

Provinciale weg N470 als trendsetter voor zelfregulerende gelijkspanningsnetten

In dit artikel trachten we uit te leggen waarom zelfregulerende netten op gelijkspanning een belangrijke rol zullen spelen in de energietransitie [1]. Gelijkspanningsnetten zijn onlosmakelijk verbonden met de opkomst van vermogenselektronica in de hardware van onze elektriciteitsproductie, -opslag en -consumptie, terwijl het enorme controle-potentieel van de vermogenselektronica leidt tot zelfregulerende netten. Dit idee is uitgewerkt in de N470, het eerste distributienet op gelijkspanning waarin enkel zelfregulerende componenten worden gebruikt en waar ook de beveiliging volledig actief is uitgevoerd.

Vanuit historisch perspectief heeft het AC-net met recht en reden lange tijd de voorkeur genoten boven het DC-net. In een wereld waarin de productie verzorgd wordt door grote fossiele-, waterkracht en nucleaire centrales met synchrone generators van honderden MW en waarin het merendeel van de consumptie bestaat uit (inductie-)motoren en de rest wordt verstoofd in eenvoudige weerstanden gaande van gloeilampen tot rudimentaire koffiezetten en keramische kookplaten, is het AC-net met zijn passieve beveiliging en eenvoudige omvorming tussen laag-, midden- en hoogspanning de meest aangewezen keuze.

De rol van zelfregulerende gelijkspanningsnetten in de energietransitie

De energieketen ondergaat echter significante veranderingen die worden gedreven door twee belangrijke pijlers;

1. Enerzijds is de energietransitie een van de centrale thema's van het hedendaagse maatschappelijke debat. Dit debat wordt gedreven door globale aspecten zoals de opwarming van het klimaat, maar ook door lokale aspecten zoals de impact van luchtvervuiling (fijnstof, stikstofoxiden en VOC's) op de volksgezondheid.

2. Anderzijds biedt de opkomst van de vermogenselektronica voorheen ongekennde technische mogelijkheden, denk maar aan de eenvoudige diode die vandaag de dag toegepast wordt in LED's voor de verlichting en zonnepanelen voor energieopwekking.

Door deze maatschappelijke en technische drijvers zien we een sterke opkomst van hernieuwbare energiebronnen zoals zon- en windenergie. Hier is geen sprake meer van synchrone generators op 50 Hz; Zonnepanelen zijn een DC-stroombron en windmolens werken met een generator die is aangesloten op een DC-tussenkring voordat de conversie naar het elektriciteitsnet plaatsvindt. Tegelijkertijd brengen deze bronnen nieuwe uitdagingen met zich mee; Het balanceren van de intermitterende productie van deze bronnen met de toenemende vraag naar elektriciteit vergt een andere aanpak en nieuwe oplossingen. Deze bronnen zorgen ook voor een verschuiving in de structuur van de opwekking. De traditionele top-down structuur geënt op grootschalige productie in enkele centrales wordt in het huidige net afgewisseld met een gedistribueerde structuur waarbij hernieuwbare opwekking zoals windturbines en WKK's worden aangesloten op het middenspanningsnet en residentiële PV op het laagspanningsnet.



Ook aan de zijde van de elektriciteitsconsumptie zien we verregaande ontwikkelingen; Door de evolutie in de kostprijs en energiedichtheid van batterijen, kunnen verbrandingsmotoren in voertuigen vervangen worden door elektromotoren. In deze elektrische voertuigen zorgt de vermogenselektronica wederom voor de koppeling tussen de DC-batterij en het elektriciteitsnet (en de elektromotoren). In steeds meer woningen/gebouwen wordt de aardgasgestookte CV-ketel vervangen door een warmtepomp waarin vermogenselektronica via een DC-tussenkring zorgt voor de variabele aandrijving van de waterpomp en compressor.[6] Deze DC-tussenkring vinden we ook terug in wasmachines, drogers, stofzuigers et cetera waar de netfrequentie wordt omgezet naar een variabele frequentie voor de aandrijving van elektromotors of naar een magnetisch veld in inductiekookplaten.

