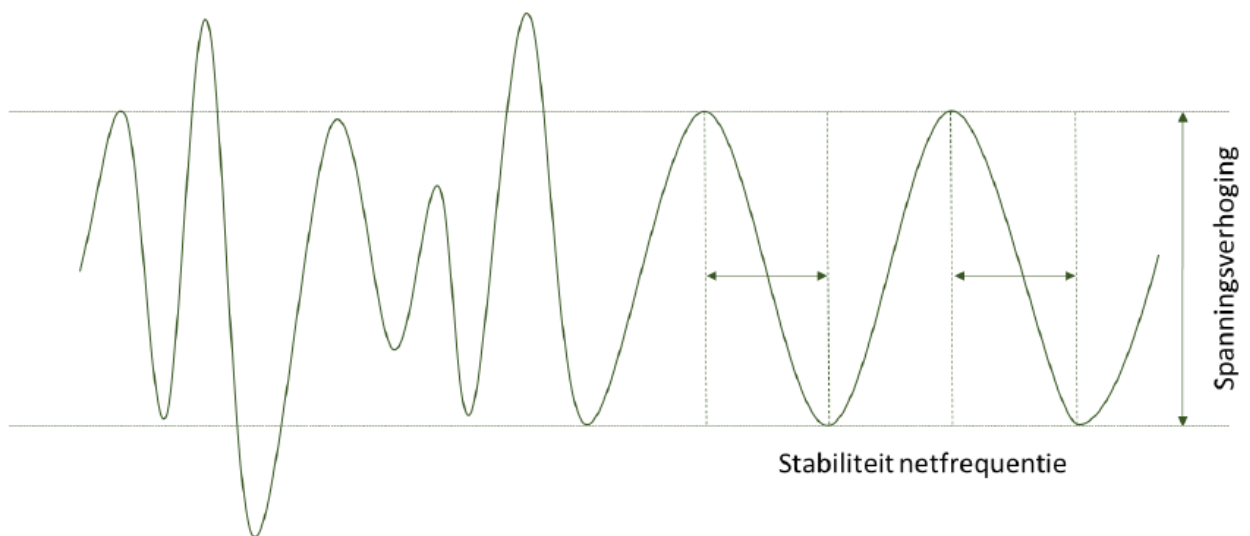




Eindrapportage

Smart Balance

Intelligente oplossingen voor gebalanceerde integratie van PV systemen in elektriciteitsnetten



Projectgegevens

Projectnummer: TESH114008
Projecttitel: Smart Balance - Intelligente oplossingen voor gebalanceerde integratie van PV systemen in elektriciteitsnetten
Penvoerder: TNO
Partners: Mastervolt
Heliox
Fourtress
Cogas
Rendo
Projectperiode: 1 januari 2015 t/m 30 juni 2018

Contactgegevens

Deze rapportage is opgesteld door Chematronics in samenwerking met de projectpartners. Chematronics is projectbegeleider van het Smart Balance project. Voor vragen inzake het project, de resultaten en vervolgmogelijkheden kunt u contact opnemen met:

Chematronics BV

Alex Vermeer
+31 6 143 43 108
a.vermeer@chematronics.nl

TNO

Roelien Attema
+31 88 866 70 50
roelin.attema@tno.nl

Subsidie

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Samenvatting

De PV markt staat aan de vooravond van grootschalige toepassing. De aantrekkelijke business case en hogere toegevoegde waarde van PV maakt dat de technologie zelf klaar is voor grootschalige toepassing. In de West-Europese markt zijn vrijwel alle PV systemen netgekoppeld. Terugverdienmodellen zijn gebaseerd op levering aan het net, waarbij geen rekening wordt gehouden met infrastructurele kosten. Zolang PV een minimaal deel van de energiebalans uitmaakt, geeft dit geen problemen. Bij grootschalige toepassing komen echter de nodige uitdagingen naar boven. Grootschalige integratie van PV in de gebouwde omgeving zal in toenemende mate ten koste gaan van de stabiliteit van het elektriciteitsnet. Dit betreft niet alleen onbalans tussen energieopwekking en -vraag, maar ook ongewenste infrastructurele effecten zoals spanningsverhoging in het laagspanningsnet (LS-net) en snellere frequentievariaties in het totale net.

In dit project is de ontwikkelde en gedemonstreerde VSG technologie als uitgangspunt genomen. Deze technologie bevindt zich op TRL6, de technologie is ontwikkeld in het VSYNC project en gedemonstreerd in een industrieel relevante setting (100 kVA VSG, in Cheia, Roemenië, en 10 VSG's van ieder 3 kVA in Bronsbergen, Nederland). De uitdagingen van dit project hebben zich gericht op het vertalen van deze technologie naar een commercieel interessant systeem, op basis van de beschikbare omvormerplatforms van Mastervolt en Heliox. Deze zijn respectievelijk gericht op string omvormers en batterijomvormers (Mastervolt), en micro-omvormers (Heliox). Doelstelling van het project was om te komen tot intelligente omvormers die in staat zijn om de negatieve effecten van het toevoegen van decentrale energieopwekkers (PV systemen) m.b.t. lokale spanningsverhoging en destabilisatie van de netfrequentie significant te reduceren. Hierdoor blijft grootschalige uitrol van PV mogelijk en kan PV een rol van betekenis gaan spelen in de Nederlandse (en internationale) energiebalans.

De projectpartners zijn Mastervolt en Heliox (productontwikkelaars), Fourtress (softwareontwikkelaar), Cogas en Rendo (netbeheerders) en TNO (kennisinstelling). Het consortium wordt ondersteund door Chematronics (projectmanagement) en Alliander (aansluiting bij lopende proeftuinen voor grootschalige uitrol) als externe partijen.

