toepast. Subharmonischen vallen buiten het traditionele harmonische spectrum en worden niet altijd meegenomen in standaard PQ-analyses..

Even harmonischen zijn zeldzaam in goed uitgebalanceerde elektrische systemen, omdat de meeste bronnen van harmonische vervorming, zoals driefasige gelijkrichters, voornamelijk oneven harmonischen genereren. Het voorkomen van even harmonischen kan wijzen op asymmetrie in het systeem. De aanwezigheid van even harmonischen is visueel waar te nemen door een afwijking bij de positieve alternantie van het signaal ten opzichte van de negatieve alternantie.

Interharmonischen zijn signalen die een frequentie hebben niet exact een veelvoud zijn van de fundamentele frequentie. Een bekend voorbeeld hiervan is het CAB-signaal dat door distributienetbeheerders wordt gebruikt om systemen zoals straatverlichting te bedienen of om elektriciteitsmeters automatisch te schakelen tussen dag- en nachttarief.

Harmonische emissie

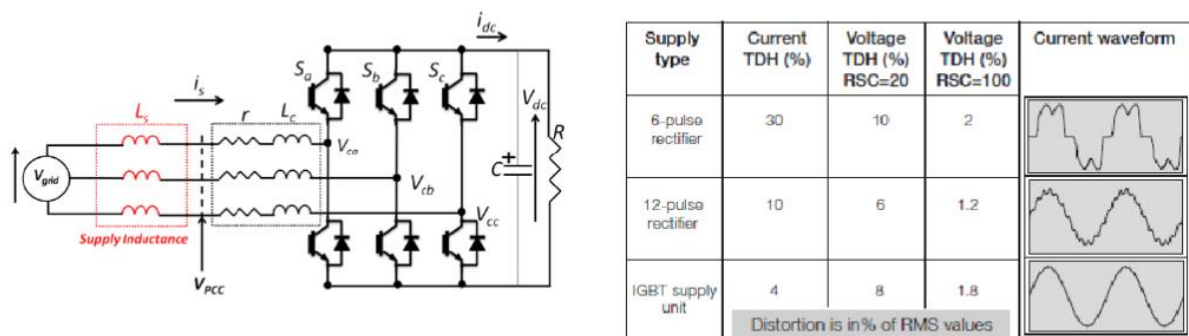
Harmonische emissie ontstaat door niet-lineaire verbruikers. Door de interactie van niet-lineaire verbruikers met het voedingsnetwerk kan deze harmonische vervorming zich verspreiden via de impedantie van het systeem. In dit onderdeel worden de oorzaken van harmonische emissies op omvormerniveau besproken, evenals hun interactie op netwerkniveau.

Harmonische stroomemissie

In het laagfrequente spectrum vallen de emissies van "line-commutated" omvormers. Bij deze omvormers, zoals de B2/B6-brugomvormers, bepaalt het spanningsverloop van het voedingsnet de schakelvolgorde van de schakelaars. Dit betekent dat de schakelmomenten volledig afhankelijk zijn van de netspanning, waardoor deze omvormers relatief eenvoudig zijn qua ontwerp en besturing. Een B6-brugomvormer kan een totale harmonische vervorming (THD(i)) van wel 30% bereiken, wat aanzienlijk is en de netkwaliteit negatief kan beïnvloeden.

Om de harmonische emissies naar het net te beperken, wordt doorgaans een smoorspoel toegevoegd aan de ingang van de omvormer. De inductiviteit van deze smoorspoel zorgt ervoor dat hoogfrequente signalen een hoge impedantie ervaren. Hierdoor wordt de harmonische spanningsval over de spoel aanzienlijk vergroot, wat resulteert in een reductie van harmonische spanningsemissies naar het net toe. Deze methode beperkt de impact van de harmonische stromen op andere apparaten in het netwerk. Het gebruik van "line-commutated" omvormers blijft populair vanwege hun eenvoud en lagere kosten, vooral in toepassingen zoals eenvoudige gelijkrichters of oudere industriële installaties. Doordat er in moderne netwerken met strengere eisen aan Power Quality en toenemende integratie van gevoelige apparatuur, worden deze omvormers steeds vaker vervangen of gecombineerd met geavanceerdere technologieën om de harmonische belasting op het net te minimaliseren.

Een alternatief zijn "self-commutated" omvormers. In tegenstelling tot "line-commutated" omvormers, waarbij de schakelmomenten afhankelijk zijn van de netspanning, werken "self-commutated" omvormers onafhankelijk en worden ze aangestuurd door externe besturingselektronica. Deze omvormers hebben een actieve ingang en maken gebruik van pulsbreedtemodulatie om de schakelaars (bijvoorbeeld IGBT's) met een hoge frequentie te sturen. Dit leidt tot een aanzienlijke reductie van laagfrequente harmonische emissies, vaak tot onder de 5% THD(i). Hoewel de laagfrequente emissies sterk worden verminderd, introduceren self-commutated omvormers hoogfrequente harmonische componenten, beter bekend als supraharmonischen. De hoge schakelfrequentie van pulsbreedtemodulatie genereert supraharmonische stromen die door kabels en componenten in het netwerk worden verspreid. Dit kan leiden tot interferentie met andere apparatuur, verhoogde thermische verliezen in transformatoren en kabels, en verstoring van gevoelige communicatiesignalen.



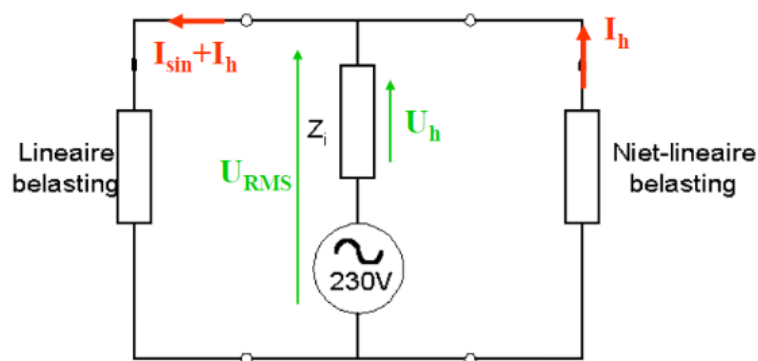
Figuur 26 Harmonische distorsie door line-commutated omvormer en active-front-end

Primaire en secundaire emissie

Doorgaans wordt er een onderscheid gemaakt tussen primaire emissie en secundaire emissie. Primaire emissie verwijst naar de harmonische stromen die rechtstreeks door een niet-lineaire verbruiker in het netwerk worden geïnjecteerd. Secundaire emissie ontstaat door de interactie van deze primaire harmonischen met de frequentieafhankelijke impedantie van het voedingssysteem, wat leidt tot een complexe spanningsvervorming die andere apparaten beïnvloedt.

Harmonische stromen die door niet-lineaire verbruikers worden gegenereerd, veroorzaken spanningsvallen over de totale impedantie van het voedingssysteem. Deze totale impedantie bestaat uit de interne impedantie van de stroombron en de impedantie van de kabels en andere componenten in het netwerk. Aangezien deze impedantie frequentieafhankelijk is, veroorzaken harmonische stromen een spanningsvervorming die afhankelijk is van de frequentie. Als gevolg ontvangen alle aangesloten apparaten, inclusief de lineaire verbruikers, een vervormde voedingsspanning. Deze vervormde spanning leidt er vervolgens toe dat ook de stroom die door lineaire verbruikers ($I_{\sin} + I_h$) wordt afgenomen niet-lineair is, wat de belasting op het netwerk verder vergroot. Het ontstaan van onttrokken harmonische stromen door een lineaire belasting wordt weergegeven op Figuur 27.

De verspreiding van deze emissies heeft belangrijke gevolgen voor de kwaliteit van de voedingsspanning in netwerken. Niet-lineaire apparaten dragen niet alleen bij aan de vervorming, maar absorberen ook harmonische emissies van andere apparaten, wat hun eigen prestaties kan beïnvloeden.



Figuur 27: Spanningsvervorming door niet-lineaire belasting

Overige Interacties tussen laadtoestellen

In de volgende onderdelen worden twee interacties tussen naburige elektrische laders besproken. De twee interacties kenmerken zich in het verschil van de schakelfrequentie tussen de elektrische laders. De eerste interactie is frequency beating, en ontstaat door twee naburige gelijkaardige elektrische laders met een kleine deviatie in de schakelfrequentie. De tweede interactie heet intermodulatie distorsie, en komt voor bij toestellen waarvan de schakelfrequentie sterk verschilt [1, 2].

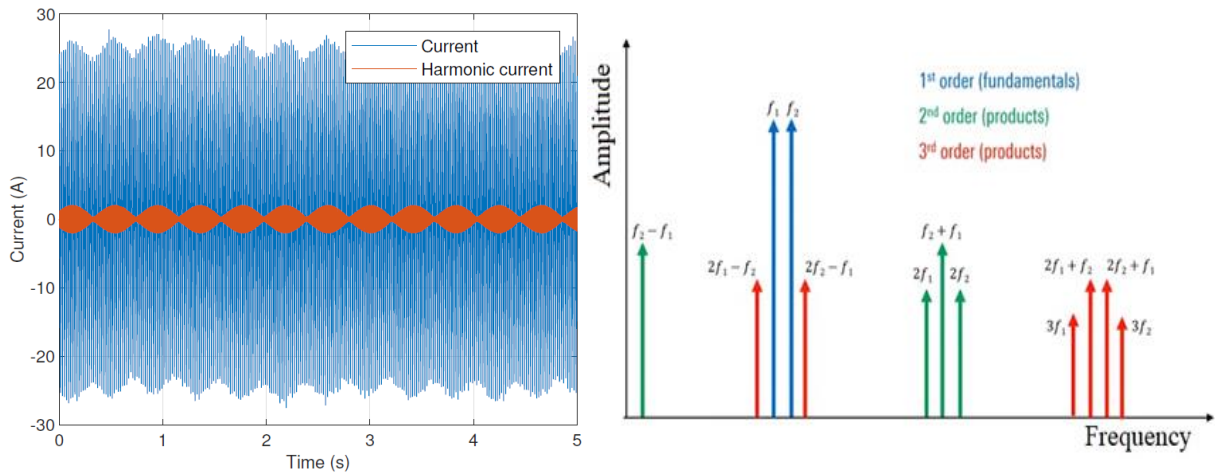
Wanneer twee identieke naburige omvormers dicht bij elkaar staan kan frequency beating ontstaan. Door het productieproces zal de schakelfrequentie van identieke omvormers, alsnog licht verschillen. Wanneer deze deviatie bijvoorbeeld $< 1\%$ bedraagt, dan zal als de omvormer A schakelt aan bijvoorbeeld 10,000 Hz, omvormer B schakelen aan 10 002,4 Hz. Deze twee golfvormen met een licht verschillende frequentie zullen afwisselend zorgen voor constructieve en destructieve interferentie. Dit zorgt voor een "beating", waarbij de frequentie van het kloppen gelijk is aan het verschil van de frequenties van de omvormers.

$$f_{\text{beat}} = |f_A - f_B| = |f_{\Delta}| = \frac{1}{t_{\text{beat}}}$$

In bovenstaand voorbeeld zal klopfrequentie gelijk zijn aan:

$$f_{\text{beat}} = |10\,000 - 10\,002,4| = 2,4\text{ Hz}$$

Frequency beating is een significante bron van subharmonischen. Op onderstaande figuur is dit fenomeen te zien in de praktijk. Hierbij is er bij het meten van de stroom een rode sub harmonische te zien die oscilleert tussen de -2 A en de 2 A



Figuur 28: Frequency beating bij twee naburige omvormers en intermodulatie

Een andere interactie tussen schakelfrequenties van apparaten is intermodulatievorming. Intermodulatie treedt op wanneer twee apparaten met verschillende schakelfrequenties van aanzienlijke amplitude dicht bij elkaar worden aangesloten. Intermodulatie is een ander type vervorming dan frequentiebeating omdat de frequentie normaal gesproken tussen enkele kHz tot tientallen kHz ligt, wat resulteert in hoogfrequente component. Intermodulatie is bekend uit de communicatietheorie, maar is ook (onbedoeld) aanwezig door de schakelartefacten van verschillende omvormers.

De tweede-orde intermodulatieproducten kunnen worden berekend met behulp van de volgende formule:

$$f_{2e\text{ orde}} = |f_1 \pm f_2|$$

De derde-orde intermodulatieproducten worden als volgt berekend:

$$f_{3e\text{ orde}} = |2f_1 \pm f_2| \text{ en } |2f_2 \pm f_1|$$

De intermodulatieproducten kunnen in theorie tot oneindig doorgaan. Elk niet-lineair systeem kan hogere-orde harmonische en intermodulatieproducten genereren die voortvloeien uit de fundamentele frequenties die door het systeem worden verwerkt. In de praktijk worden de hogere-orde intermodulatieproducten zwakker naarmate de orde toeneemt.

Standaard PQ-analyzers zoals de Fluke 435-II meten tot de 50^e harmonische. Het meten van deze verschijnselen met dergelijke stroomgroottes vraagt gespecialiseerde meetapparatuur. In de hier opvolgende casestudie worden klassieke Power-Quality parameters onderzocht. Als gevolg zal in de hier opvolgende case het effect van frequency beating en intermodulatie distorsie niet worden onderzocht

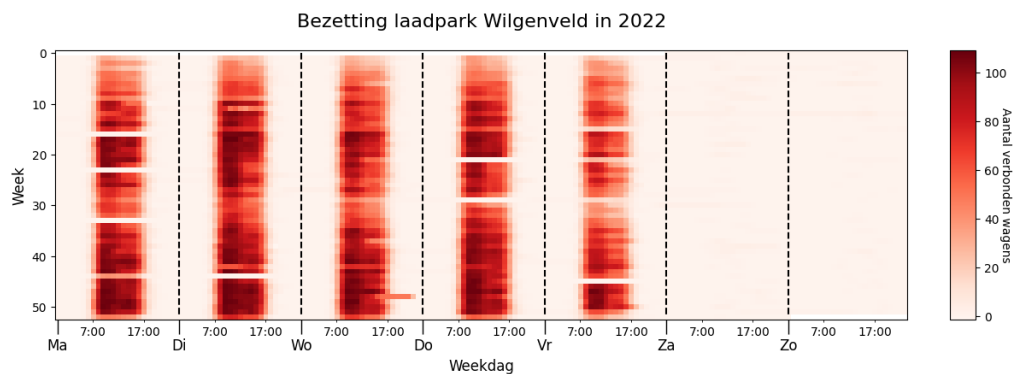
Casestudie: EV-parking Wilgenveld (Colruyt)

Inleiding

In deze casestudie wordt het gebruik en de netkwaliteit van Laadpark Wilgenveld in Halle onderzocht. Tot 2022 was Wilgenveld met 108 AC-laadpunten en één DC-laadpunt van 60 kW het grootste laadpark van België. Elke AC-laadpaal beschikt over twee laadpunten die elk gelijktijdig 22 kW kunnen leveren. Het laadpark wordt, op acht AC-laadpunten na, gevoed door een 1600 kVA-transformatoren. Het eerste deel van deze casestudy bevat een analyse van de laadbeurtsessiesdata, aangeleverd door Colruyt. Het tweede deel bespreekt de Power Quality-metingen uitgevoerd door de UGent.

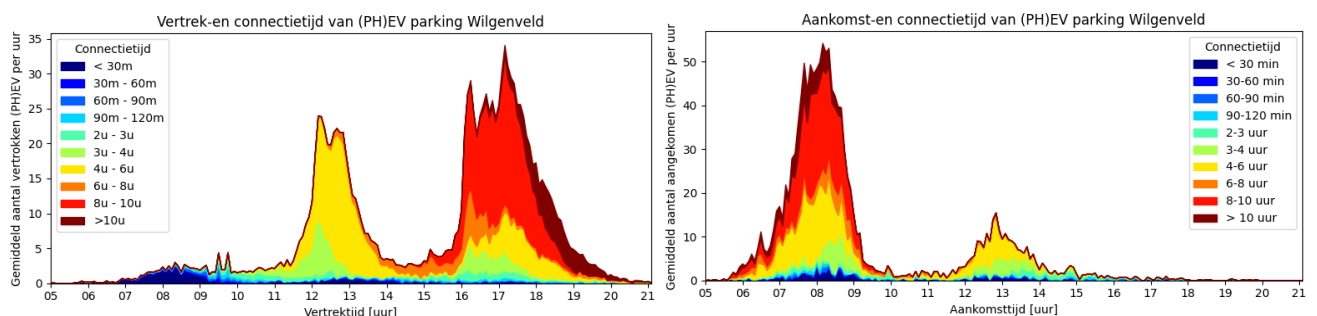
Analyse van de laadbeurtsessies

In Figuur 29 wordt de bezetting van het laadpark gedurende 2022 weergegeven. Hieruit blijkt dat de meeste voertuigen zijn aangesloten tussen 7:00 en 17:00. Daarnaast wordt regelmatig de maximale bezetting van het laadpark bereikt rond de middag. In het weekend en op feestdagen wordt het laadpark amper benut. Verder valt op dat de bezetting van het laadpark verhoogt naarmate het eind van het jaar nadert.



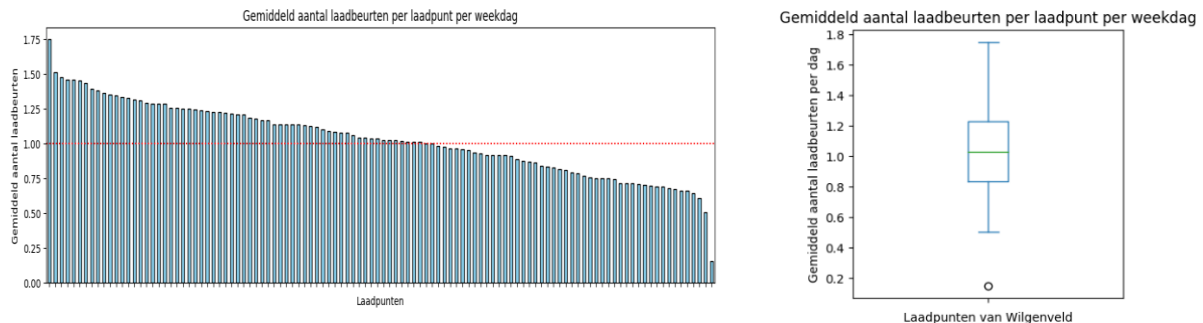
Figuur 29: Bezetting van laadpark Wilgenveld gedurende 2022

In Figuur 30 worden respectievelijk de aankomst- en connectietijd, en de vertrek- en connectietijd weergegeven. De grafieken illustreren dat voertuigen die vroeg aankomen doorgaans het langst blijven staan, terwijl voertuigen die laat vertrekken, over het algemeen het langst aangesloten zijn geweest. Verder valt op dat relatief veel voertuigen rond het middaguur opnieuw worden aangesloten na een eerdere verbinding. Dit gedrag kan worden toegeschreven aan de regelgeving van Colruyt, die voorschrijft dat voertuigen maximaal vier uur aangesloten mogen blijven.



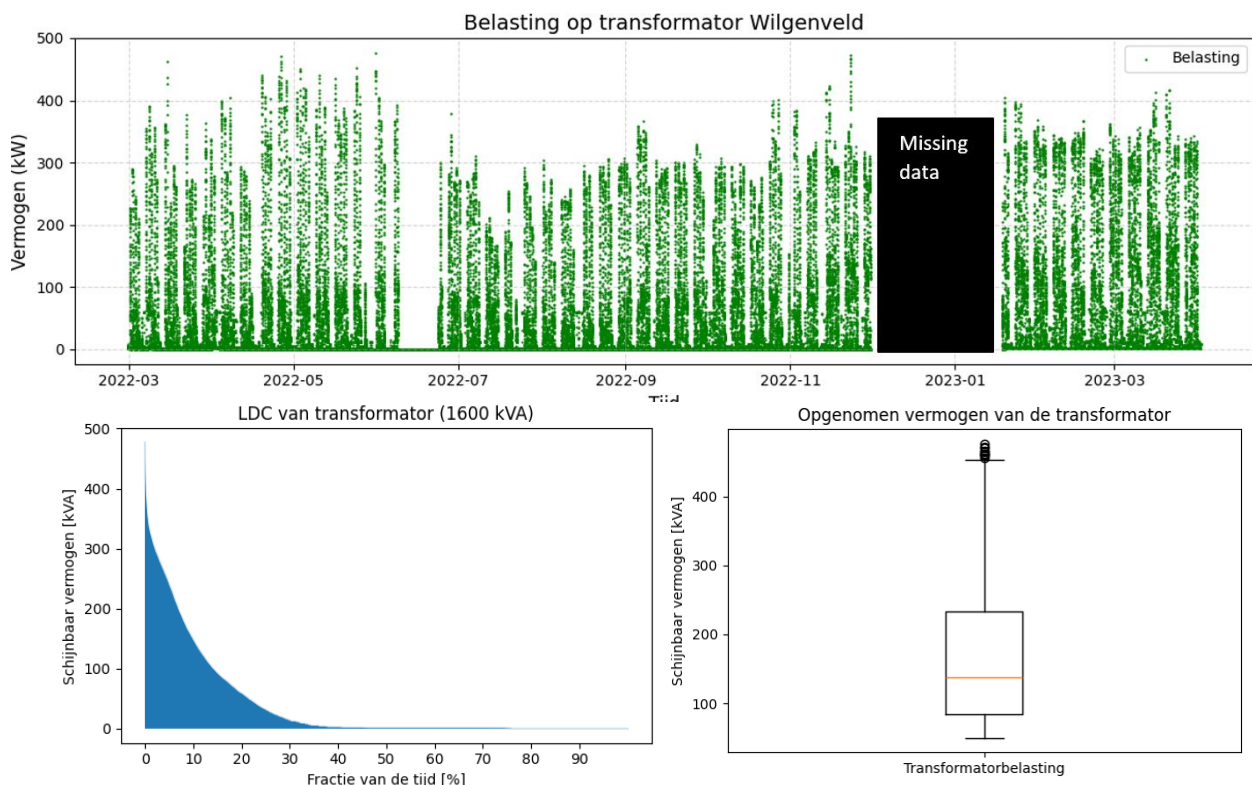
Figuur 30: Aankomst-en vertrekverdeling met daarbijhorende connectietijd

Elk laadpunt wordt intensief gebruikt, met meer dan 50% van de laadpunten die dagelijks meer dan één laadbeurt uitvoert. Figuur 31 (links) toont het gemiddelde aantal laadbeurten per laadpunt per werkdag, terwijl Figuur 31 (rechts) een boxplot geeft van het gemiddeld aantal laadbeurten per laadpunt voor iedere dag van het jaar.



Figuur 31: Dagelijkse benutting van de laadpalen

Ondanks het hoge aantal laadbeurten per dag wordt de transformator nauwelijks belast. Figuur 32 toont de analyse van de transformator, die minder dan 30% van de tijd wordt belast. Dit is logisch, aangezien het laadpark alleen op werkdagen en tussen 10:00 en 17:00 wordt gebruikt ($\frac{5}{7} \times \frac{10}{24} \approx 30\%$). De belasting piekt slechts kortstondig tot 30% van het nominale vermogen. Een transformator haalt het hoogste rendement bij 70% van zijn nominale belasting. Als gevolg is de transformator bij Colruyt momenteel sterk overgedimensioneerd.



Figuur 32: Belastingsgraad van de transformator

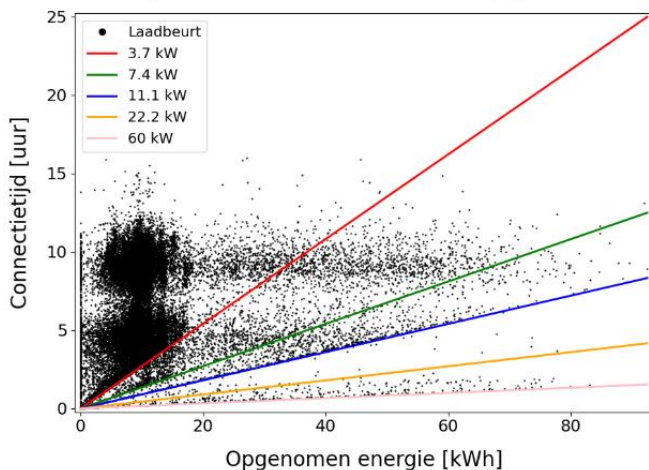
Een verklaring voor de lage belasting van de transformator is weergegeven op Figuur 34. Op deze figuur wordt de connectietijd van een (PH)EV weergegeven in functie van zijn opgenomen energie. De gekleurde lijnen geven weer hoeveel energie een (PH)EV maximaal zou kunnen opnemen voor een

bepaalde hoeveelheid tijd, bij een gegeven vermogen. De meeste laadbeurten bevinden zich sterk boven de rode lijn van 3.7 kW en nemen minder energie op dan 20 kWh. Uit deze data kunnen twee zaken worden afgeleid:

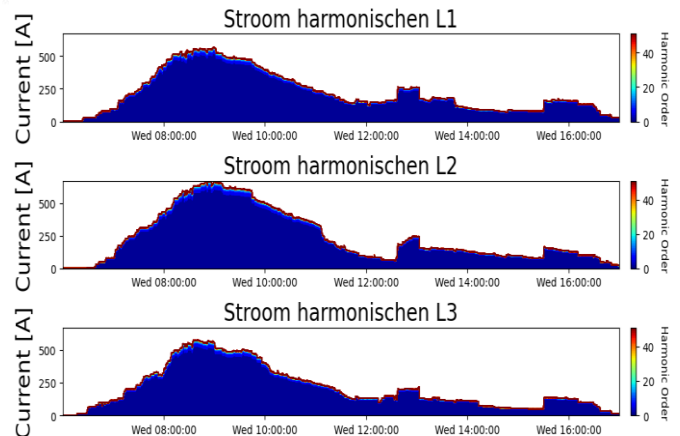
1. De meeste wagens die laden op dit laadpark zijn plug-in hybride.
2. Een hoog aantal laadpaalklevers.

De laadpunten worden met andere woorden niet optimaal gebruikt. Een volledige bezetting van het laadpark gaat momenteel gepaard met een suboptimale energieoverdracht.

Connectietijd van EV's in functie van de opgenomen energie



Figuur 34: Connectietijd van EV's en opgenomen energie



Figuur 33: Geleverde stroom door transformator

Analyse van de On-site metingen

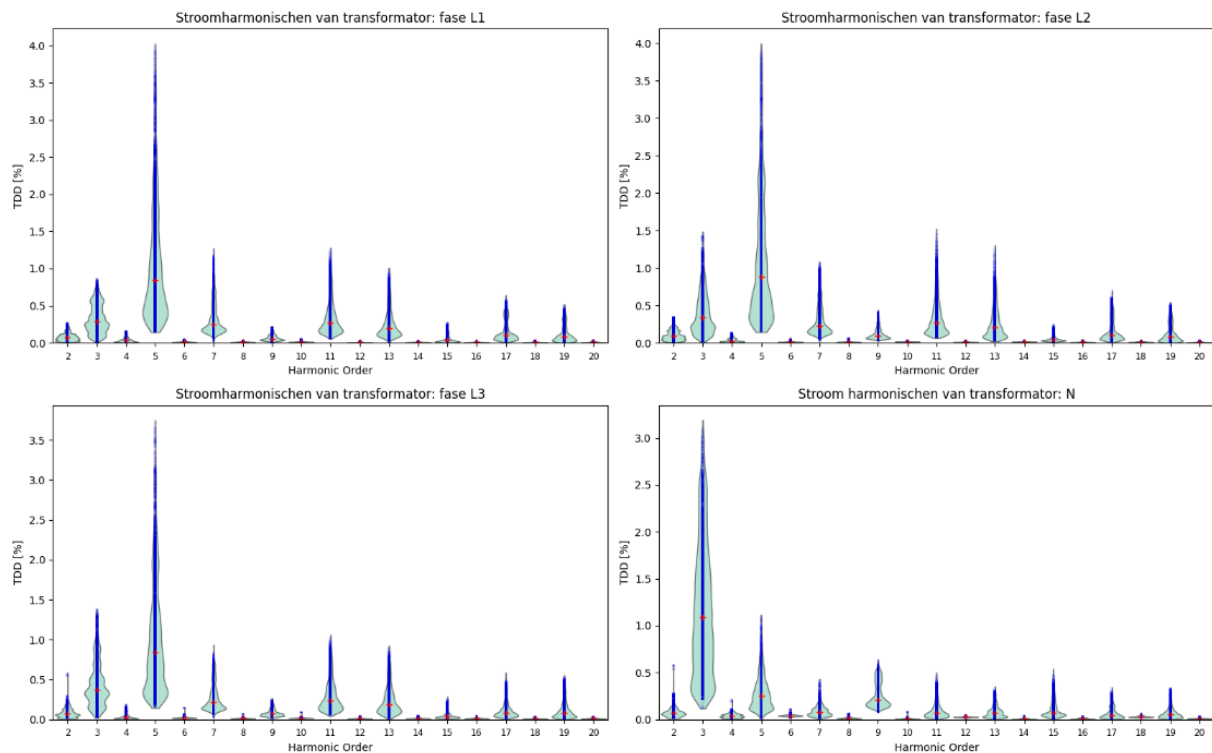
De impact van laadinfrastructuur op de netkwaliteit wordt sterk bepaald door lokale omstandigheden, zoals de omvormertopologie, het laadgedrag van elektrische voertuigen en parameters zoals spanningskwaliteit en netimpedantie. Deze factoren beïnvloeden elkaar vaak op complexe wijze, waardoor theoretische analyses niet toereikend zijn. Daarom werden tussen 10 juli 2024 en 25 juli 2023 vijf on-site Power Quality-metingen uitgevoerd met vier Fluke 430-II's. Hierbij worden de stroomharmonischen (50 Hz - 2500 Hz), spanningsharmonischen (50 Hz - 2500 Hz), actief vermogen, schijnbaar vermogen en reactief vermogen iedere 15 minuten gelogd. Metingen werden uitgevoerd op de secundaire zijde van de voedingstransformator (3f + N) en op een volledige laadpaal (3f + N). Door een kortsluiting kort na de installatie van de meetapparatuur, leverde deze laatste geen bruikbare data op. Tenslotte werden nog bij twee bijkomende AC-laadpalen metingen verricht, elk op de fase en de neutraal.

