

ZONNEPANELEN OP ZEE

DRIJVENDE ENERGIEBRON VAN DE TOEKOMST

In dit artikel gaan we in op drijvende fotovoltaïsche zonne-energiesystemen, met name op zee. We bespreken diverse projecten wereldwijd en gaan vervolgens in op een drijvend systeem in de Noordzee. Daarbij laten we de invloed van golven en temperatuur zien op de energieopbrengst van zonnepanelen.

Om de doelstellingen voor het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen te bereiken, moet massaal worden ingezet op technologieën voor het oogsten van hernieuwbare energie, zoals zonne- en windenergie. De hoeveelheid geïnstalleerd vermogen aan fotovoltaïsche (*photovoltaic*, PV) systemen is het afgelopen decennium aanzienlijk toegenomen tot eind 2019 een wereldwijd totaal van 750 GW. De bijdrage van PV aan de wereldwijde elektriciteitsvoorziening is nu zo'n 3% en dit zal naar verwachting toenemen tot 22% in 2025, met een potentieel tot 70% (40.000 TWh) in 2050 [1]. De ontwikkeling van PV-installaties op grote schaal wordt echter beperkt door (i) de kosten en beschikbaarheid van land, (ii) vermindering van de efficiëntie bij hoge bedrijfstemperatuur van de PV-cellen en ook (iii) milieueffecten, waaronder een potentiële bedreiging van biodiversiteit. Deze beperkingen zijn een sterke motivatie voor de introductie van zowel PV geïntegreerd in/op/aan gebouwen, als drijvende PV-systemen (*floating PV*, FPV) op het oppervlak van binnenwater en zee (*offshore floating PV*, OFPV). In dit artikel richten we ons op OFPV-systemen en de uitdagingen die daarbij komen kijken.

PV op zee

Drijvende PV-systemen zijn interessant omdat de installatie ervan in de eerste plaats landoppervlakte bespaart, dat daardoor beschikbaar blijft voor gebruik ten behoeve van bijvoorbeeld landbouw of natuur. Daarnaast heeft (zee)water een verkoelend effect, evenals hogere windsnelheden buitengaats op de panelen (zie verderop in het artikel), met als gevolg een hogere efficiëntie. Voorts, het installatiepotentieel is zeer groot omdat 71% van het aardoppervlak uit water bestaat en omdat meer dan de helft van de wereldbevolking binnen honderd kilometer van een zee-kust woont. Daarnaast zou de opgewekte energie uit OFPV-systemen een goede elektriciteitsvoorziening kunnen zijn voor olie- en gasplatforms in zee, maar ook voor schepen. Met dit laatste alleen al zou 3% van de wereldwijde broeikasgasemissies kunnen worden bespaard [2].

Uit een vergelijkend onderzoek met gerealiseerde FPV-systemen die tussen 2007

en 2013 zijn gebouwd [3] komen twee zaken naar voren: (i) er treedt vermindering op van de verdamping van water uit het drinkwaterreservoir of meer waarop deze systemen zich bevinden en (ii) er treedt verminderde algengroei op. Deze analyse concludeerde verder dat er zeven verschillende aspecten kunnen worden aangeven of een FPV-systeem optimaal is ontworpen: modulariteit, flexibiliteit, robuustheid, veiligheid, grootte van de optimale ondersteuningsstructuur, eenvoud van installatie en minimalisering van de uiteindelijke kosten.

Een van de FPV-projecten die goed scoort op alle bovengenoemde aspecten, is het SERIS-project (Solar Energy Research Institute of Singapore) in Tengeh, Singapore [4]. In een vergelijking tussen het FPV-systeem van dit project en een vergelijkbaar dak-gemonteerd PV-systeem in Singapore werd geconcludeerd dat de temperatuur van het OFPV-systeem over het algemeen vijf tot tien graden Celsius lager is dan dat van het dak-PV-systeem. Als gevolg hiervan ligt de prestatieverhouding van een OFPV-systeem ongeveer 10% boven dat van een dak-PV-systeem in Singapore. Dat wil zeggen dat het OFPV-systeem 10% meer energie opwekt dan het dak-PV-systeem.