Er is ook een nieuwe rol weggelegd voor energieopslag [2][3]. Aan de ene kant is er de korte-termijn opslag in batterijen, zowel stationair als in elektrische auto's. Aan de andere kant is er de stijgende belangstelling voor waterstof, met een breed spectrum aan toepassingen gaande van elektrolyzers in de staalindustrie tot lange-termijn opslag van elektrische energie in waterstof en ammoniak.

In contrast met de uitgebreide aandacht voor de transitie in de energieopwekking en nieuwe verbruikers zoals elektrische auto's en warmtepompen, wordt er minder aandacht besteed aan de rol van het elektriciteitsnet in deze transitie. Het is immers het elektriciteitsnet dat de wisselende productie van zon- en windenergie moet kunnen transporteren naar steeds meer verschillende verbruikers, korte-termijn opslag in batterijen en, in de toekomst, lange-termijn opslag in waterstofderivaten. Het elektriciteitsnet dient zich tegelijkertijd aan te passen aan de veranderende structuur met productie die wordt aangesloten op midden- en laagspanning, maar ook energieopslag die zich op deze niveaus situeert. Het moet ook overweg kunnen met de toename in het elektriciteitsverbruik door de verschuiving van fossiele brandstoffen naar elektriciteit voor transport en warmte-opwekking.

Foto 1: In november 2020 is de N470 als duurzaamste weg van Nederland in gebruik genomen. De zonnepanelen in het geluidsscherm bij Delfgauw wekken voldoende energie op om 323 lichtmasten en 225 verkeerslichten langs de weg van stroom te voorzien. Foto: Provincie Zuid-Holland.

Het elektriciteitsnet is daarmee de backbone van de energietransitie en verdient daarom de nodige aandacht. We moeten ons vragen durven stellen over de transitie die het elektriciteitsnet zelf dient aan te gaan zodat het klaar is voor deze nieuwe oplossingen en de veranderende structuur van productie en afname. Wanneer we vandaag de dag het elektriciteitsnet *from scratch* zouden opbouwen, zijn er twee belangrijke factoren die we moeten meenemen voor het vinden van de optimale oplossing;

1. De prominente componenten van het nieuwe elektriciteitsnet, zoals zon- en windenergie, batterijen, elektrolyzers, elektrische auto's en warmtepompen hebben als gemeenschappelijke factor dat ze allen ofwel direct ofwel op de tussenkring op gelijkspanning werken. Voor de integratie van deze componenten op een gemeenschappelijke backbone is een *gelijkspanningsnet* de beste keuze omdat dit gepaard gaat met minder conversiestappen. Dit zorgt niet alleen voor een hogere efficiëntie, maar ook voor een duurzamer omgaan met de beschikbare materialen, een hogere betrouwbaarheid en een minder kapitaalintensief elektriciteitsnet.
2. Het feit dat al deze apparaten via vermogenselektronica zijn aangesloten op het elektriciteitsnet laat ons toe om het enorme controle-potentieel van deze laatste te benutten. Dit betekent dat we *zelfregulerende* netten kunnen ontwikkelen waarin de aangesloten apparaten zelf kunnen acteren op de toestand van het net. Zo kunnen productie-eenheden zelf de productie verminderen als de lokale spanning te hoog wordt of kan de elektrische wagen autonoom het laadvermogen verkleinen als de spanning te laag wordt. De componenten in dit net zullen dus niet passief "toekijken" als de nettoestand de afgesproken limieten overschrijdt, maar *autonoom* ingrijpen om het net binnen deze limieten te houden. Dit zorgt voor een veel robuuster net waarin tijdelijke pieken in de productie en belasting zichzelf limiteren om het net te allen tijde overeind te houden. Dit betekent ook dat we netten niet meer moeten bouwen om kortstondige pieken op te vangen, maar dat we netten vanuit een techno-economisch optimum kunnen ontwerpen.