Metingen op de Transformator

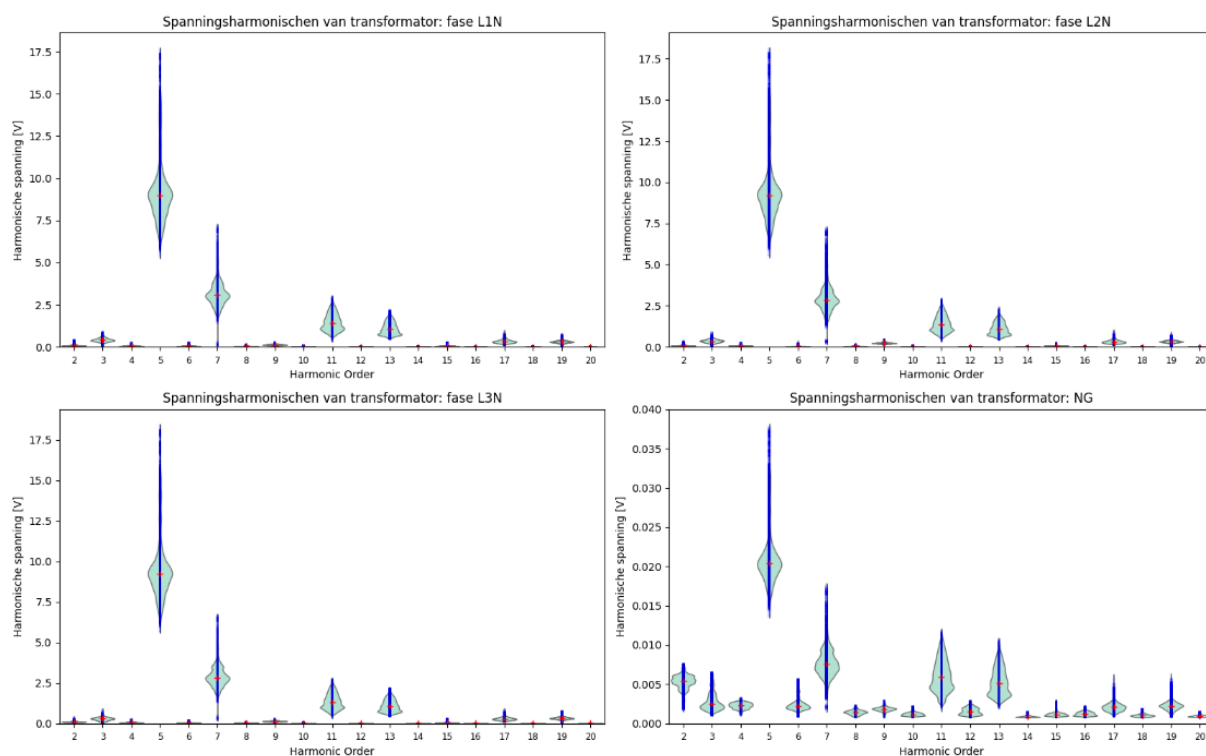
Figuur 33 toont de geleverde stromen op de fasen L1, L2 en L3 op de secundaire zijde van de transformator, gemeten op 12 juli 2023 tussen 10:00 en 17:00. Het hoogste vermogen wordt in de ochtend geleverd. De harmonische inhoud van deze stromen bevindt zich voornamelijk onder de 20e harmonische, wat de focus van verdere analyse bepaalt. Figuur 35 toont de geleverde stromen op de fasen L1, L2 en L3 op de secundaire zijde van de transformator, gemeten op 12 juli 2023 tussen 10:00 en 17:00. Het hoogste vermogen wordt in de ochtend geleverd. De harmonische inhoud van deze stromen bevindt zich voornamelijk onder de 20e harmonische, waardoor hierop verder wordt gefocust. Op onderstaande figuren worden de stroomharmonischen van alle fasestromen en de neutraal weergegeven in een violinplot. Uit de plot blijkt dat er een beperkte aanwezigheid is van even-orde harmonischen, wat wijst op asymmetrie in het elektrische systeem. Zoals verwacht neemt de

harmonische inhoud af naarmate de frequentie stijgt. In de fasestromen is de 5e harmonische duidelijk dominant. Deze component wordt nader verklaard in het kader van de metingen bij elektrische voertuigen.

Voor de stroomharmonischen in de neutraal is duidelijk zichtbaar dat de homopolaire componenten (met name de 3e orde harmonische) bijna driemaal zo groot zijn als die in de fasestromen. Dit benadrukt de significante invloed van derde-orde harmonischen in driefasige systemen met niet-lineaire belastingen.

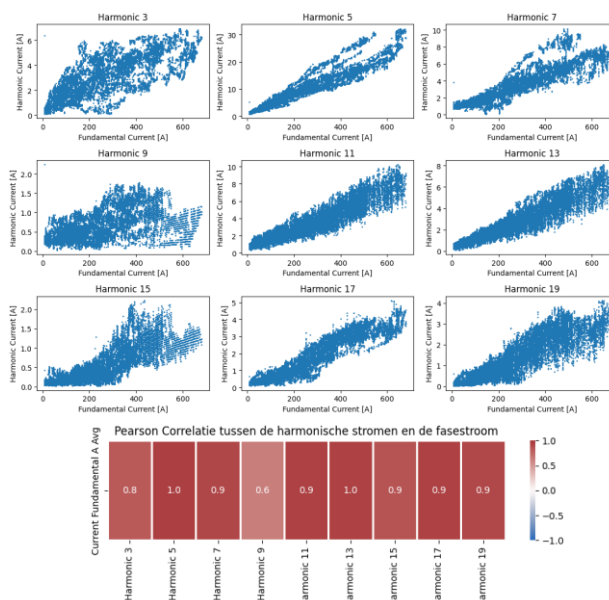


Figuur 35: Stroomharmonische aan de secundaire van de transformator



Figuur 36: Spanningsharmonischen aan de secundaire van de transformator

Op Figuur 37 is de grootte van de harmonische stroom weergegeven in functie van de fundamentele stroom. Hierbij valt een uitgesproken positieve correlatie op te merken voor alle harmonische. Voor alle harmonische stromen behalve de derde orde harmonische is er een quasilineair verband op te merken tussen enerzijds het overgedragen vermogen en de harmonische emissie.



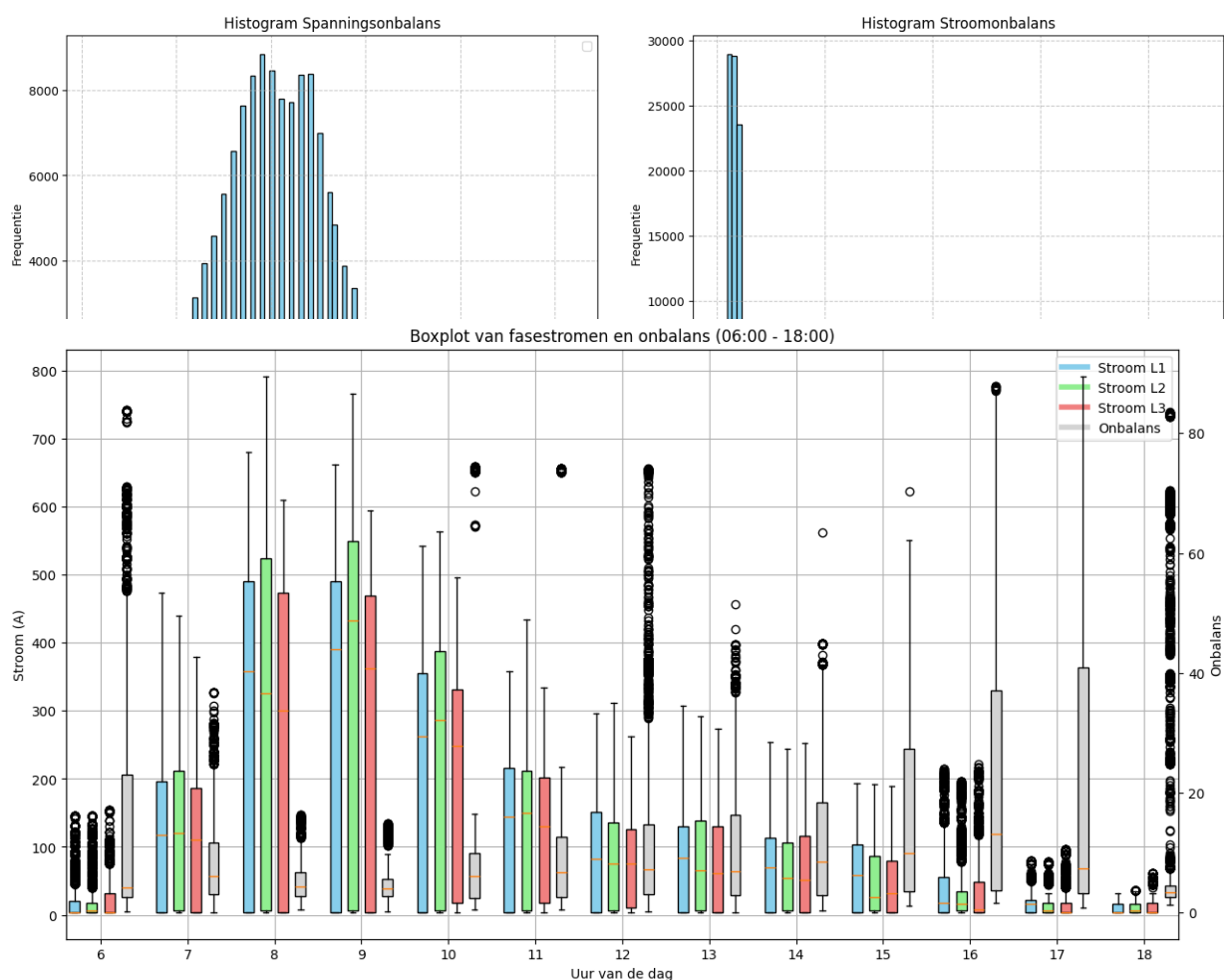
Figuur 37: Correlatie tussen harmonische stroom en fundamentele stroom bij de transformator

Spanningsonbalans wordt gedefinieerd volgens de IEC 61000-4-30 als:
$$\text{Unbalance } V_n = \frac{V_{\text{neg}}}{V_{\text{pos}}} \times 100\%$$

Hierbij is V_{neg} de negatieve-sequentiespanning en V_{pos} de positieve-sequentiespanning. Volgens de norm mag langdurige spanningsonbalans in laagspanningsinstallaties maximaal 2% bedragen. Op Figuur 38 is te zien dat de spanningsonbalans gemeten op de transformator maximaal 0,5% bedraagt. De elektrische installatie voldoet bijgevolg ruimschoots aan de norm. Op de rechterfiguur is de stroomonbalans te zien. Gedurende het merendeel van de tijd is er weinig stroombalans terug te vinden. Desondanks kan de stroomonbalans oplopen tot wel 80%. Er zijn twee redenen waarom dit niet gebeurt:

1. Stroomonbalans gebeurt voornamelijk wanneer een beperkt aantal wagens aan het opladen zijn zoals om 6 uur 's ochtends en vanaf 12 uur 's middags.
2. Het net is over gedimensioneerd waardoor de netimpedantie en de bijhorende spanningsval laag is.

Als gevolg kan de stroombalans procentueel groot, maar in absolute grootte klein, waardoor dit zich niet vertaalt tot een grote spanningsonbalans.



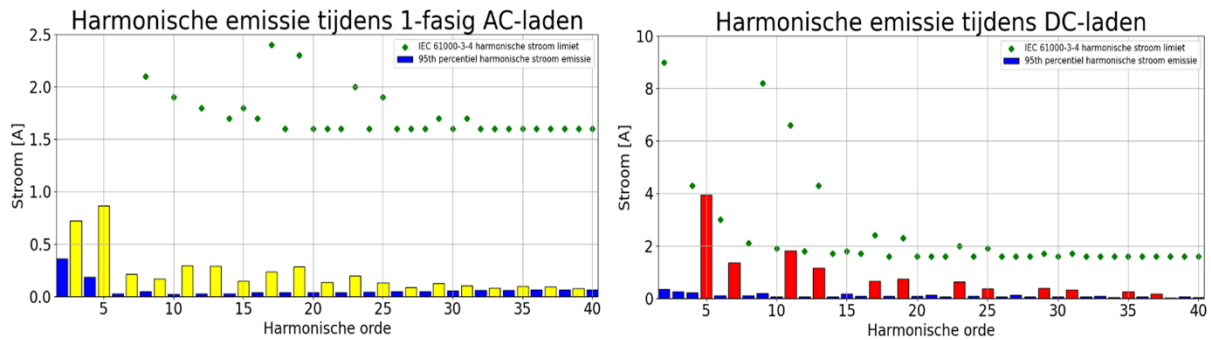
Figuur 39: Boxplot van de stromen door de secundaire van de transformator en de spanningsonbalans.

Laadbeurten

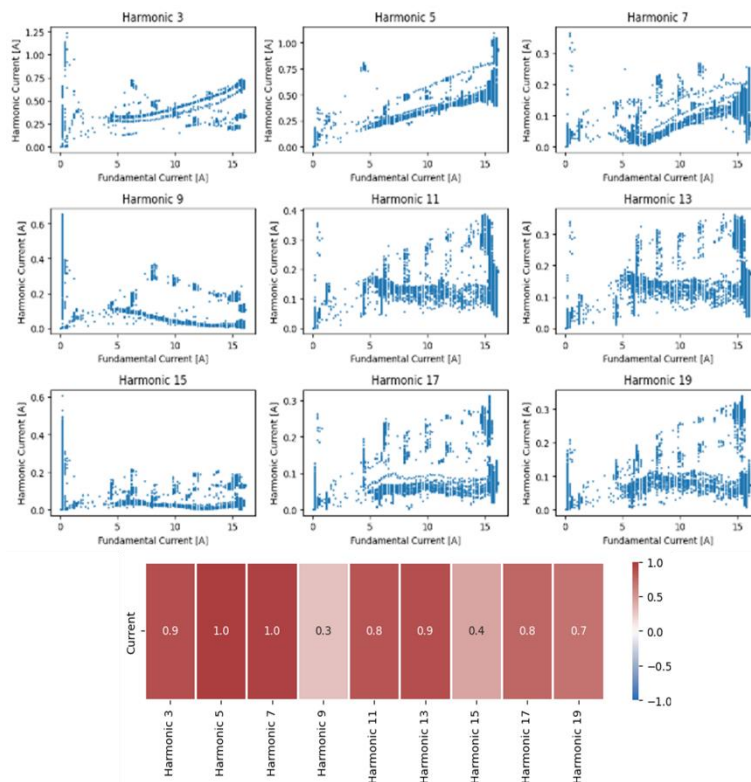
Bij AC-laden wordt de wisselstroom omgezet naar gelijkstroom door de on-board charger van het voertuig. In Figuur 40 wordt de 95%-percentiel harmonische stroomemissie getoond van laadbeurten met een vermogen van 3,7 kW (AC-laden) en 60 kW (DC-laden). Deze emissies worden vergeleken met de emissienormen uit IEC 61000-3-4, waaruit blijkt dat alle laadbeurten aan de norm voldoen.

De lage harmonische emissie wijst erop dat de laadbeurten gebruikmaken van omvormers met een active-front-end. Bij AC-laden domineren harmonischen van de orde $2n$ met $n \in \mathbb{N}^+$, terwijl bij DC-laden vooral harmonischen van de orde $6n$ met $n \in \mathbb{N}^+$ voorkomen. Aangezien de meeste laadbeurten in dit geval AC-laden betreffen, vertoont de totale harmonische emissie, gemeten op de transformator, een vergelijkbaar patroon als bij enkelfasig AC-laden.

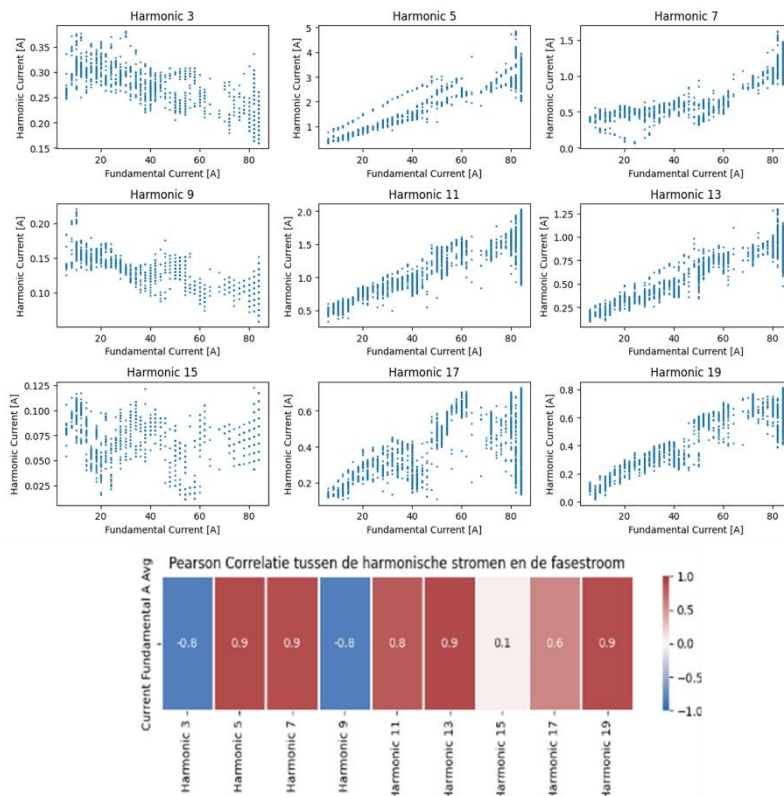
Verder is er een positieve correlatie op te merken tussen de grote van de fasestroom en de harmonische emissie, behalve voor de homopolaire componenten.



Figuur 40: Harmonische emissie tijdens AC- en DC-laden



Figuur 41: Correlatie tussen harmonische stroom en fundamentele stroom bij AC-laden



Figuur 42: Correlatie tussen harmonische stroom en fundamentele stroom bij DC-laden

4. Bedrijfszekere werking van beveiligingen

Inleiding

Dit werkpakket richt zich op de invloed van harmonischen, veroorzaakt door elektrische voertuigen op differentieelschakelaars. Differentieelschakelaars worden frequent gebruikt als beschermingsapparatuur in elektrische installaties. Bij een isolatiefout kan stroom via de aardgeleider of direct naar de aarde vloeien. Deze lekstromen moeten worden opgespoord en uitgeschakeld, wat mogelijk is met een differentieelschakelaar. Voor eenfasige circuits zijn er tweepolige varianten beschikbaar, terwijl driefasige netten gebruikmaken van vierpolige uitvoeringen. Bij het gebruik van een differentieelschakelaar moet er aan de volgende voorwaarden voldaan zijn om een goede werking van de differentieelschakelaar te garanderen:

1. De transformator moet geaard zijn.
2. De massa's moeten geaard zijn.
3. De foutstroom moet groter zijn dan de gevoeligheid van de differentieelschakelaar.
4. De isolatiefout moet stroomafwaarts optreden van de differentieelschakelaar.
5. De nulgeleider mag stroomafwaarts van de differentieelschakelaar niet opnieuw geaard worden. Indien dit toch gebeurt, zal een deel van de stroom die terugkeert naar de transformator niet via de nulgeleider verlopen, maar via de nieuwe aarding en de aarding van de transformator. Dit wordt door de differentieelschakelaar gedetecteerd, wat leidt tot een onderbreking van de stroomtoevoer, ook al is er in feite geen direct gevaar voor indirecte aanraking. Dit is

voornamelijk van toepassing bij een foutieve uitvoering van een TN-C-S-net waar er van een TN-S-net terug wordt overgegaan naar een TN-C-net

Samengevat worden differentieelschakelaars toegepast in wisselspanningsinstallaties waar enkel kortsluitbeveiliging niet voldoende is bij een isolatiefout. Dit is met name belangrijk wanneer het pad van de foutstroom een hoge impedantie heeft. In TT-netwerken, waar de aardingsweerstand relatief hoog is, worden differentieelschakelaars standaard geïnstalleerd. In TN-netwerken worden ze geplaatst wanneer de maximale kabellengte wordt overschreden. Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Eerst wordt de werking van differentieelschakelaars besproken, daarna volgt een overzicht van hun beperkingen, verschillende types en hoe ze geïmplementeerd moeten worden. Tenslotte volgt een bespreking van de differentieelschakelaar demonstrator.

Differentieelschakelaars

Gevoeligheid van de differentieelschakelaar

Differentieelschakelaars beschermen gebruikers tegen indirecte aanrakingen. Ze doen dit door het verschil te meten tussen de stroom in de toevoergeleider en de stroom in de retourgeleider van een circuit. Als het verschil groter of gelijk is aan de helft van de gevoeligheid van de differentieel ($I_{\Delta n}$) dan kan deze trippen. De differentieel moet trippen als de lekstroom groter of gelijk is aan de gevoeligheid van de differentieel. Hierbij is i_{L1} de ogenblikkelijke stroomwaarde en wijst het subscript naar de geleider. Deze voorwaarden worden voor een driefasig systeem weergegeven in onderstaande vergelijkingen. De differentieel mag trippen bij een 50 Hz-lekstroom als:

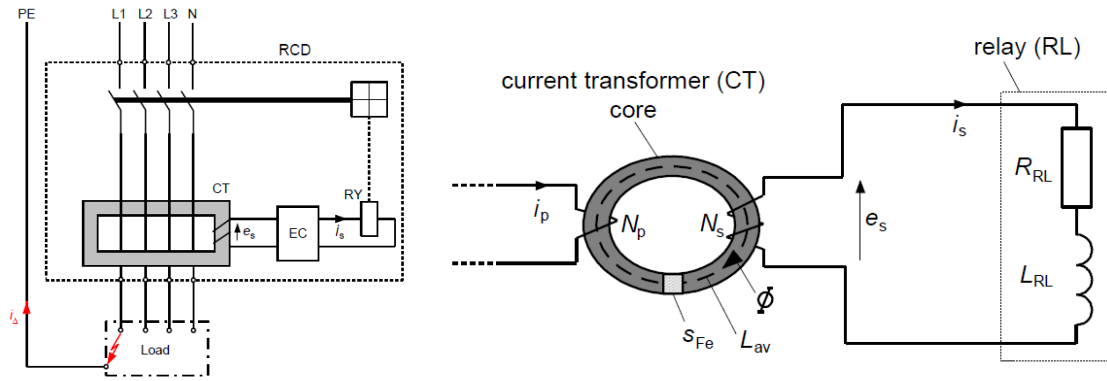
$$|i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} + i_N| \geq \frac{I_{\Delta n}}{2}$$

De differentieel moet trippen bij een 50 Hz-lekstroom als:

$$|i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} + i_N| \geq I_{\Delta n}$$

Werkning van de differentieelschakelaar

De volgende elementen zijn verantwoordelijk voor het detecteren van de lekstroom: een stroomtransformator (CT), een optioneel elektrische circuit (EC) en een elektromechanische relais (RY). Het verschil tussen de ingaande en uitgaande stromen wordt gemeten door de transformator. Het optionele elektrische circuit is specifiek ontworpen om de gevoeligheid van de differentieelschakelaar te regelen. Dit circuit kan de differentieel minder gevoelig maken voor bepaalde frequenties, zoals hoogfrequente harmonischen, of juist extra gevoelig maken voor gelijkstroomcomponenten. Tenslotte zal het elektromechanische relais zorgen voor de stroomonderbreking. Een schematische weergave van een type A differentieel is weergegeven op de onderstaande figuur.



Figuur 44: Opbouw van een differentieelschakelaar (Czapp et al. 2021)

Iedere geleider is rond de meettransformator gewikkeld in dezelfde zin. Verder is er aan deze magnetische kern een bijkomende wikkeling aanwezig die verbonden is met het uitschakel mechanisme van de differentieel. De magnetische flux die vloeit door de transformator tijdens normale werking is bijgevolg aan. Bij aanwezigheid van een lekstroom, vloeit een magnetische flux doorheen de kern van de transformator die gelijk is aan:

$$B = \mu_{\text{kern}} \sum_{n=1}^4 \frac{N_p I_n}{2\pi R_{\text{gem}}}$$

$$\Phi = B \cdot A \quad (B \perp A)$$

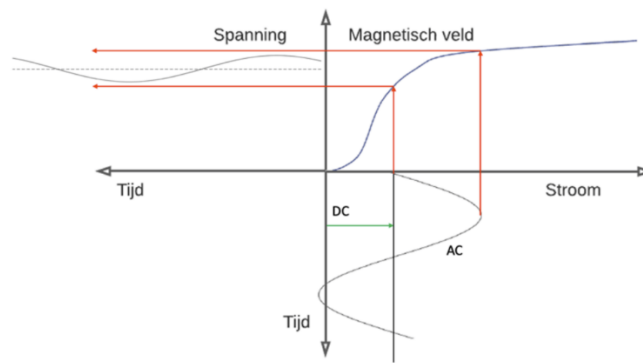
Deze flux zal volgende de wet van Faraday en Lenz een spanning induceren die zijn ontstaan probeert tegen te werken. Als gevolg vloeit er een stroom door elektrische circuit waardoor het elektromechanisch relais vervolgens het circuit onderbreekt.

$$e_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt}$$

Invloed van elektrische voertuigen op differentieelschakelaars

Een differentieel van type A is ontworpen en geoptimaliseerd voor stromen met een frequentie van 50 Hz. Dit houdt in dat dit type differentieel niet of slechts in beperkte mate in staat is om veiligheid te garanderen bij lekstromen met een andere frequentiesamenstelling. Omdat een type A-differentieel in essentie een transformator is, kunnen veel van de beperkingen worden verklaard aan de hand van dezelfde principes die van toepassing zijn bij transformatoren. In het eerste deel van deze subsectie wordt het gedrag van de differentieel besproken bij frequenties lager dan 50 Hz, terwijl het tweede deel ingaat op het gedrag bij hogere frequenties.

Wanneer een gelijkstroom van voldoende grootte (> 6 mA) door de differentieel stroomt, dan wordt deze blind. De differentieelschakelaar zal niet reageren op de aanwezigheid van lekstromen. Als er een gelijksstroom wordt aangelegd op een transformator, ontstaat er een homopolaire magnetische flux. Deze flux wordt niet tegengewerkt door de wetten van Faraday en Lenz, omdat de afgeleide van de flux nul is. Hierdoor blijft de flux in de kern aanwezig, wat uiteindelijk leidt tot magnetische verzadiging.



Figuur 45: B-H Curve bij verzadiging

Bij verzadiging verschuift de curve volgens de groene pijl naar rechts. Omdat het verband tussen de stroom en het magnetisch veld bij verzadiging niet langer lineair is, leidt een incrementele vergroting van de stroom in dit geval tot een steeds kleinere incrementele toename van het magnetische veld. Bij aanwezigheid van een gelijkstroomcomponent zou de lekstroom ontoelaatbaar groot moeten worden voordat er voldoende spanning wordt geïnduceerd in de secundaire wikkeling om de differentieelschakelaar vervolgens te laten trippen.

Wanneer de stroom niet puur gelijkstroom is, maar een subharmonische, wordt de geïnduceerde spanning kleiner. Dit komt doordat de tijdsafgeleide van de inductie lager is. Ook in dit geval dreigt de differentieel niet correct te functioneren.

Problematiek bij frequenties boven de fundamentele

Zoals eerder vermeld bestaat een differentieel uit een transformator. Ijzerverliezen treden ook op in een differentieel. Ijzerverliezen is een verzamelnaam voor drie verliezen: hysteresis-, wervelstroom- en Zwerfstroomverlies. Door deze verliezen zal de geïnduceerde spanning bij stromen met hoge frequenties, bij eenzelfde RMS waarde, kleiner zijn dan bij stromen met een lage frequentie. De impact van zwerfstroomverliezen in deze context is verwaarloosbaar, waardoor deze niet verder behandeld worden. Hysteresisverliezen ontstaan door het remanent magnetisme die overblijft in de magnetisch kern. Het periodiek omklappen van de magnetische dipolen kost energie, die wordt omgezet in warmte. De omschakeling van de magnetische veldrichting is evenredig met de frequentie, waardoor deze verliezen een lineair verband met de frequentie hebben.