In het project zijn de volgende resultaten bereikt:

1. Inzicht in behoeften netbeheerders m.b.t. problematiek omtrent PV systemen inzake spanningsverhoging en netfrequentie. Hierbij gaat het om de omvang, timing, potentiële toekomstige kosten en locatie van de problemen;
2. Inzicht in benodigde communicatie tussen PV systemen en tussen netbeheerder of andere actoren (installateurs, consumenten) en het PV systeem en daarmee gepaard gaande veiligheids- en privacy-issues.
3. Inzicht in huidige en toekomstige Nederlandse en Europese wet- en regelgeving m.b.t. intelligente PV systemen/PV omvormers/batterijsystemen, kijkend naar o.a. veiligheid en mogelijkheden in commerciële modellen;
4. Vertaling van VSG technologie van het huidige platform (generieke bi-directionele omvormer geprogrammeerd met Matlab-Simulink) naar platforms gedeeltelijk geschikt voor commerciële toepassing in de omvormers van Heliox en Mastervolt;
5. Overzicht van huidige technische, praktische en commerciële belemmeringen van Mastervolt en Heliox omvormers m.b.t. inpassing van VSG technologie;

6. Systeemarchitectuur van het PV systeem incl. intelligente omvormers, waarbij een analyse wordt gemaakt van de technische en commerciële meerwaarde van integratie van inertia respons vermogen en reactief vermogen op verschillende niveaus in het systeem. Het systeem bestaat uit PV modules, een of meerdere omvormers (incl. compacte opslag) en het elektriciteitsnet. Integratie kan plaatsvinden per module (i.e. micro-omvormers), per PV systeem (i.e. string omvormer of aparte apparatuur) of in het laagspannings- of middenspanningsnet;
7. Simulatie van prestatie van systeemarchitectuur, inzicht in (varianten) van de systeemarchitectuur en prestaties daarvan in simulatiemodellen. Bij positief resultaat wordt overgegaan tot implementatie;
8. Selectie/aanpassing van (delen van) VSG algoritmes en integratie hiervan in de omvormers van Heliox en Mastervolt. Eventuele eenvoudig te realiseren hardware aanpassingen worden ook uitgevoerd;

Door ontstane uitdagingen gedurende het project zijn onderstaande resultaten niet behaald. De partners gaan hier verder inhoudelijk op in, in het inhoudelijke eindrapport en hebben tevens in de aanbevelingen de stappen beschreven t.b.v. een eventueel vervolgproject.

9. Experimentele praktijktoepassing van operationele systemen bij de proeftuin van het hoofdgebouw van Cogas (vergelijk tussen (combinaties van) string omvormer, micro-omvormer, batterij-omvormer en oorspronkelijke VSG). Onderzoek naar onderlinge interferentie/systeeminvloeden en prestaties in het net;
10. Operationele test bij consumenten in het net. Hiervoor wordt een geschikte locatie gekozen gedurende het project door de betrokken netbeheerders;
11. Uitgewerkte business case voor toepassing VSG technologie in PV systemen, waarbij het niveau van toepassing, de schaalbaarheid, de kosten en baten voor verschillende actoren (leveranciers van systemen/omvormers, consumenten, netbeheerders, eigenaren PV systemen) worden uitgewerkt.

Inhoudelijk eindrapport

Deze rapportage betreft de eindrapportage van het subsidieproject Smart Balance zoals uitgevoerd in het kader van de Switch2SmartGrids. In onderstaande rapportage wordt ingegaan op de inhoudelijke doelstellingen en eindresultaten. Daarnaast wordt een aantal projectwijzigingen omschreven.

Inleiding

De PV markt staat aan de vooravond van grootschalige toepassing. De afgelopen jaren is de toegevoegde waarde van PV producten verder toegenomen, van een primaire focus op productietechnologie met als doel hogere opbrengsten en lagere kosten, naar gebouwgeïntegreerde concepten die zowel esthetisch als functioneel toegevoegde waarde hebben voor de eindgebruiker. Ook de aansluiting bij de bouwkolom en daar geldende processen wordt steeds beter ontwikkeld. De aantrekkelijke business case en hogere toegevoegde waarde van PV maakt dat de technologie zelf klaar is voor grootschalige toepassing.

In de West-Europese markt zijn vrijwel alle PV systemen netgekoppeld. Terugverdienmodellen zijn gebaseerd op levering aan het net, waarbij geen rekening wordt gehouden met infrastructurele kosten. Zolang PV een minimaal deel van de energiebalans uitmaakt, geeft dit geen problemen. Bij grootschalige toepassing komen echter de nodige uitdagingen naar boven (bijvoorbeeld in Duitsland of België). Grootschalige integratie van PV in de gebouwde omgeving zal in toenemende mate ten koste gaan van de stabiliteit van het elektriciteitsnet. Dit betreft niet alleen onbalans tussen energieopwekking en -vraag, maar ook ongewenste infrastructurele effecten zoals spanningsverhoging in het laagspanningsnet (LS-net) en snellere frequentie variaties in het totale net. Er is intelligentie nodig om de balans te vinden tussen het toevoegen van PV opwekking lokaal in het net en de gevolgen daarvan op de lokale elektrische infrastructuur (spanningsverhoging, stabiliteit netfrequentie).

Bovengenoemde ontwikkelingen geven direct problemen voor netbeheerders en op middellange termijn ook voor consumenten en PV leveranciers, omdat er geen PV installaties meer kunnen worden toegevoegd binnen de huidige capaciteiten van het elektriciteitsnet zonder dat dit ten koste gaat van de lokale spanningskwaliteit en de frequentiestabiliteit voor het gehele net. Nu worden deze problemen opgelost door capaciteit tijdelijk af te schakelen. Dit is echter op lange termijn niet wenselijk.

Doelstelling

In dit project is de ontwikkelde en gedemonstreerde VSG technologie als uitgangspunt genomen. Deze technologie bevindt zich op TRL6, de technologie is ontwikkeld in het VSYNC project en gedemonstreerd in een industrieel relevante setting (100 kVA VSG, in Cheia, Roemenië, en 10 VSG's van ieder 3 kVA in Bronsbergen, Nederland). De uitdagingen van dit project hebben zich gericht op het vertalen van deze technologie naar een commercieel interessant systeem, op basis van de beschikbare omvormerplatforms van Mastervolt en Heliox. Deze zijn respectievelijk gericht op string omvormers en batterijomvormers (Mastervolt), en micro-omvormers (Heliox). Doelstelling van het project was om te komen tot intelligente omvormers die in staat zijn om de negatieve effecten van het toevoegen van decentrale energieopwekkers (PV systemen) m.b.t. lokale spanningsverhoging en destabilisatie van de netfrequentie significant te reduceren. Hierdoor blijft grootschalige uitrol van PV mogelijk en kan PV een rol van betekenis gaan spelen in de Nederlandse (en internationale) energiebalans.

Doelstelling van het project is om te komen tot intelligente (micro-)omvormers die in staat zijn om de negatieve effecten van het toevoegen van decentrale energieopwekkers (PV systemen) m.b.t. lokale spanningsverhoging en destabilisatie van de netfrequentie significant te reduceren. Hierdoor blijft

grootschalige uitrol van PV mogelijk en kan PV een rol van betekenis gaan spelen in de Nederlandse (en internationale) energiebalans.