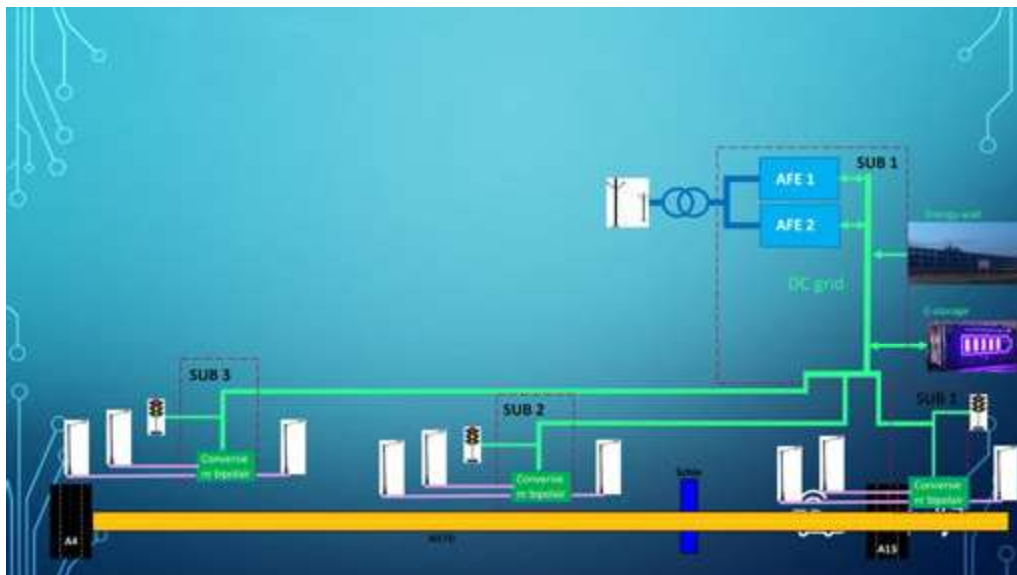
Vanuit dit perspectief is het te begrijpen dat de toekomst van het elektriciteitsnet niet alleen rond gelijkspanning draait, maar rond zelfregulerende gelijkspanningsnetten die zorgen voor een robuuste infrastructuur waarin efficiënt wordt omgegaan met (hernieuwbare) energie en waarin grondstoffen duurzaam worden aangewend.

Met dit betoog trachten we duiding te geven aan het belang van het N470 zelfregulerende gelijkspannings-distributienet in de bredere context van de energietransitie. Wat de N470 uniek maakt is dat we op systeemniveau het distributienet "heruitgevonden" hebben, door niet alleen alle apparaten op DC te laten werken maar door dit te combineren met zelfregulerende apparaten die, indien nodig, zelf ingrijpen om het net overeind te houden, en *actieve* beveiliging die eventueel optredende fouten quasi-ogenblikkelijk afschakelt.

Systeemdenken leidt tot zelfregulerende DC-netten

Voordat we de specifieke implementatie van de N470 bespreken, is het belangrijk om de voordelen van gelijkspannings- en zelfregulerende netten aan te halen. In deze context is het belangrijk om te beseffen dat sommige voordelen vandaag al gerealiseerd kunnen worden, terwijl andere voordelen pas duidelijk zullen worden als we aanpassingen doorvoeren op systeemniveau. Hetzelfde geldt voor de nadelen, sommige zijn vandaag al te mitigeren, andere mitigatiemaatregelen steunen op toekomstige ontwikkelingen van het elektriciteitsnet.

