

Openbaar Eindrapport project “SunCycle”: SunCycle 2nd generation concentrator cell-assembly

*Corry de Keizer, Wiep Folkerts, Solar Energy Application Centre (SEAC), www.seac.cc
Peter Penning, Marnick van de Zande, SunCycle Technology B.V., www.suncycle.nl
John Schermer, Leon Bunthof, Radboud Universiteit, <http://www.ru.nl/appliedmaterialsscience/>
Contactpersoon: marnick.zande@suncycle.nl*

Project samenvatting

In het SunCycle project is een consortium de uitdaging aangegaan om een volgende generatie van een concentrerende PVT module te ontwikkelen en deze module uitgebreid te onderzoeken. Het SunCycle concept is ontwikkeld en gepatenteerd door het bedrijf SunCycle. Met behulp van een lens en een spiegel wordt het directe zonlicht geconcentreerd op een kleine hoog-efficiënte zonnecel. Het systeem is stationair, alleen de prisma en de spiegel draaien onafhankelijk van elkaar. Hierdoor is het systeem goed toepasbaar in een stedelijke omgeving. De cel wordt gekoeld en produceert daardoor ook warmte.

Binnen dit project is gewerkt aan een nieuwe generatie module met een hogere efficiëntie. Verschillende werkpakketten hebben daaraan bijgedragen:

- Fundamenteel onderzoek is door Radboud Universiteit uitgevoerd naar verschillende effecten op de opbrengst van de cel. Onderzocht is hoe het inhomogene licht op de cel, een inhomogene invalshoek en een inhomogeen spectrum de efficiëntie van een hoog-efficiënte cel beïnvloeden. Een uitkomst is dat secundaire optica voor de PV-cel de opbrengst verhogen.
- De celopbouw met celtoren, cel, secundaire optica, koelblok en elektronica is compleet herontworpen. Deze functioneert hierdoor veel beter en is veel robuuster. Bovendien zijn, naar aanleiding van de operationele resultaten in de veldtest, veel andere componenten en software verbeterd of herontworpen resulterend in een betere functionaliteit.
- Verschillende prototypes van de SunCycle module zijn langdurig onderzocht in een buitenopstelling op de SolarBEAT veldtest locatie (TU/e campus) in Eindhoven. Daarbij is zowel de elektrische, als de thermische performance gemeten. Een elektrische operationele cefficiëntie tot 16.3 % is gemeten.
- Er is een techno-financieel model ontwikkeld om key performance parameters zoals de Net Present Value (NPV) en de Levelized Cost of Energy (LCoE) voor warmte en stroom te realiseren voor Nederland en Jordanië. Omdat er in Nederland drie keer zo weinig directe instraling op een statisch vlak is als in Jordanië, is de investering de komende jaren in Nederland niet rendabel. Daarentegen is een investering in Jordanië zeer gunstig, zeker als de verwachte stijgingen van de systeemefficiëntie gerealiseerd kunnen worden.

De projectpartners kijken terug op een succesvol project, waarin veel stappen zijn gemaakt naar een volledig functioneel product. Het project heeft geresulteerd in een nieuw ontwerp voor de 2^{de} generatie SunCycle module en veel operationele ervaring. Stationair en onder standaard testcondities is een elektrische cefficiëntie tot 20 % gemeten, in de veldtest is een stabiele cel-efficiëntie van 16.3 % gemeten.

Project achtergrond

Het bedrijf SunCycle heeft een innovatief hoog concentrerend PVT (HCPVT) concept ontwikkeld. Het is een statische module met geïntegreerde tracking door middel van een roterend prisma en een roterende parabolische spiegel, die direct zonlicht concentreren op een kleine hoog efficiënte cel. Er wordt een concentratiefactor van meer dan 500x gerealiseerd, waardoor een veel kleiner celoppervlak nodig is dan voor een standaard PV-systeem. Achter de hoog efficiënte cel zit een koelblok, die de cel koelt, maar daardoor ook een warmte genereert.

Het systeem produceert zowel warmte als stroom en kan toegepast worden in een stedelijke omgeving.

Voor het begin van het project, was er nog beperkte ervaring met het experimentele functioneren van de SunCycle module. Tijdens dit project is het functioneren van verschillende generaties van de SunCycle module buiten op het Solar BEAT dak in Eindhoven onderzocht.