Concrete doelen van dit project vanuit het perspectief van het Innovatiecontract Smart Grids 2012 en het addendum 2014 zijn hieronder benoemd.

- Dit project draagt bij aan het reduceren van de kosten van netwerkverzwaringen en kosten voor balancering vanwege de systeemintegratie van duurzame energiebronnen. Zonder de ontwikkelde technologische oplossingen in dit project zal het op termijn niet meer mogelijk zijn om meer decentrale energieopwekking aan het net toe te voegen. Om dit mogelijk te maken zullen netbeheerders significant in het netwerk moeten investeren. Dit wordt middels dit project voorkomen. De ontwikkelde technologie levert dus een directe kostenbesparing op de netwerkinfrastructuur en daarmee op de kosten van duurzame energie. Voor netbeheerders in Nederland zal dit een cumulatieve besparing op investeringskosten opleveren van ca. 150M€ van 2018 t/m 2020 en 580M€ van 2021 t/m 2030;
- Een deel van de Nederlandse energieconsumenten zal gebruik gaan maken van de in dit project ontwikkelde Smart Grids technologie. In de eerste vijf jaar na het project gaat het hierbij om ca. 50.000 systemen (cumulatief);
- De cumulatieve besparing op het primaire energieverbruik bedraagt 2,4PJ (t/m 2022) en hiermee wordt de uitstoot van 163kton CO₂ in die vijf jaar vermeden (zie hoofdstuk 6);
- In dit project wordt een significante kostenreductie van VSG technologie gerealiseerd ter voorkoming van spanningsverhoging en instabiliteit in de netfrequentie in Smart Grids. De technologie wordt dermate goedkoop dat de business case voor toepassing in PV systemen voor de consument en netbeheerder interessant blijft. Dit leidt tot snelle marktgroei en opschaling van toepassing van de technologie;
- De in dit project deelnemende bedrijven zullen in de periode 2018-2022 een cumulatieve omzetgroei zien van ca. 38M€. Dit in verhouding tot de huidige projectinvestering van 1,1M€ projectkosten (exclusief commercialisatiekosten) waarvan ruim 0,5M€ subsidie;
- De ontwikkeling van een commercieel toepasbare VSG technologie zal bijdragen aan de uitbouw en consolidatie van de bestaande top-3 kennispositie in Europa op het gebied van Smart Grids. Na succesvolle uitvoering van dit project verwacht TNO spin-off activiteiten m.b.t. opdrachten van derden en eventueel daaraan gekoppelde licentieovereenkomsten voor het integreren van de VSG technologie in producten anders dan PV omvormers (bijv. bij windturbines).

Werkwijze

Het project kende vier werkpakketten:

- WP1 – Systeemarchitectuur. In dit werkpakket is onderzocht welke implicaties de toepassing van de VSG technologie in de string-, micro- en batterij-omvormers heeft. Belangrijke parameters die onderzocht zijn, zijn de gewenste functionaliteiten, performance implicaties van zowel de omvormers als de VSG functionaliteit, en de economische haalbaarheid. Met name voor de economische haalbaarheid waren de performance implicaties en de (huidige en toekomstige) wet- en regelgeving met betrekking tot toepassing van intelligente PV systemen van belang.
- WP2 – Simulatie en systeemtesten. In dit werkpakket zijn de systemen met behulp van simulatie en emulatie getest. Er is voornamelijk gekeken naar de gewenste effecten en de performance implicaties. Tevens is er gekeken naar potentiële interactie effecten.
- WP3 – Technologische implementatie. In werkpakket 3 zijn de algoritmes geïmplementeerd in de drie varianten van omvormertechnologie (micro-omvormers, string omvormers, batterijomvormers). De benodigde aanpassingen in de hard- en software worden gerealiseerd en de applicatie wordt ontwikkeld.
- WP4 – Experimentele praktijktoepassing in intelligente netgekoppelde PV-systemen. In dit werkpakket zijn de ontwikkelde systemen getest in een pilot opstelling bij Cogas. Het hoofdgebouw is ingericht als proeftuin alvorens systemen in een marktsituatie worden toegepast. Er zijn systeemtesten uitgevoerd. En er is een vergelijking gemaakt tussen traditionele omvormers, het tafelmodel van de VSG technologie en aangepaste omvormers al dan niet aangevuld met batterijtechnologie.

Resultaten

In het project zijn een aantal resultaten bereikt. Onderstaand worden enkele belangrijke resultaten toegelicht. Daarbij wordt tevens gebruik gemaakt van verwijzingen naar beschikbare verslagen en testrapporten. Deze zijn integraal onderdeel van deze inhoudelijke eindrapportage en dienen dan ook als vertrouwelijk te worden behandeld.

WP1 Systeemarchitectuur

In de eerste fase van het project is gefocust op de haalbaarheid. De technische randvoorwaarden en uitgangspunten van de VSG zijn geïnventariseerd waarna de implementatiemogelijkheden van de VSG technologie door Fourtress, Mastervolt en Heliox zijn geëvalueerd. In samenspraak met de netbeheerders zijn parallel hieraan in kaart gebracht op welk niveau de technologie toegevoegde waarde kan hebben en welke actoren hierbij horen. De spannings- en balanshandhaving was hiervoor het primaire doel. Duitsland diende als voorbeeld voor de marktproblematiek. Daarnaast zijn de juridische randvoorwaarden in kaart gebracht. Rendo en Cogas hebben hiervoor een aantal scenario's ontwikkeld t.b.v. de typische probleemgevallen en energietransitie.

Cogas heeft onderzoek gedaan naar wet- en regelgeving. Hierbij kwam naar voren dat er meer ruimte komt in de wetgeving voor testen / experimenteren in het net. Er ontstaan bijvoorbeeld mogelijkheden om 'eigen' netten te beheren.

Onlangs heeft TNO al onderzoek gedaan in het kader van het Europese project VSYNC over het besturen van driefasige vermogenselektronische converters in energiesystemen om de systeemstabiliteit te verbeteren. Het VSYNC-concept, dat rond 2012 is ontwikkeld, is een mogelijke implementatie van een

VSM, die de uitgangsstroom van inverter-gebaseerde Distributed Generators (DG) of op het net aangesloten converters met lokale opslag regelt om de huidige referentie te volgen die is gegenereerd op basis van een traditionele synchrone machine. Op deze manier zou een driefasig, op een omvormer gebaseerd DG in principe het gedrag van traditionele synchrone machines nabootsen en virtuele traagheid en demping aan het net bieden.