- A. Doordat steeds meer elementen direct of via een tussenkring op gelijkspanning werken [4][5][6][7], kan de omvormer beperkt worden tot een omvormer met 1 enkele conversiestap tussen de DC-netspanning en de eigen spanning. In AC-netten moet dit aangevuld worden met een tweede conversiestap die de DC-tussenkring verbindt met het AC-net. Praktisch betekent dat de hoeveelheid vermogenselektronica in de omvormer grosso modo halveert, waardoor we op lange termijn uitzicht krijgen op goedkopere omvormers met een hogere energie-efficiëntie omwille van de kleinere conversieverliezen in de vermogenskring, terwijl de omvormer duurzamer omspringt met de grondstoffen (minder vermogenselektronica). De kapitaalkost van de omvormer daalt dus op lange termijn, op korte termijn is dit nog niet zichtbaar vanwege het ontbreken van de schaalvoordelen ten opzichte van de in massa geproduceerde AC-omvormer. Deze omvormers vinden we terug in consumentenelektronica, zoals TV's en laptops, vaatwassers, koelkasten, airconditioning en warmtepompen, maar ook voor de aansluiting van PV-panelen en in de lader van elektrische wagens. Dit voordeel vereist echter denken op systeemniveau, omdat dit pas ten volle uitgebuit kan worden als we het hele systeem van productie en opslag over distributie en verbruik in beschouwing nemen.
- B. Door de toepassing van DC-netten kan er 35% meer vermogen gedistribueerd worden per mm² kabel dan met (driefasige) AC-netten. Dit voordeel neemt toe over langere afstanden. Ter illustratie voor laagspanning; Hierbij worden bipolaire ± 350 V DC-netten vergeleken met driefasige 400 V AC-netten, omdat beide netten geschikt zijn om apparaten met een 700 V DC-tussenkring aan te sluiten, dit houdt de vergelijking eerlijk. Bovendien hoeven er geen reactieve stromen vervoerd te worden in DC-netten, waardoor het voordeel verder oploopt.
- C. In het scenario waarin hernieuwbare energie deels direct wordt gebruikt en deels wordt opgeslagen in bijvoorbeeld batterijen om daarna verbruikt te worden, treden er veel conversiestappen op tussen productie, opslag en verbruiker. In dit scenario kan het voordeel in energie-efficiëntie van DC- t.o.v. AC-netten oplopen tot wel 10%. De impact hiervan moet echter niet onderschat worden, dit houdt immers ook in dat we 10% minder hernieuwbare energie nodig hebben om het verbruik te dekken en dat we een kleine 10% minder opslag nodig hebben. Dit illustreert waarom DC-netten veel verder gaan dan louter distributie, maar dat zij een impact hebben op systeemniveau omdat we significante besparingen kunnen realiseren in de productie en opslag van (hernieuwbare) energie.
- D. In DC-netten heeft de spanning slechts een amplitude, terwijl in AC-netten de spanning een amplitude, frequentie en fase heeft. Dit maakt de netconnectie in DC-netten eenvoudiger aangezien er maar 1 parameter van de spanning geregeld moet worden. Dit maakt het tevens eenvoudiger om het net in eilandbedrijf uit te baten.



Figuur 1: Opbouw van het gelijkspanningsdistributienet van de N470.



Foto 2: De Energy-Wall bij schemering.

E. Het laatste voordeel staat feitelijk los van de DC versus AC-discussie, maar is louter een voordeel van actieve beveiliging. Netten uitgerust met actieve beveiligingen kunnen langere afstanden overbruggen dan netten met passieve beveiligingen zoals zekeringen (bij dezelfde spanning). In deze laatste netten moet de kabellengte immers beperkt worden om voldoende kortsluitstroom te kunnen leveren bij een sluiting aan het einde van de kabel. Bij actief beveiligde (DC-)netten geldt deze restrictie niet en wordt er vooral gekeken naar de spanningsval over de kabel.

Natuurlijk zijn er ook nadelen verbonden aan DC-netten. Het grootste struikelblok blijft het beperkte aanbod van de beschikbare componenten en de kleinschalige productie van deze componenten. Dit is geen technische hinderpaal en kan opgelost worden door toenemende vraag en bijhorende grotere productie van deze componenten. Op component niveau is er dus nog een nadeel, maar op systeemniveau is dit nadeel minder aanwezig. Ook de normen vormen soms nog een struikelblok, maar er wordt hard gewerkt om deze normen snel uniform en coherent te maken zodat meer fabrikanten compatibele DC-producten op de markt kunnen brengen.