In een ander onderzoeksproject is een FPV-systeem ontwikkeld, genaamd *floating, tracking, cooling, concentrating*-systeem (FTCC-systeem). Deze is op twee locaties getest: de ene in Livorno en de andere op een locatie in de buurt van Pisa, beide in Italië [5]. De onderzoekers maakten een ontwerp om de panelen te koelen met water, wat de efficiëntie met 15% verhoogde. De conclusie was dat hun specifieke FPV-systeem jaarlijks bijna 30% meer energie oplevert dan een vergelijkbaar PV-systeem op land.

Een natuurlijk koelsysteem of waterkoeling spelen een belangrijke rol in de prestaties van een FPV-systeem. Dat moge duidelijk zijn. Onderzoekers hebben ook zonnepanelen ondergedompeld om het effect van koeling nader te bestuderen. Als panelen vier centimeter onder het wateroppervlak zijn geplaatst leveren ze meer energie dan eenzelfde paneel op het land. Maar als de panelen veertig centimeter diep zijn geplaatst wordt er aanzienlijk minder energie opgewekt omdat de waterkolom het zonlicht sterk absorbeert.



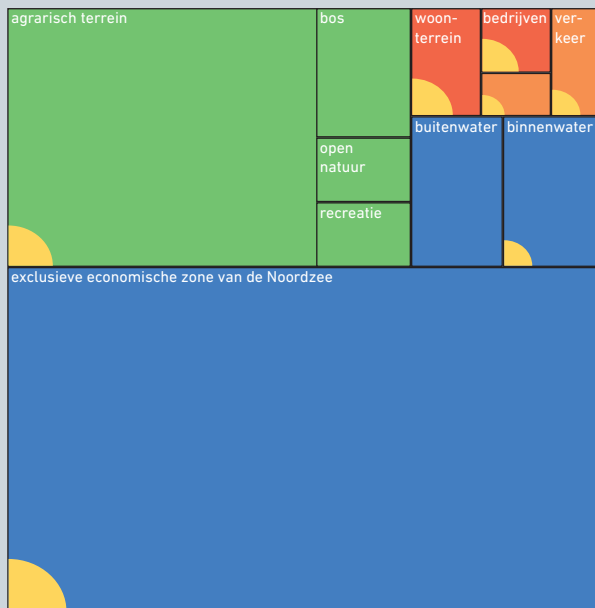
Sara Golroodbari onderzoekt fotovoltaïsche zonne-energiesystemen aan de UU. Ze heeft een achtergrond in de elektrotechniek en ongeveer zeven jaar ervaring in het modelleren en ontwerpen van PV-systemen. s.z.-mirbagherigolroodbari@uu.nl



Wilfried van Sark is hoogleraar Integratie van fotovoltaïsche zonne-energie aan het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling van de UU. Hij is experimenteel fysisch en heeft meer dan 35 jaar ervaring op het gebied van fotovoltaïsche zonne-energie, van cel tot systeem.

PV IN NEDERLAND?

In veel landen, ook in het dichtbevolkte Nederland, heeft land veel verschillende gebruiksdoelen, zoals landbouw, bewoning, industrie en infrastructuur. Dit vraagt om beleid dat de verschillende wensen om ruimte tegen elkaar afweegt. Voor een substantiële bijdrage van zonne-energie aan de Nederlandse energietransitie is veel oppervlakte nodig (enige honderden vierkante kilometer). De *Roadmap PV Systemen en Toepassingen* [8] heeft het aandeel beschikbare ruimte en de geïmplementeerde verhouding daarvan in kaart gebracht, zie figuur 1. Tabel 1 geeft een vergelijking in geïnstalleerd vermogen voor PV-parken op land en op water in Nederland. De vergelijking is gemaakt tussen de gegevens van het jaar 2017 en de verwachte capaciteit in het jaar 2050.



Figuur 1. Potentieel gebruik van bodem en wateroppervlak voor zonne-energie in Nederland in 2050 (het geel gemarkeerde deel is een indicatie van het voor PV te gebruiken areaal).

	2017	2030	2050
PV-parken op land	0,1	25	90
drijven PV-parken	0,0	9	69

Tabel 1. (Verwacht) vermogen in GW van PV-parken op land en op water in Nederland.

Er moet een optimum gevonden worden. Dit leidt tot een ontwerp voor een OFPV-paneel dat op zee drijft, maar soms wordt overspoeld door golven.