In het begin van het Smart Balance project, stelde TNO voor om het driefasige VSYNC-concept aan te passen aan enkelfasige converters en over te dragen aan Heliox en Mastervolt enkele ideeën voor simulatie in MatLab / Simulink-software van een enkelfasige synchronisatie-eenheid gericht op het verschaffen van frequentieschatting live.

Net als bij andere netgekoppelde converters, had de oorspronkelijk voorgestelde synchronisatie-eenheid voor het Smart Balance project een specifieke phase-locked loop (PLL) -structuur die bedoeld was om de fase en frequentie van de netspanning te schatten, zodat een DG-converter kan worden aangesloten op de het wisselspanningsnet en snel kan reageren op de netfrequentievariëaties als gevolg van een onbalans in vermogen tussen opwekking en verbruik.

De door TNO voorgestelde PLL-structuur was inherent niet-lineair en het was erg moeilijk om de parameters af te stemmen. Aanvankelijk was een methode voor het ontwerpen van deze parameters niet beschikbaar. Daarom hebben Heliox en Mastervolt in samenwerking met TNO met succes een ontwerpprocedure voor dit doel ontwikkeld. Het oorspronkelijke concept voor de synchronisatie-eenheid bleek echter gevoelig te zijn voor grote frequentievariëaties. Bovendien werd het door TNO niet duidelijk gemaakt of de tijdrespons van deze voorgestelde PLL-structuur snel genoeg was om de netfrequentievariëaties op een zinvolle manier te volgen om een degelijke basis te geven voor het emuleren van het gedrag van een synchrone machine.

Software implementatie

De grootste uitdaging bij het implementeren van VSG-software in bestaande apparaten was het zorgen voor naadloze integratie in de vorige SW-architectuur. Er is een gedetailleerde analyse van de SW-architectuur uitgevoerd en er zijn revisies uitgevoerd om aan de vereiste behoeften te voldoen en optimalisaties te kunnen uitvoeren. Een Firmware-in-the-Loop (FIL) -model van de firmware is gemaakt in Simulink om de bestaande code te analyseren en aan te passen.

Behaalde resultaten in dit werkpakket:

Resultaat: Inzicht in behoeften netbeheerders m.b.t. problematiek omtrent PV systemen inzake spanningsverhoging en netfrequentie. Hierbij gaat het om de omvang, timing, potentiële toekomstige kosten en locatie van de problemen.

Resultaat: Inzicht in benodigde communicatie tussen PV systemen en tussen netbeheerder of andere actoren (installateurs, consumenten) en het PV systeem en daarmee gepaard gaande veiligheids- en privacy-issues.

Resultaat: Inzicht in huidige en toekomstige Nederlandse en Europese wet- en regelgeving m.b.t. intelligente PV systemen/PV omvormers/batterijsystemen, kijkend naar o.a. veiligheid en mogelijkheden in commerciële modellen

Resultaat: Overzicht van huidige technische, praktische en commerciële belemmeringen van Mastervolt en Heliox omvormers m.b.t. inpassing van VSG technologie;

Resultaat: Systeemarchitectuur van het PV systeem incl. intelligente omvormers, waarbij een analyse wordt gemaakt van de technische en commerciële meerwaarde van integratie van inertia respons vermogen en reactief vermogen op verschillende niveaus in het systeem. Het systeem bestaat uit PV modules, een of meerdere omvormers (incl. compacte opslag) en het elektriciteitsnet. Integratie kan plaatsvinden per module (i.e. micro-omvormers), per PV systeem (i.e. string omvormer of aparte apparatuur) of in het laagspannings- of middenspanningsnet;

Gedeeltelijk behaald resultaat: Vertaling van VSG technologie van het huidige platform (generieke bi-directionele omvormer geprogrammeerd met Matlab-Simulink) naar platforms geschikt voor commerciële toepassing in de omvormers van Heliox en Mastervolt;

WP2 Simulatie en systeemtesten

Onafhankelijk van TNO analyseerden en verbeterden zowel Heliox als Mastervolt door middel van simulaties met MatLab / Simulink niet alleen de synchronisatie-eenheid maar ook het volledige model van een VSYNC-converter die op het openbare net was aangesloten. Het doel was om inzicht te krijgen en oplossingen te vinden om een bestaand convertor-prototype bij Mastervolt aan te passen om het VSYNC-concept voor toepassingen met laag vermogen te valideren. Na het oplossen van theoretische en praktische problemen, werd het prototype met succes door Mastervolt in gebruik genomen. Er werd aangetoond dat de enkelfasige omzetter vermogen in het net kon injecteren met vertraagde en traag reagerende virtuele traagheidskarakteristieken.

In tweede instantie stelden Heliox en Mastervolt de vraag dat meerdere PLL's in een systeem vaak met elkaar kunnen concurreren en veel problemen kunnen veroorzaken, bijvoorbeeld verminderde prestaties, toegenomen complexiteit en zelfs instabiele werking. Anders gesteld, lijkt het VSYNC-concept voor een bepaalde converter te reageren met "virtuele inertie" op frequentievariaties; Maar hoe zit het met de impact van de nabijheid van miljoenen converters? Geschiedt de gezamenlijke invoeding van DG-groepen op het net synchroon om de wereldwijde stabiliteit van de netfrequentie te ondersteunen? Helaas had TNO met betrekking tot de samenvoeging van meerdere inverters geen ervaring met en konden er geen conclusies worden getrokken over dit belangrijke punt.