Foto 3: De E-opslag met weergave van de laadtoestand.



Foto 4: Het centrale distributiestation SUB1 (links) met rechts de E-opslag en op de achtergrond de E-Wall.

De N470, het eerste zelfregulerende gelijkspanningsdistributienet

Het zelfregulerende gelijkspanningsdistributienet (Figuur 1) van de N470 strekt zich uit over een lengte van 5 km tussen de A4 en A13. Het DC-net voedt 8 kruispunten met in totaal 250 verkeerslichtarmaturen, waarbij het op- en afrittencomplex voor de verbinding van de N470 met de A4 en A13 het belangrijkste deel is van deze infrastructuur. Verder voedt het DC-net de openbare verlichting (OVL) bestaande uit een 400-tal LED-lampen op de N470 en de nabijgelegen fietspaden. De hernieuwbare productie wordt verzorgd door een "E-Wall" met een piekvermogen van 100 kW. Verder beschikt het net over een 1 MWh batterij voor de opslag van de hernieuwbare energie en voor noodvoeding. Dit resulteert in een 100 kW distributienet met een totale kabellengte van 30 km. In wat volgt lichten we de belangrijkste componenten toe.

De aansluiting op het laagspanningsnet van Stedin wordt verzorgd door Active Front Ends (AFE's), die de AC-spanning omvormen naar een unipolaire DC-spanning van 700 V. Deze AFE's zijn redundant uitgevoerd zodat bij uitval van 1 AFE de volledige verkeersinfrastructuur en openbare verlichting gevoed kan blijven worden.

De hernieuwbare energie van de Energy-wall (Foto 2) wordt opgewekt door een 200-tal indrukwekkende zonnepanelen van 500 W met 96 PV-cellen, dit in contrast tot residentiële zonnepanelen met 60 cellen. Deze panelen worden

aangesloten in strings van 15 panelen. Om de maximale opbrengst uit deze panelen te kunnen halen, laat de PV-omvormer de maximum-power-point spanning (MPPS) variëren tussen 200 en 800 V zodat in alle omstandigheden de opbrengst geoptimaliseerd kan worden. Aangezien we in een DC-net werken, heeft deze omvormer maar 1 conversiestap nodig om de MPPS om te vormen naar de DC-net spanning.

De opgewekte zonne-energie wordt overdag gebruikt om de verkeersinfrastructuur te voeden, maar uiteraard brandt er dan geen OVL. Daarom wordt de overtollige zonne-energie opgeslagen in een centrale batterij/E-opslag van 1 MWh (Foto 3). Deze batterij bestaat uit 12 strings van 90 kWh met een string-spanning van 500 V. De stringspanning varieert tijdens laden en ontladen van de batterij, daarom worden de strings voorzien van een dc-dc omvormer die de batterijen koppelt aan de DC-net spanning van 700 V. Wederom is hier maar 1 enkele conversiestap nodig om de batterij te koppelen aan het DC-net en omdat het vermogen zowel bij laden als ontladen door de omvormer moet, winnen we hier meer dan 5% aan efficiëntie.

De E-opslag doet ook dienst als noodvoeding. Aangezien Power Management in een DC-microgrid heel eenvoudig is, moet er enkel gekeken worden naar de amplitude van de DC-net spanning om te constateren of er voldoende vermogen aanwezig is om de belasting te dekken. Als de amplitude onder de drempel voor de noodvoeding daalt, dan zal de batterij ogenblikkelijk ingrijpen en de spanning op peil houden. Dit kan de batterij minimaal 24u volhouden en langer als de E-Wall ook een bijdrage levert.

Het centrale distributiestation voor de hele N470 is SUB1 (Figuur 4). In dit station bevindt zich de centrale verdeler waarop de beide AFE's, de E-Wall,

de E-opslag en de beide onderstations SUB2 en SUB3 zijn aangesloten. SUB1 voedt tevens een aantal VRI's en ook enkele OVL-kringen. Vanuit SUB1 vertrekken er 2 DC-kabels naar SUB2 en SUB3 die een paar kilometer van SUB1 verwijderd zijn. In deze SUBs gebeurt de verdere verdeling naar de andere VRI's en zijn ook de bipolaire omvormers (zie verder) voor de resterende OVL-kringen aanwezig.