Een simpele berekening voor het hysteresisverlies is volgens het Steinmetz model is weergegeven in onderstaande vergelijking. Hierbij is P_{hyst} het hysteresisverlies, c_{hyst} de hysteresisverliesfactor die eigen is aan het materiaal, f de frequentie en B_{max} de maximale inductie. Het verlies aan energie door de hysteresis lus is visueel voor te stellen als de oppervlakte onder de BH-curve.

$$P_{\text{hyst}} = c_{\text{hyst}} \cdot f \cdot B_{\text{max}}^{1,6}$$

Een tweede fenomeen waarop de differentieel ongevoeliger wordt is door wervelstroomverliezen. Door het wisselend magnetisch veld ontstaan er stroomlussen binnen de kern van de transformator. Deze stroomlussen genereren op vervolgens magnetische velden, die hun ontstaan tegenwerken. De berekening van wervelstroomverliezen is weergegeven in de onderstaande vergelijking. Hierbij is P_{werv} het vermogensverlies door we wervelstromen, d de dikte van de lamellen, f de frequentie van de stroom en B_{max} de maximale inductie.

$$P_{\text{werv}} = c_{\text{werv}} \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\text{max}}^2$$

Problematiek bij supraharmonische

De internationale normen voor differentiëlen van type B garanderen een correcte werking tot een frequentie van 1 kHz. Uit experimenten blijkt dat het ongevoeliger worden van differentiëlen bij supraharmonischen een probleem kan vormen. De mate van ongevoeligheid is hierbij afhankelijk van de frequentie en de verhouding van supraharmonischen ten opzichte van de fundamentele stroom.

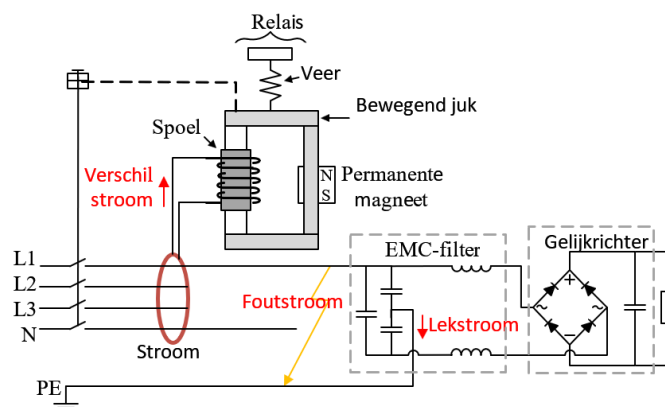
Een EMC-filter, zoals weergegeven op Figuur 46, wordt vaak gebruikt om ruis in een signaal af te voeren naar de aarde. Door de verbinding met de grond en het hoogfrequente karakter van supraharmonischen kunnen deze een supraharmonische lekstroom veroorzaken. Bij een puur supraharmonische lekstroom daalt de gevoeligheid van het differentieel aanzienlijk. In het onderzoek beschreven door Czapp en Tariq (2021) werd een lekstroom met een frequentie van respectievelijk 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz en 50 kHz aangelegd aan drie differentiëlen van het type A en twee van het type B, met een variërende stroomgrootte van $0,5 I_{\Delta n}$ tot $15 I_{\Delta n}$.

Geen enkel differentieel schakelde uit bij een lekstroom kleiner dan $10 I_{\Delta n}$. Voor frequenties hoger dan 5 kHz schakelde geen enkel differentieel uit bij een lekstroom kleiner dan 15 keer $I_{\Delta n}$. Ondanks deze hoge waarden vormt dit niet noodzakelijk een probleem voor de persoonsbeveiliging. De maximale grootte van $I_{\Delta n}$ wordt bepaald op basis van het risico op ventriculaire fibrillatie.

De IEC/TS 60479-2 geeft de maximale lekstroom weer in functie van de frequentie tot en met 1 kHz. Volgens de norm dient een lekstroom van 1 kHz slechts onderbroken te worden wanneer deze $14 I_{\Delta n}$ overschrijdt. Voor frequenties hoger dan 1 kHz zijn er (nog) geen waarden opgenomen, waardoor de impact op de veiligheid slechts beperkt geëvalueerd kan worden [3].

Als de lekstroom een fundamentele component bevat, wijst dit op een elektrische fout die dient te worden onderbroken. Omdat het differentieel vrijwel ongevoelig is voor supraharmonischen, zal het slechts correct handelen als er voldoende fundamentele stroom vloeit.

Differentiëlen zijn grotendeels ongevoelig voor supraharmonischen. Als gevolg hiervan zullen ze niet vroegtijdig uitschakelen bij onvermijdbare lekstromen door filters. Wanneer de lekstroom een fundamentele component bevat, blijven differentiëlen van type A en B correct werken. Het gebrek aan normen voor supraharmonischen vormt een beperking voor het evalueren van de impact op de veiligheid van differentiëlen [4].



Figuur 46: Schematische weergave van een EMC-filter met een differentieelschakelaar

Types differentieelschakelaars

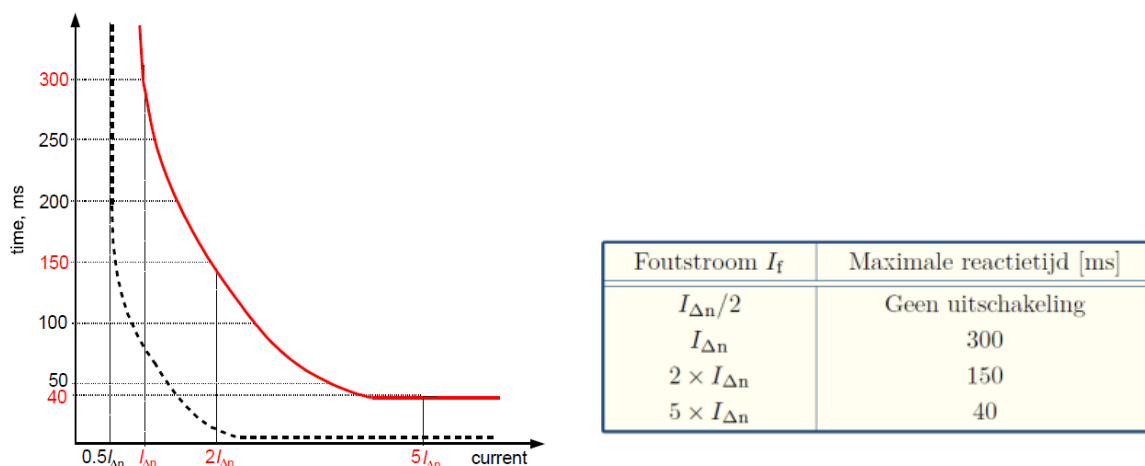
Er worden vier types differentieelschakelaars onderscheiden, gerangschikt van laag naar hoog in gevoeligheid zijn die: AC, A, F en B(+). Een differentieelschakelaar van een hogere klasse biedt minimaal dezelfde bescherming als die van een lagere klasse, onder dezelfde omstandigheden.

Type AC-differentieelschakelaars zijn ontworpen om te reageren op zuivere wisselstroom bij een frequentie van 50 Hz. Ze zijn beperkt tot enkel deze stroomvorm en zijn niet geschikt voor moderne toepassingen waarbij vaak andere stroomvormen voorkomen. In België is de implementatie van type AC verboden vanwege de beperkingen in bescherming.

Type A-differentieelschakelaars kunnen reageren op zowel wisselstroom als gelijkstroomcomponenten met een pulskarakteristiek tot 6 mA. Deze differentieelschakelaars zijn de meest voorkomende in België. Volgens de IEC 61008-1 normering ondergaan deze schakelaars twee tests:

1. Lekstroomtest: De lekstroom wordt geleidelijk verhoogd waarbij de waarde van de trip RMS-waarde wordt geëvalueerd. De differentieelschakelaar dient hierbij te trippen bij een stroom tussen $0,5 I_{\Delta n}$ en $I_{\Delta n}$ bij een frequentie van 50 Hz.
2. Tijdstroomkarakteristiek: Bij de tweede test wordt een lekstroom aangelegd met een grootte die overeenkomt met de boven limiet van de differentieel. Vervolgens wordt de maximum tijd tot trippen, de tijd tussen het opkomen van de lekstroom en het trippen van de differentieel, opgemeten. Het maximum van deze tijd is afhankelijk van de grootte RMS-waarde van de lekstroom: Bij een lekstroom gelijk aan $I_{\Delta n}$, $2I_{\Delta n}$ of $5 I_{\Delta n}$, mag de reactietijd respectievelijk niet langer zijn dan 300 ms, 150 ms en 40 ms.

De tijd-stroomkarakteristiek wordt vastgelegd in de norm IEC 61008/61009 en geïllustreerd op Figuur 47. Waarbij de IEC 60364 de maximale onderbrekingstijd vastlegt.



Figuur 47: Tijd-stroomkarakteristiek volgens IEC 61008

Type F-differentieelschakelaars zijn ontworpen voor toepassingen met eenfasige niet-lineaire belastingen en kunnen lekstromen tot 10 mA detecteren. Ze functioneren betrouwbaar bij harmonische lekstromen tot 1 kHz. In België zijn ze niet gehomologeerd en worden ze niet toegepast waardoor ze bijgevolg niet worden onderzocht in dit werk.

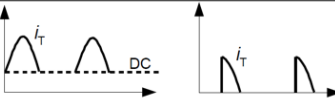
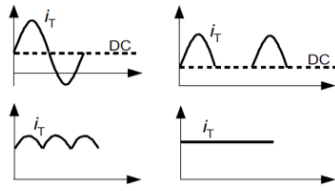
Differentieelschakelaars van het type B zijn een stuk geavanceerder en zijn specifiek ontworpen voor installaties met complexe stroomvormen zoals omvormers, laadpalen, en zonnepanelen. Ze detecteren zowel foutstromen tot 1 kHz als zuivere gelijkstromen. Volgens de IEC 62423-norm reageren ze

op lekstromen met een DC-component groter dan 6 mA en blijven ze betrouwbaar bij harmonischen en gepulseerde stromen. Deze schakelaars bieden een hoge mate van bescherming en zijn in België verplicht bij specifieke toepassingen zoals frequentieregelaars, zonnepaneelinstallaties en elektrische laadpalen.

Tenslotte is er nog het type B+. Waar type B bescherming biedt tot harmonischen van ongeveer 1 kHz, is type B+ specifiek ontworpen om ook effectief te functioneren bij harmonischen tot 20 kHz.

Onderstaande tabel vat de types differentieelschakelaars samen:

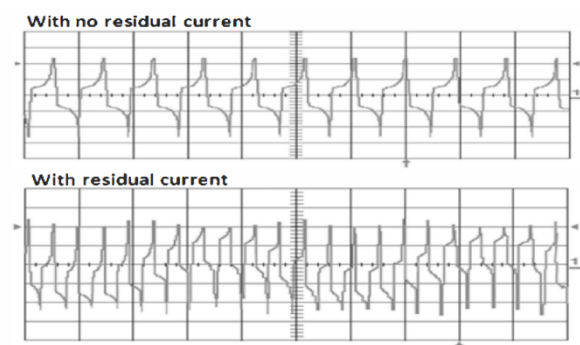
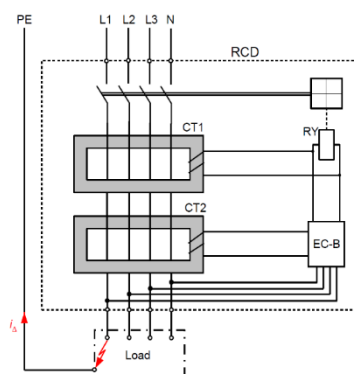
Tabel 1: Overzicht van types differentieelschakelaars

RCD Type	Detecteert volgende lekstromen	Voorbeeldgolf
AC	Sinusoïden (50 Hz)	/
A	- Sinusoïden (50 Hz) - Pulserende vormen (DC-component max. 6 mA)	
B	- Sinusoïden (tot 1 kHz) - Pulserende stroomvormen - Sinusoïden met DC-component - Pure DC-stroom - Gemengde sinusvormige golfvormen	
B+	- Sinusoïden (tot 20 kHz) " "	/

Opbouw van een differentieelschakelaar type B

Een type B-differentieel bevat, in tegenstelling tot een type A, twee ringvormige ferromagnetische kernen. De opbouw van een differentieel type B wordt schematisch weergegeven op Figuur 49.

De eerste kern is identiek aan deze van een differentieel type A en detecteert AC-lekstromen met vaste of variabele frequenties. De tweede kern is vervaardigd uit nanokristallijn materiaal en is geoptimaliseerd voor DC-lekstromen en hoge frequenties. Dit materiaal heeft een hoge permeabiliteit, wat het minder gevoelig maakt voor temperatuurvariaties, veroudering en externe magnetische velden. De werking wordt ondersteund door een signal conditioning unit, die een draaggolfsignaal injecteert in de secundaire wikkeling van de tweede kern. In normale omstandigheden, zonder lekstroom, is de secundaire stroom gemiddeld nul omdat de kern in bijna-verzadigde toestand wordt gebracht. Wanneer er een lekstroom optreedt, zal de kern in verzadiging treden, waarna de elektrische schakeling ervoor zorgt dat de schakelaar tript. Figuur 48 geeft signaal weer in de secundaire wikkeling van de tweede kern met en zonder lekstroom.

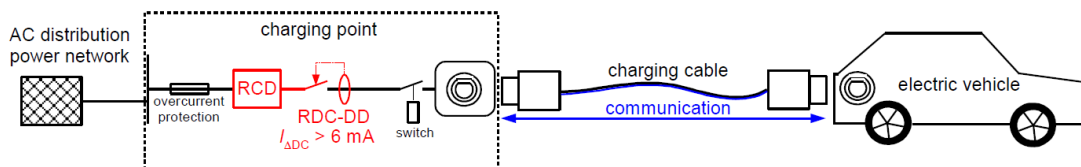


Figuur 48: Signaal op de secundaire wikkeling van de tweede kern met en zonder lekstroom.

Figuur 49: Opbouw van een differentieel type B

Beveiligen van EV-laadpunten

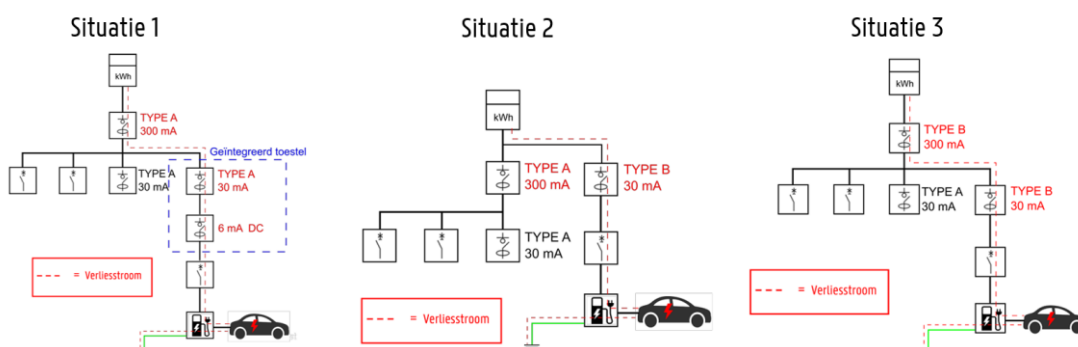
Een differentieel kan geplaatst worden in een TT, TN-S of IT netstelsel. Bij een isolatiefout zorgt de PE-geleider voor een gesloten elektrisch circuit voor de foutstroom. Volgens het AREI dient een differentieel met een gevoeligheid van 30 mA geplaatst te worden bij ieder laadpunt om de gebruiker te beschermen tegen onrechtstreekse aanraking. In dit onderdeel wordt de implementatie van een laadpunt in een TT-net besproken.



Figuur 50: Schematische opbouw van een laadpaal inclusief beveiligingen.

De omvormers in de On-Board Charger van de wagen of DC-laadpunt kunnen een foutstroom produceren die een gelijkstroomcomponent bevat. Een gelijkstroomcomponent die groter is dan 6 mA kan ervoor zorgen dat een differentieel van het type A blind wordt. Om dit te voorkomen zijn er twee opties: een differentieelschakelaar van het type B of het toevoegen van een gelijkstroomdetectie aan de differentieel type A. In een bestaande installatie kunnen zij als volgt geïmplementeerd worden:

In scenario 1 wordt het elektrisch voertuig in serie aangesloten met de bestaande differentieel. Aan het laadpunt wordt een differentieel type A met gelijkstroomdetectie geplaatst. Als gevolg kan de hoofddifferentieel niet blind worden, doordat de differentieel aan het laadpunt zal ingrijpen bij een lekstroom met gelijkstroomdetectie. Deze aanpak mag niet gebruikt worden als er meerdere laadpunten in eenzelfde installatie wordt gebruikt. Het kan gebeuren dat verschillende toestellen een lekstroom genereren die elk kleiner is dan 6 mA. Hierdoor zal de differentieel van de laadpaal niet trippen, maar zal de bovenliggende differentieel alsnog blind worden door de superpositie van deze DC-lekstromen. In scenario 2 staat de differentieel van het laadpunt parallel op de hoofddifferentieel. Als gevolg zal de lekstroom deze geen impact ervaren van de lekstroom en moet deze niet vervangen worden. In scenario 3 wordt de laadpaal met een differentieel type B in serie geplaatst met de bestaande differentieel. Wanneer een lekstroom vloeit met een gelijkstroomcomponent bestaat het gevaar dat de bovenliggende differentieel blind wordt. Als gevolg dient deze vervangen te worden door een differentieel type B. Ook in deze aanpak mogen er meerdere laadpunten worden aangesloten op de installatie.



Figuur 51: Plaatsen van een laadpaal in een bestaand net (VOLTA)

Demonstrator: Differentieeltestbank

Inleiding

Als cruciaal onderdeel van dit project wordt een demonstrator gebouwd die het mogelijk maakt om differentieelbeveiligingen onder gecontroleerde omstandigheden te testen. Deze demonstrator zal niet alleen de verschillende typen differentieelbeveiligingen simuleren en analyseren, maar zou ook kunnen bijdragen aan het valideren van de theoretische bevindingen.

Literatuurstudie

Uit de literatuur blijkt dat verschillende testbanken zijn ontwikkeld om de werking van differentieel-schakelaars onder diverse omstandigheden te analyseren. Hierbij zijn verschillende types (AC, A, B en F) en frequenties onderzocht.

Slangen et al. richtte zich op de impact van hoogfrequente lekstromen op vijf differentieelschakelaars, waaronder twee van type AC (30/300 mA), één type A (30 mA) en één type B (30/300 mA). Met een opstelling die een fundamentele lekstroom en een hoogfrequente lekstroom afzonderlijk kon genereren, werd aangetoond dat type A- en AC-schakelaars minder gevoelig werden voor gevaarlijke lekstromen bij 50 Hz in aanwezigheid van hoogfrequente componenten. Dit resulteerde in vals-negatieve situaties waarbij bijvoorbeeld een type A-differentieel 50 Hz-lekstromen van meer dan 300 mA doorliet, ruim boven de veilige limiet van 30 mA. Type B bleek veel minder beïnvloed door deze supraharmonische stromen [3].

Espín-Delgado et al. onderzochten supraharmonische en quasi-gelijkstroom (0-4 Hz) lekstromen en hun effect op dertien differentieelschakelaar. Met behulp van een programmeerbare spanningsbron en weerstanden werd het gedrag van sinusvormige en vervormde lekstromen geanalyseerd. De resultaten toonden dat type A- en AC-schakelaars verhoogde tripdrempels vertoonden, wat het risico op vals-negatieve situaties vergroot. Type B blijkt opnieuw robuuster, wat wijst op een betere geschiktheid voor complexe netomstandigheden [4].

Möller et al. richtte zich specifiek op huishoudelijke apparaten zoals elektrische voertuigen, zonnepanelen, en batterijopladers. Door realistische netcondities te simuleren, inclusief spanningsvervormingen en netimpedanties, ontdekten ze dat type A vaak ongewenst tripte bij lekstromen met significante fundamentele of pulserende componenten ($>1,5$ mA). Type B en F daarentegen bleven beter functioneren, zelfs bij complexe stroomvormen [5].

Czapp et al. breidden deze analyses uit naar frequenties tot 50 kHz. Hun opstelling combineerde gemengde frequentiecomponenten om te testen hoe differentieelschakelaars reageerden op realistische foutstromen. De studie toonde aan dat de tripdrempels van veel schakelaars, zelfs bij sommige type B- en F-modellen, aanzienlijk toenamen bij hogere frequenties. De lekstroom dient een voldoende grootte fundamentele component te bevatten. Dit benadrukt niet alleen mogelijke veiligheidsrisico's, maar ook de noodzaak om internationale normen te herzien en te verbeteren om deze uitdagingen het hoofd te bieden [6].

In de literatuur bestaat consensus dat type B aardlekschakelaars veel beter bestand zijn tegen storingen dan type A aardlekschakelaars. Desondanks zijn type B aardlekschakelaars minder gevoelig voor harmonischen dan voor de fundamentele 50-Hz-component. Dit vormt echter geen probleem. Enerzijds staat IEC 60479 toe dat de minimale stroom waarbij de aardlekschakelaar schakelt bij hogere frequenties, ook hoger mag zijn (zie tabel). Anderzijds is het ontstaan van lekstromen moeilijk te voorkomen. Als aardlekschakelaars te gevoelig zouden zijn voor harmonischen, kan de continuïteit

van de elektrische installatie in gevaar komen. Bovendien is aangetoond dat, zolang de lekstroom voldoende van de fundamentele component bevat, de aardlekschakelaar correct blijft functioneren.

Tabel 2: Lekstromen waarvoor de differentieelschakelaar al of niet moet ingrijpen.

Frequency Hz	Residual non-operating current $I_{\Delta n}$	Residual operating current $I_{\Delta n}$
150	$0,5 I_{\Delta n}$	$2,4 I_{\Delta n}^a$
400	$0,5 I_{\Delta n}$	$6 I_{\Delta n}^a$
1 000	$I_{\Delta n}$	$14 I_{\Delta n}^{a b}$

NOTE 1 The definitions of "residual non-operating current and of "operating currents" are those of IEC 61008-1 and IEC 61009-1.

NOTE 2 The waveform for the given frequencies is sinusoidal.

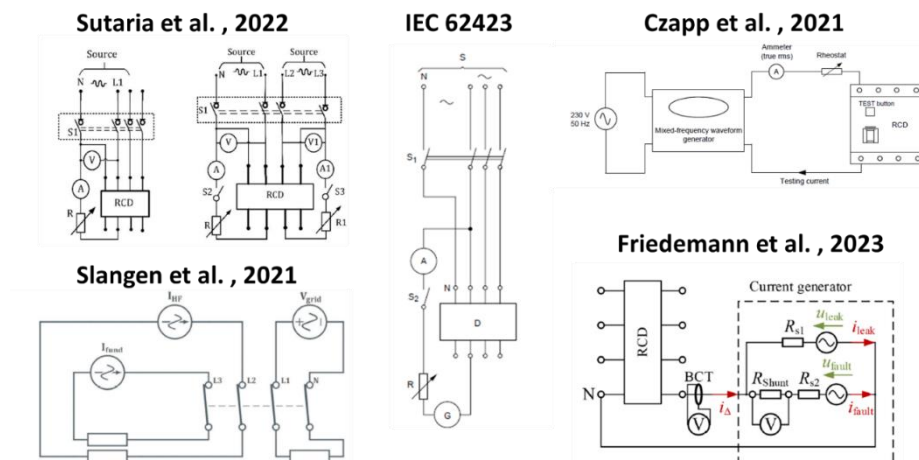
NOTE 3 The maximum permissible earthing impedance at a frequency f_x depends on the upper limit of the operating currents of the RCD at that frequency.

NOTE 4 The relationship between the frequency of the acceptable touch voltages and the dissipated power in the human body are under consideration. Until final values are fixed the maximum allowed touch voltage of 50 V for 50/60 Hz is recommended.

^a The values correspond to the threshold of ventricular fibrillation according to IEC/TS 60479-1 in combination with the frequency factor for ventricular fibrillation according to IEC/TS 60479-2.

^b IEC 60479 series gives no factors for frequencies above 1 kHz.

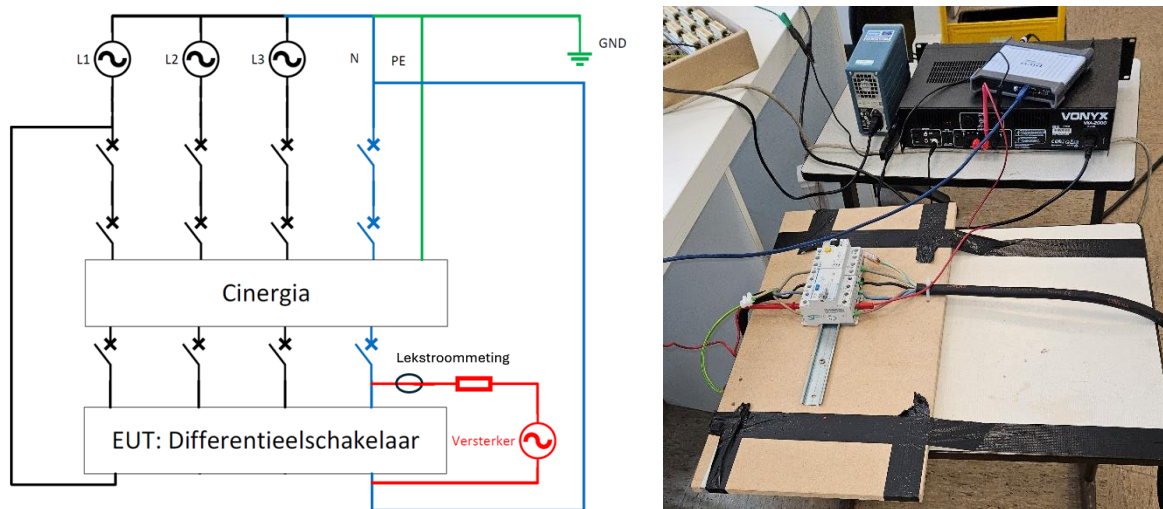
Verder experimenten uit de literatuur baseren hun opstelling op het experiment uit IEC 62423. Hierbij wordt de differentieel aan primaire zijde gevoed door het net. Dit is onontbeerlijk, want de differentieel Type B is spanningsafhankelijk. Zonder spanning zal de tweede kern van de differentieel niet werken, waardoor de type B in wezen functioneert als een type A. Vervolgens wordt een lekstroom gecreëerd door een spanningsbron en een impedantie.



Figuur 52: Schematische weergave van opstellingen in de literatuur

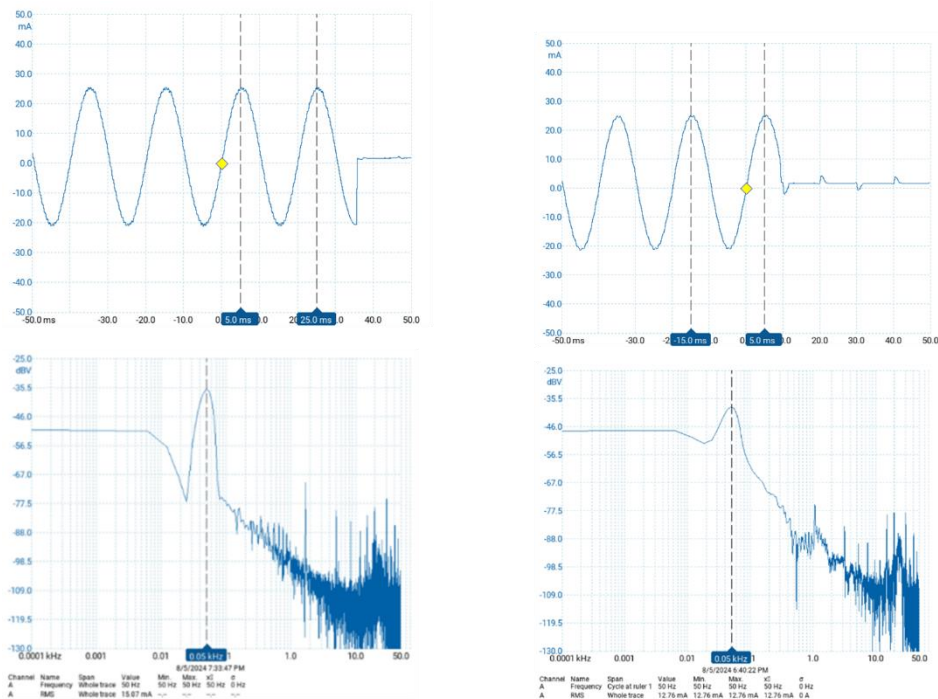
Onderzoekopstelling

Zowel in de opstellingen beschreven in de literatuur als in de opstellingen volgens IEC 60479 wordt geen rekening gehouden met de invloed van een aangesloten belasting. In dit onderzoek wordt geëvalueerd of een aardlekschakelaar anders reageert wanneer deze wordt belast. Als belasting werd de Cinergia GE&EL+ vAC/DC met een vermogen van 40 kVA gebruikt. Dit is een regeneratieve en bidirectionele omvormer die zowel AC- als DC-belastingen kan simuleren. Het apparaat fungeerde als belasting, waarbij energie uit het systeem werd opgenomen en direct werd teruggevoerd naar het net. Dit biedt het voordeel dat de belasting kan worden gevoed met een configureerbare stroom met een harmonisch spectrum, onafhankelijk van de voedingspanning. De lekstroom werd gegenereerd door de oscillator van de PicoScope 5244B en versterkt met een Vonyx VXA-2000 versterker met een vaste impedantie. Voor het meten van de lekstroom werd gebruikgemaakt van de Picotech TA189. De opstelling is hieronder schematisch weergegeven:



Figuur 53: Onderzoekopstelling

Het doel van dit werk is om van de verschillende types differentiële, hun veiligheid onder invloed van de vervuiling veroorzaakt door “line-commutated” on-board chargers. Het onderzoek werd uitgevoerd op vijf differentieelschakelaars type B van vijf verschillende merken met een I_n van 40 A en een $I_{\Delta n}$ van 30 mA. Voor vier verschillende merken en zowel met als zonder belasting. Als belasting werd een worst-case scenario van de harmonische emissie van een B6-mutator genomen zonder filter. De THD(i) bedroeg hierbij 30% en bevatte: 20% 5^e harmonische; 14,28% 7^e harmonische; 9,09% 9^e harmonische; 7,69 13^e harmonische; 5,88% 17^e harmonische en 5,26% 19^e harmonische. De lekstroom werd hierbij telkens vergroot in trappen van 5 mA met een wachttijd van 3s, waarbij er bij het trippen de RMS-waarde van de laatste volledige periode werd genoteerd zoals geïllustreerd op de onderstaande figuur. Dit experiment werd 3-maal uitgevoerd voor iedere frequentie en voor iedere automaat. De resultaten worden besproken in het volgende onderdeel.

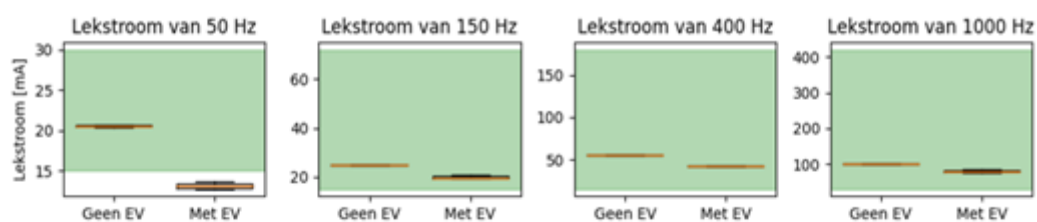


Figuur 54: Opmeten van maximale lekstroom alvorens de differentieelschakelaar tript

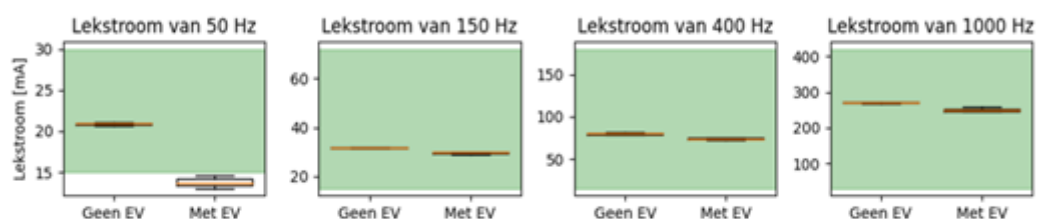
Resultaten

Op onderstaande grafieken zijn de maximale lekstromen weergegeven in functie van de lekstroomfrequentie en het merk van de differentieelschakelaar. In het groen is het gebied weergegeven waarin de differentieel mag trippen. Boven het groene gebied had de differentieel moeten trippen (vals-negatief) en onder het groene gebied mag de differentieel niet trippen (vals-positief). Uit de metingen blijkt dat de impact van de belasting een negatieve impact heeft op het trippedrag van de automaat. De stroom die benodigd is, is in iedere case lager met een belasting dan zonder belasting. Dit zorgt voor problemen bij een lekstroom van 50 Hz. Daar is voor ieder merk te zien dat deze tript bij een lekstroom tussen 10 en 15 mA.

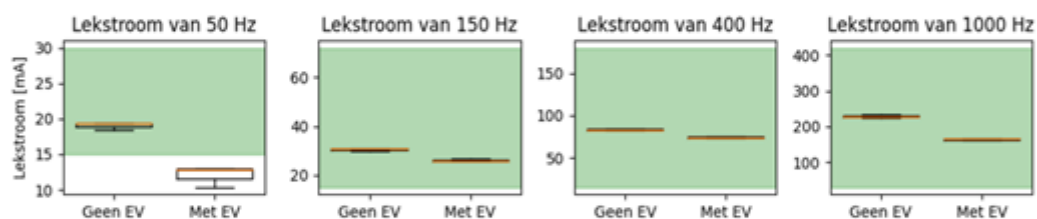
Trippen van differentieel type B van het merk 1



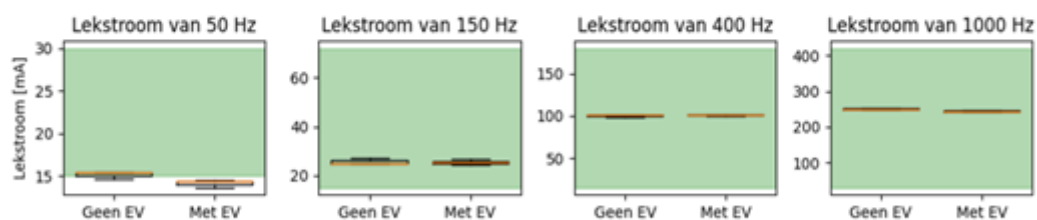
Trippen van differentieel type B van het merk 2



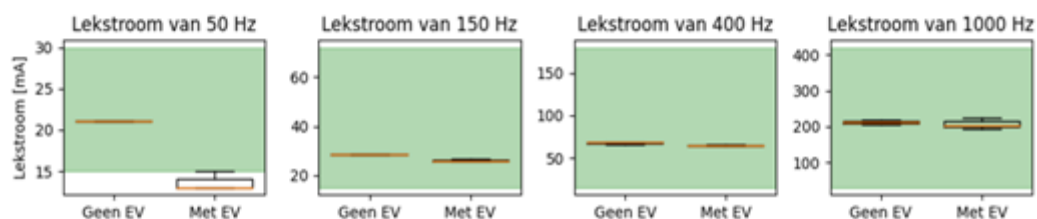
Trippen van differentieel type B van het merk 3



Trippen van differentieel type B van het merk 4



Trippen van differentieel type B van het merk 5



Figuur 55: Maximale lekstroom in functie van merk van automaat en frequentie van lekstroom

5. Uitbating van laadinfrastructuur op een DC-bus

Historiek van DC

Sinds het einde van de 19e eeuw is de wereldwijde adoptie van AC-netten een direct gevolg van de historische 'War of Currents' tussen Nikola Tesla en Thomas Edison. Dit conflict, waarin voorstanders van zowel AC als DC betrokken waren, bevoordeelde uiteindelijk Tesla, voornamelijk door de baanbrekende uitvinding van de transformator door Gaulard en Gibbs. Deze technologische doorbraak maakte efficiënte spanningsomzetting mogelijk, wat de langeafstandstransmissie van elektriciteit via AC vergemakkelijkte en daarmee de inherente beperkingen van DC overwon, die voornamelijk wordt gekarakteriseerd door aanzienlijke spanningsverliezen over lange afstanden. Ondanks de pogingen van Edison om zijn 110V DC-net als veiliger te promoten, bleek de capaciteit van AC om stroom over grotere afstanden te transporteren beslissend te zijn, wat de evolutie van moderne elektriciteitsdistributiesystemen fundamenteel heeft vormgegeven [7].

Desondanks is DC niet volledig verdrongen. Het blijft een cruciale rol spelen in nichetoepassingen, met name in transportsectoren zoals de maritieme en spoorwegsystemen. Opmerkelijk is dat DC meer dan een eeuw later een heropleving lijkt te doormaken, vooral op het gebied van transmissie. Deze hernieuwde interesse kan worden toegeschreven aan vooruitgangen in vermogenselektronica en aanzienlijke vorderingen in halfgeleidertechnologieën, die de efficiëntie en haalbaarheid van DC-toepassingen dramatisch hebben verbeterd. In 1901 stelde Charles F. Scott een cruciale vraag in zijn publicatie [8]:

“Are the reasons for the use of direct current sufficient to justify the increased complications and expense of the converting apparatus? To answer this intelligently, we will consider it in two divisions: (a) In the utilization of electric energy, what advantages has direct current over alternating current ? (b) When energy is generated as alternating current, what disadvantages are involved in utilizing it as direct current?”

In die tijd waren DC-systemen afhankelijk van chemische batterijen en roterende omvormers voor DC-netten inefficiënt en economisch onhaalbaar waren. Als deze vragen opnieuw zouden worden energieomzetting, waardoor bekeken in de context van moderne technologie, zou het antwoord waarschijnlijk ondubbelzinnig zijn: de huidige vooruitgangen wijzen sterk in de richting van de voorkeur voor gelijkstroom in veel toepassingen.

De verschuiving naar gedistribueerde energiesystemen, waaronder PV-installaties, BESS en de toeneemende elektrificatie van transport en verwarming via elektrische voertuigen en warmtepompen, vertoont een gemeenschappelijk kenmerk: deze technologieën werken van nature op DC. Bovendien zijn efficiëntere verlichtingssystemen, zoals LED's, ook gebaseerd op DC. Ondanks deze ontwikkelingen blijven huidige energiesystemen DC omzetten naar AC, wat extra omzettingstappen introduceert en de complexiteit verhoogt. Het is inmiddels duidelijk geworden dat de overgang naar een DC-gebaseerd systeem aanzienlijke voordelen zou opleveren, waaronder een vermindering van componenten, lagere omzettingsverliezen en een eenvoudiger, efficiënter net.

Voordelen van DC

Het is duidelijk dat het gebruik van DC-distributie bepaalde voordelen biedt ten opzichte van AC-distributie. Het is echter belangrijk te benadrukken dat de efficiëntie van DC sterk afhankelijk is van de aanwezigheid van lokale RES en BESS. Hieronder wordt een overzicht gepresenteerd van deze voordelen:

- **Verhoogde energie-efficiëntie:** Een van de belangrijkste voordelen van DC-distributie ten opzichte van AC-systemen is de hogere energie-efficiëntie. Deze verbetering ligt voornamelijk in de

vermindering van omzettingstappen, waarbij meerdere DC/AC-omvormers voor individuele assets worden vervangen door efficiëntere DC/DC-omvormers en één centrale DC/AC-omvormer. De efficiëntiewinst wordt verder vergroot wanneer hernieuwbare energiebronnen zoals PV en BESS worden geïntegreerd, wat de behoefte aan DC/AC-omzetting minimaliseert. Bovendien worden kabelverliezen verminderd door de hogere power factor (meestal gelijk aan 1 in DC-systemen) en kunnen ze verder worden geoptimaliseerd door het juiste DC-uitbatingsspanning te kiezen [9] [10].

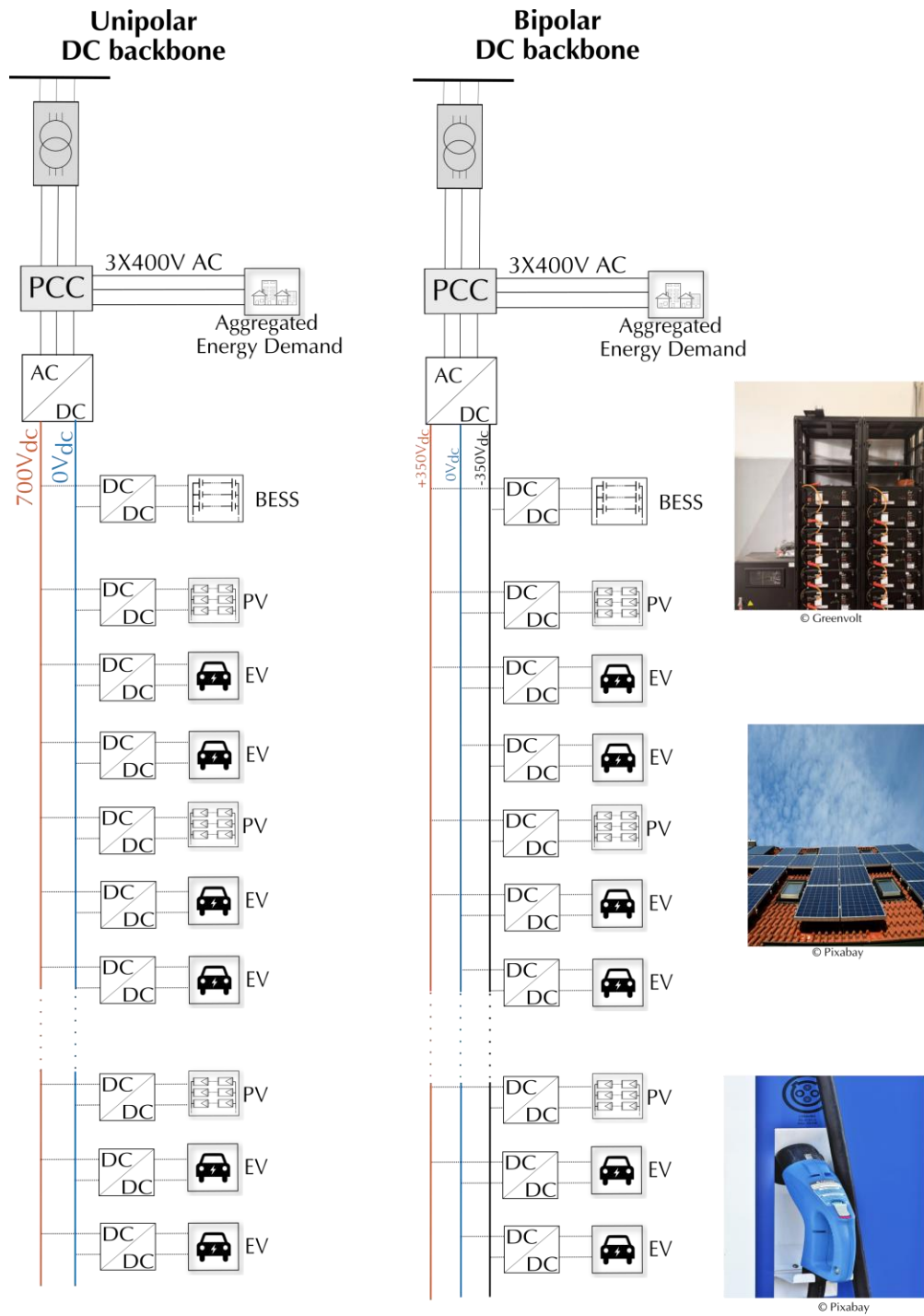
- **Afwezigheid van reactief vermogen en skin-effect:** Vanuit een ander perspectief verbetert de afwezigheid van reactief vermogen in DC-netten, samen met de eliminatie van het skin-effect, de efficiëntie ten opzichte van AC-distributie. In DC-netten is schijnbaar vermogen identiek aan actief vermogen, wat systeemverliezen vermindert door de inefficiënties veroorzaakt door reactief vermogen te vermijden. Bovendien zijn DC-netten veel beter bestand tegen netuitval en kunnen ze sneller overschakelen naar eilandbedrijf, omdat ze synchronisatie-uitdagingen en reactief vermogenstroom vermijden [11] [12].
- **Verminderde power quality problemen:** Volgens de huidige normen en onderzoeken kunnen power quality problemen in DC-systemen globaal worden onderverdeeld in twee categorieën. De eerste categorie omvat kortdurende verstoringen, zoals spanningspieken, dips en onderbrekingen. Spanningsfluctuaties in DC-systemen en flikkering in AC-systemen—beide kunnen verstoringende effecten hebben op het menselijk comfort—zijn nauw met elkaar verbonden en worden vaak veroorzaakt door plotselinge veranderingen in actief vermogen of interacties tussen meerdere omvormers. De tweede categorie betreft langdurige problemen, zoals aanhoudende spanningsafwijkingen, die verergerd kunnen worden door spanningsonbalans. Dit is een bijzonder aandachtspunt in bipolaire DC-netten, waar bijvoorbeeld ongebalanceerde PV-injectie kan leiden tot operationele uitdagingen [13].
- **Verbeterde betrouwbaarheid:** De betrouwbaarheid van vermogenselektronische omvormers wordt voornamelijk bepaald door de betrouwbaarheid van belangrijke componenten zoals vermogenselektronische schakelaars, condensatoren en sturingen. Onder deze componenten zijn schakelaars en condensatoren in het hoofdvoedingsgedeelte het meest kritisch. DC-distributiesystemen verbeteren de betrouwbaarheid door het aantal omvormingsstappen te verminderen. In plaats van meerdere gedistribueerde DC/AC-omvormers maakt DC gebruik van één centrale DC/AC-omvormer en gedistribueerde DC/DC-omvormers. Deze significante vermindering van het aantal componenten, met name vermogensschakelaars en condensatoren, leidt tot een hogere operationele betrouwbaarheid [12].
- **Verbeterde controleerbaarheid:** De afwezigheid van reactief vermogen en vereenvoudigde netwerksynchronisatie verbeteren de controleerbaarheid en het energiebeheer van LVDC-netwerken aanzienlijk. Dit voordeel ontstaat voornamelijk doordat LVDC-systemen vertrouwen op vermogenselektronica, wat voor eenvoudiger beheer zorgt. Vermogenselektronische omvormers kunnen het vermogen dat aan belastingen wordt geleverd en door bronnen wordt gegenereerd, nauwkeurig regelen, wat actieve controle over de stroom binnen het systeem mogelijk maakt. Dit niveau van controle maakt DC-systemen flexibeler en responsiever op veranderende belastingseisen en productie [14].

Er zijn tal van aanvullende voordelen, waarvan vele met de hierboven beschreven algemene voordelen verbonden zijn. Zo kan de vermindering van CAPEX en OPEX, samen met een verminderde vraag naar grondstoffen—wat bijdraagt aan een lagere ecologische voetafdruk—direct worden gekoppeld aan de rechtvaardigingen voor verbeterde energie-efficiëntie. Verder vertegenwoordigt de inherente eenvoud van DC-netwerken een ander voordeel dat overeenkomt met deze bredere voordelen. Bovendien vergemakkelijkt de afwezigheid van een fasehoek in DC-systemen de synchronisatie, wat

ook kan worden gekoppeld aan de vereenvoudigde eilandwerking die eerder werd genoemd in de context van de afwezigheid van reactief vermogen [15, 16].

Topologie

Een LVDC-distributiesysteem kan worden geïmplementeerd in twee primaire configuraties: unipolaire en bipolaire DC-backbones. De structurele verschillen tussen deze twee opstellingen worden geïllustreerd in Figuur 56.



Figuur 56 Weergave van (a) een unipolaire DC-backbone en (b) een bipolaire DC-backbone met zowel PV, BESS als EV.

In de unipolaire configuratie bestaat de backbone uit slechts twee draden: een positieve pool ($+V_{dc}$) en een neutrale pool ($0V_{dc}$). In tegenstelling tot de unipolaire configuratie bevat de bipolaire configuratie drie draden: een positieve pool ($+V_{dc}$), een neutrale pool ($0V_{dc}$) en een negatieve pool ($-V_{dc}$). Dit verschil in bedrading leidt tot verschillende operationele kenmerken tussen de twee systemen.

Het belangrijkste verschil tussen de unipolaire en bipolaire configuraties is de beschikbaarheid van meerdere spanningsniveaus. In een unipolair systeem kunnen verbindingen alleen worden gemaakt tussen de positieve en neutrale polen, waardoor het systeem beperkt is tot één spanningsniveau. In een bipolair systeem kunnen verbindingen worden gemaakt tussen de neutrale pool en de positieve of negatieve pool, waardoor twee verschillende spanningsniveaus beschikbaar zijn. Deze eigenschap biedt meer flexibiliteit bij het aansluiten van verschillende belastingtoepassingen die op verschillende spanningsniveaus werken, wat een significant voordeel biedt voor systemen met diverse vereisten.

De unipolaire structuur is, vanwege zijn eenvoud, relatief goedkoop te ontwerpen en te implementeren. Wanneer het echter wordt vergeleken met de bipolaire configuratie, biedt het een verminderde transmissiecapaciteit bij hetzelfde spanningsniveau. In het unipolaire systeem wordt energie overgedragen via twee geleiders, terwijl in het bipolaire systeem het gebruik van drie geleiders een grotere transmissiecapaciteit tussen de positieve en neutrale polen mogelijk maakt. Een belangrijk nadeel van de bipolaire configuratie is de mogelijkheid van spanningsonbalans wanneer meerdere belastingen op verschillende spanningsniveaus zijn aangesloten. Dit probleem doet zich niet voor in unipolaire systemen. Omgekeerd is een nadeel van de unipolaire configuratie het gebrek aan redundantie. In het geval van een storing moet de gehele lijn worden uitgeschakeld. Daarentegen biedt het bipolaire systeem een hogere mate van bedrijfszekerheid; wanneer een storing optreedt in één lijn, kan de andere lijn doorgaan met het overdragen van energie, waardoor een bepaald niveau van operationele redundantie wordt gewaarborgd. Tabel 3 biedt een samenvatting van de belangrijkste voordelen en nadelen van zowel de unipolaire als de bipolaire LVDC-configuraties [17].

Tabel 3 Voor- en nadelen van unipolaire en bipolaire LVDC-netten.

Structuur	Unipolair	Bipolair
Pro's	- Goedkoop - Geen onbalans - Eenvoudig ontwerp	- Verschillende spanningsniveaus beschikbaar - Hogere transmissiecapaciteit - Bepaalde mate van redundantie
Contra's	- Verminderde transmissiecapaciteit - Slechts één spanningsniveau beschikbaar - Geen redundantie	- Duurder - Onbalans kan optreden - Meer convertercomponenten

Om een bipolaire bus te realiseren, kunnen verschillende converterconfiguraties worden geïmplementeerd. Deze configuraties omvatten het gebruik van twee in serie geschakelde Voltage Source Converters (VSC's), een enkele VSC met een spannings-balancer, of een 3-level VSC met een neutraal punt geklemde converter. Verschillende technieken voor het mitigeren van spanningsonbalans in bipolaire DC-distributienetten zijn beschreven in de literatuur [18] [19].

Uitbatingsspanning

Het bepalen van het optimale spanningsniveau is een belangrijke stap bij de implementatie van LVDC-netten. Volgens de IEC 60038-standaard wordt LVAC gedefinieerd als opererend binnen een spanningsbereik van 0 tot 1000 V, terwijl LVDC-netten spanningen tot 1500 V ondersteunen [20]. Deze spanningslimieten komen overeen met de European Low Voltage Directive en de Belgische Algemene Regels voor Elektrische Installaties (AREI), die beide gebaseerd zijn op de IEC-normen [21].

Het ontbreken van standaard DC-spanningen is één van de drempels die een brede uitrol van DC-netten en de ontwikkeling van toestellen en omvormers tegenhoudt.

Belangrijke factoren

Bij de selectie van het spanningsniveau voor een LVDC-distributiesysteem moeten drie criteria worden overwogen: veiligheid, kosten en efficiëntie. Het optimale spanningsniveau is meestal een compromis tussen deze factoren. Hogere spanningen leiden tot lagere transmissieverliezen en een hogere capaciteit, maar brengen veiligheidsuitdagingen met zich mee, zoals hogere aanraakspanningen. Dit vereist betere aarding, aangepaste beveiligingssystemen en geschikte apparatuur. Daarnaast beïnvloedt het spanningsniveau de efficiëntie van de vermogenselektronica in het LVDC-netwerk, zoals onderzocht in [22]. Over het algemeen leidt een hoger spanningsniveau tot een energie-efficiënter netwerk, maar verhoogt het de risico's op gevaarlijke aanraakspanningen. Ook kabelkarakteristieken spelen een belangrijke rol. Lagere spanningen veroorzaken hogere stromen, wat leidt tot meer warmteontwikkeling en spanningsval in kabels. Dit kan vereisen dat dikkere kabels worden gebruikt, wat de kosten verhoogt [23].

In de bestaande literatuur ontbreekt het, ondanks de aanzienlijke impact ervan, aan diepgaande techno-economische analyses met betrekking tot het optimale spanningsniveau voor LVDC-systemen. De onderzoeksgroep EELab/Lemcko bereidt momenteel een onderzoeksproject voor dat gericht is op het uitvoeren van uitgebreide analyses, waarbij rekening wordt gehouden met diverse technische en economische criteria.

Door de actieve betrokkenheid van de onderzoeksgroep bij de relevante IEC-werkgroep, die zich richt op de ontwikkeling van standaarden voor DC-spanningen, kunnen de verworven inzichten worden gedeeld met de internationale gemeenschap. Dit biedt mogelijkheden om de ontwikkeling van een spanningsstandaard te versnellen en te onderbouwen met doordachte en wetenschappelijk gefundeerde analyses.

Veiligheid

Een cruciale veiligheidsrichtlijn voor DC-systemen is vastgelegd in IEC 60364-4-41 [24], waarin de maximale toegestane aanraakspanning wordt gedefinieerd als 50 V voor AC-systemen en 120 V voor DC-systemen. De blootstellingscurves in deze norm, die de relatie tussen stroom en blootstelduur weergeven, tonen aan dat DC een lager risico voor mensen vormt dan AC. Daarnaast is het effect van spanningskeuze op de aanraakspanning onderzocht in [25]. Hierin werd de aanraakspanning berekend als een functie van de totale aardingsweerstand onder foutomstandigheden, waarbij verschillende spanningsniveaus, netimpedantie en de transformator aan de bovenkant van het net werden meegenomen. In deze analyse werd een foutscenario op 1 km afstand van de gelijkrichter en een TN-aardingssysteem in beschouwing genomen.

De resultaten laten zien dat bij hogere spanningsniveaus de aanraakspanning de grens van 120 V overschrijdt bij aanzienlijk lagere aardingsweerstand in vergelijking met lagere spanningsniveaus. Dit suggereert dat het directe effect van een hogere spanning kritischer is dan het indirecte effect van een lagere spanning en de bijbehorende hogere stroom. Bovendien werd waargenomen dat de aanraakspanning snel toeneemt met de aardingsweerstand, voornamelijk omdat de aardingsweerstand domineert totdat deze de waarde van de beschermingsaardegeleider benadert. Daarentegen is de aanraakspanning bij een geïsoleerd aardingssysteem (IT) vrijwel verwaarloosbaar, met analytische resultaten die minder dan 10 mV laten zien. Dit benadrukt de aanzienlijke veiligheidsvoordelen van IT-systemen bij het verminderen van risico's door aanraakspanning.

Efficiëntie

Op gebouwniveau

Verscheidene publicaties in de literatuur behandelen het optimale spanningsniveau voor LVDC-netwerken. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen residentiële en gebouwtoepassingen enerzijds en DC-distributie anderzijds. Voor residentiële toepassingen is het selecteren van een geschikte DC-busspanning sterk afhankelijk van de compatibiliteit met bestaande AC-spanningsniveaus. Vanuit het perspectief van fabrikanten van elektrische apparaten zou een ideale DC-busspanning het aantal benodigde DC/DC-conversiestappen minimaliseren. Zo worden apparaten die ontworpen zijn voor een werking op 220V AC en een power factor corrector bevatten, doorgaans gelijkgericht naar 380V DC. Een DC-bus van 380V zou direct compatibel zijn met dergelijke apparaten, waardoor DC/DC-converters overbodig worden. Dit is echter niet altijd eenvoudig, aangezien sommige apparaten, zoals bepaalde airconditioners, extra DC/DC-converters gebruiken om de 380V DC te verlagen naar 200V DC [26].

In 2014 voerde de IEC System Evaluation Group een wereldwijde enquête uit over LVDC-toepassingen [26]. De resultaten toonden aan dat apparaten die werken onder 48V en boven 350V de markt domineren. Voor residentiële DC-netwerken met een groot aandeel elektronische apparaten wordt daarom vaak een 48V DC-bus aanbevolen. Voor systemen met bijvoorbeeld elektrische voertuigladings zijn hogere spanningsniveaus, zoals 750V, efficiënter. Echter, rekening houdend met de algemene compatibiliteit met huishoudelijke apparaten, wordt 380V DC over het algemeen beschouwd als het meest optimale spanningsniveau voor residentiële DC-bussen. In [27] worden de belangrijkste ontwerpcriteria beschreven voor het geschikt maken van huishoudelijke apparaten voor DC-netwerken, met een focus op vermogensomvormers en regeltechnische vereisten. Een toegepast voorbeeld met inductieverwarming wordt gepresenteerd, waarbij 380V wordt geïdentificeerd als het meest optimale spanningsniveau voor een efficiënte werking.