Zon op de Noordzee

Ook in Nederland staan we niet stil. In samenwerking met de Katwijkse start-up Oceans of Energy ontwikkelen we een OFPV-systeem dat voor de kust

van Zeeland zal worden getest. Om de verwachte energieopbrengst te kunnen bepalen hebben we een simulatiemodel ontwikkeld [6]. Deze is gebaseerd op bestaande PV-modellen, maar daarbij houden we ook rekening met het feit dat een drijvend PV-systeem beweegt zodat de hoek van invalende zonne-instraling en daarmee de energieopbrengst continu varieert. Een

PV-systeem op land wordt gekenmerkt door een vaste hoek waaronder het zonnepaneel bijvoorbeeld naar het zuiden is gericht. Voor een OFPV-systeem kunnen we de dynamische variatie van deze hoek uitrekenen op basis van golfkarakteristieken en hoe die wordt beïnvloed door windsnelheid. Daartoe is een golfspectrumanalyse nodig, waarbij we dankbaar gebruikmaken van het JONSWAP-spectrum (Joint North Sea Wave Project) [7]. Hierbij wordt de hoogte $S(\omega)$ van golven op open zee beschreven als, met r en ω_p als gegeven:

$$S(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^2} \exp \left[-5/4 \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^r$$

$$r = \exp \left[-1/2 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2 \right]$$

$$\alpha = 5,061 \left(\frac{\omega_p}{2\pi} \right)^4 H_s [1 - 0,287 \log \gamma]$$

waarin ω_p de hoekfrequentie van de piek in het golfspectrum is, ω de hoekfrequentie, γ een vergrotingsfactor, H_s de significante golffrequentie en g de gravitatieconstante. De factor $\gamma = 0,07$ voor $\omega < \omega_p$ en $\gamma = 0,09$ voor $\omega > \omega_p$. Figuur 2 geeft aan hoe een golf verloop leidt tot een veranderende kantelhoek van het drijvend PV-systeem, via simpele klassieke mechanica. We beschouwen hierbij een drijvend ponton met een aantal PV-panelen daarop vlak bevestigd.

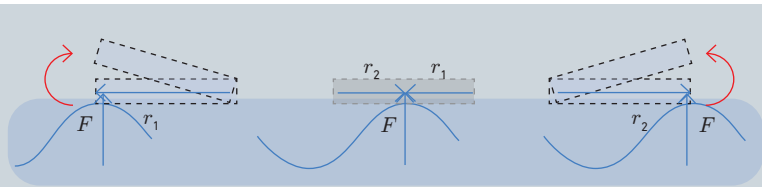
Energieopwekking

Met gegevens over windsnelheden voor het jaar 2016 hebben we de kantelhoek uitgerekend. Figuur 3 geeft de maandelijks gemiddelde kantelhoek en windsnelheid weer. De gemiddelde kantelhoek laat meer variatie zien tijdens het winterseizoen wanneer de instraling veel lager is dan andere tijden van de jaar. De grafiek toont dat de kantelhoek dezelfde trend volgt als de windsnelheid. Voor het berekenen van de temperatuur van de PV-systemen voor analyse van energieopwekking moet naast de luchttemperatuur ook de windsnelheid en luchtvochtigheid meegenomen worden. Met warmteoverdrachttheorie vinden we zo een schijnbare tempera-

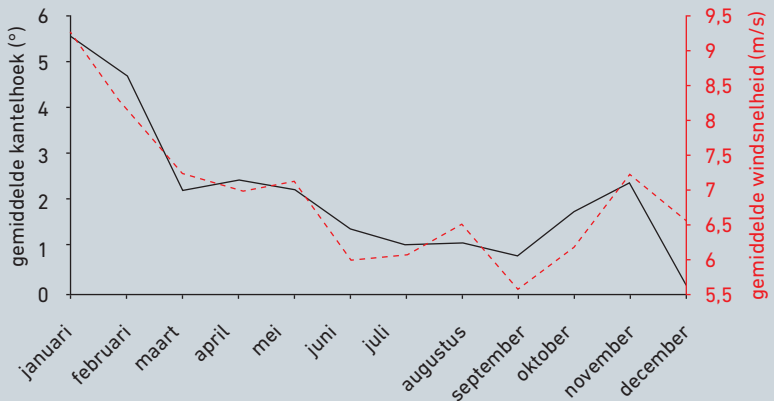
tuur voor de panelen en zonnecellen in het paneel, waarmee het rendement correct kan worden uitgerekend. Het resultaat is te zien in figuur 4. Dit toont de hoeveelheid maandelijks opgewekte energie in kWh per kWp geïnstalleerd voor het jaar 2016 op de linker- en rechteras, en op de rechteras wordt het relatieve verschil tussen de opgewekte energie van twee systemen op zee en op land weergegeven, $([E_{\text{OPPV}} - E_{\text{LBPV}}] / E_{\text{LBPV}})$. Het is duidelijk te zien dat het OPFV-systeem in alle maanden beter presteert in vergelijking tot het landsysteem. De hoogste verschillen zijn te zien in juli, februari en maart waarin de energieopbrengst van het OPFV-systeem tot bijna 20% hoger is dan de energieopbrengst van het landsysteem. Op jaarbasis wekt het OPFV-systeem 1346 kWh/kWp op en dat is 13% meer dan het landsysteem (1192 kWh/kWp). Echter, de zonneinstraling verschilt op beide locaties. Figuur 4 laat dat ook zien. Op zee is de zonneinstraling 8,5% hoger dan op land. Als daarvoor wordt gecorrigeerd, is het relatieve verschil zo'n 4% in het voordeel van het OPFV-systeem. Dit resultaat is lager dan meestal in de literatuur wordt gerapporteerd [4]. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een lagere omgevingstemperatuur in ons land in vergelijking met die in tropische gebieden. Dit zijn we nu aan het uitzoeken.