De laatste en misschien wel belangrijkste component die we hier bespreken is de actieve beveiliging van deze zelfregulerende dc-netten. Deze beveiliging is gebaseerd op vermogenselektronica en monitort actief de spanning en stroom (in casu de N470 gebruiken we de PXS700 van Eaton/Direct Current). Door deze cruciale parameters te meten, kan er in minder dan een ms gereageerd worden wanneer deze parameters de ingestelde limieten overschrijden. Het is belangrijk om deze beveiliging te kaderen in het geheel van het gelijkspanningsnet verhaal waarin de volledige productie, opslag en consumptie via omvormers is aangesloten op het net; In een net waarin alle apparaten acteren in een ms tijdsframe, kunnen we niet blijven werken met passieve beveiligingen die zelf geen benul hebben van de stroom en spanning en die een tijdsframe van (tienden van) seconden nodig hebben om nimmer pro-actief en altijd passief te reageren. Bij deze zelfregulerende DC-netten hoort een actieve beveiliging met een sub-ms responstijd. Als de actieve beveiliging een afwijking detecteert op de ingestelde limieten in

net waarin alle componenten al bijdragen aan de stabiliteit, dan moet er wel meer aan de hand zijn; Een quasi-ogenblikkelijke uitschakeling van de getroffen kabel of component is nu gerechtvaardigd. Omdat de actieve beveiliging de stroom en spanning meet, biedt deze ook nieuwe mogelijkheden om het zelfregulerende gelijkspanningsnet te monitoren (Figuur 2). Zo krijgen we inzicht in de powerflows in het DC-net en kunnen problemen eenvoudig gedetecteerd en geanalyseerd worden.

Als laatste hoofdstuk willen we graag de netstructuur van het zelf-regulerende DC-net van de N470 bespreken. Hierin bespreken we de TN-S aardingstopologie, de radiale netstructuur en geven meer duiding rond de gemengde uni- en bipolaire spanningsniveaus in de N470.