Een casestudie in [28] onderzoekt het optimale spanningsniveau voor off-grid LVDC residentiële nanogrids op basis van efficiëntie. In vergelijking met LVAC-systemen blijkt dat voor laagvermogen residentiële toepassingen, 48V DC de beste prestaties levert. Dit komt voornamelijk door de dominantie van elektronische apparaten en LED-verlichting, die doorgaans werken onder 48V DC, en het feit dat BESS ook binnen dit spanningsbereik werkt. De studie rapporteert een efficiëntieverbetering van 15-22% voor DC-systemen ten opzichte van conventionele AC-systemen. Voor toepassingen met hoger energieverbruik, zoals in commerciële faciliteiten, wordt een hogere DC-spanning van 400V aanbevolen, wat een efficiëntieverbetering van 10-11% oplevert. Dezelfde aanbeveling voor 48V DC voor residentiële toepassingen wordt ook ondersteund in [29]. De studie [30] stelt dat 24V DC onvoldoende is voor de DC-bus wanneer hogere belastingen, zoals keukentoestellen of EV's, aanwezig zijn. Daarom raden zij 48V of 100V aan voor de LVDC-bus om verliezen en kabelkosten te verminderen. Het is echter belangrijk op te merken dat de auteurs hun studie beperkten tot de extra lage veiligheidsspanning, dat tot 120V reikt.

Op vergelijkbare wijze vergeleek [31] de efficiëntie van LVAC installaties opererend op 230V en LVDC installaties opererend op 325V, rekening houdend met reële verbruiksprofielen. De resultaten tonen aan dat LVDC-distributiesystemen een vergelijkbare of zelfs superieure efficiëntie kunnen behalen ten opzichte van LVAC-netwerken, met een dagelijkse gemiddelde efficiëntievoordeel van 2,3%. Daarnaast werd vastgesteld dat de efficiëntie van het DC-systeem sterk fluctueert gedurende de dag, terwijl de efficiëntie van het AC-systeem relatief stabiel blijft. Deze variatie is voornamelijk te wijten aan efficiëntieverlies bij lagere belastingen in DC/DC-converters.

Op distributieniveau

De auteurs in [32] voerden een uitgebreide evaluatie uit van de werkspanningen voor LVDC-distributie, gebaseerd op de waarden die worden aanbevolen in de Chinese DC spanningsrichtlijn. De standaard definieert LVDC-spanningsniveaus variërend van 110V tot 1500V. De evaluatie werd uitgevoerd voor twee toepassingsscenario's. Het eerste scenario richt zich op civiele toepassingen, zoals residentiële en kantoornetwerken, waarbij veiligheid en kostenefficiëntie prioriteit hebben. Voor deze toepassingen worden lagere spanningsniveaus, specifiek 110V, 220V en 400V, aanbevolen om de veiligheid van de gebruiker en economische haalbaarheid te waarborgen. Het tweede scenario betreft professionele toepassingen, waaronder scheepvaart, stedelijk spoorvervoer, gedistribueerde stroomvoorziening en energieopslagsystemen, waarbij de gebruikers vakbekwaam zijn en de nadruk ligt op praktische toepasbaarheid en flexibiliteit. In deze gevallen worden hogere spanningsniveaus – 600V, 750V en 1000V – als geschikter beschouwd om te voldoen aan de eisen van dergelijke gespecialiseerde omgevingen.

Het overzichtsartikel in [33] presenteert een methodologie voor het selecteren van een geschikt spanningsniveau uit een vooraf gedefinieerde set, die de volgende waarden omvat: 48V, 60V, 220V, 400V, 750V, 1500V, 3000V, 6000V, 10kV, 24kV, 55kV en 100kV. De auteurs hanteerden het constraint-principe, waarbij factoren zoals de spanningen die in bestaande projecten worden gebruikt en de leveringscapaciteit werden meegenomen om deze set te definiëren. Op basis van deze set werd een prestatie-evaluatie uitgevoerd, waarbij vijf belangrijke factoren in overweging werden genomen: de potentiële toekomstige toepassingen van DC-spanning, lijnverliezen, de toepasbaarheid van huidige converters, een vergelijking tussen AC- en DC-vermogenoverdracht, en de straal en afstand tot de verbruikers. Het voorgestelde kader werd toegepast op stadsniveau in een Chinese context, met een gebied van 10 km² en een totale belasting van 200 MW. Het netwerk dat werd onderzocht, omvatte woonwijken, bedrijvenparken, datacenters en spoorweginfrastructuur. Een spanning van 1,5 kV werd aanbevolen voor het spoorsegment, terwijl 220V als meer geschikt werd beschouwd voor residentiële en commerciële netten, inclusief kantoorgebouwen uitgerust met PV-systemen en energieopslag. Daarnaast worden lagere spanningen zoals 60V of 48V voorgesteld voor gebruik binnen gebouwen.

In [23] wordt benadrukt dat spanningsniveaus van 24V, 48V en 120V beperkt zijn tot relatief lage vermogensoverdracht over korte afstanden. In reactie op deze beperking stelt de studie voor om een bipolair LVDC-netwerk te gebruiken met spanningsniveaus van $\pm 350V$ en $\pm 700V$. Deze spanningsniveaus werden geselecteerd op basis van hun compatibiliteit met bestaande normen en regelgeving, hun flexibiliteit in het accommoderen van een breed scala aan belastingstypes en hun potentieel voor schaalbaarheid om grotere gebieden te dekken. Wat betreft energie-efficiëntie concludeerde de studie dat energiebesparingen worden beïnvloed door verschillende factoren, waaronder de efficiëntie van de omvormers, de dichtheid van AC-belastingen, de fysieke en nominale vermogenscapaciteit van het systeem en de mate van penetratie van hernieuwbare energie. Voor kleinere LVDC-systemen zijn de energieverliezen iets hoger (ongeveer 3%) door onvermijdelijke verliezen in de AC/DC-converter. Voor grotere LVDC-netten worden de verliezen in de converter gecompenseerd door grotere kabelverliezen in de LVAC-netten. Bovendien blijkt uit de studie dat de toegenomen penetratie van hernieuwbare energiebronnen de energiebesparingen in het systeem verder verbetert.

In [26] wordt een uitgebreide studie gepresenteerd over de prestaties van verschillende spanningsniveaus binnen een LVDC-stroomsysteem dat is gekoppeld aan het LVAC-net van de energieleverancier. De systeemconfiguratie omvat vier eengezinswoningen, elk uitgerust met een LVDC-residentiële systeem, evenals verschillende soorten energieopslag en hernieuwbare energiebronnen (RES). De

vergelijkende analyse van de studie suggereert dat voor een unipolair residentieel DC-voedingssysteem de optimale spanningsniveaus 240V en 380V zijn. Voor een bipolaire DC-voeding die is ontworpen om zware belastingen aan te kunnen, wordt een spanning van 750V ($\pm 375V$) aanbevolen.

Standaardisatie

Zoals eerder vermeld, bevindt de standaardisatie van DC-uitbatingsspanningen zich nog in een zeer vroege fase. Hoewel er binnen de IEC al initiatieven zijn om dit proces op gang te brengen, bestaat er op dit moment nog geen formele standaard. De voorgaande paragrafen hebben echter benadrukt dat verschillende factoren een rol spelen bij het bepalen van de optimale uitbatingsspanningen. Bovendien zorgt het selecteren van de juiste uitbatingsspanning ervoor dat de voordelen ten opzichte van traditionele AC-netwerken verder kunnen worden vergroot.

Geschikte internationale LVDC-spanningsbereiken zullen een basis bieden voor het ontwerp en de testprocedures van elektrische apparatuur en systemen, en vergemakkelijken de overgang van apparatuur van AC naar DC-stroomvoorziening. LVDC-spanningen moeten voldoen aan de vereisten van de gebruiksscenario's waarin LVDC-systemen een verschil kunnen maken. De lijst van standaardspanningen moet zo kort mogelijk zijn, zodat een kosteneffectieve en veilige werking mogelijk is.

Vanuit die optiek is er binnen de IEC een werkgroep opgericht die zich hiermee bezighoudt. Deze werkgroep heeft in eerste instantie een technisch rapport opgesteld waarin een reeks aanbevelingen wordt verzameld, gebaseerd op ervaringen uit verschillende pilootprojecten wereldwijd. Onderzoeksgroep EELab/Lemcko is actief betrokken bij deze werkgroep en zal hieronder de (voorlopige) aanbevelingen voor de spanning beschrijven.

Er worden twee verschillende tabellen met aanbevolen spanningen voorgesteld:

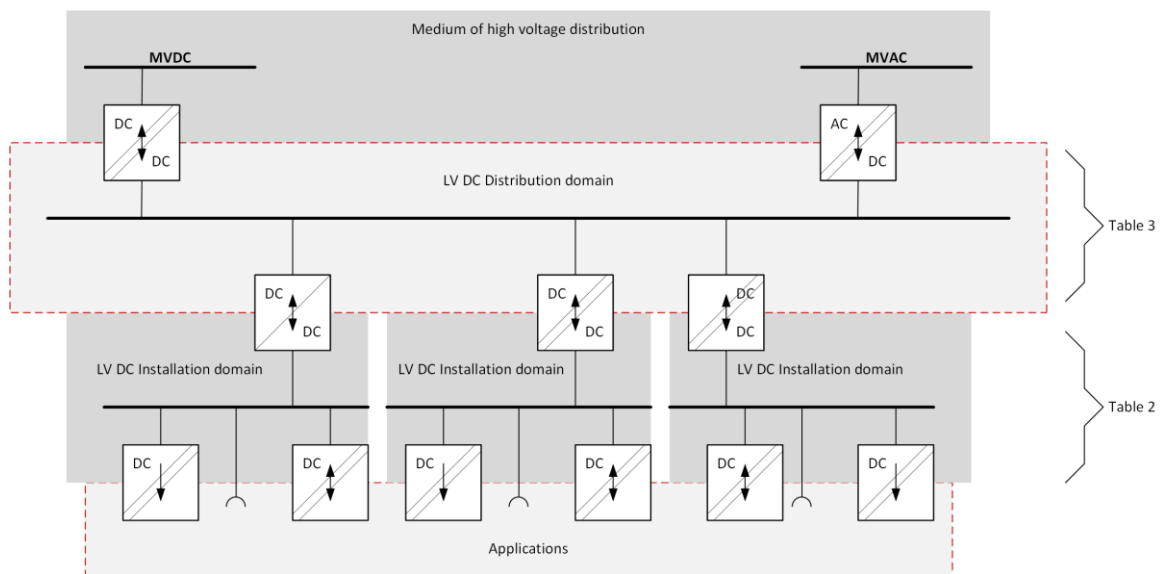
- Eén voor het distributiedomein: installaties voor hoge vermogens, lange afstanden en puur distributiedoeleinden, exclusief eindcircuits.
- Eén voor het installatiedomein: installaties inclusief eindcircuits, typisch in privéomgevingen, voor het leveren van spanning aan eindgebruikersapparaten.

De aanbevolen spanningswaarden houden rekening met de compatibiliteit van de installaties die tot deze twee domeinen behoren, weergegeven in Figuur 57. Verschillende veelgebruikte spanningen zijn opgesomd in de gebruiksscenario's die zijn opgenomen in Tabel 4. Deze spanningen vertegenwoordigen de huidige voorgestelde spanningsniveaus.

Tabel 4 Voorlopig aanbevolen spanningen door de IEC DC-werkgroep.

Installation domain	Distribution domain
$\pm 175V$	-
350V	750V
$\pm 350V$	$\pm 750V$
700V	1500V
± 700	-
1400V	-

De opgesomde spanningen zijn nominale waarden. Net zoals bij de AC-standaarden zal er ook voor DC een reeks spanningsbanden bestaan die dynamisch zullen zijn. Deze spanningsbanden omvatten de blackoutband, de noodband, de nominale band, de operationele overspanningsband en de niet-operationele overspanningsband.



Figuur 57 Onderscheid tussen distributiedomein en installatiedomein zoals gedefinieerd door de IEC DC-werkgroep.

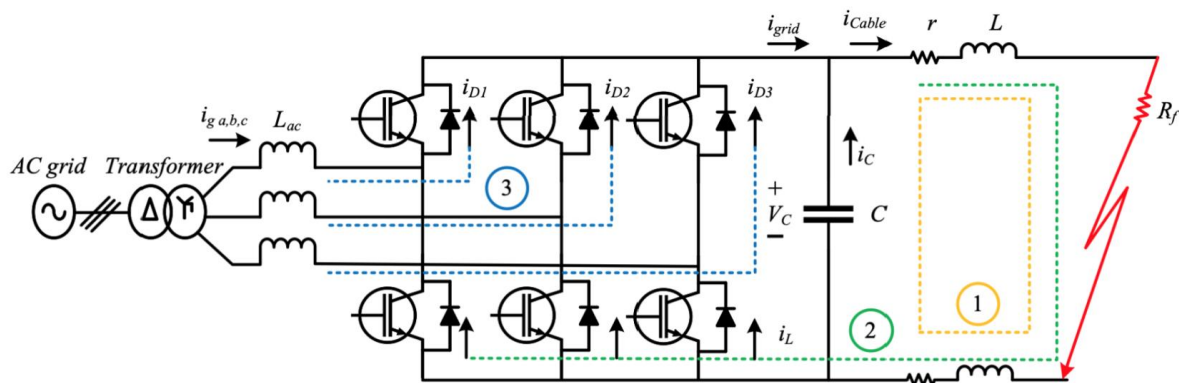
Beveiliging

De beveiliging van DC-netten brengt specifieke uitdagingen met zich mee door het gebrek aan gestandaardiseerde richtlijnen en de technische complexiteit van foutdetectie en -afschakeling. De ontwikkeling van betrouwbare en economisch haalbare beveiligingsmethoden wordt bemoeilijkt door de afwezigheid van standaarden.

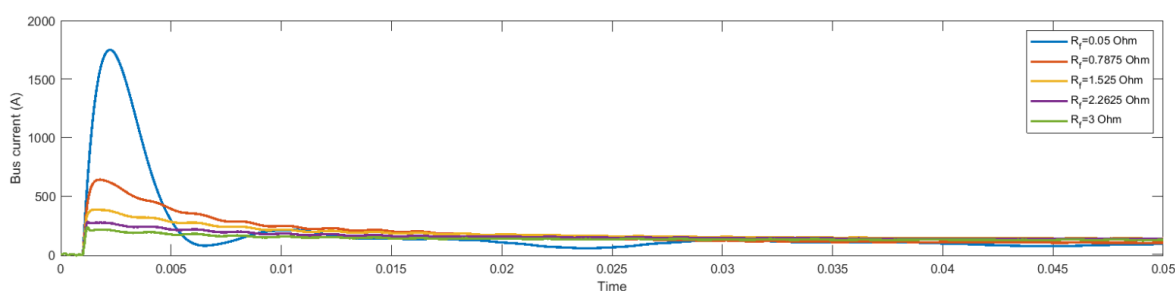
Belangrijke uitdagingen zijn onder meer het ontbreken van natuurlijke nuldoorgangen, wat de foutstroomonderbreking bemoeilijkt en hogere eisen stelt aan beveiligingsapparatuur. Dit betekent dat standaard AC-overstroombeveiligers niet geschikt zijn. Bovendien kunnen omvormers beschadigd raken als ze langer dan enkele milliseconden aan foutstromen worden blootgesteld. Tijdens fouten ontladst de condensator van de omvormer, wat leidt tot piekstromen, en kan de foutstroom zich verspreiden naar componenten waar deze niet kan worden onderbroken.

De capacatieve aard van vermogenelektronische omvormers zoals de VSC afgebeeld op Figuur 58 leidt tot hoge piekstromen (zie Figuur 59) tijdens fouten, terwijl de integratie van beveiligingsmechanismen wordt bemoeilijkt door de variabele aard van hernieuwbare energiebronnen, batterijsystemen en hun verschillende bedrijfsmodi. Traditionele mechanische schakelaars hebben trage reactietijden, waardoor ze minder geschikt zijn voor DC-distributie, waar foutstromen snel tot 100 keer de nominale belastingstroom kunnen bereiken. Zekeringen bieden een goedkope oplossing, maar moeten na elke fout vervangen worden en kunnen geen onderscheid maken tussen tijdelijke en permanente fouten.

De unieke eigenschappen van DC-netten vereisen snellere, betrouwbaardere en kosteneffectieve beveiligingsapparatuur. Het ontwikkelen van gestandaardiseerde richtlijnen en geavanceerde technologieën is essentieel om deze uitdagingen aan te pakken en de implementatie van DC-netten te versnellen.



Figuur 58 Een 2-level VSC waarbij de 3 fasen worden weergegeven bij een kortsluiting aan de DC-zijde.



Figuur 59 Foutstroom bij een two-level VSC converter met verschillende foutweerstand.

Pilootprojecten

In [64] wordt een lijst gepresenteerd van een aantal LVDC projecten wereldwijd. Daarnaast is er een interactieve microgridkaart beschikbaar via [65]. Deze kaart toont DC-projecten wereldwijd en categoriseert ze op basis van de type toepassing. Het is belangrijk op te merken dat deze kaart niet volledig up-to-date is en dat er een aantal projecten ontbreken. Desondanks biedt de lijst een goed overzicht van de status van de implementatie van DC wereldwijd. De details van deze projecten en zijn opgenomen in Tabel 5.

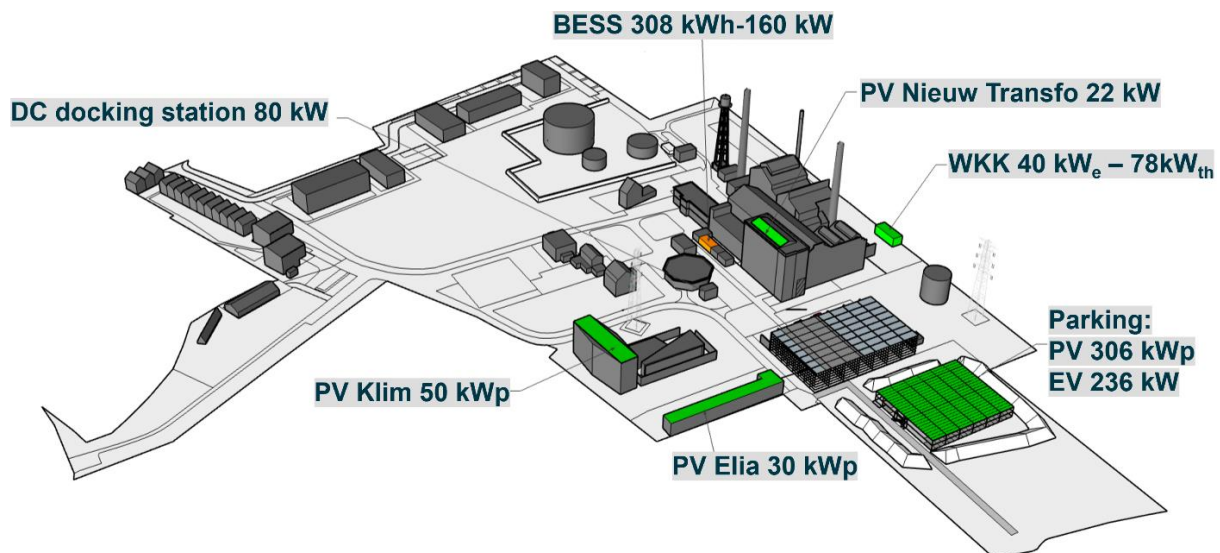
Tabel 5 Overzicht van DC-pilootprojecten.

Project	Beschrijving
ABN Amro Bank Circle Paviljoen in Amsterdam	Efficiënt en duurzaam circulair gebouw in Amsterdam, met 3000m ² vergaderruimtes en voorzien van een 350V DC-microgrid [34].
Koreaans project op Seogeocho eiland	±750V systeem met RES, BESS en oplaadstations voor EV's [35].
Schneider's kantoor in Grenoble	Laadstation voor EV's met carport, bifaciale PV-modules, BESS en LED's [36].

In Vlaanderen is er sinds kort ook een LVDC-net, namelijk het RE/SOURCED-project. Het RE/SOURCED-project [37], een initiatief van Urban Innovative Actions gefinancierd door de Europese Unie, heeft als doel een circulair, middelgroot en zelfvoorzienend energiesysteem te ontwikkelen binnen de herontwikkeling van de Transfosite, een voormalige kolengestookte elektriciteitscentrale in Zwevegem, België. Het project beslaat 10 hectare en integreert kantoren, woningen en sociale

voorzieningen. De site heeft een divers energieverbruikprofiel, wat het een ideale omgeving maakt om bewoners en consumenten samen te brengen in een energiegemeenschap als living lab. Het project omarmt de principes van de circulaire economie door te focussen op materiaalhergebruik, renovatie en energie-efficiëntie. Dit wordt grotendeels gerealiseerd door de implementatie van een LVDC microgrid, dat centraal staat in de benadering van het project om energieproductie, -opslag en -verbruik te optimaliseren.

Het LVDC-microgrid heeft een radiale DC-backbone die via een bidirectionele AC/DC-omvormer is verbonden met het openbare AC-net. Door DC te gebruiken voor de koppeling van gedistribueerde hernieuwbare energiebronnen en BESS, zoals weergegeven in Figuur 60, biedt het microgrid aanzienlijke voordelen op het gebied van energie-efficiëntie door conversieverliezen te verminderen en het materiaalgebruik te minimaliseren [38]. Energie wordt voornamelijk opgewekt door meerdere PV installaties en een WKK, terwijl de opslag wordt verzorgd door een stationair BESS. De seizoensgebonden complementariteit tussen PV en CHP verhoogt de zelfvoorziening van het microgrid, wat verder wordt versterkt door de aggregatie van diverse vraagprofielen, wat ook bijdraagt aan een langere levensduur van het BESS [39]. Oplaadstations voor EVs gebruiken direct DC-energie, waarbij overtollige energie wordt opgeslagen in het BESS, ter plaatse wordt verbruikt of via een Single Point of Connection (SPoC) in het openbare AC-net wordt geïnjecteerd.



Figuur 60 3D-weergave van het RE/SOURCED-project.

Deze SPoC maakt schaalvoordelen mogelijk en stelt het microgrid in staat om flexibiliteitsdiensten aan het openbare AC-net te leveren als een enkel geheel. Het microgrid wordt beheerd door een uitgebreid Energy Management System dat alle energiestromen monitort en optimaliseert, met inbegrip van weersvoorspellingsmogelijkheden en historische verbruiksdata. Als het eerste LVDC-microgrid dat wordt beheerd door een openbare distributienetbeheerder (DNB) in België, heeft dit project als doel waardevolle inzichten te bieden in operationele praktijken en systeemontwerp. Het beoogt ook de standaardisatie van LVDC-netwerken te bevorderen, wat de weg vrijmaakt voor een bredere adoptie.

Concreet worden momenteel kortsluitingstests voorbereid voor het DC-netwerk in samenwerking met de DSO. Deze tests hebben als doel de betrouwbaarheid van de netbeveiliging te beoordelen en nieuwe rekentechnieken voor kortsluitanalyses in DC-netwerken te valideren. De huidige standaard voor DC-kortsluitstromen, IEC 61660 [9], houdt geen rekening met vermogenelektronische converters, hoewel vermogenselektronica een aanzienlijke invloed heeft op het kortsluitgedrag. Om deze

beperking aan te pakken, is er een uitgebreid circuitmodel van het gehele netwerk ontwikkeld. Dit model maakt nauwkeurige berekeningen van de kortsluitstroomsterktes en -dynamiek mogelijk, door gedetailleerde componentenpecificaties van de converterfabrikant te gebruiken. Deze inspanning zal resulteren in een methodologie voor het juiste ontwerp van beveiligingsapparatuur en aanbevelingen voor standaardisatie.

EV laden op AC en DC

De integratie van PV-BESS via LVDC-backbones maakt efficiëntere energiestromen mogelijk door conversieverliezen aanzienlijk te verminderen. Bovendien biedt de vervanging van meerdere kleinschalige DC/AC-omvormers door een gecentraliseerde DC/AC-omvormer schaalvoordelen. Deze voordelen, besproken in een vorig onderzoek, onderstrepen het potentieel van LVDC-integratie [22].

Een extra mogelijkheid om deze voordelen te vergroten, is het maximaliseren van het direct PV verbruik binnen de LVDC-backbone om netuitwisselingen te minimaliseren. EV-laders zijn in dit opzicht bijzonder geschikt, omdat ze een sleutelrol spelen in de elektrificatie van de vraag en aanzienlijk bijdragen aan de toenemende elektriciteitsbehoefte. De integratie van EV's brengt echter ook uitdagingen met zich mee, zoals netcongestie en power quality problemen [40]. Het combineren van EV-vraag met PV en BESS is essentieel om deze uitdagingen aan te pakken, vooral wanneer ze worden geïntegreerd via een LVDC-backbone.

Dit onderdeel onderzoekt de integratie van EV-laders binnen een industriële omgeving voor EV-laden op de werkplek. De analyse wordt voorafgegaan door een literatuurstudie, de ontwikkeling van EV-laadmodellen en de toelichting van toegepaste laadstrategieën.

Literatuurstudie

Problemen op LVAC netten

De toenemende adoptie van EVs brengt belangrijke uitdagingen met zich mee voor distributienetten. EV-laden vraagt relatief hoge vermogens in vergelijking met andere huishoudelijke apparaten, wat leidt tot spanningsonevenwichtigheden, verhoogde vermogensverliezen en congestie in het net. Verschillende studies hebben deze problemen onderzocht en bieden waardevolle inzichten in hoe deze uitdagingen kunnen worden aangepakt.

Een Duitse studie [40] analyseerde de impact van EV-penetratie op residentiële netten, rekening houdend met regionale variaties in netconfiguraties zoals landelijke, rurale en stedelijke gebieden. Deze netten verschillen in kabellengte, afstand tussen huishoudens en benutting van transformatoren. De studie onderzocht verschillende laadscenario's en toonde aan dat spanningsafwijkingen en overbelasting van transformatoren vooral optreden bij hoge penetratieniveaus, met name in landelijke netten met de typische lange leidingen. In stedelijke gebieden werden eerder thermische grensoverschrijdingen waargenomen in kabels en transformatoren. Dit benadrukt dat de uitdagingen sterk afhankelijk zijn van de structuur van het net.

Gecontroleerd laden van EV's biedt een effectieve oplossing om deze problemen te beperken. Een Vlaamse studie [41] liet zien dat ongecontroleerd laden de netbelasting meer dan verdubbelde, wat leidde tot overbelasting van transformatoren. Gecontroleerde laadstrategieën, waarbij de laadstroom wordt aangepast aan de beschikbare netcapaciteit, verminderden de belasting tot 90% van de nominale capaciteit en beperkten spanningsafwijkingen. Het gebruik van spanningsdroop laadcontrole bleek bijzonder effectief in het verminderen van spanningsdalingen en het handhaven van netstabiliteit. Een Nederlandse studie [42] onderzocht de effecten van laadstrategieën gericht op kostenoptimalisatie versus piekbelastingbeheer. Hoewel kostenoptimalisatie aantrekkelijk lijkt, leidt

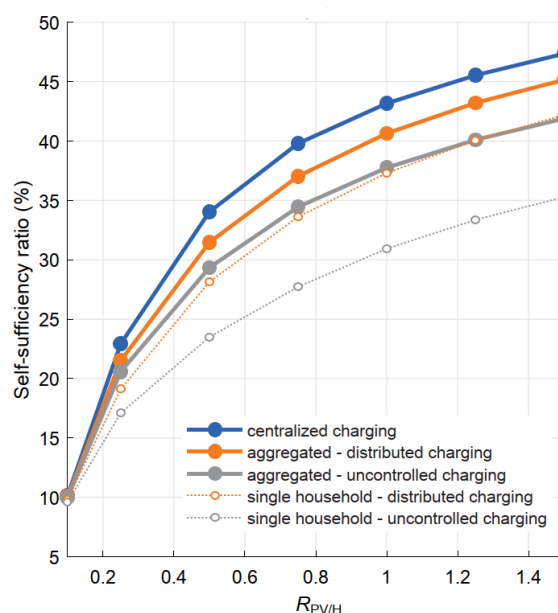
deze aanpak tot hogere netbelastingen en energieverliezen. Piekbelastingbeheer daarentegen resulteert in een vlakker belastingprofiel, lagere verliezen en minder noodzaak tot netversterkingen. Dit onderstreept het belang van het integreren van *grid constraints* in laadstrategieën om de algehele efficiëntie van het elektriciteitssysteem te waarborgen.

Naast kabelverliezen zijn er ook energieverliezen binnen de OBC en de batterij. Deze verliezen variëren afhankelijk van de laadstroom en de laadstatus (SoC). Bij lage laadstromen zijn de verliezen in de OBC en de batterij het grootst. Dit heeft implicaties voor de dimensionering van laadstations: hoewel lagere laadvermogens de initiële kosten kunnen verlagen, kunnen ze op termijn leiden tot hogere energiekosten door toenemende verliezen [43]. Een ander belangrijk aandachtspunt is de impact van EV-laden op de kwaliteit van de stroomvoorziening. Spanningsfluctuaties, harmonischen en supra-harmonischen vormen grote uitdagingen. Deze fenomenen kunnen leiden tot flikkeringen in verlichting, extra vermogensverliezen in kabels en transformatoren, en storingen in beschermingsapparatuur. Verdere inzichten in de uitdagingen die harmonischen en supraharmonischen veroorzaken in praktijktoepassingen van boordladers OBC's worden toegelicht in [1]. Uit de studie bleek dat supra-harmonischen aanwezig waren in zeven van de acht geteste OBC's, met een aanzienlijke toename van harmonische vervorming bij lagere laadstromen.