Project doelstelling

Het doel van het projectconsortium was om een tweede generatie cell assemblage binnen een SunCycle module te ontwikkelen en de module in zijn geheel te demonstreren. De 2^e generatie module moet beter en met een hogere efficiëntie functioneren als de 1^e generatie. Het project is uitgevoerd door SunCycle Technology B.V., de Radboud Universiteit en SEAC.

Project werkplan

Het project was opgedeeld in een viertal werkpakketten met zelfsturende teams. WP1 verzorgde een buiten veldtest naar de 1^e en 2^e generatie SunCycle module. De veldtest vond plaats op de onderzoekslocatie SolarBEAT. Het operationele functioneren van de module en de thermische en elektrische performance zijn onderzocht. WP2 ontwikkelde een techno-financieel model en beoordeelde de techno-financiële haalbaarheid van het SunCycle systeem in Nederland en Jordanië. In WP3 is het effect van inhomogene instraling, inhomogene invalshoek en het inhomogene spectrum op het oppervlak van de III-V cel onderzocht. Het nut van secundaire optica is ook onderzocht. WP4 ontwikkelde en realiseerde een nieuwe celopbouw. Dit bevatte onder andere de cel, het koelblok, de bedrading en leidingen, en de celtoren. Verder zijn verschillende componenten van de module geoptimaliseerd en gewijzigd, onder andere op basis van de operationele ervaring van de veldtest in WP1.

Project resultaten

Veldtest

Op de onderzoekslocatie SolarBEAT, op het terrein van de TU Eindhoven, is vanaf april 2015 tot en met september 2016 de SunCycle module onderzocht. Er zijn verschillende versies van de module onderzocht. Het doel van de veldtest was om de thermische elektrische performance van de SunCycle module te onderzoeken, maar ook om het operationele

functioneren van de module te bestuderen en met deze kennis te verbeteren. Verschillende issues die tijdens de veldtest naar boven kwamen zijn opgelost door veranderingen aan de module of de software.

De SunCycle module concentreert alleen directe zoninstraling. Deze wordt op SolarBEAT gemeten met een pyrhelimeter (DNI), deze wordt nog gecorrigeerd voor de hellingshoek van de module. De module bevat zelf een DC/DC converter die de hoge stroom van de III-V cel en het lage voltage omzet naar een hogere spanning zodat er een set batterijen mee kan worden opgeladen. De opbrengst werd zowel bij de cel, als na de DC/DC conversie gemeten. De SunCycle module was aangesloten op een thermisch circuit, waarbij de ingaande temperatuur ingesteld kan worden.

De resultaten van de veldtest kunnen als volgt samengevat worden:

- De maximaal gemeten elektrische module-efficiëntie van de eerste generatie module was 6.7%. Dit is veel lager dan de stationair met een zonn simulator gemeten cel-efficiëntie van ruim 15%. De verschillen kunnen verklaard worden door optische verliezen in de prisma en spiegel en een lage kwaliteit concentratie door een gebrekkig zonvolgsysteem.
- Bij de tweede generatie zijn een groot aantal verbeteringen doorgevoerd met betrekking tot celontwerp, secundaire optica, plaatsing van componenten etc. Dit leidde tot een veel betere cel-efficiëntie van maximaal 16.3 % voor de tweede generatie. Dit is lager dan de met een zonn simulator gemeten efficiëntie van 19.5 %. In het laatste jaar van het project zijn nog verschillende veranderingen doorgevoerd die de performance verder verbeteren.
- De thermische efficiëntie (zero loss) is rond de 30% voor generatie 1 en 32 % voor generatie 2. Warmteverliezen worden in



Figuur 1 SunCycle module generatie 1 (links) en generatie 2 (rechts)

toekomstige generaties verder beperkt door een betere isolatie.