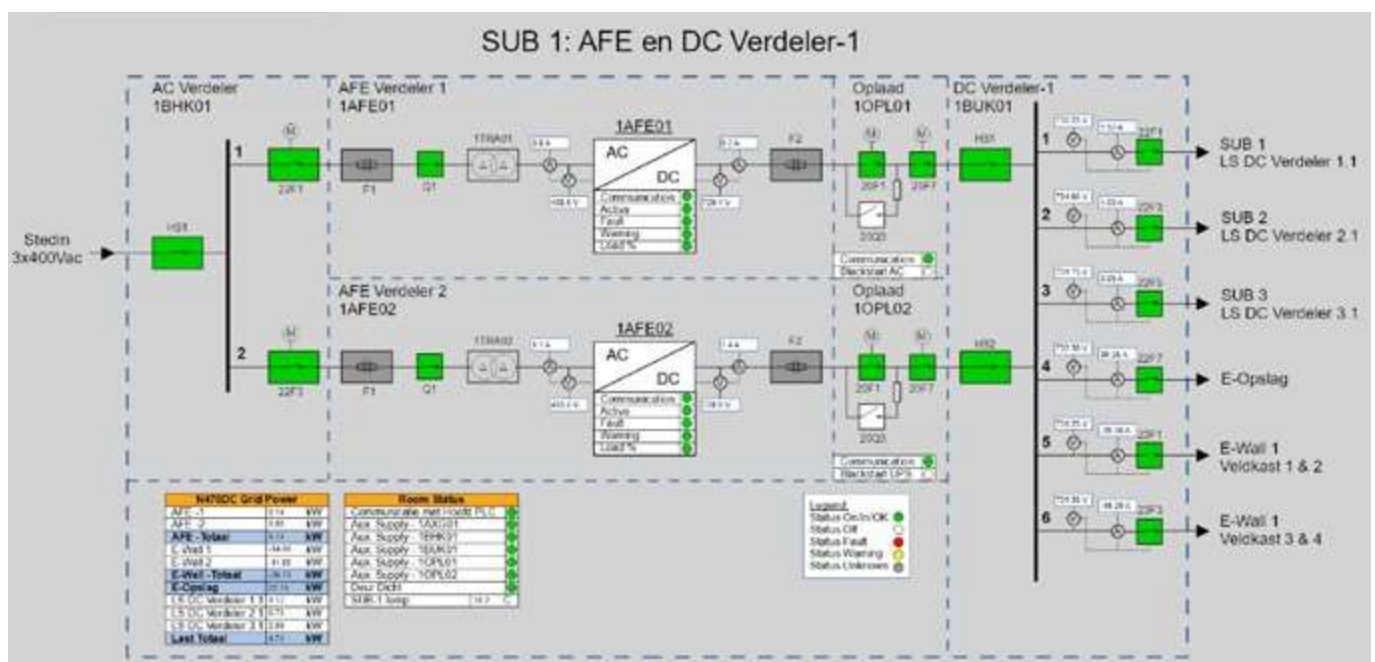
TN-S aardingstelsel

Voor het aardingsstelsel van dc-netten is gekozen voor een TN-S topologie. Dit houdt in dat het net:

- 1 of 2 polen en bijhorende geleiders heeft,
- een neutrale (N) of midden geleider (M) die verbonden is met de aarde en die de stroomonbalans tussen beide polen kan opnemen.
- Een Protective Earth (PE) geleider die de massa van de aangesloten apparaten verbindt met de aarde.

Zoals de naam al aangeeft (S=separated/gescheiden), zijn de midden geleider en PE niet met elkaar verbonden (met uitzondering van het centrale aardingspunt). Dit wordt gedaan om dc-lekstromen te voorkomen. Deze zorgen immers voor corrosie en zijn een gevaar voor de infrastructuur die

Figuur 2: Monitoring van SUB1, de E-wall produceert 31 kW verdeeld over 5 kW belasting en 26 kW naar de E-opslag.



de lekstroom voert. Om deze reden worden in dc-distributienetten geen TN-C en TT-stelsels toegelaten. In (radiale) distributienetten met 1 hoofdvoeding verzorgd door een centraal LS-distributiestation, mag de midden geleider direct verbonden worden met de aarde. Op andere locaties wordt de aarding verzorgd door een hulpaarde met condensator-diode netwerk. In normale werking verhindert het condensator-diode netwerk de aanwezigheid van aardlekstromen tussen de hoofdaarde en hulpaarde. Indien er een fout optreedt, bijvoorbeeld door een kabelbreuk, zal de foutstroom wel kunnen terugvloeien door de hulpaarde zodat de beveiliging de foutstroom detecteert en quasi-ogenblikkelijk kan uitschakelen. De condensator in de hulpaarde zorgt ervoor dat hoogfrequente netvervuiling een kort pad heeft naar zijn bron, zodat de vervuiling niet in het net terechtkomt.

Netstructuur

De eenvoudigste structuur voor een distributienet is het radiale net. Dit houdt in dat de onderstations via 1 enkele aftakking/kabel zijn verbonden met het centrale dc-distributiestation. Vanuit dit centrale station vertrekken meerdere kabels om de onderstations, de batterij en de E-wall aan te sluiten aan het centrale distributiestation SUB1. Het voordeel van deze topologie is de eenvoud en dat een enkele beveiliging van de kabel volstaat.