Synergie en optimalisatie tussen PV en EV

De voorgaande paragraaf richtte zich uitsluitend op de effecten van EV's op de power quality en de beperkingen van de netcapaciteit, evenals op de manieren om deze problemen te mitigeren door optimale laadstrategieën. De aanwezigheid van lokale PV-opwekking biedt echter een belangrijke opportuniteit om deze uitdagingen verder aan te pakken. Lokale PV-productie kan bijdragen aan het verminderen van piekbelastingen, overbelasting van het net voorkomen, spanningsafwijkingen minimaliseren, stroomverliezen verminderen en het zelfverbruik van PV verhogen. Dit laatste biedt niet alleen economische voordelen, maar vermindert ook de power quality problemen die samenhangen met PV-injectie [44] [45].

In een doctoraatsonderzoek onderzocht Fachrizal de synergie tussen PV-opwekking en de laadvraag van EV's, waarbij een optimalisatiekader werd ontwikkeld om netuitwisselingen te minimaliseren [44]. De ontwerpvariabele in dit kader was het laadprofiel van EV's, onderworpen aan beperkingen zoals de dagelijkse laadbehoefte en het maximaal toegestane laadvermogen. De gecontroleerde laadstrategie werd onderzocht via twee benaderingen: gedistribueerde optimalisatie en geaggregeerde optimalisatie. De resultaten toonden aan dat de geaggregeerde optimalisatieaanpak de hoogste waarden behaalde voor zowel de Self-Consumption Index (SCI) als de Self-Sufficiency Index (SSI). De SSI was ongeveer 5 procentpunten hoger in vergelijking met geaggregeerd maar ongecontroleerd laden, zoals weergegeven in Figuur 61. Bovendien benadrukte de analyse de voordelen van geaggregeerd laden boven individueel laden, met name in het verhogen van PV-gebruik en het verminderen van netimporten. Deze bevindingen zijn gebaseerd op een PV-installatie waarvan de jaarlijkse opwekking gelijk is aan het jaarlijkse verbruik. Daarnaast lieten alle onderzochte gecoördineerde laadscenario's aanzienlijke piekbelastingsreducties zien, met een grotere reductie op gebouwniveau (50%) dan op gemeenschapsniveau (40%). Dit verschil is te wijten aan het feit dat piekbelastingen in woongebouwen niet altijd samenvallen. Geaggregeerde optimalisatie leidde ook tot lagere netverliezen en hogere minimale spanningsniveaus.



Figuur 61 SSI voor verschillende laadstrategieën toegepast op individuele huishoudens en geaggregeerde resultaten.

In [46] werden drie verschillende controleprincipes onderzocht om de synergie tussen PV-productie en EV-laadvraag te maximaliseren. Het onderzoek was gemotiveerd door het ontbreken van een systematische analyse van hoe verschillende coördinatiemechanismen de prestaties van EV-laadrespons beïnvloeden. Het referentiescenario zonder controle werd vergeleken met twee gecoördineerde benaderingen: een bottom-up strategie, waarbij de laadsnelheid sequentieel wordt geoptimaliseerd per lader, en een top-down strategie, gericht op geaggregeerde prestaties. De top-down aanpak presteerde beter in termen van piekbelastingsreductie en algehele verbetering, maar bracht hogere rekenkosten en complexiteit met zich mee.

Andere studies hebben technieken onderzocht om laadprofielen van EV's te optimaliseren in combinatie met PV-systemen, gericht op meerdere doelen. Bijvoorbeeld, in [47] werd een multi-objective optimalisatiekader voorgesteld voor een PV-EV-station met een batterijopslagsysteem. De doelen waren het maximaliseren van de inkomsten en het minimaliseren van BESS-degradatie, terwijl de *grid constraints* werden gerespecteerd. De resultaten toonden aan dat een balans kan worden gevonden tussen inkomstenmaximalisatie en een langere levensduur van de BESS via optimale controle. In een andere studie [48] werd de temporele afstemming van EV-laadvraag en PV-opwekking geanalyseerd in Rotterdam. Gecoördineerd laden, vooral in de winter, leidde tot hogere zelfconsumptie. Interessant genoeg bleek opportunistisch laden tijdens periodes van overschot aan zonne-energie soms een lagere zelfconsumptie te veroorzaken, wat het belang van strategische coördinatie benadrukt. Tot slot gaf de review [49] een uitgebreid overzicht van controlestrategieën en uitdagingen bij EV-PV-integratie, waaronder problemen met stroomkwaliteit en de hoge kosten van geïntegreerde laadstations.

Vergelijkende analyses op AC en DC

Deze paragraaf biedt een overzicht van bestaande studies die de vergelijkende efficiëntie van LVAC- en LVDC-netten onderzoeken, met een focus op de integratie van EV's. Het artikel [31] heeft studies beoordeeld die de efficiëntie van beide netarchitecturen vergelijken en een nieuwe benadering voorgesteld voor efficiëntiestudies die meerdere parameters omvat, zoals geïnstalleerde PV-capaciteit, batterij SoC en de specifieke belasting- en opbrengstprofielen. Al deze factoren hebben een significante invloed op de efficiëntie en moeten in elke analyse worden meegenomen. De auteurs wijzen

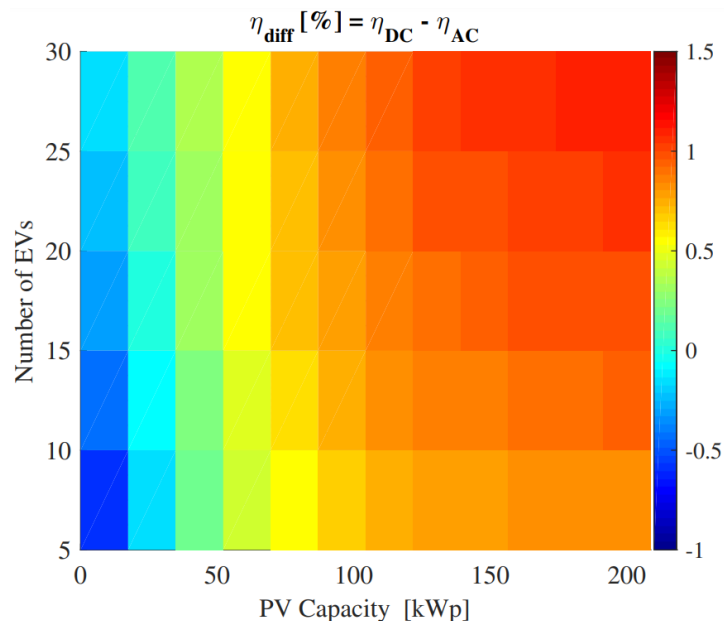
echter ook op de beperkingen van veel studies, met name de aannames die de kwaliteit van de resultaten verminderen. Terwijl één parameter constant werd gehouden, werden andere in discrete stappen binnen een vast bereik gevarieerd. Een vaak over het hoofd gezien aspect is de uitbatingsspanning, dat nauw verbonden is met kabel- en omzettingsverliezen en hun ontwerp. De auteurs concluderen met aanbevelingen voor toekomstig onderzoek, vooral naar EV-integratie, wat nog een onderbelicht gebied is. Momenteel behandelen slechts drie artikelen expliciet de vergelijkende efficiëntie van LVAC- en LVDC-systemen met EV-integratie.

Het artikel [50] presenteert een analyse van energieverliezen en spanningsprofielen in LVAC- en LVDC-netten met integratie van EV's. De auteurs beschouwden een benchmark voor een radiale LV-nettopologie, die kan schakelen naar een ring-mesconfiguratie. Dit net bestond uit verschillende sub-netwerken, waaronder commerciële entiteiten, residentiële klanten, een Fast Charging Station (FCS) en een winkelcentrumparkeergarage met EV-laders. Er werd aangenomen dat residentiële klanten 2,3 kW of 11 kW laders hadden, terwijl de FCS's werden gemodelleerd met vermogens tot 50 kW. Opvallend is dat hernieuwbare energiebronnen en energieopslagoplossingen niet in de simulaties waren opgenomen, en het DC-werksspanningsniveau was vastgezet op 380 V. Om realistische laadprofielen te genereren, gebruikten de auteurs statistieken uit Nieuw-Zeeland, en pasten ze een stochastisch model toe om het laadgedrag te simuleren. Vier EV-types, die de grootste marktaandeelen in Nieuw-Zeeland vertegenwoordigen, werden gebruikt, rekening houdend met batterijcapaciteit, het nominale vermogen van de OBC en het specifieke energieverbruik (energie per kilometer). De laadvermogens en types EV's werden willekeurig toegewezen aan klantnodes. Simulaties werden uitgevoerd over een periode van 24 uur met een resolutie van 15 minuten. De resultaten gaven aan dat de radiale netconfiguratie leidde tot een significante vermindering van de energieverliezen, terwijl de mesconfiguratie slechts marginaal verschil opleverde. Bovendien bleek de minimale spanning in het LVDC-net 2 tot 3 procentpunten hoger te zijn dan in LVAC. De studie biedt echter geen duidelijkheid over de oorzaak van de energieverliezen, of deze nu door de omvormers, kabels of beide werden veroorzaakt, noch hoe deze verliezen werden berekend.

In [51] werd de toepassing van EV-laden op zowel DC- als AC-architecturen getest in een werkomgeving. De studie simuleerde laadgedrag met vaste aankomsttijden om 7:45 uur en beschouwde twee scenario's met 10 laders van respectievelijk 11 kW of 22 kW. Het DC-distributiesysteem omvatte ook een PV-installatie en een BESS; echter, de studie specificeerde de grootte van de BESS niet of beschreef de laadstrategie, en gaf ook het spanningsniveau niet aan. Bovendien werd in de analyse aangenomen dat vaste efficiëntiewaarden werden afgeleid van commerciële omvormerspecificaties en literatuurmodellen, zonder onderscheid te maken tussen de efficiëntie van AC- en DC-omvormers. Een typisch energieverbruikprofiel van een kantoorgebouw werd aangenomen als basislastprofiel. Energieverliezen voor zowel AC- als DC-architecturen werden dagelijks gesimuleerd en geëxtrapoleerd naar wekelijkse en jaarlijkse niveaus, wat betekent dat seizoensvariaties in PV-opwekking niet werden overwogen. De resultaten toonden aan dat de LVDC-architectuur, wanneer gekoppeld aan een PV-systeem, het grootste besparingspotentieel bood door minimale netuitwisselingen. De auteurs raadden verder onderzoek aan naar verschillende laadscenario's, inclusief kosten-batenanalyses, om de implicaties van deze architecturen beter te begrijpen.

De studie gepresenteerd in [52] onderzocht kantoorgebouwen met EV-integratie in een unipolair LVDC-net dat opereerde op 750 V. Het LVDC-netwerk omvatte een PV-systeem, BESS en meerdere EV-laders. De simulatie gebruikte repetitieve dagelijkse energieverbruiksprofielen voor kantoorgebouwen, afgeleid van een literatuurmodel. Vijf verschillende laadprofielen werden aangenomen, elk met verschillende laadvermogens, maar met vast gedrag (d.w.z. consistente aankomst- en vertrektijden evenals geladen energie) gedurende het hele jaar. Er werd een vaste efficiëntie van 98% voor

elke omzetterfase en 99% voor de efficiëntie van AC-kabels aangenomen. De laatste werd aangepast voor DC door de relatieve verliezen te vermenigvuldigen met de verhouding van de theoretische DC/AC-kabelverliezen, waarbij de arbeidsfactor op DC werd uitgesloten en het aantal geleiders werd verminderd van drie naar twee. De analyse werd uitgevoerd over een periode van een jaar met een resolutie van 1 uur. De auteurs onderzochten de relatieve efficiëntie van DC ten opzichte van AC en vonden dat de efficiëntiewinst maximaal was wanneer een grote hoeveelheid PV-opwekking werd gekoppeld aan voldoende EV-vraag, met een maximaal voordeel van 1,5 procentpunt. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 62.



Figuur 62 Absoluut efficiëntieverschil tussen EV-laden op AC en DC met variërend aantal EV's en PV-capaciteit.

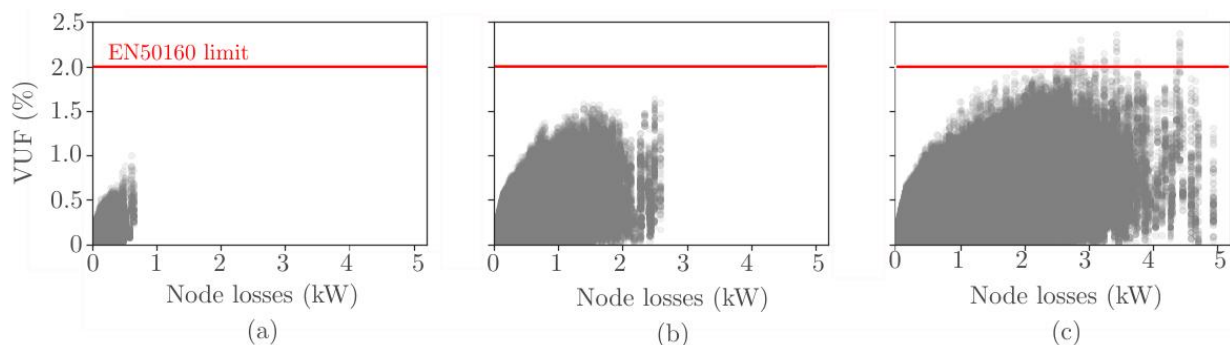
De sensitiviteitsanalyse van de PV-capaciteit gaf verder aan dat wanneer EV's direct de geproduceerde PV-energie consumeren, de efficiëntie toeneemt in het DC-geval, terwijl de extra conversiestappen in AC leiden tot hogere verliezen. Het opnemen van BESS bleek alleen voordelig wanneer er voldoende PV-capaciteit was, wat het belang benadrukt van het goed dimensioneren van zowel het PV-systeem als de BESS. Tabel 6 biedt een samenvatting van de toepassingen en beperkingen van de onderzochte referenties.

De geobserveerde beperkingen in voorgaande studies werden in een eerder onderzoek al gedeeltelijk ingevuld, waarbij de focus lag op de implementatie van een residentieel hybride AC/DC distributienet. De studie [53] onderzocht de toepassing van een LVDC-architectuur in een residentieel distributienet met 91 aansluitpunten in een voorstedelijk gebied, waarin gedistribueerde PV-systemen, EV-laders en een gecentraliseerd BESS zijn geïntegreerd. Deze configuratie wordt vergeleken met een equivalente LVAC-architectuur, die gedistribueerde PV-systemen, EV-laders en gedecentraliseerde BESS bevat. De EV's volgen een opportunistisch laadstrategie voor hun laadgedrag, dat wil zeggen dat de EV's laden bij aankomst en stoppen met laden bij vertrek of wanneer de auto volladen is.

Tabel 6 Overzicht van beperkingen in studies over de integratie van EV's in LVDC-netten.

Ref.	Toepassingen	Beperkingen
[50]	Residentieel en commercieel	- Simulatie van één dag, dus seizoensvariaties worden niet meegenomen - Dynamisch laadgedrag niet inbegrepen - Geen RES en opslag - Verliesberekeningsmethode en efficiënties niet gespecificeerd
[51]	Werkplaats	- Vaste aankomsttijd en initiële SoC - Dynamisch laadgedrag uitgesloten - Simulatie van één dag, dus seizoensvariaties worden niet meegenomen - Vaste efficiëntiewaarden aangenomen
[52]	Kantoorgebouwen	- Simulatie met een resolutie van 1 uur - 5 laadprofielen aangenomen met verschillende maar vaste laadvermogens - Dynamisch laadgedrag niet inbegrepen - Vaste efficiëntiewaarden aangenomen

De analyse van de spanningsafwijkingen toonde geen overschrijdingen van de spanningslimieten, zelfs niet bij hoge penetratie van PV of EV's. Deze beperkte afwijking kan worden toegeschreven aan de doorgaans kortere feederlengtes in voorstedelijke gebieden en de aanwezigheid van BESS's. Echter, de directe aansluiting van PV-systemen in de LVDC-architectuur (d.w.z. zonder MPPT) resulteert in lichte PV-curtailment. Een ander onderzochte kwestie is de spanningsonbalans weergegeven in Figuur 63, waarbij de drempel een aantal keer per jaar wordt overschreden, wat leidt tot verhoogde kabelverliezen. De vergelijkende efficiëntieanalyse toonde de voordelen aan van de synergetische integratie van EV's en PV-systemen, die de operationele efficiëntie in de LVDC-architectuur verbeteren en de netafname aanzienlijk verminderen. Voor scenario's met hogere oplaadvermogens werd opgemerkt dat grotere PV-systeemgroottes nodig zijn om een efficiënte werking binnen een LVDC-architectuur te behouden.



Figuur 63 Spanningsonbalans in functie van de kabelverliezen bij verschillende EV-penetraties zonder PV en met variërende EV-penetratie: (a) 0% EV-penetratie; (b) 50% EV-penetratie; (c) 100% EV-penetratie.

Naast de eerder genoemde artikels hebben andere studies ook vergelijkende analyses uitgevoerd tussen LVDC- en LVAC-netconfiguraties, echter met een andere focus. De studie [54] onderzoekt de economische implicaties van het uitbreiden van laagspanningsdistributienetwerken met ofwel pure DC- of hybride AC/DC-systemen voor de integratie van zonne-PV en EV-laden. Conversieverliezen werden berekend met vaste efficiëntiewaarden, en er werden vergelijkingen gemaakt tussen traditionele AC-systemen, hybride AC/DC-systemen en pure DC-systemen. De auteurs concludeerden dat

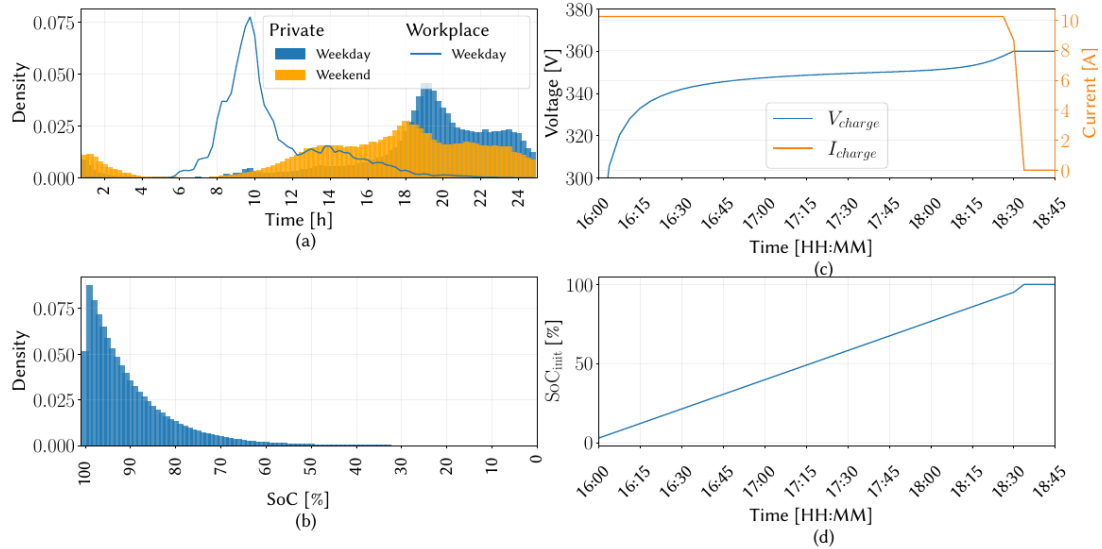
een parallelle pure DC-systeem voordeliger kan zijn in gebieden zonder bestaande distributiesystemen. Een tien jaar oude PhD-thesis [55] onderzocht ook de toepassing van DC- en AC-netten in gebouwen met EV, PV en warmtepompen. Hoewel de studie geen expliciete focus op energieverliezen had, lag de nadruk op andere aspecten zoals netuitwisselingen, piekvraag en spanningsonbalans, opnieuw met vaste efficiëntiewaarden voor de analyse.

Methodologie

Laadmodel

Het eerste onderdeel richt zich op het modelleren van het gedrag van individuele rijbestuurders, waarbij de inherente stochastische variaties worden meegenomen op basis van beschikbare statistische gegevens. Dit wordt geïntegreerd met een dynamisch oplaadmodel, dat stroom- en spanningsprofielen genereert die het oplaadproces voorstellen. Hieronder worden de twee onderdelen beschreven:

- i. **Modellering van het rijgedrag:** De EV-laadprofielen worden stochastisch gegenereerd op basis van realistische gegevens, verzameld door ELaadNL, een kennis- en innovatiecentrum voor slim en duurzaam opladen van EVs, geïnitieerd door de Nederlandse netbeheerders [56]. ELaadNL heeft waarschijnlijkheidsfunctie (PDF's) afgeleid voor aankomsttijden en de initiële laadstatus SoC_{init} op basis van 10.000 laadsessies die in 2018 in Nederland werden gemonitord. Deze PDF's zijn gecategoriseerd in drie groepen: (i) particuliere klanten die thuis laden, (ii) werknemers die laden op hun werkplek, en (iii) openbare klanten die laden op openbare locaties. Het focus van dit onderzoek ligt uitsluitend op particulier laden en laden op het werkplek, waarbij de waarschijnlijkheden worden gebruikt om aankomsttijden en de initiële SoC van de EV's te bepalen, zoals weergegeven in Figuur 64 (a) en (b). Het is belangrijk op te merken dat de laders in het weekend niet worden gebruikt.
- ii. **Dynamisch laadproces:** Dit wordt toegepast om overbelasting en degradatie te voorkomen. Het laadproces bestaat uit een constante stroom (CC) fase, gevolgd door een constante spanning (CV) fase, gebaseerd op de benadering gepresenteerd in [57]. In de CV-fase wordt het risico vermindert dat de batterijspanning zijn drempel overschrijdt. De verkregen dynamische spanning- en stroom-oplaadcurves, evenals de SoC-curve, worden gepresenteerd in Figuur 64 (c) en (d). Merk op dat elektrische circuitmodellen meestal worden bepaald voor individuele cellen, terwijl in deze studie batterijpacks bestaan uit meerdere cellen die in serie zijn geschakeld. Daarom wordt een conversie toegepast. De conversiemethodologie en de parameters die worden gebruikt voor het modelleren van het dynamische oplaadproces zijn te vinden in [57] en zijn gebaseerd op het batterijpack van de Nissan Leaf.



Figuur 64 Waarschijnlijkheidsfuncties en dynamische laadcurves, met: (a) verdeling van aankomsttijden op weekdagen en weekends; (b) SoC bij aankomst. De rechterplots tonen een willekeurige dag met: (c) laadspanning en stroom en (d) de bijbehorende SoC-curve.

Laadstrategie

Deze paragraaf beschrijft de laadstrategieën die in deze studie zijn gesimuleerd, met bijzondere aandacht voor het gecoördineerde EV- laadstrategieën. Om het gecoördineerde laadstrategie duidelijk te onderscheiden van het opportunistisch laadstrategie, worden beide als volgt gedefinieerd:

- Opportunistisch EV laden
 - Het laden is ongecontroleerd, wat betekent dat voertuigen onmiddellijk beginnen met laden bij de maximale laadsnelheid zodra ze aankomen.
 - Het laden stopt bij vertrek of wanneer de batterij volgeladen is.
 - Dit schema houdt geen rekening met externe parameters, zoals de beschikbaarheid van PV-opwekking of de belasting van het gebouw.
- Gecoördineerd EV-laden:
 - Dit schema houdt rekening met het voorspelde verbruik van het gebouw en de PV productie.
 - Op basis van factoren zoals het beoogde SoC, de verwachte vertrektijd, wordt het EV-laadschema geoptimaliseerd om specifieke doelstellingen te bereiken, zoals het optimaliseren van de PV-benutting, efficiëntie en economische opbrengsten.
 - De optimalisatie wordt uitgevoerd op basis van een voorspelling voor de volgende dag en gaat in deze studie uit van een exacte voorspelling van het verbruik, PV-opwekking, aankomsttijd en SoC_{init} van de EV.

In dit hoofdstuk is het gecoördineerde laadschema exclusief ontworpen om de zelfvoorziening te maximaliseren. De formulering ervan bevat echter van nature aspecten van efficiëntie. De SSI wordt op basis van een voorspelling voor de volgende dag berekend met 96 samples per dag, wat overeenkomt met de 15-minutenresolutie van de vraag- en PV-productiegegevens. Het optimalisatieprobleem wordt uitgedrukt als een enkelvoudige objectieve functie, zoals gepresenteerd in onderstaande vergelijkingen.

$$SSI = \frac{\sum_{t=0}^{96} \min(P_{o,pv}(t) + P_{o,bess,d}(t), P_l(t) + \sum_{i=1}^{n_{ev}} P_{net, ev, i}(t))}{\sum_{t=0}^{96} (P_l(t) + \sum_{i=1}^{n_{ev}} P_{net, ev, i}(t))}$$

$$\min f = SSI$$

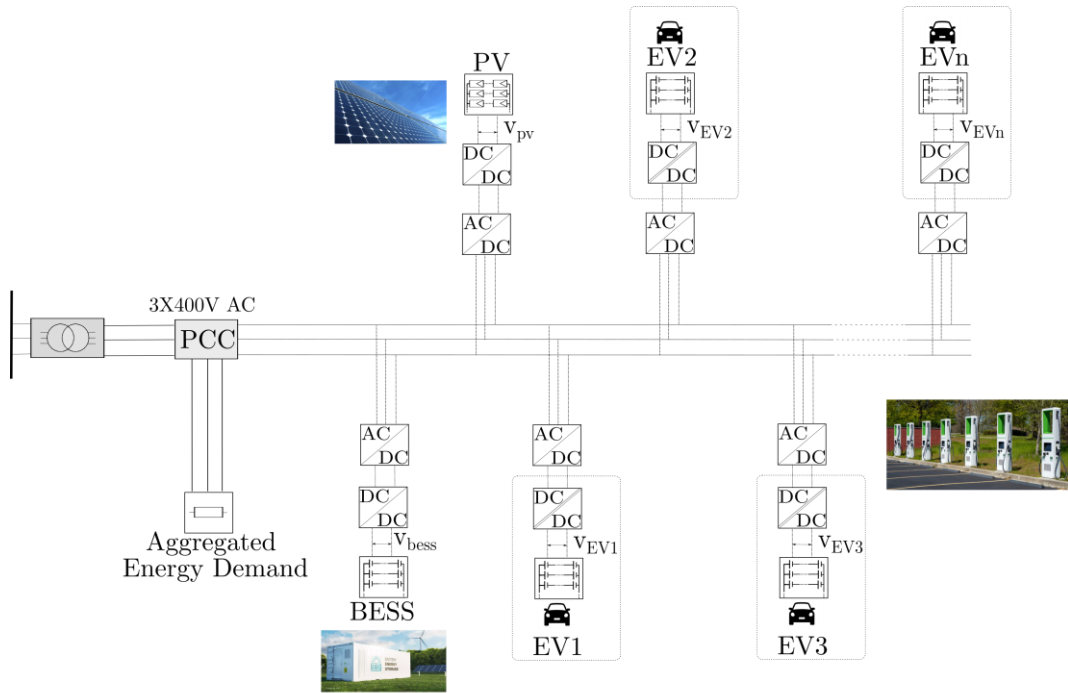
De teller van de SSI bevat naast het gebouwenergieverbruik P_l en het netto EV verbruik $P_{net, ev}$ ook de netto energiebijdragen van de verschillende bronnen, zijnde de netto BESS ontladprofiel $P_{o,bess,d}$ en de PV opbrengstprofiel $P_{o,pv}$. Deze netto energiestromen worden berekend aan de hand van verliesmodellen van de verschillende omvormers. De berekeningsmethodiek hiervoor werd in [22] beschreven.

De *constraints* in dit model zorgen ervoor dat het laden van de EVs binnen de vastgelegde grenzen verloopt. Ten eerste wordt het laadvermogen van de EV's beperkt om ervoor te zorgen dat het niet boven de maximale capaciteit van de laadinfrastructuur uitkomt. Daarnaast wordt de SoC van de batterij gecontroleerd, zodat deze niet te veel wordt opgeladen of ontladen, wat de batterij kan schaden. Er is ook een beperking die het tijdsvenster definieert waarin de EV moet opladen, wat betekent dat het laden alleen plaatsvindt tijdens de tijden dat de auto beschikbaar is. Verder is er een beperking die ervoor zorgt dat de EV de gewenste lading bereikt bij vertrek, of zo veel mogelijk laadt binnen het beschikbare tijdsvenster. Ten slotte wordt de energiebalans gecontroleerd om ervoor te zorgen dat de energie die door het net, de batterijopslag en de zonnepanelen wordt geleverd, precies overeenkomt met de totale vraag.

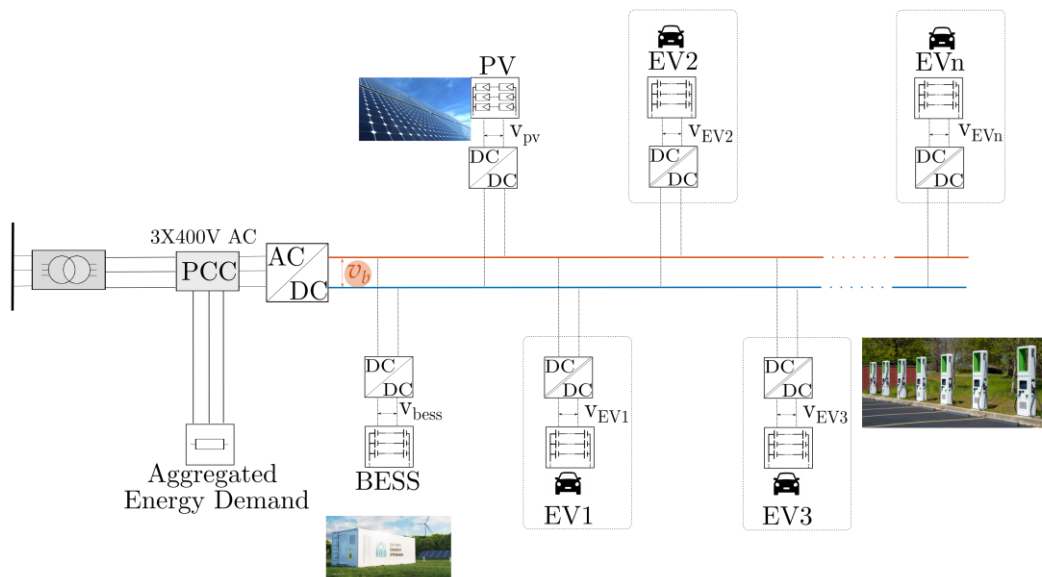
De optimalisatie is gebaseerd op het algoritme gedefinieerd in [58] en maakt gebruik van het Particle Swarm Optimisation algoritme, dat bijzonder goed geschikt is voor de niet-convexe aard van de optimalisatie van EV-laden. PSO biedt verschillende voordelen, waaronder eenvoud in implementatie, minder parameters en robuustheid, en is veelvuldig toegepast in de literatuur voor de optimalisatie van EV-laden [59]. De optimalisatie die in deze sectie wordt beschreven, wordt uitgevoerd op basis van een day-ahead benadering, en dit proces wordt herhaald voor alle dagen van het jaar. Als resultaat worden n_{ev} tijdreeksen gegenereerd, die elk 35.040 samples bevatten.

Netarchitectuur, specificaties en metriek

Figuur 65 toont de netarchitecturen die in deze studie zijn geanalyseerd. Figuur 65 (a) toont een driefasige LVAC-net waarin driefasige EV-laders, een gecentraliseerd PV-systeem en een BESS zijn geïntegreerd. Ter vergelijking toont Figuur 65 (b) dezelfde componenten verbonden met een LVDC-net.



(a)



(b)

Figuur 65 Overzicht van de netarchitecturen geanalyseerd in deze studie met EV's, PV en BESS: (a) LVAC-netarchitectuur en (b) LVDC-netarchitectuur.

De LVAC-configuratie maakt gebruik van OBC's om AC-vermogen om te zetten naar DC, terwijl de LVDC-architectuur off-board laders gebruikt om de 700V LVDC backbone-spanning om te zetten naar de oplaadspanning van de EV. Galvanische isolatie wordt toegepast ter bescherming [60]. Dit wordt gerealiseerd door middel van full-bridge converters, wat zorgt voor een breed spanningsbereik en hoge efficiëntie [61]. De parameters en variabelen die in deze analyse worden beschouwd, zijn samengevat in Tabel 7:

- Het aantal elektrische voertuigen, variërend van 0 tot 20;
- De geïnstalleerde PV-capaciteit, variërend van 8 kW_p tot 120 kW_p;
- De geïnstalleerde BESS-capaciteit, variërend van 8 kWh tot 120 kWh;
- Het maximale EV-laadvermogen, ingesteld op 11 kW of 22 kW.

In deze studie is de jaarlijkse energiebehoefte gebaseerd op een klein en middelgroot onderneming (KMO) dat zich bezighoudt met kantooractiviteiten. Het laadprofiel voor 2021, dat openbaar beschikbaar is via de Vlaamse energieregulator [62], wordt gebruikt om het energieverbruik van de KMO te representeren. De modellering van de PV-BESS volgt de benadering die is beschreven [53].

Tabel 7 Overzicht van de simulatiewaarden voor een AC- en DC architectuur met EV, PV en BESS.

Beschrijving	Symbool	Waarde	Eenheid
Aantal EV-laders	n_{ev}	{1, 2, ..., 20}	-
String PV capaciteit	$P_{unit,pv}$	4.14*	(kW _p)
Totale PV capaciteit	P_{pv}	$P_{unit,pv} \cdot \{2, 6, ..., 300\}^*$	(kW _p)
Laadvermogen	P_{ev}	{11; 22}	(kW)
BESS capaciteit	E_{bess}	$P_{unit,pv} \cdot \{2, 6, ..., 300\}^*$	(kWh)
Jaarlijks kantoorverbruik	E_{demand}	50	(MWh)

*De unit PV-capaciteit vertegenwoordigt een string bestaande uit 230W-modules (zoals beschreven in [63]) met 18 modules in serie. Deze waarde wordt vermenigvuldigd met een integerparameter die varieert van 2 tot 26 voor de gevoeligheidsanalyse, waarbij de BESS-grootte proportioneel is aan de grootte van de PV-capaciteit.

Naast de efficiënties en verliezen zal ook een derde metriek worden geëvalueerd. De RELD (Relative Energy Loss Difference) geeft het relatieve verschil weer tussen de verliezen die optreden in een DC-net ten opzichte van een AC-net.

$$RELD = \frac{E_{loss,dc} - E_{loss,ac}}{E_{loss,ac}}$$

Assumpties

Voor de vergelijkende studie werden de volgende aannames gemaakt:

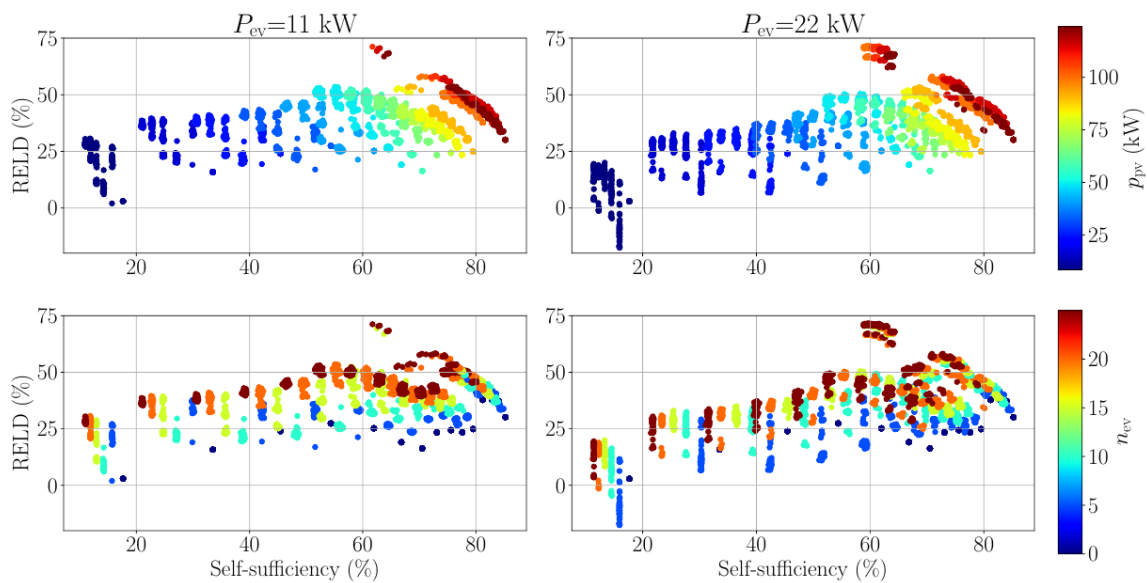
- In deze studie wordt een jaarlijks verbruik van 50MWh aangenomen voor een KMO met een kantoorgebouw en 20 werknemers. Deze aanname is gebaseerd op studies [64, 65], die de complexiteit en de vele parameters benadrukken die het moeilijk maken om het verbruiksprofiel nauwkeurig te modelleren. Tegelijkertijd geven deze studies een duidelijke en evidente correlatie aan tussen het bezettingspercentage en het verbruik op basis van het gebruik. Aangezien dit niet de primaire focus is van het doctoraatsonderzoek en het verbruik slechts indirect invloed heeft op de efficiëntie, vooral door de invloed op het gebruik van de BESS en de coördinatie van de EV's, wordt een intuïtieve aanname gemaakt dat het verbruik, voornamelijk gedreven door verwarming, koeling en ICT, valt binnen de lagere verbruiks-categorieën die in de genoemde studies zijn gedefinieerd.
- Vervolgens geeft het EV-laadstrategie prioriteit aan het directe gebruik van geproduceerde PV-energie of opgeslagen BESS-energie door de EV's, in plaats van het kantoorverbruik, om conversieverliezen te minimaliseren. Het coördinatieschema optimaliseert echter de EV-scheduling terwijl het rekening houdt met het niet-dispatchbare kantoorverbruik. Deze aanname bevestigt dus ook de minimale invloed van het kantoorverbruik op de algehele energie-efficiëntie.
- Gezien de kleine schaal van de bestudeerde case wordt aangenomen dat de kabelafstanden zodanig zijn dat ze minimale kabelverliezen veroorzaken, waarbij conversieverliezen de dominante factor zijn in de vergelijkende analyse. Bovendien vermindert deze aanname de rekentijd, wat belangrijk is voor dit geval vanwege de stochastische aard van de analyse.

- Om de stochastische aard van het EV-laden in de analyse op te nemen, wordt er iteratief gesampled, waarbij EV-laadprofielen worden gegenereerd op basis van de opgegeven waarschijnlijkheidsfunctie. Het aantal iteraties wordt bepaald door de convergentie van de RELD te evalueren bij een toenemend aantal iteraties. Uit de analyse bleek dat 75 iteraties nodig zijn om een robuuste en representatieve analyse te verkrijgen, met een nauwkeurigheidsmarge van 0,1%.

Resultaten voor opportunistisch laden

Correlatie tussen SSI en RELD

Het spreidingsdiagram in Figuur 66 toont de relatie tussen zelfvoorziening, de RELD, de ogenblikkelijk PV-energieproductie en het aantal EVs. Er is een duidelijke correlatie te zien tussen zelfvoorziening en RELD, waarbij een toename in zelfvoorziening leidt tot verminderde netafname vanuit het net, wat de netuitwisselingen minimaliseert en het vermogen door de AC/DC-omvormer vermindert, wat uiteindelijk de bijbehorende verliezen reduceert.



Figuur 66 Correlatie tussen RELD en zelfvoorziening in functie van de ogenblikkelijke PV-productie (boven) en het aantal EV-laders (onder), met 11kW-laders rechts en 22kW-laders links.

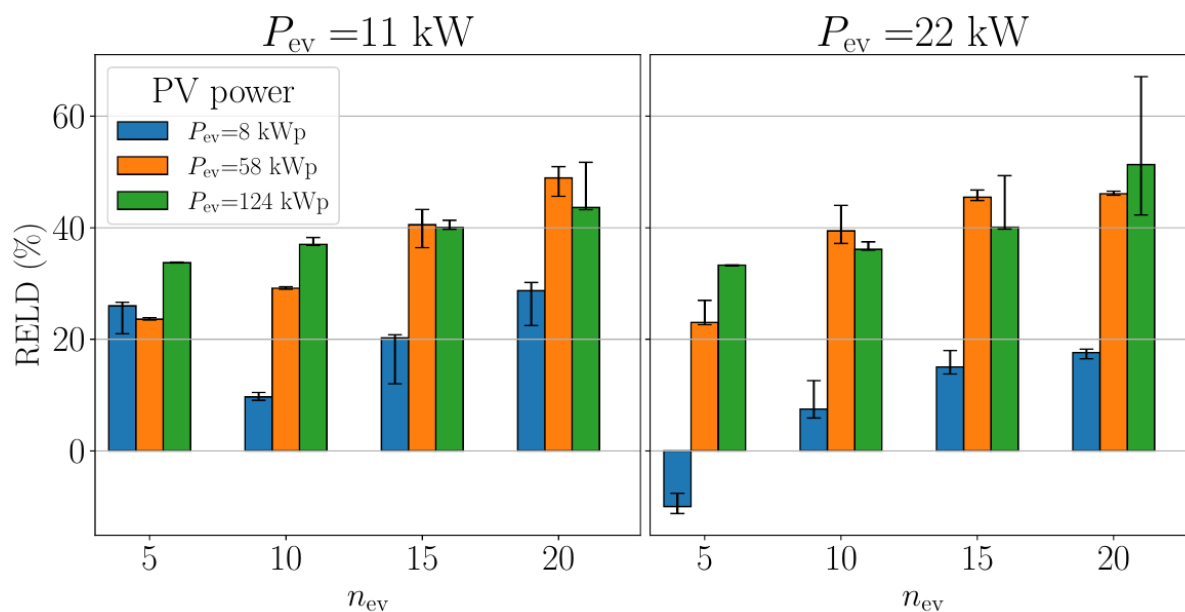
In de context van de LVAC-netarchitectuur leidt een toename in zelfvoorziening echter tot hogere conversieverliezen, wat op zijn beurt een hogere RELD bevordert. De kleuren in de bovenste grafieken tonen aan dat naarmate de PV-energieproductie toeneemt, een groter deel van de EV-vraag wordt gedekt door de PV-productie, waardoor de netafname vermindert. Omgekeerd, wanneer de PV-energieproductie laag is, is de RELD lager of negatief, vooral wanneer het laadvermogen is ingesteld op 22kW. Dit suggereert dat, onder deze omstandigheden, werken binnen een LVAC-netarchitectuur resulteert in een hogere efficiëntie, voornamelijk vanwege de dimensionering van de centrale DC/AC-omvormer in de LVDC-netarchitectuur. De omvormer is gedimensioneerd op basis van het hoogste vermogen dat met het net wordt uitgewisseld, wat overeenkomt met het maximale PV-vermogen dat wordt geproduceerd in het geval van $P_{ev}=11$ kW, of het maximale geaggregeerde EV-vermogen wanneer $P_{ev}=22$ kW. Dus, tijdens periodes van lage instraling, werkt de DC/AC-omvormer binnen een lager efficiëntiebereik, wat de conversieverliezen negatief beïnvloedt.

De onderste grafieken vertonen een vergelijkbare trend, waarbij kleurvariaties de invloed van het variabele bereik van n_{ev} illustreren, dat varieert van 0 tot 20. Een toename in n_{ev} leidt tot een hogere RELD, zonder noodzakelijkerwijs de zelfvoorziening te verbeteren. Hogere geaggregeerde EV-ver-

mogen leiden tot werking binnen hogere efficiëntiebereiken van de efficiëntiecurve. Deze grafiek benadrukt de synergetische voordelen tussen EV's en PV-systemen in een LVDC-architectuur, aangezien het duidelijk hogere efficiënties aantoont in vergelijking met de LVAC-netarchitectuur. Wanneer hoge PV-productie gepaard gaat met voldoende EV-vraag, leidt dit tot een hogere zelfvoorziening, waardoor de voordelen van de LVDC-architectuur maximaal worden benut.

Efficiëntievergelijking

Bij de analyse van de netarchitecturen met behulp van de beschreven methodologie en zonder de integratie van een BESS, worden de resultaten in Figuur 67 verkregen. Een opvallende observatie is de relatief kleine variantie in RELD-waarden, met uitzondering van het scenario met 20 EV-laders met op 22 kW laadvermogen.

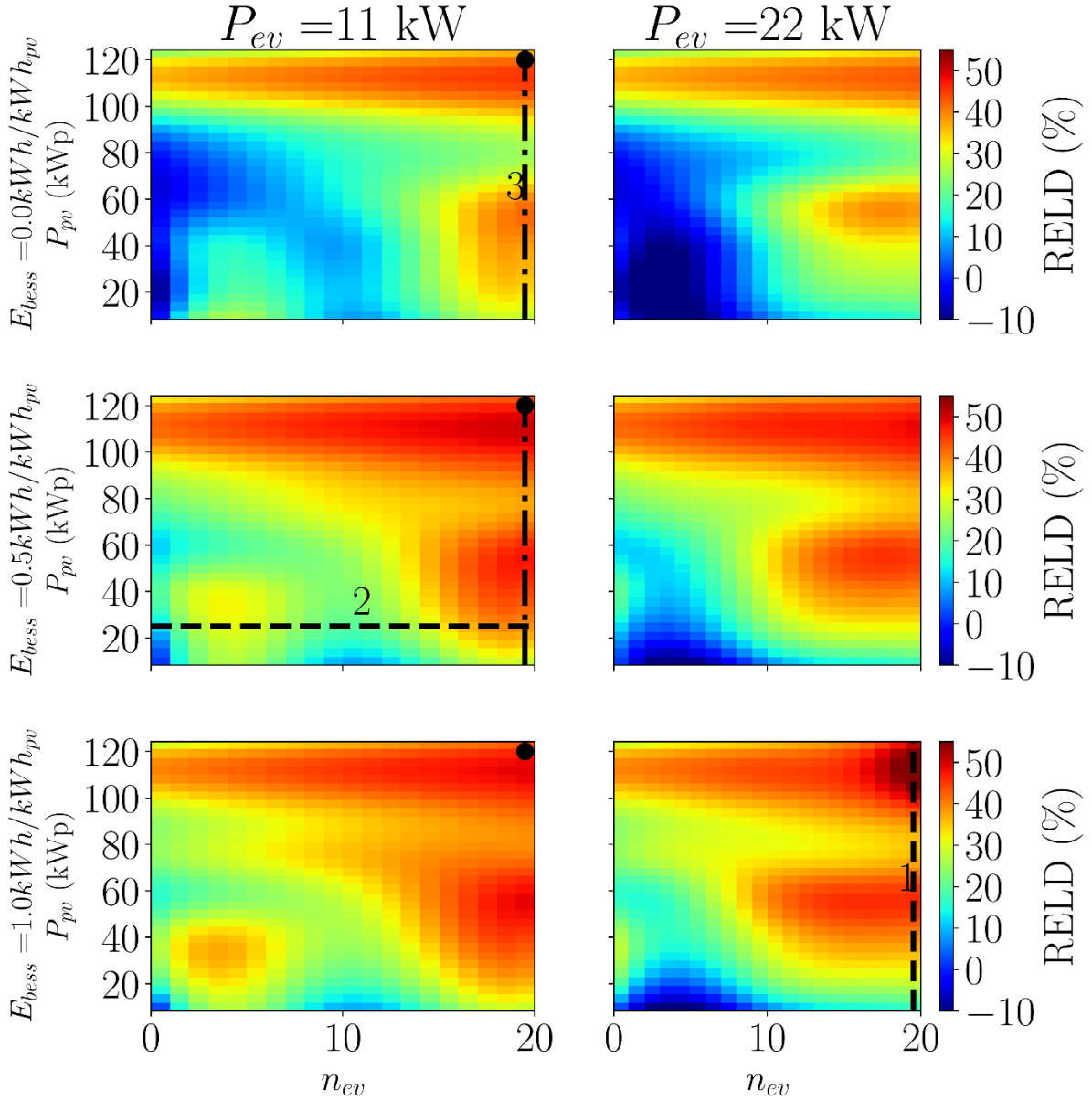


Figuur 67 RELD-resultaten voor 11kW (links) en 22kW (rechts) EV-laders, getoond voor drie verschillende PV-groottes met bijbehorende interkwartielbereiken (q25-q75).

Deze uitschieter is te wijten aan de stochastische variabiliteit in EV-laadprofielen, wat leidt tot aanzienlijke fluctuaties in het maximale geaggregeerde vermogen en daardoor variaties in de efficiëntie van de DC/AC-omvormer. De analyse benadrukt verder het cruciale belang van de dimensionering van componenten voor de systeemefficiëntie. Bijvoorbeeld, bij 5 EV-laders met een laadvermogen van 22~kW en een klein PV-systeem, vertoont het systeem een lage efficiëntie, vooral tijdens periodes waarin PV energie in het net wordt geïnjecteerd. Bovendien leidt een toename van het aantal EV-laders consequent tot hogere RELD-waarden, ongeacht de grootte van het PV-systeem. Dit toont aan dat LVDC-netconfiguraties zelfs met kleinere PV-systemen voordelig zijn, voornamelijk door schaalvoordelen. De verbetering in RELD is vooral uitgesproken wanneer voldoende PV-productie samenvalt met EV-vraag, wat het belang onderstreept van een juiste dimensionering van de systeemcomponenten om de efficiëntie te maximaliseren.

Figuur 68 biedt een uitgebreide analyse van verschillende BESS-groottes en bevestigt eerdere bevindingen dat de grootste voordelen worden behaald wanneer EV-vraag wordt gecombineerd met voldoende PV-capaciteit. De synergy tussen EV's en PV-systemen is duidelijk, aangezien de gelijktijdige productie van PV-energie en het verbruik ervan door EV's de efficiëntie en energiebesparing maximaliseert. Toch kunnen aanzienlijke voordelen ook worden gerealiseerd wanneer PV wordt gekoppeld aan een BESS in afwezigheid van EV's, vooral binnen een LVDC-configuratie. Deze voordelen worden verder versterkt naarmate de BESS-grootte toeneemt, wat het belang benadrukt van opslagcapaciteit

bij het optimaliseren van de zelfvoorziening. Daarentegen blijft de RELD beperkt wanneer kleine PV-systemen worden gecombineerd met EV-laders. Deze beperking ontstaat door de suboptimale efficiëntie van de centrale DC/AC-omvormer, die is gedimensioneerd op basis van het maximale geaggregeerde EV-vermogen. Hierdoor opereert het systeem binnen een lager efficiëntiebereik tijdens PV-injectie of BESS-ontlading om aan het kantoorverbruik te voldoen. Deze inefficiëntie is vooral merkbaar bij laadvermogens van 22 kW.

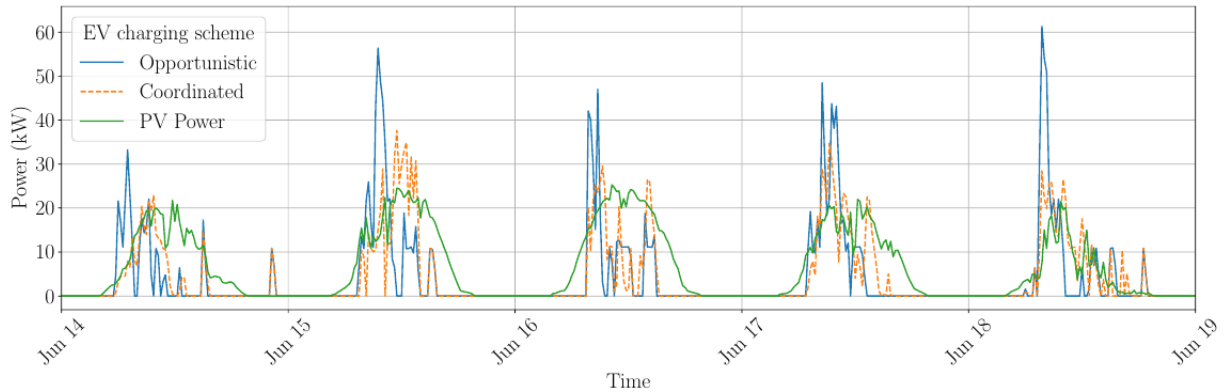


Figuur 68 RELD-resultaten voor 11kW (links) en 22kW (rechts) EV-laders, gepresenteerd voor drie verschillende BESS-groottes met variërende PV grootte en aantal EV-laders

Daarnaast verbetert een grotere BESS-grootte de zelfvoorziening van de EV-vraag, wat een groter voordeel oplevert voor de LVDC-architectuur. Dit benadrukt het potentieel van geoptimaliseerde BESS-dimensionering. Verder onderzoek wordt uitgevoerd om de onderliggende oorzaken van specifieke trends en discontinuïteiten in de resultaten te analyseren en zo diepere inzichten te verkrijgen in de modellering van omvormerefficiëntie. Aangezien dit buiten de scope van dit project valt, wordt het hier niet verder onderzocht.

Resultaten voor gecoördineerd laden

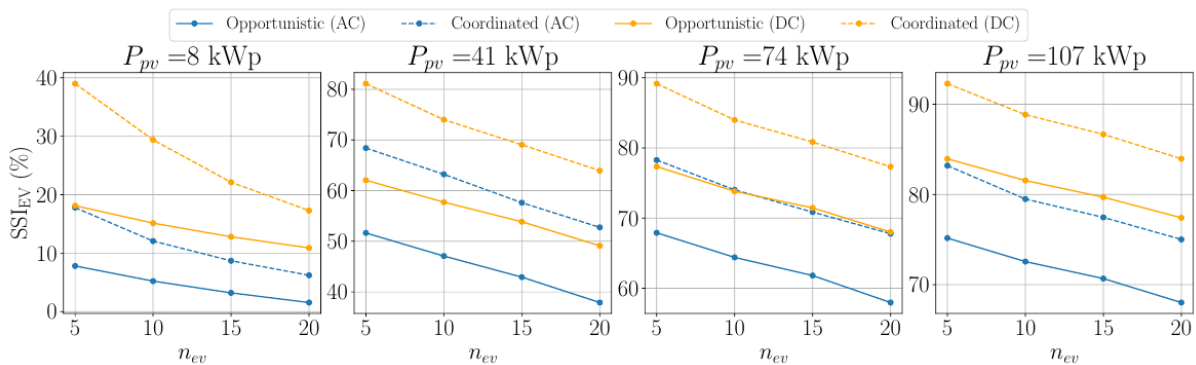
De gecoördineerde laadstrategieën streven ernaar om de synergie tussen EV's en PV-systemen optimaal te benutten door de zelfvoorzieningsgraad te maximaliseren, zoals beschreven in het optimalisatiekader. Zoals geïllustreerd in Figuur 69, regelen deze strategieën het laadvermogen van EV's op een manier die de directe benutting van beschikbare PV-productie optimaliseert. Daarentegen vertoont de opportunistische laadstrategie een grotere variabiliteit, gekenmerkt door hogere piekvermogens die regelmatig de capaciteit van de beschikbare PV-opwekking overschrijden.



Figuur 69 Geaggregeerde EV-profielen voor opportunistisch en gecoördineerd laden in combinatie met PV-productie. Scenario: 20 EV-laders van elk 11 kW en een geïnstalleerde PV-capaciteit van 41 kW.

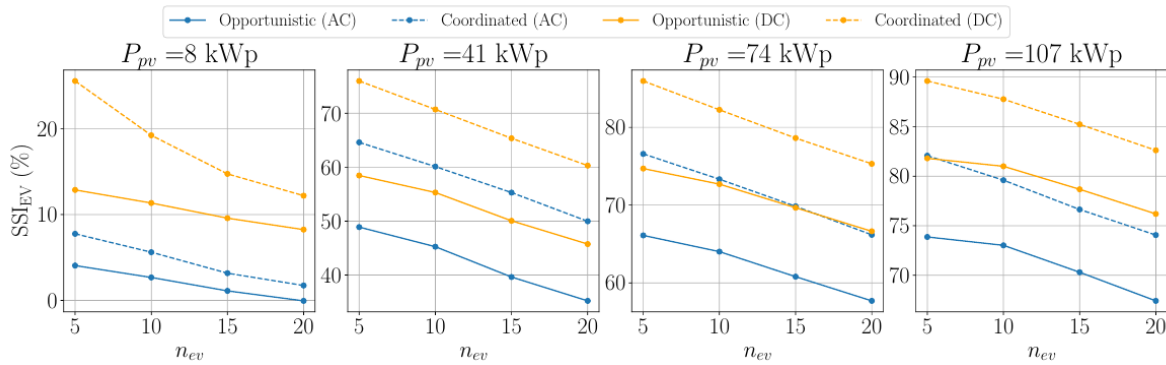
Zelfvoorziening

Figuur 70 toont aan dat de gecoördineerde laadstrategieën resulteren in een aanzienlijk hogere SSI_{EV} , de EV-zelfvoorziening. Een grotere PV-capaciteit leidt tot een stijging van SSI_{EV} , hoewel deze stijging afneemt zodra het PV-vermogen het EV-vermogen overtreft. In dergelijke gevallen wordt de Pareto-grens bereikt, wat betekent dat verdere verbeteringen in planning niet mogelijk zijn binnen de vastgelegde optimalisatieconstraints. Zoals verwacht biedt de gecoördineerde laadstrategie een aanzienlijk voordeel in SSI_{EV} van 20 procentpunten ten opzichte van de opportunistische laadstrategie in het geval van een LVDC-architectuur, met het grootste verschil bij de kleinste PV-capaciteit. Dit is te wijten aan het feit dat bij een kleinere PV-capaciteit een groter deel van de PV-productie direct wordt benut, wat leidt tot minder netuitwisseling en een veel efficiëntere werking, wat zich vertaalt in een gunstigere stijging van de SSI_{EV} . Daarentegen neemt dit verschil af naarmate de PV-capaciteit toeneemt, wat een grotere afhankelijkheid van netuitwisseling weerspiegelt en daardoor een lagere operationele efficiëntie.