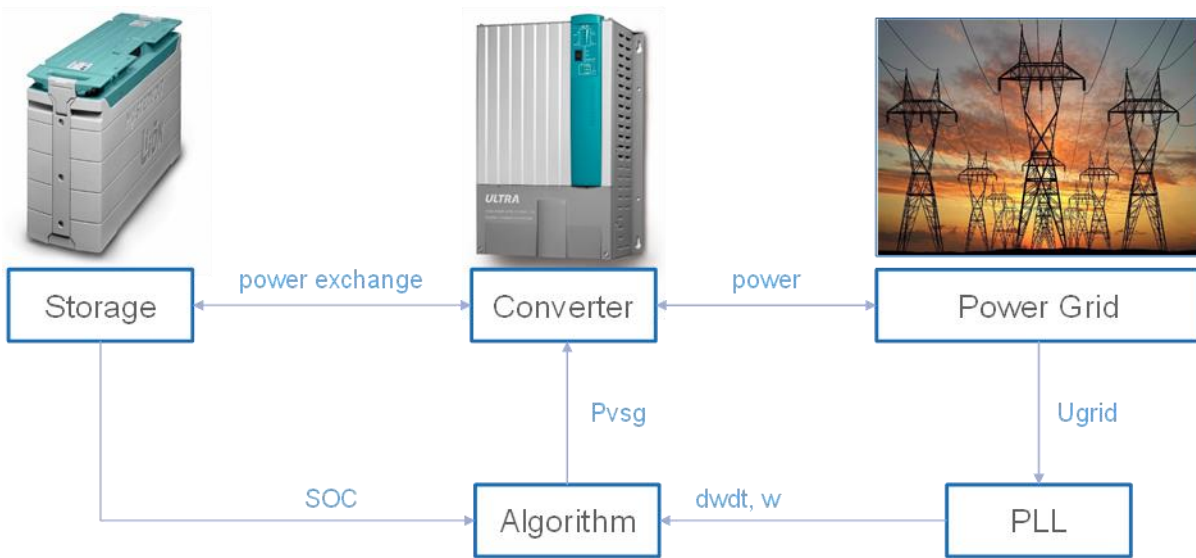
De op de VSYNC-benadering gebaseerde DG, zoals oorspronkelijk door TNO voorgesteld, zorgde ervoor dat de omvormer nog steeds als een stroombron fungeert. Voedingssystemen worden echter gedomineerd door spanningsbronnen. Vanuit het oogpunt van frequentiestabiliteit zijn huidige bronnen inherent niet compatibel met voedingssystemen. Hoewel de huidige energiesystemen sommige bronnen kunnen verdragen, kan een groot aantal bronnen (als gevolg van miljoenen samenwerkende low-power converters) mogelijk ernstige uitdagingen opleggen aan de werking van de stroomsystemen. Deze kwesties zijn niet in overweging genomen in het vorige VSYNC-project, daarom was er geen inzicht in dit fundamentele aspect beschikbaar. Dit heeft als gevolg dat de focus van het Smart Balance project verschoof naar algoritmen die VSM's als spanningsbronnen implementeren. Dit is een enorm belangrijk inzicht dat tijdens het project werd opgedaan.

Behaalde resultaten in dit werkpakket:

Resultaat: Simulatie van prestatie van systeemarchitectuur, inzicht in (varianten) van de systeemarchitectuur en prestaties daarvan in simulatiemodellen.

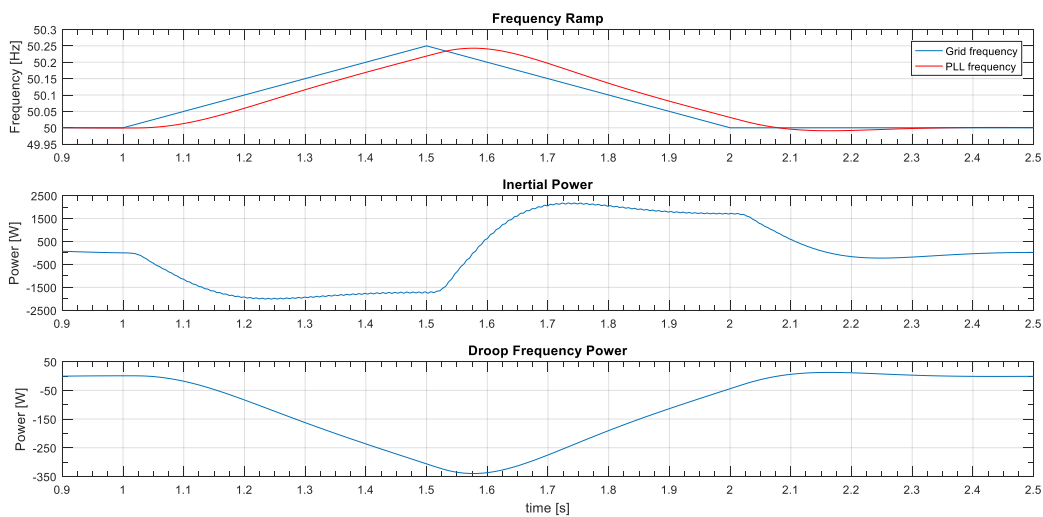
WP3 Technologische implementatie
 Implementatie VSG Mastervolt en Heliox

Een VSG-algoritme, gebaseerd op differentiaalvergelijking voor rotorversnelling van een synchrone machine, kenmerken van de frequentie-verandering en laadtoestand (SoC) van de opslagenheid, werd geleverd door TNO, voor verder onderzoek en implementatie.



Figuur: VSG concept implementatie overzicht.

Vervolgens is met een mathematisch model het VSG algoritme geanalyseerd op respons, gevoeligheid en werking.



Figuur: VSG mathematisch model respons.

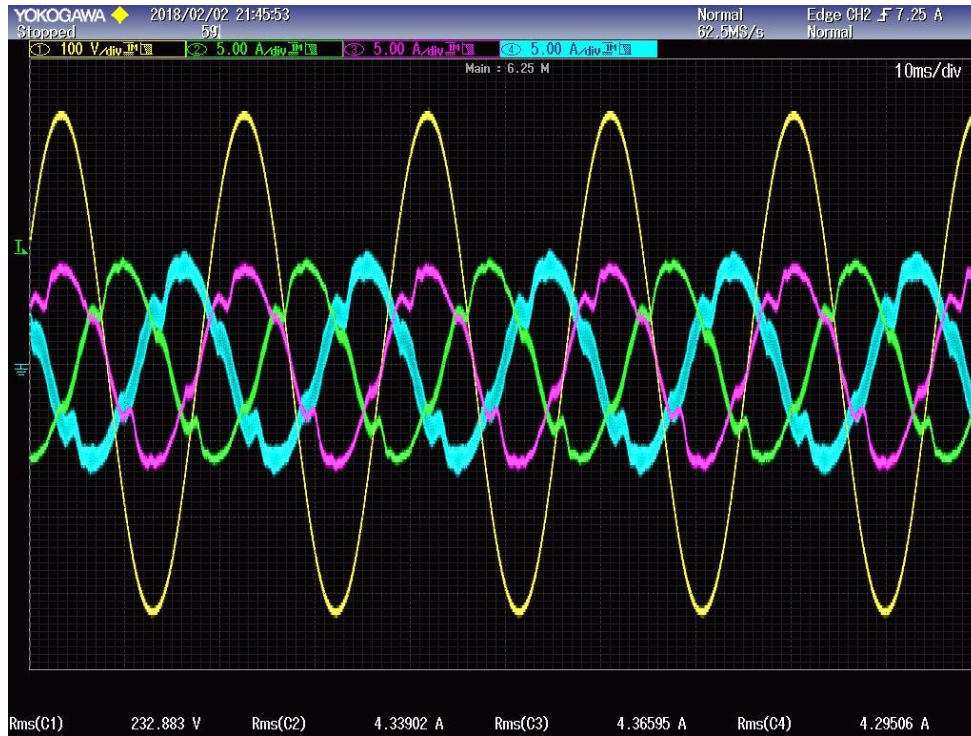
Het PLL mechanisme gebruikt door het VSG-algoritme werd uitgebreid onderzocht (samen met TNO en Heliox) om de stabiliteit en dynamische prestaties te verifiëren. ‘Loop transfer’-karakteristieken en afstemming van parameters waren de belangrijke aspecten van overweging. Simulink-modellen (zowel overdrachtsfunctie als op basis van de ‘state-space’) van de hardware en software van het bestaande apparaat zijn ontwikkeld en het VSG algoritme is opgenomen in de bestaande besturingsmechanismen inclusief een batterijmonitoringssysteem.

Een implementatie van het VSG-algoritme in de bestaande hardware werd gerealiseerd. Het gebruikte apparaat was een Mass Combi Ultra (MCU), een multifunctionele converter met gecombineerde sinusvormer, lader en overdrachtsysteemfunctionaliteit. Tevens is er een implementatie gerealiseerd in drie verschillende converters (zie figuur op volgende pagina) die zijn verbonden met drie AC-fasen, waarbij elke converter het algoritme onafhankelijk uitvoert en geen communicatie of synchronisatie uitvoert. De waargenomen resultaten waren zoals verwacht en bevestigd aan de gevestigde theorie- en simulatieresultaten.



Figuur: Lab opstelling driefase implementatie.

Onderstaande figuur geeft het resultaat weer wanneer de netfrequentie afwijkt van een lagere waarde dan nominaal (50 Hz) en de converter stroom toevoert aan het net. De gele lijn toont fase 1 van de netspanning, paars toont de stroom van fase 1, groen toont de stroom van fase 2 en blauw toont de stroom van fase 3.



Figuur: Driefase implementatie resultaat.

Behaalde resultaten in dit werkpakket:

Resultaat: Selectie/aanpassing van (delen van) **VSG1** algoritmes en integratie hiervan in de omvormers van Heliox en Mastervolt. Eventuele eenvoudig te realiseren hardware aanpassingen worden ook uitgevoerd;

WP4 Experimentele praktijktoepassing in intelligente netgekoppelde PV systemen

Niet behaalde resultaten in dit werkpakket:

De volgende resultaten zijn niet behaald i.v.m. ontwikkeling van VSG2 Technologie:

Niet behaald resultaat: Experimentele praktijktoepassing van operationele systemen bij de proeftuin van het hoofdgebouw van Cogas (vergelijk tussen (combinaties van) string omvormer, micro-omvormer, batterij-omvormer en oorspronkelijke VSG). Onderzoek naar onderlinge interferentie/systeeminvloeden en prestaties in het net;

Niet behaald resultaat: Operationele test bij consumenten in het net. Hiervoor wordt een geschikte locatie gekozen gedurende het project door de betrokken netbeheerders;

Niet behaald resultaat: Uitgewerkte business case voor toepassing VSG technologie in PV systemen, waarbij het niveau van toepassing, de schaalbaarheid, de kosten en baten voor verschillende actoren (leveranciers van systemen/omvormers, consumenten, netbeheerders, eigenaren PV systemen) worden uitgewerkt.

Vervolgactiviteiten

Na een aantal technische besprekingen met TNO was het de perceptie dat, om de stabiliteit van de netfrequentie te helpen tijdens aanzienlijke belastingvariaties, de elektronische omvormers die op het openbare net zijn aangesloten zich moeten gedragen als netvormende converters. Dit betekent in principe dat de netvormende converters als een spanningsbron aangesloten worden op het net via een inductieve impedantie, en niet als net-ondersteunende converters (stroombronnen die direct op het net aangesloten vermogen leveren).

Tijdens belastingvariaties verandert de netfrequentie niet abrupt. De faseverschuiving tussen de netspanning op het aansluitpunt en de spanningsgolfvorm van een netvormende omzetter zal echter veel sneller veranderen en kan zelfs stapsprongen vertonen. Daarom, om zich te gedragen zoals een synchrone machine zou doen, zouden de netvormende converters niet moeten proberen om het faseverschuivingsverschil zo snel mogelijk te corrigeren, maar met een bepaalde vertraging, wat overeenkomt met het introduceren van een trage reactie. Anders gesteld, moet de controle worden uitgevoerd op het corrigeren van de faseverschuiving, niet op de frequentie.

Het zou waardevol zijn voor Heliox en Mastervolt als de bovenstaande beweringen op de een of andere manier gekwantificeerd zouden kunnen worden. Hiervoor is meer onderzoek nodig:

(1) Om de ontwikkeling van een methode voor snelle vermogensrespons op spanningsfaseverschuivingsvariaties opnieuw te overwegen, met praktische verificatie. Voor een eenvoudige implementatie en testen met beschikbare machines, kan de beproeving worden gedaan aan driefasesystemen (het detectieprincipe moet evengoed van toepassing zijn op enkelfasige systemen later).

(2) Om door experimenten, op een laag vermogen, het transiënte gedrag van de spanningsfaseverschuiving van een bestaande driefasige synchrone machine gekoppeld aan een frequentie gestuurd emulatiernet te bevestigen.

(3) Voor het implementeren en testen van een eenvoudige besturingsaanpak om de spanningsfaseverschuiving van een netvormingsomzetter langzaam te corrigeren. In dit geval zou een driefase synchrone machine (mechanisch aangedreven door een gelijkstroommotor als 'prime mover') de spanningen en frequentie van het emulatiernet leveren.

(4) Om het gedrag van de faseverschuivingsgestuurde netvormende omzetter te vergelijken met een netondersteunende omvormer, zoals reeds geïmplementeerd door Mastervolt (bijvoorbeeld VSG1, gebaseerd op de VSYNC-ideeën), die beide gelijktijdig werken in dezelfde experimentele opzet als in (3).

Het is de mening van Heliox dat de bovengenoemde stappen fundamenteel begrip zullen brengen voor het concept "DG-converter met virtuele inertie", met implicaties voor de toekomstige implementatie in enkelfasige elektronische systemen met laag vermogen. Op deze manier kan het Smart Balance-project waardevolle resultaten opleveren voor toekomstig onderzoek.