Unipolaire en bipolaire spanningsniveaus

In de N470 wordt gebruik gemaakt van zowel unipolaire netten als bipolaire netten. We hebben eerder al aangegeven dat bipolaire netten met een poolspanning van ± 350 V DC 35% meer vermogen kunnen transporteren per mm^2 dan driefasige AC-netten op 400 V terwijl ze wel dezelfde vermogenslektronica met een DC-tussenkring op 700 V gebruiken. Bij de N470 maken we gebruik van een mix van unipolaire en bipolaire netten. Het unipolaire net heeft een nominale spanning van 700V en verbindt de centrale DC-verdeler in SUB1 met de AFE's, de (omvormers van) de E-wall en E-opslag en zorgt voor de distributie van SUB1 naar SUB2 en SUB3. Technisch gezien was het minder complex om deze apparaten allen aan te sluiten op 1 gemeenschappelijke unipolaire spanning van 700 V. De spanning tussen beide polen van dit net is dezelfde als in een ± 350 V DC net, waardoor de voordelen behouden bleven. Ook de voeding van de VRI's is rechtstreeks op deze unipolaire spanning aangesloten. Voor de openbare verlichting is er een andere insteek gebruikt. Terwijl er op het unipolair net maar een paar tential

omvormers zijn aangesloten, moeten er op het OVL-net meer dan 400 lamp-drivers worden aangesloten die de DC-net spanning moeten omzetten naar een gecontroleerde stroom door de diodes van de LED-verlichting, wat een spanning van ongeveer 100 V aan de uitgang van de lamp-driver vereist. Door gebruik te maken van een DC-net op 350V, kan de hele lamp-driver op een lagere spanning gebouwd worden, waardoor deze goedkoper wordt. Bovendien is het vermogen per lamp grosso modo 100 W, dus de vermogens in dit deel van het DC-net zijn veel kleiner. Daarom wordt voor de OVL een bipolair DC-net op ± 350 V aangelegd. Het grote voordeel is enerzijds dat de lamp drivers maar aan 350V worden blootgesteld en anderzijds dat de energiedistributie zelf nog steeds op 700 V gebeurt (bij evenwichtige belasting vloeit er vrijwel geen stroom door de middengeleider). De overgang tussen beide netten wordt gerealiseerd door galvanisch geïsoleerde omvormers die aan de ingang in parallel zijn aangesloten op het unipolaire 700V net en aan de uitgang 350 V produceren. Door de uitgangen in serie te zetten en het middenpunt te aarden, verkrijgen we een bipolair ± 350 V DC-net.

Conclusie

Het distributienet van de N470 is een echte trendsetter, die bewijst dat een volledig distributienet op DC kan worden aangelegd, inclusief de opwekking via zonnepanelen en de opslag in batterijen. Bovendien is het een robuust net, niet alleen omdat de batterij-opslag een heel etmaal de energievoorziening kan overnemen, maar ook omdat het een zelfregulerende net is waarin alle apparaten een bijdrage leveren om de spanning binnen de grenzen te houden.

Sluitstuk van dit zelfregulerende gelijkspanningsdistributienet is de actieve beveiliging, die integraal deel uitmaakt van de net-monitoring en de powerflow in het net in kaart brengt. Al deze innovaties worden verenigd in coherent geheel, waardoor we nieuwe referenties kunnen zetten op het gebied van energie-efficiëntie, duurzaam gebruik van grondstoffen en materiaal, robuustheid en zelfvoorzienende verkeersinfrastructuur.

Referenties

1. Keynote speech Gelijkspanningscongres 2018, "Distribution Grids with DC Power Electronics - a Key Enabling Technology", Prof. Dr. ir. Dr. h.c. Rik W. De Doncker
2. IRENA, "Utility-Scale Batteries Innovation Landscape Brief", September 2019
3. T.-T. Nguyen et al., "A review on technology maturity of small scale energy storage technologies", Renew. Energy Environ. Sustain. 2, 36 (2017)
4. <http://www.epdtonthenet.net/article/41914/IR-S-HVICS-lead-the-way-towards-energy-efficiency.aspx>
5. <https://www.electronicdesign.com/power/optocouplers-help-promote-safe-efficient-ev-charging-stations>
6. <https://www.renesas.com/in/en/solutions/key-technology/power-management/air-conditioner.html>
7. <http://finalyearpowerelectronicsprojects.blogspot.com/2015/11/transformerless-cascaded-multilevel.html>