Figuur 70 EV-zelfvoorziening voor variërend n_{ev} en PV-groottes, vergelijking van opportunistisch en gecoördineerd laden in LVAC- en LVDC-architecturen met 11kW-laders.

Bij de LVAC-architectuur is het voordeel van het regelen van de EV-laadvermogen aanzienlijk kleiner, wat intuïtief kan worden toegeschreven aan de hogere conversieverliezen. Voor een PV-systeem van 8 kWp blijkt het zelfs voordeliger om een ongecontroleerde laadstrategie op DC toe te passen dan een gecontroleerde laadstrategie op AC. Dit benadrukt de grote invloed van een continu efficiënte werking op de SSI_{EV} . Vergelijkbare trends worden waargenomen bij de resultaten met 22 kW EV-laders, zoals weergegeven in Figuur 71 hoewel de SSI_{EV} in dit geval lager is vanwege het hogere vermogen.



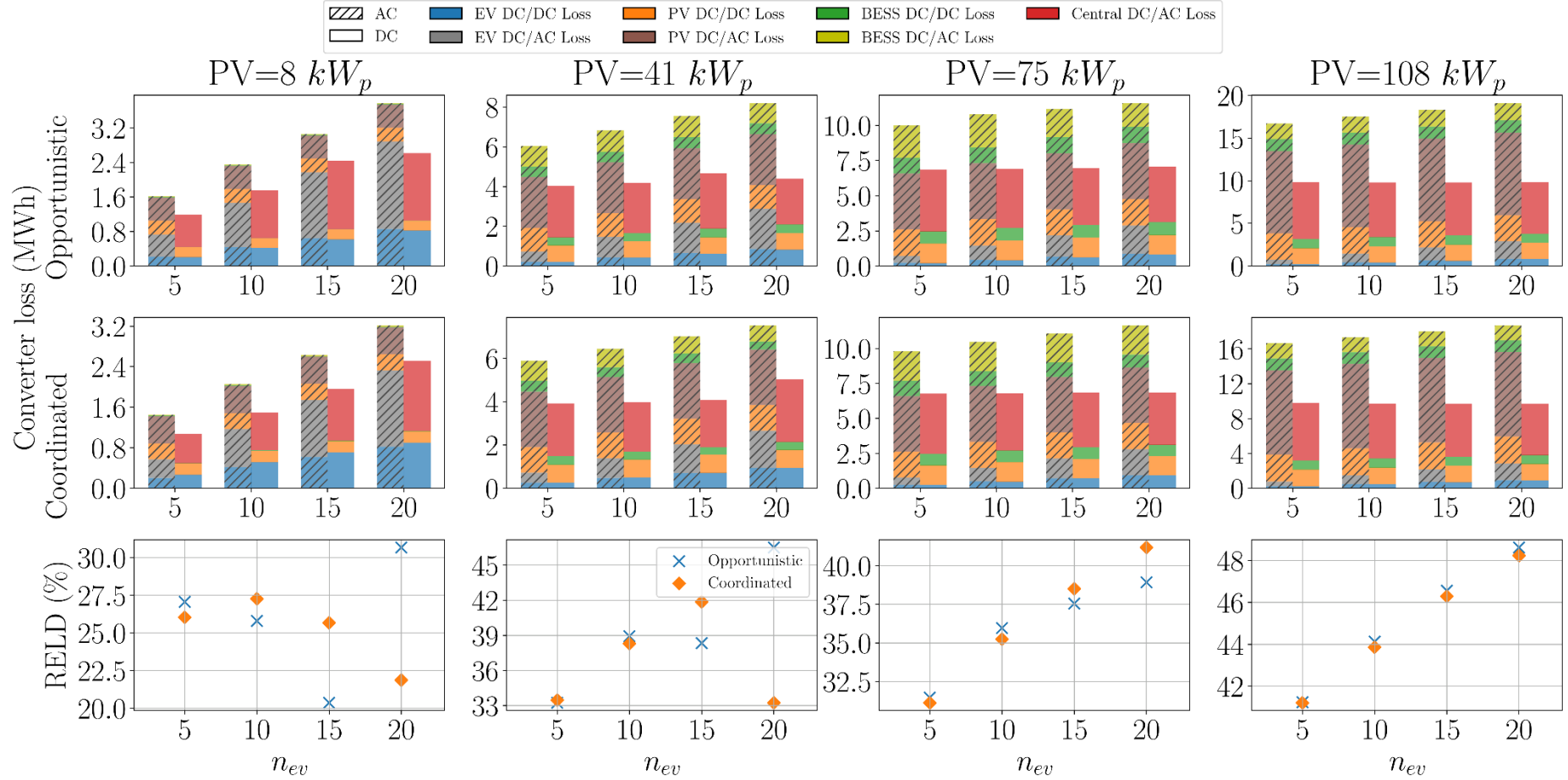
Figuur 71 EV-zelfvoorziening voor variërend n_{EV} en PV-groottes, vergelijking van opportunistisch en gecoördineerd laden in LVAC- en LVDC-architecturen met 22kW-laders.

Energieverliezen

De analyse van energieverliezen in de Figuur 72 toont aan dat de LVDC-architectuur in alle scenario's efficiënter is. Dit komt voornamelijk door de dubbele conversiestap in de LVAC-architectuur, wat leidt tot een sterkere toename van verliezen naarmate de PV-capaciteit en het aantal EV's toenemen. Grotere PV-systemen verhogen de DC/DC- en DC/AC-verliezen in de PV-installatie en BESS, terwijl een hoger aantal EV's leidt tot meer DC/DC- en DC/AC-verliezen in de voertuigen.

Hoewel intuïtief verwacht wordt dat de RELD in het gecoördineerde scenario altijd hoger is vanwege de toename in directe energieconsumptie door EV's, blijkt deze vaak gelijk of slechts iets hoger of lager te zijn. Dit kan worden verklaard door het tijdsgebonden karakter van de EV-vraag, die voornamelijk overdag plaatsvindt en al een hoge zelfvoorziening bereikt in het ongecontroleerde scenario. Bovendien houdt de doelstelling van het gecoördineerde scenario rekening met efficiëntieaspecten, waardoor de EV DC/DC- en DC/AC-converters in een hoog-efficiëntiebereik kunnen werken en verliezen worden verminderd. Een andere mogelijke verklaring is de invloed van de grootte van de centrale DC/AC-omvormer, die inefficiënt kan werken tijdens PV-injectie of BESS-ontlading bij een hoog n_{EV} en kleine PV-systemen.

Bij grotere PV-systemen blijven de energieverliezen vrijwel constant, ongeacht het aantal EV's. De verliezen worden voornamelijk bepaald door de PV-installatie en de BESS, terwijl EV-gerelateerde verliezen slechts een lichte stijging veroorzaken in het totale energieverlies. Vergelijkbare resultaten worden waargenomen bij 22 kW EV-laders, hoewel het hogere laadvermogen leidt tot meer scenario's met verhoogde RELD in het gecoördineerde scenario. Het hogere laadvermogen zorgt voor een betere benutting van de PV-productie, wat resulteert in minder netafname en lagere verliezen. Een opvallend resultaat wordt gezien bij 20 EV-laders en een PV-capaciteit van 108 kW, waar het energieverlies aanzienlijk toeneemt in het opportunistische scenario. Dit wordt veroorzaakt door de dimensionering van de centrale omvormer, die is gebaseerd op de geaggregeerde EV-vraag en de PV-capaciteit overschrijdt. In het gecoördineerde scenario treedt dit probleem niet op, doordat de EV-vraag gelijkmatiger over de tijd wordt verdeeld, wat leidt tot lagere asynchrone pieken.



Figuur 72 Energieverliezen voor LVDC- en LVAC-architecturen: eerste rij toont opportunistisch laden, tweede rij gecoördineerd laden met 11kW EV-laders, en derde rij de RELD, met in alle situaties een variërende n_{ev} en PV-grootte

Discussie van de resultaten

Deze studie onderzocht de toepassing van een LVDC-architectuur in een kantooromgeving, waarbij zowel opportunistische als gecoördineerde laadstrategieën werden overwogen. De belangrijkste bevindingen van deze analyse zijn als volgt:

- Een LVDC-architectuur versterkt het synergiepotentieel tussen EV's en PV-systemen, wat resulteert in een efficiëntere werking en verbeterde benutting van de PV productie. Wanneer echter het PV-systeem te klein is en het laadvermogen wordt verhoogd naar 22 kW in plaats van 11 kW, wordt de RELD laag of zelfs negatief. Daarnaast werd geconstateerd dat zelfs in de afwezigheid van PV, wanneer alleen EV-laders zijn aangesloten op de LVDC-backbone, de RELD gunstig kan blijven door de gecentraliseerde en dus efficiëntere DC/AC-omvormer.
- De relatie tussen de invoerparameters n_{ev} , PV-grootte en RELD is niet-lineair en vertoont bepaalde discontinuïteiten. Verdere onderzoeken toonden aan dat deze discontinuïteiten ontstaan door componentparameters, voornamelijk de schakeltijd van de MOSFET, die variaties in schakelverliezen veroorzaakt. Daarnaast benadrukt een analyse van de trends in verschillende componentparameters de schaalvoordelen van het centraliseren van de DC/AC-omvormer, vooral bij het verminderen van magnetische kernverliezen.
- Gecoördineerd EV-laden maximaliseert het synergiepotentieel, wat resulteert in een significante toename van de SSI. Dit effect is vooral uitgesproken in een LVDC-architectuur, waar de verminderde conversieverliezen bijdragen aan de hogere SSI. Daarentegen ervaart de LVAC-architectuur verhoogde conversieverliezen door de dubbele conversiestappen. Voor scenario's met maximale SSI is de RELD hoger in de gecoördineerde laadstrategie, wat het effect van de systeemgrootte op de verschillen in energieverliezen verder benadrukt. Bovendien toont de gecoördineerde laadstrategie ook zijn effectiviteit in het optimaliseren van de omvormerverliezen.
- Ten slotte werd in deze sectie ook de invloed van de grootte van de centrale DC/AC-omvormer benadrukt. Vooral in het geval van een klein PV-systeem en een hoog aantal EV's, of bij 22 kW EV-laders, wordt de maatvoering bepaald door de asynchrone piek van de EV's, wat leidt tot een minder efficiënte werking tijdens de PV-injectie.

Conclusies

Evolutie naar DC

Door de energietransitie komen DC-netten steeds meer op de voorgrond. Technologieën zoals PV-systemen, BESS, EV's, LED-verlichting en warmtepompen biedt aanzienlijke voordelen voor een DC-koppeling ten opzichte van een klassiek AC-net. Naast de verhoogde efficiëntie spelen ook verbeterde controleerbaarheid, eenvoud in ontwerp en beheer, en economische voordelen een belangrijke rol in deze verschuiving. Toch zijn er nog enkele grote drempels die moeten worden overwonnen voordat DC-netten breed geaccepteerd worden. De beveiliging vormt een belangrijke uitdaging vanwege de hoge piekstromen en het ontbreken van een natuurlijke nuldoorgang. Ook het gebrek aan standaardisatie, vooral wat betreft uitbatingsspanning, belemmert een snellere adoptie. Een werkgroep heeft inmiddels een eerste set aanbevelingen opgesteld, maar verdere actie is nodig. Het versnellen van standaardisatieprocessen en het delen van ervaringen rond het ontwerp en de exploitatie van DC-netten via pilootprojecten is essentieel. Deze projecten kunnen waardevolle inzichten opleveren en bijdragen aan de verdere ontwikkeling en acceptatie van DC-netten als een onmisbaar onderdeel van onze energie-infrastructuur.

Bestaande studies

De literatuurstudie benadrukt verschillende uitdagingen die gepaard gaan met de integratie van EV-laders in LVAC-distributienetten. De vraag van EV's introduceert mogelijke operationele problemen, waaronder stroomcongestie, wat kan leiden tot overbelasting van kabels en transformatoren. Ook zijn spanningsgerelateerde problemen, zoals afwijkingen, bestudeerd, waarbij spanningsonbalans als een kritisch probleem naar voren komt in het geval van enkelfasige EV-laders. Een belangrijke strategie om deze uitdagingen aan te pakken is het integreren van EV-laders met PV-systemen en het implementeren van controlestrategieën om het directe gebruik van beschikbare PV-productie te maximaliseren, waardoor de afhankelijkheid van het net wordt verminderd. Dit synergiepotentieel kan verder worden vergroot door integratie in een LVDC-backbone, wat een eenvoudiger en efficiëntere werking van het systeem mogelijk maakt. De literatuur toont echter een significante kloof in vergelijkende studies over de efficiëntie van LVAC- en LVDC-netten. De weinige bestaande studies hebben verschillende beperkingen, zoals inadequate modellering van omvormerverliezen, uitsluiting van dynamisch laadgedrag van EV's, korte simulatiehorizon of het gebruik van onrealistische EV-profielen. Bovendien zijn er geen studies gevonden die de voordelen van gecoördineerd laden in een LVDC-architectuur onderzoeken.

Vergelijkende studie: EV laden op AC en DC

In de studie werd de opportunistische en gecoördineerde laadstrategieën toegepast op LVDC- en LVAC-architecturen in een kantooromgeving met gecentraliseerde PV-systemen en BESS. De correlatie tussen de RELD en zelfvoorziening toonde de gunstige impact van hoge EV-vraag in combinatie met grote PV-systeemgroottes op de efficiëntie van de LVDC-architectuur. De analyse toonde ook aan dat hogere laadvermogens kunnen leiden tot lage of zelfs negatieve RELD wanneer ze worden gekoppeld aan kleine PV-systemen. Deze bevinding benadrukt de cruciale rol van de grootte van de centrale DC/AC-omvormer bij het bepalen van de algehele efficiëntie. Een gedetailleerder onderzoek bevestigde de toename van de RELD bij grotere PV-systeemgroottes en hogere EV-vraag. Bovendien toonde de analyse aan dat zelfs wanneer alleen EV-laders zijn aangesloten op de LVDC-backbone, de RELD gunstig blijft, wat de schaalvoordelen illustreert, die verder werden onderzocht via een gedetailleerde componentanalyse van omvormers. Deze analyse gaf ook, kort, inzicht in de discontinuïteitsrelatie tussen RELD en de P_{pv} - n_{ev} -parameters. In de daaropvolgende vergelijking van gecoördineerde en opportunistische laadstrategieën in beide architecturen, resulteerde de gecoördineerde

strategie consequent in een hogere SSI. De LVDC-architectuur vertoonde echter aanzienlijk hogere SSI, vooral onder de gecoördineerde laadstrategie.

Een gedetailleerd onderzoek van conversieverliezen benadrukte de impact van dubbele conversiestappen in de LVAC-architectuur. De RELD was hoger voor de gecoördineerde laadstrategie in scenario's met hoge SSI, aangezien het verhoogde directe gebruik van PV de omvormerverliezen in de LVDC-architectuur verminderde, terwijl de tegenovergestelde trend werd waargenomen in de LVAC-architectuur. Bovendien kwam de dimensionering van de centrale DC/AC-omvormer naar voren als een kritische factor, waarbij de efficiëntie werd beïnvloed door de vraag of de piek van het geaggregeerde EV-verbruik de PV-systeemgrootte overschreed of omgekeerd. Inefficiënties werden waargenomen tijdens PV-injectie, ontlading van BESS om aan de energievraag van het gebouw te voldoen, of netafname, wat de noodzaak benadrukt voor een optimale dimensionering van de AC/DC-omvormer. Bovendien biedt de LVDC-architectuur de mogelijkheid om OBC's weg te laten, wat kosten en materiaalgebruik kan verminderen. Het eerste scenario onderzocht ook de directe aansluiting van PV-systemen op het LVDC-net, waarbij aanzienlijke efficiëntievoordelen werden onthuld. Deze voordelen kunnen verder worden vergroot door dynamisch geoptimaliseerde spanningsniveaus toe te passen, een concept dat dieper wordt onderzocht door EELab/Lemcko. De bestudeerde voordelen en mogelijke optimalisaties onderstrepen het potentieel van LVDC-architecturen als een efficiëntere en eenvoudiger oplossing voor de integratie van PV-systemen in verschillende configuraties, zoals Building-Integrated PV (BIPV) en zonnecarports met BESS en EV's. Dit potentieel is vooral relevant in het licht van wettelijke verplichtingen, zoals die in Frankrijk, waarbij parkeerplaatsen verplicht moeten worden uitgerust met zonnepanelen [66].

Referenties

- [1] T. M. H. Slangen, T. van Wijk, V. Čuk en J. F. G. Cobben, „The Harmonic and Supraharmonic Emission of Battery Electric Vehicles in The Netherlands,” in *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 2020.
- [2] T. M. H. Slangen, T. van Wijk, V. Čuk en J. F. G. Cobben, „The Propagation and Interaction of Supraharmonics from Electric Vehicle Chargers in a Low-Voltage Grid,” *Energies*, 2020.
- [3] T. Slangen, B. Lustenhouwer, V. Cuk en S. Cobben, „The Effects of High-Frequency Residual Currents on the Operation of Residual Current Devices,” *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 2021.
- [4] E.-D. Ángela, S. Jil, R. Sarah, N. Naser en B. Math, „Impact of supraharmonics and quasi-dc on the operation of residual current devices,” in *CIREN 2021*, Online, 2021.
- [5] M. Friedemann, B. Ana Maria en M. Jan, „Characteristic leakage current of household devices and their impact on the tripping behaviour of residual current devices,” *Electric Power Systems Research*, 2023.
- [6] C. Stanislaw en T. Hanan, „Behavior of Residual Current Devices at Frequencies up to 50 kHz,” *Energies*, 2021.
- [7] J. Jones, *Empires of Light: Edison, Tesla, Westinghouse, and the Race to Electrify the World*, 2003.
- [8] C. F. Scott, „Alternating Current as a Factor in General Distribution for Light and Power,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XVIII, pp. 843-848, 1901.
- [9] R. Weiss, L. Ott en U. Boeke, „Energy efficient low-voltage DC-grids for commercial buildings,” in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2015.
- [10] H. E. Gelani, F. Dastgeer, M. Nasir, S. Khan en J. M. Guerrero, „AC vs. DC Distribution Efficiency: Are We on the Right Path?,” *Energies*, vol. 14, 2021.
- [11] T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero en D. Skrlec, „Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, pp. 54-65, 2014.
- [12] V. A. Prabhala, B. P. Baddipadiga, P. Fajri en M. Ferdowsi, „An Overview of Direct Current Distribution System Architectures & Benefits,” *Energies*, vol. 11, p. 2463, 2018.
- [13] Y. Li, K. Sun, Y. Sun, K.-J. Li, J. Lou en Y. Pang, „A Comparative Study on Power Quality Standards and Interaction Analysis for LVDC Systems,” in *2022 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2022.
- [14] P. K. Behera en M. Pattnaik, „Design and control of dc–dc converters in a pv-based lvdc microgrid,” *DC—DC Converters for Future Renewable Energy Systems*, p. 1–29, 2022.

- [15] E. Rodriguez-Diaz, F. Chen, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, R. Burgos en D. Boroyevich, „Voltage-Level Selection of Future Two-Level LVdc Distribution Grids: A Compromise Between Grid Compatibility, Safety, and Efficiency,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, pp. 20-28, 2016.
- [16] T. De Wispelaere, S. Ravyts, N. Baeckeland en M. Kleemann, „A Techno-Economic Analysis to Compare Low Voltage DC with AC Grids for LED Lighting,” in *2023 IEEE Belgrade PowerTech*, 2023.
- [17] E. Rodriguez-Diaz, M. Savaghebi, J. C. Vasquez en J. M. Guerrero, „An overview of low voltage DC distribution systems for residential applications,” in *2015 IEEE 5th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, 2015.
- [18] G.-H. Gwon, C.-H. Kim, Y.-S. Oh, C.-H. Noh, T.-H. Jung en J. Han, „Mitigation of voltage unbalance by using static load transfer switch in bipolar low voltage DC distribution system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 90, pp. 158-167, 2017.
- [19] S. Rivera, R. Lizana F., S. Kouro, T. Dragičević en B. Wu, „Bipolar DC Power Conversion: State-of-the-Art and Emerging Technologies,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, pp. 1192-1204, 2021.
- [20] I. S. Voltages, „IEC 60038,” *Edition*, vol. 7, p. 2009–06, 2002.
- [21] „Algemeen Reglement op de elektrische installaties, Boek 1,” 2023.
- [22] Azaioud, Hakim, R. Claeys, J. Knockaert, L. Vandeveld en J. Desmet, „A Low-Voltage DC Backbone with Aggregated RES and BESS: Benefits Compared to a Traditional Low-Voltage AC System,” *Energies*, vol. 14, nr. 5, 2021.
- [23] W. Li, X. Mou, Y. Zhou en C. Marnay, „On voltage standards for DC home microgrids energized by distributed sources,” in *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2012.
- [24] I. E. Commission, *Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock*, 2005.
- [25] J. Karppanen, T. Kaipia, P. Nuutinen, A. Lana, P. Peltoniemi, A. Pinomaa, A. Mattsson, J. Partanen, J. Cho en J. Kim, „Effect of voltage level selection on earthing and protection of LVDC distribution systems,” 2015.
- [26] L. Li, K.-J. Li, K. Sun, Z. Liu en W.-J. Lee, „A Comparative Study on Voltage Level Standard for DC Residential Power Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, pp. 1446-1455, 2022.
- [27] Ó. Lucía, I. Cvetkovic, H. Sarnago, D. Boroyevich, P. Mattavelli en F. C. Lee, „Design of Home Appliances for a DC-Based Nanogrid System: An Induction Range Study Case,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, pp. 315-326, 2013.

- [28] S. Anand en B. G. Fernandes, „Optimal voltage level for DC microgrids,” in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010.
- [29] S. Moussa, M. J.-B. Ghorbal en I. Slama-Belkhodja, „Bus voltage level choice for standalone residential DC nanogrid,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 46, p. 101431, 2019.
- [30] S. Moussa, M. J.-B. Ghorbal en I. Slama-Belkhodja, „DC voltage level choice in residential remote area,” in *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2018.
- [31] H. E. Gelani, F. Dastgeer, K. Siraj, M. Nasir, K. A. K. Niazi en Y. Yang, „Efficiency comparison of AC and DC distribution networks for modern residential localities,” *Applied Sciences*, vol. 9, p. 582, 2019.
- [32] F. Wang, L. Wang, X. Zhang, J. Wang, S. Li en Y. Liu, „Voltage Level Study for DC Distribution Grid Based on Comprehensive Evaluation,” in *2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA)*, 2021.
- [33] J. Duan, Z. Li, Y. Zhou en Z. Wei, „Study on the voltage level sequence of future urban DC distribution network in China: A Review,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, p. 105640, 2020.
- [34] D. systems, „Circl Pavilion Amsterdam,” June 2023. [Online]. Available: <https://www.dc.systems/projects/circl-pavilion-abn-amro>.
- [35] H. K. Hong, Y. Cho, J. Kim, J. Cho en a. J. Kim, „Demonstration of the LVDC distribution system in an island,” in *CIREN*, 2017.
- [36] V. Thompson, „Timber framed solar carports for residential, commercial applications,” September 2024. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2024/09/05/timber-framed-solar-carports-for-residential-commercial-applications/>.
- [37] U. I. Action, „RE/SOURCED Renewable Energy SOLUTIONS for URban communities based on Circular Economy policies and Dc backbones,” July 2024. [Online]. Available: <https://www.uia-initiative.eu/en/uia-cities/leiedal-intermunicipal-association>.
- [38] H. Azaioud, R. Claeys, L. V. Jos Knockaert en J. Desmet, „Re/Sourced Pilot Project: Design And Power Flowanalysis Of A LvdC Backbone With Hybrid Energy System,” in *CIREN*, Online, 2021.
- [39] H. Azaioud, R. Claeys, L. V. Jos Knockaert en J. Desmet, „Self-sufficiency and lifetime improvement of community BESS on an LVDC backbone compared to individual BESS,” in *CIREN*, Rome, 2023.
- [40] L. Held, A. März, D. Krohn, J. Wirth, M. Zimmerlin, M. R. Suriyah, T. Leibfried, P. Jochem en W. Fichtner, „The Influence of Electric Vehicle Charging on Low Voltage Grids with Characteristics Typical for Germany,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 10, 2019.
- [41] N. Leemput, F. Geth, J. Van Roy, A. Delnooz, J. Büscher en J. Driesen, „Impact of Electric Vehicle On-Board Single-Phase Charging Strategies on a Flemish Residential Grid,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 1815-1822, 2014.

- [42] E. Veldman en R. A. Verzijlbergh, „Distribution Grid Impacts of Smart Electric Vehicle Charging From Different Perspectives,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 333-342, 2015.
- [43] E. Apostolaki-Iosifidou, P. Codani en W. Kempton, „Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging,” *Energy*, vol. 127, pp. 730-742, 2017.
- [44] R. Fachrizal, „Synergy between Photovoltaic Power Generation and Electric Vehicle Charging in Urban Energy Systems: Optimization Models for Smart Charging and Vehicle-to-Grid,” 2023.
- [45] C. Gonzalez, J. Geuns, S. Weckx, T. Wijnhoven, P. Vingerhoets, T. De Rybel en J. Driesen, „LV Distribution Network Feeders in Belgium and Power Quality Issues Due to Increasing PV Penetration Levels,” in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2012.
- [46] P. Huang, J. Munkhammar, R. Fachrizal, M. Lovati, X. Zhang en Y. Sun, „Comparative studies of EV fleet smart charging approaches for demand response in solar-powered building communities,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 85, p. 104094, 2022.
- [47] H. H. Eldeeb, S. Faddel en O. A. Mohammed, „Multi-Objective Optimization Technique for the Operation of Grid tied PV Powered EV Charging Station,” *Electric Power Systems Research*, vol. 164, pp. 201-211, 2018.
- [48] U. Fretzen, M. Ansarin en T. Brandt, „Temporal city-scale matching of solar photovoltaic generation and electric vehicle charging,” *Applied Energy*, vol. 282, p. 116160, 2021.
- [49] A. J. Alrubaie, M. Salem, K. Yahya, M. Mohamed en M. Kamarol, „A Comprehensive Review of Electric Vehicle Charging Stations with Solar Photovoltaic System Considering Market, Technical Requirements, Network Implications, and Future Challenges,” *Sustainability*, vol. 15, 2023.
- [50] W. Huynh, T. T. Hoang, A. Ukil en N.-K. C. Nair, „Comparison of Low-Voltage AC and DC Distribution Networks for EV Charging,” in *2022 7th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)*, 2022.
- [51] M. Yasko, A. Balint, J. Driesen en W. Martinez, „Future workplace EV charging architectures: DC and AC charging choices,” in *2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 2023.
- [52] I. Sulaeman, G. R. Chandra Mouli, A. Shekhar en P. Bauer, „Comparison of AC and DC Nanogrid for Office Buildings with EV Charging, PV and Battery Storage,” *Energies*, vol. 14, 2021.
- [53] R. Cleenwerck, A. Hakim, V. Majid, C. Thierry en D. Jan, „Impact Assessment of Electric Vehicle Charging in an AC and DC Microgrid: A Comparative Study,” *Energies*, vol. 16, nr. 7, 2023.

- [54] S. Jiang, „Extension of low voltage distribution by pure DC or mixed AC/DC parts for integration of solar PV and EV charging,” 2022.
- [55] J. Van Roy, „Electric vehicle charging integration in buildings,” 2015.
- [56] N. L. Elaad, *Data Analytics*, 2020.
- [57] S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte en M. Veneroni, „Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 103, pp. 158-187, 2017.
- [58] J. Yang, L. He en S. Fu, „An improved PSO-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid,” *Applied Energy*, vol. 128, pp. 82-92, 2014.
- [59] I. Rahman, P. M. Vasant, B. S. M. Singh, M. A. Al-Wadud en N. Adnan, „Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1039-1047, 2016.
- [60] P. Van den Bossche, A. Mentens en G. Dotreppe, „Electrical safety as key issue in EV charging infrastructure,” in *The 35th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, 2022.
- [61] G. Rajendran, C. A. Vaithilingam, N. Misron, K. Naidu en M. R. Ahmed, „A comprehensive review on system architecture and international standards for electric vehicle charging stations,” *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103099, 2021.
- [62] VREG, *Verbruiksprofielen en productieprofielen*, 2024.
- [63] R. Cleenwerck, H. Azaioud, R. Claeys, T. Coosemans, J. Knockaert en J. Desmet, „An approach to the impedance modelling of low-voltage cables in digital twins,” *Electric Power Systems Research*, vol. 210, p. 108075, 2022.
- [64] V. A. I. en Ondernemen (VLAIO), „Energiescans in KMO's (2017-2018) EINDRAPPORT, DEEL 1,” Brussels, 2018.
- [65] J. M. Sipma, A. Kremer en J. Vroom, „Energie labels en het daadwerkelijk energieverbruik van kantoren,” 2017.
- [66] E. Bellini, „France introduces solar requirement for parking lots,” *PV Magazine*, 12 December 2022.
- [67] F. Freschi, „High-Frequency Behavior of Residual Current Devices,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012.