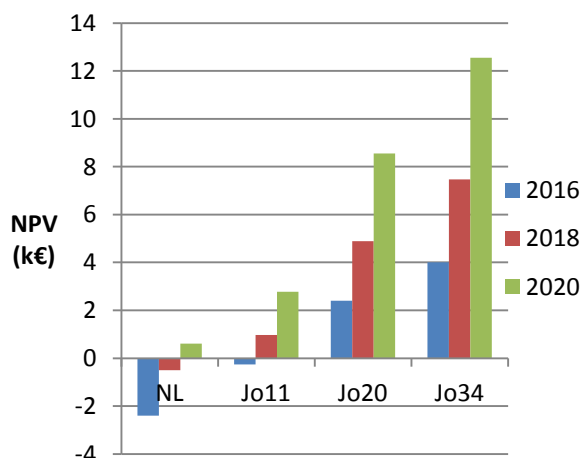
- Er is veel geleerd over het functioneren van de module buiten, daardoor zijn er veel innovaties versneld geïmplementeerd.

Techno-financieel model

Een techno-financieel model is ontwikkeld om te berekenen waar en of het SunCycle systeem van een financieel perspectief succesvol kan zijn. De kernparameters die berekend zijn, zijn de NPV (Netto Contante Waarde) en de LCoE (Levelized Cost of Energy). Omdat het SunCycle systeem zowel warmte als stroom produceert en de prijzen voor een kWh warmte en een kWh stroom veel verschillen, werd de LCoE 'vastgezet' en de LCoH, de Levelized Cost of Heat, berekend.

Er werd een systeem van 20 modules (ca. 4m²), inclusief installatie en overige systeemcomponenten (inverter, opslagtank, pomp) gebruikt als referentie. Voor de opbrengst zijn inschattingen gebruikt op basis van de huidige techniek en de verwachte efficiëntietoename in 2018 en 2020. De scenario's voor efficiëntietoename zijn zeer positief, een verdubbeling van de opbrengst in 2018 en een verdere toename met 35 % in 2020. Deze toename in efficiëntie wordt veroorzaakt doordat de huidige efficiëntie van DC-DC conversie en DC-AC conversie niet zo hoog is (beiden 80%) en door een verwachte toename van de efficiëntie van de module.

In Jordanië geldt momenteel, net zoals in Nederland, een salderingsregeling. De prijs van de elektriciteit is afhankelijk van het verbruik, er zijn drie scenario's meegenomen, €0.11/kWh, 0.203€/kWh en 0.34€/kWh. Omdat in Jordanië ongeveer 3 keer zoveel directe instraling is op een statisch vlak als in Nederland, is de toepassing van het SunCycle systeem daar zeer gunstig. Voor Nederland is dat de komende jaren, met deze aannames, niet zo. De NPV van de verschillende systemen wordt gepresenteerd in Figuur 2.



Figuur 2 NPV voor het SunCycle systeem (20 modules) in Nederland en Jordanië (na 20 jaar)

Karakterisatie van systeemcomponenten

Een gedetailleerde analyse van de optische componenten en de optische effecten op de cel is belangrijk om betere SunCycle modules te maken. In de Applied Materials Science group van de Radboud Universiteit zijn verschillende meetopstellingen gebouwd om de zonnecellen en de optische componenten van de SunCycle module door te meten.

Als licht door een spiegel op een zonnecel wordt geconcentreerd, ontvangen niet alle delen van de cel precies dezelfde hoeveelheden licht. Het midden van de cel ontvangt meer licht dan de randen. Om dit effect te onderzoeken zijn verschillende tests gedaan waarbij de cellen deels beschaduwde werden. Verschillende schaduw patronen zijn hierbij toegepast; rechthoekig, buitenrand, of midden. IV karakteristieken van deze cellen tonen een disproportioneel verlies van de cel performance onder gedeeltelijke beschaduwing aan, welke voornamelijk toe te kennen is aan het verlies van ladingdragers aan de buitenrand van de cellen. De relatief grote cellen (15x15 mm²), die SunCycle gebruikt hebben daarom een voordeel met betrekking tot dit verlies, omdat de verhouding tussen rand en celoppervlak klein is. Verder onderzoek heeft aangetoond dat dit verlies voornamelijk toe te kennen is aan de GaAs subcel in de triple-junction cel, en bovendien dat door Radboud in huis gegroeide diepe junctie GaAs cellen robuuster zijn met betrekking tot dit effect.