Een interessante onderzoeksvraag voor een eventueel toekomstig project zou de mogelijkheid zijn om het gedrag van een vermogenselektronische omzetter te veranderen van 'grid-supporting' naar 'grid-forming' en terug afhankelijk van de belastingsituatie van het net.

Discussie

Smart Balance was een ambitieus project met een groot aantal innovatieve doelstellingen. Bij de start van het project waren twee uitdagingen geformuleerd waarvoor de VSG technologie ontwikkeld moest worden. Gedurende het project bleek dat de gestelde oplossing inadequaaf was bij het berekenen van de systeemparameters. Een gridanalyse inclusief diepgaande vereisten vloeide hieruit voort.

TNO presenteerde in het begin van het project de VSG-oplossing voor twee uitdagingen die voortvloeien uit grootschalige inzet van PV-systemen. Deze oplossing bleek tijdens het project ontoereikend te zijn, toen werd geprobeerd om systeemparameters te berekenen. Dit leidde tot een diepere analyse van het gedrag van het netwerk en de vereisten die voortvloeien uit dit gedrag voor de converters die PV aan het net koppelen.

De problemen kunnen worden gekenmerkt als Frequency Issues (FI) en voltage Issues (VI).

Het verbeterde begrip zorgde meer inzicht van wat VSG echt is en waarom welke issues er ontstonden bij de toepassing hiervan. Het wees echter ook de weg naar een aangepaste en daardoor adequate VSG voor FI. In dit document wordt VSG in zijn oorspronkelijke vorm aangeduid als VSG1, de gewijzigde VSG wordt VSG2 genoemd.

Dit document bevat een wiskundige analyse en definieert simulaties en experimenten om deze analyse te valideren. De simulaties toonden dat de modellen zich inderdaad gedragen zoals de analyse voorspeld. Het ultieme bewijs van geldigheid moet echter komen van experimenten. Er is veel moeite gedaan om een testsite voor deze experimenten te bouwen en in gebruik te nemen. Helaas vertoonde de testopstelling een onstabiele werking vanwege een fout in de operationele werking van een van de componenten.

De experimentele validatie moet hierdoor nog plaatsvinden. De voorgestelde wijzigingen van VSG werden gedaan op een conceptueel niveau. Een gedetailleerd ontwerp wacht nog steeds op zowel fysieke implementatie als simulaties en experimenten.

De oplossing voor VI kon niet worden gevonden in een gemodificeerde VSG. De aard van de bekabeling in het laagspanningsgedeelte van het net maakt dit onmogelijk. Er is echter een (of de) oplossing gevonden om het laagspanningsdistributienetwerk slimmer en sneller te maken door converters toe te voegen die de spanningsregeling van de “feeders” verbeteren. Deze converters kunnen op de markt worden gekocht.

Op sommige resultaten is om strategische, product- of markttechnische redenen afgeweken, maar zijn wel relevante additionele resultaten behaald. Onderstaand tabel geeft een overzicht van behaalde resultaten.

Oorspronkelijke resultaten	Eventuele afwijkingen
Inzicht in behoeften netbeheerders m.b.t. problematiek omtrent PV systemen inzake spanningsverhoging en netfrequentie. Hierbij gaat het om de omvang, timing, potentiële toekomstige kosten en locatie van de problemen;	Gerealiseerd
Inzicht in benodigde communicatie tussen PV systemen en tussen netbeheerder of andere actoren (installateurs, consumenten) en het PV systeem en daarmee gepaard gaande veiligheids- en privacy-issues.	Gerealiseerd
Inzicht in huidige en toekomstige Nederlandse en Europese wet- en regelgeving m.b.t. intelligente PV systemen/PV omvormers/batterijsystemen, kijkend naar o.a. veiligheid en mogelijkheden in commerciële modellen;	Gerealiseerd
Vertaling van VSG technologie van het huidige platform (generieke bi-directionele omvormer geprogrammeerd met Matlab-Simulink) naar platforms geschikt voor commerciële toepassing in de omvormers van Heliox en Mastervolt;	Operationeel prototype bij Mastervolt gerealiseerd ter validatie van het VSYNC concept.
Overzicht van huidige technische, praktische en commerciële belemmeringen van Mastervolt en Heliox omvormers m.b.t. inpassing van VSG technologie	Gerealiseerd
Systeemarchitectuur van het PV systeem incl. intelligente omvormers, waarbij een analyse wordt gemaakt van de technische en commerciële meerwaarde van integratie van inertia respons vermogen en reactief vermogen op verschillende niveaus in het systeem. Het systeem bestaat uit PV modules, een of meerdere omvormers (incl. compacte opslag) en het elektriciteitsnet. Integratie kan plaatsvinden per module (i.e. micro-omvormers), per PV systeem (i.e. string omvormer of aparte apparatuur) of in het laagspannings- of middenspanningsnet;	Gerealiseerd
Simulatie van prestatie van systeemarchitectuur, inzicht in (varianten) van de systeemarchitectuur en prestaties daarvan in simulatiemodellen. Bij positief resultaat wordt overgegaan tot implementatie;	Gerealiseerd
Experimentele praktijktoepassing van operationele systemen bij de proeftuin van het hoofdgebouw van Cogas (vergelijk tussen (combinaties van) string omvormer, micro-omvormer, batterij-omvormer en oorspronkelijke VSG). Onderzoek naar onderlinge interferentie/systeeminvloeden en prestaties in het net;	De experimentele validatie moet hierdoor nog plaatsvinden. De voorgestelde wijzigingen van VSG werden gedaan op een conceptueel niveau. Een gedetailleerd ontwerp wacht nog steeds op zowel fysieke implementatie als simulaties en experimenten.
Operationele test bij consumenten in het net. Hiervoor wordt een geschikte locatie gekozen gedurende het project door de betrokken netbeheerders;	Niet gerealiseerd doordat experimentele validatie nog moet plaatsvinden.
Uitgewerkte business case voor toepassing VSG technologie in PV systemen, waarbij het niveau van toepassing, de schaalbaarheid, de kosten en baten voor verschillende actoren (leveranciers van systemen/omvormers, consumenten, netbeheerders, eigenaren PV systemen) worden uitgewerkt.	Definitieve businesscase niet gerealiseerd door de experimentele validatie nog moet plaatsvinden.

Tabel: Overzicht behaalde resultaten Smart Balance

Conclusie

De uitgangspositie zoals die aan het begin van het project werd verondersteld, is onjuist gebleken. Na een jaar werd dit duidelijk en werd een nieuwe aanpak gekozen. Een grondige analyse bracht aan het licht waarom VSG niet zou werken. Het toonde manieren om dit, theoretisch, door simulatie en, praktisch, door experimenten te bewijzen. Het leidde ook tot een opsplitsing van het werk naar frequentie-gerelateerde problemen en spanningsgerelateerde problemen. Dit waren achteraf afzonderlijke onderzoekspaden.

Het inzicht in met name het frequentieprobleem heeft zich aanzienlijk ontwikkeld, evenals het vertrouwen dat het onderzoek nu op de goede weg is. De implementatie van VSG1 was succesvol en was veelbelovend in die zin dat de apparaatimplementatie overeenkwam met de computersimulaties. Er moet echter nog veel meer worden getest in het veld en de effectiviteit van het onderliggende concept moet worden onderzocht. De VSG2-benadering, hoewel in theorie schijnbaar veelbelovend, moet uitgebreid worden geanalyseerd en praktisch zijn gebleken alvorens verder te gaan met de integratie ervan in converters. Om dit verder te onderzoeken zijn echter nog een aantal activiteiten die noodzakelijk zijn om verder uit te werken.

- Aanvullende simulaties om een compleet beeld te krijgen van alle relevante functies van SG, VSG1 en VSG2.
- Werken aan het gedetailleerde ontwerp van VSG2
- Experimenten om de modellering te valideren.
- Experimenten om het voorspelde gedrag van VSG1 en VSG2 te bewijzen
- Toevoegen aan driefase modellen en apparaten enkelfasige modellen en apparaten
- Invloed van lage X / R-lijnen
- Interactie tussen converters met een spanningsbronkarakter
- Hoe kan gridforming door DG's worden gerealiseerd?

De verkregen resultaten kunnen als een grote stap worden gezien. Een grote stap echter op een pad dat veel langer is uitgevallen dan in het begin werd gedacht.

Aanbevelingen

Het is onduidelijk voor Heliox en Mastervolt of de aggregatie van meerdere enkelfasige laagvermogen converters met ingebed VSG1-gedrag de systeemstabiliteit effectief zal bevorderen. Dit werd versterkt door de analyse van het VSG1-concept tijdens het project. Daarom is het voorbarig om dit soort besturingsalgoritmen in de producten te introduceren. Bovendien is de voorgestelde synchronisatie-eenheid niet goed geschikt voor grote frequentievariëaties en moet deze nog worden verbeterd.

De toekomstige noodzaak voor de DG-converters om zich uiteindelijk als spanningsbronnen te gedragen, in plaats van de huidige bronnen, werd niet in overweging genomen in het vorige TNO-project (VSYNC). Bijgevolg was er geen inzicht in dit fundamentele aspect tijdens het Smart Balance projectonderzoek. Daarom zou de focus van een mogelijk toekomstig project om de resultaten van het Smart Balance project naar voren te brengen, moeten liggen op algoritmen die VSG's als spanningsbronnen implementeren.

De complexiteit van het project heeft daarnaast gedurende de uitvoer voor een aantal uitdagingen gezorgd en daarmee invloed gehad op het project. Daarom doen we enkele aanbevelingen voor de uitvoer van toekomstige projecten.

- Samenwerking tussen een groot aantal partners, ieder met zijn eigen ambities, ervaringen en doelstellingen, vergt een continue afstemming van strategische en operationele belangen. Door het invullen van het projectmanagement vanuit een onafhankelijke partij zijn alle belangen meegenomen en is uiteindelijk voor alle projectpartners een succesvol project afgerond.
- De 'eindgebruikers' zijn als projectdeelnemer actief betrokken bij de uitvoering van de gestelde activiteiten. Hierdoor kon actief inzicht worden gekregen in de besliscriteria van deze partijen.
- De ambities waren hoog en de diversiteit aan innovaties was groot. Enerzijds stimuleert dit brede kennisdeling en een focus op aspecten in het systeem die in kleinere consortia mogelijk vergeten worden. Anderzijds heeft dit gezorgd voor vertraging in het realiseren van enkele resultaten. Een duidelijke projectfasering met gezamenlijk overeengekomen mijlpalen en beslismomenten is noodzakelijk om de projectvoortgang te behouden en inzicht te houden in de status van de diverse ontwikkelingen ten opzichte van de afgesproken doelen.

Concluderend kijken de projectpartners terug op een uitdagend project dat uiteindelijk heeft geleid tot nieuwe gedetailleerde inzichten t.b.v. netstabiliteit.

Uitvoering van het project

Het project heeft gedurende de looptijd diverse uitdagingen gekend. Deze hebben onder andere tot gevolg gehad dat rollen gewijzigd zijn, de consortiumsamenstelling is gewijzigd en er diverse organisatorische en begrotingswijzigingen zijn doorgevoerd. Deze worden hieronder verder toegelicht.

Technische en organisatorische uitdagingen en projectwijzigingen

De Grootste technische uitdaging die tot verschuiving van activiteiten heeft geleid is de noodzaak voor de ontwikkeling van de VSG2 Technologie waarin onderscheid wordt gemaakt tussen Frequency Issues (FI) en Voltage Issues (VI).

Organisatorisch heeft de volgende wijziging plaatsgevonden:

- Budgetverschuiving: Het niet voldoen van de verwachte performance van VSG1 heeft geleid tot een beperking in de rollen van Fourtress, Cogas en Rendo. De ontwikkeling van het VSG2 protocol leidt tot extra werk voor TNO, Heliox en Mastervolt. Het vertrek van een kennisdrager bij TNO en het niet voldoen aan de verwachte performance van het VSG1 protocol heeft vertraging in het project veroorzaakt en veel extra werk voor partners (m.n. Heliox). Door stopzetten implementatie VSG1 is de rol van Fourtress beperkt.
 - o Deze budgetverschuiving is op 29 juni 2017 akkoord gegeven door RVO. Op 20 oktober 2017 is hierop een herziene beschikking ontvangen aangaande de begroting van 29 juni 2017.

Naast de bovenstaande technische en organisatorische uitdagingen en daarmee gepaard gaande wijzigingen, zijn er geen verdere inhoudelijke wijzigingen opgetreden. Alle significante wijzigingen zijn gedurende het project aan RVO gerapporteerd en waar nodig goedgekeurd.

Kennisverspreiding

Gedurende de looptijd van Smart Balance en vanwege de gewijzigde activiteiten heeft er geen kennisverspreiding plaatsgevonden.

PR project en verdere PR mogelijkheden

I.v.m. de ontstane uitdagingen in het project zijn er geen publicaties verschenen.