Conclusie

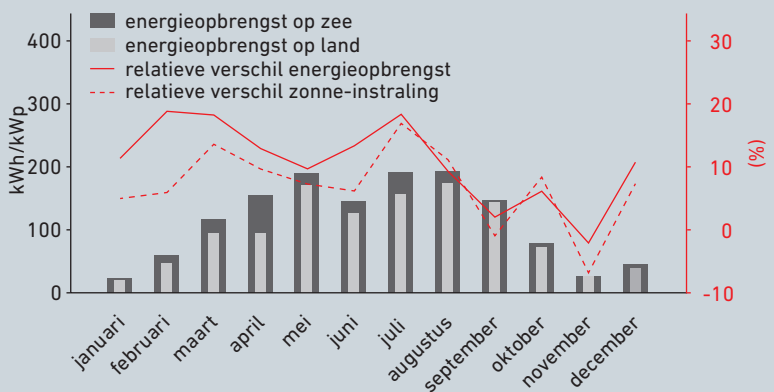
Zonnepanelen op zee bieden een enorme kans om duurzaam energie op te wekken vanwege enerzijds het verkoelende effect van zee op de panelen maar belangrijker vanwege het enorme potentieel. Dit potentieel kan goed worden benut door zonnepanelen te laten drijven in de open ruimte tussen windturbines in de al geplande offshorewindparken op de Noordzee. Onze simulaties laten zien dat de energieopbrengst van een drijvend PV-systeem op zee hoger is dan eenzelfde systeem op land, als gevolg van lagere temperaturen en in veel mindere mate als gevolg van hoekvariaties: een systeem op zee levert gemiddeld 13% meer energie op dan een systeem op land.



Figuur 2. Kracht en straal voor verschillende posities van het ponton met zonnepanelen wanneer een golf zich beweegt onder het ponton door.



Figuur 3. Gemiddelde kantelhoek voor het OPFV-systeem en de gemiddelde windsnelheid voor het jaar 2016.



Figuur 4. Op de linker- en rechteras staat de genormaliseerde energieopbrengst uit twee verschillende systemen. Op de rechteras staat het relatieve outputverschil van twee systemen.

REFERENTIES

1. Arnulf Jäger-Waldau, Snapshot of Photovoltaics—February 2020, *Energies* **13**, 930 (2020).
2. Z. Wang et al., A review of marine renewable energy storage, *International Journal of Energy Research* **43**, 6108-6150 (2019).
3. K. Trapani en M. Redó Santafé, A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **23**, 524-532 (2015).
4. H. Liu et al., Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **26**, 957-967 (2018).
5. R. Cazzaniga et al., Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems, *Proceedings 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 514-519 (2012).
6. S. Z. Golroodbari en W. van Sark, Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems, *Progress in Photovoltaics* **28**, 873-886 (2020).
7. Y. Yu et al., Parameter identification of JONSWAP spectrum acquired by airborne LIDAR, *Journal of Ocean University of China* **16**, 998-1002 (2017).
8. W. Folkers et al., Roadmap PV Systemen en Toepassingen (2017), www.uu.nl/sites/default/files/roadmap-pv-systemen-en-toepassingen-final.pdf.