Het SunCycle systeem gebruikt een secundair optisch element (SOE) om gereflecteerd licht van de spiegel naar de cel te geleiden en deels te homogeniseren. Vanwege interne reflecties in het SOE is de hoek van inval op het celoppervlak echter niet (zoals gebruikelijk) nagenoeg loodrecht. Daarom is de elektrische performance van de zonnecellen bestudeerd onder verschillende hoeken van invallend licht, waarbij onderscheid is gemaakt tussen licht dat parallel, danwel loodrecht, georiënteerd is ten opzichte van het metalen voorcontact dat bestaat uit unilaterale, parallelle lijnen. Er is gevonden dat optische verliezen in de lichtopname in de cel plaatsvinden als consequentie van dit effect, en dat bovendien de hoekafhankelijke reflectie van licht op het metalen voorcontact de cel performance verder verlaagt. Vergeleken met de verbetering in lichtopname die het gebruik van een SOE met zich meebrengt, is gebleken dat netto de verliezen minder zwaar zijn dan de voordelen. Daarom is het gebruik van een SOE in het SunCycle systeem gunstig voor de elektrische output van het systeem en dus aan te raden.

Ook de reflecties door de primaire, vier-lobbige paraboolspiegel op de secundaire optica zijn onderzocht door met een set parallelle lasers zeer precies kleine oppervlakken van de spiegel te

belichten en te bepalen waar de reflectie optreedt. Uit deze analyse is gebleken dat de beste spiegelprestatie in het midden van de lobben voorkomt. Verder naar de randen van de spiegel treden reflecties willekeuriger op (verstrooiing) en raken de stralen het SOE verder van het midden. Bovendien is vastgesteld dat de buitenranden van de spiegel het gereflecteerde licht naast en niet in het SOE sturen en daarom niet bijdragen aan de systeem performance. De verstrooiing kon worden gerelateerd aan zones die niet perfect glad zijn in de mal waarmee de spiegel wordt geproduceerd. De imperfecties in de vorm van de spiegel zijn te relateren aan de toegepaste procescondities tijdens productie. In een EU-vervolg project zullen deze condities zodanig worden geoptimaliseerd dat het gehele spiegel oppervlak bijdraagt aan de systeem performance.

Ontwikkeling van de celopbouw

Aan het begin van het project was er een prototype waarbij het functioneren van de roterende spiegel en de prisma was aangetoond. De originele celopbouw van zonnecel, bevatte de zonnecel, het koelblok, elektronica, maar geen secundaire optica. De module bevatte twee cellen.

De nieuwe celtoren met een cel, koelblok, bedrading en secundaire optica, functioneert veel beter, maar kan ook veel sneller gemonteerd worden.

Project conclusies

De belangrijkste conclusies zijn als volgt:

- Verschillende versies van de SunCycle module zijn buiten op de SolarBEAT onderzoekslocatie geïnstalleerd en de meetresultaten geanalyseerd. Tijdens het

meten van de tweede generatie SunCycle module is een elektrische cel-efficiëntie tot 16.3% gemeten. Er is veel kennis opgedaan over het functioneren van de module en op basis daarvan zijn veel verbeteringen aan de module doorgevoerd.

- Er is een techno-financiële analyse uitgevoerd voor een SunCycle HCPVT systeem met 20 modules, inclusief de overige systeemcomponenten. De analyse is uitgevoerd voor Jordanië en Nederland, met de verwachte opbrengsten voor 2016, 2018 en 2020. In Jordanië leidt dit tot een zeer positief resultaat. Voor Nederland, met drie keer minder directe zoninstraling dan Jordanië, nog niet.
- De effecten van inhomogene belichting van de zonnecel door het concentreren van het licht zijn bestudeerd, als ook de effecten van inhomogene invalshoeken door de secundaire optica, en de kwaliteit van reflecties door de spiegel.
- Er is een compleet nieuw ontwerp voor de celopbouw. Deze bevat de zonnecel, secundaire optica, een koelblok en elektrische bedrading en thermische leidingen. Ook de celtoren is herontworpen.
- Tijdens dit project zijn veel stappen gemaakt voor de verdere ontwikkeling van de SunCycle module. Ook zijn veel opstartproblemen opgelost. Dit heeft geleid tot een betere startpositie voor de grootschalige productie van modules.

Dankwoord

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, voor het TKI Solar Energy uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland..