



## Getijdenenergie veelbelovend voor het Britse energienetwerk

LOTTE KONINGS

Onze moderne samenleving is volledig afhankelijk van elektronische apparatuur voor systemen zo divers als wereldwijde communicatie, verkeersregeling en het opwarmen van huizen en kantoren. Om dit draaiende te houden is een betrouwbare elektriciteitsvoorziening in de toekomst essentieel, maar of we dat kunnen bewerkstelligen is nog niet zeker. Stroom zal moeten komen uit schone energiebronnen, maar technologieën voor het efficiënt beschikbaar maken en opslaan van energie hebben nog een lange weg te gaan. Niet alleen moeten wind, zon en water als bronnen beter benut worden, ook laten de mogelijkheden om stroom op te slaan in stuwmeren of batterijen voor gebruik op een later moment te wensen over.

Stroomopwekking met behulp van getijden kan uitkomst bieden. Het werkt als volgt: terwijl het vloed wordt staan de sluisen van een reservoir aan de kust open en

vult het reservoir zich met zeewater. Wanneer kort na vloed de sluisen gesloten worden en het waterniveau buiten het reservoir daalt, ontstaat er een hoogteverschil in de waterniveaus. Nu kan er water door turbines naar buiten stromen en stroom opwekken (zie figuur 1). Daarnaast kan er extra water het reservoir in worden gepompt, wanneer het verschil tussen de waterniveaus binnen en buiten het reservoir klein is. Dat levert later in de eb-vloed cyclus, wanneer het hoogteverschil is toegenomen, meer energie op dan nodig was voor het pompen.

Het opgewekte vermogen (energie per tijdseenheid) wordt als volgt berekend: (1)

$$P = g \cdot \rho \cdot \eta \cdot V \cdot h \quad (1)$$

Waar  $g$  de gravitatiekracht ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $\rho$  de dichtheid van de vloeistof ( $1025 \text{ kg/m}^3$  voor zeewater),  $\eta$  de turbine-ef-

ficiëntie,  $V$  het volume water in  $\text{m}^3$  dat door de turbine stroomt en  $h$  het hoogteverschil van de waterniveaus in meters. Moderne grote waterturbines hebben een efficiëntie tot 90%.

Getijden hebben drie grote voordelen ten opzichte van andere schone energiebronnen. Allereerst zijn de getijden zelf – de momenten van eb en vloed en de hoogte van het kustwater – maanden en zelfs jaren vooruit zeer precies te voorspellen. Ten tweede kunnen getijdencentrales gebruikt worden voor zeer efficiënte energieopslag. Bovendien is het mogelijk om de hoeveelheid stroom die opgewekt wordt te plannen (Greenberg, 1987). Wind- en zonne-energie zijn alleen beschikbaar wanneer de wind waait of de zon schijnt. Een reservoir dat tot hoogwaterniveau is volgelopen kan je gedurende de uren rond laagwater leeg laten lopen op de momenten waarop de energiebehoefte het hoogst is. Dit laatste kenmerk maakt getijdenstroom zeer aantrekkelijk, zeker nu pompen en turbines steeds efficiënter worden gemaakt. Het vormt echter ook een complicatie voor het bouwen van een model van het energienetwerk.

### Model

Beslissingen over de bouw en het gebruik van een energienetwerk worden ondersteund met een energieplanningsmodel. Die beslissingen gaan zowel over welke en hoeveel energiecentrales gebouwd moeten worden als over hoeveel energie elke centrale op elk moment in de geplande periode moet leveren om samen te allen tijde aan de vraag te voldoen. Dit zijn vaak geheeltallige lineaire modellen, waarin de tijd is gediscretiseerd in halve uren

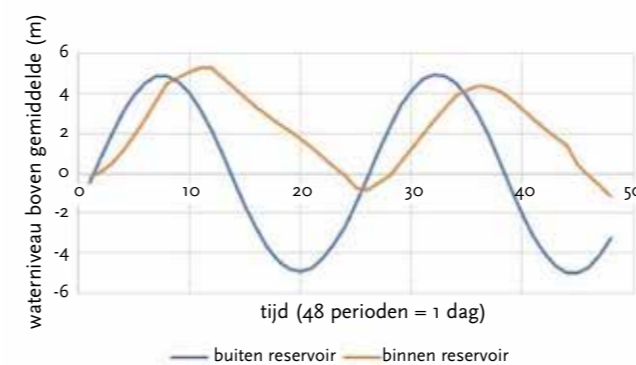
en het energienetwerk (de centrales, de eindgebruikers en elektriciteitskabels die hen verbinden) wordt weergegeven als versimpelde graaf. Historische data geeft in het model het grillige karakter van onzekere factoren zoals de vraag naar energie en de elektriciteitsproductie van groene energiebronnen weer.

Het doel is om de kosten van het netwerk te minimaliseren terwijl er wel altijd aan de vraag voldaan wordt. Het model helpt om inzichtelijk te maken hoe dat gedaan kan worden, en wat de effecten zijn van bijvoorbeeld het beperken van de hoeveelheid  $\text{CO}_2$  die geproduceerd mag worden, of het toevoegen van een nieuw type elektriciteitscentrale. Bij getijdenstroom zijn we in de context van het volledige Britse energienetwerk niet geïnteresseerd in het maximaliseren van de elektriciteitsproductie, maar in het maximaliseren van de kostenreductie die het toevoegen van de getijdencentrale teweeg brengt. Als de getijdencentrale stroom oplevert wanneer daar vraag naar is, kan bijvoorbeeld een kolen- of gascentrale minder produceren en is de toegevoegde waarde groot. Wanneer echter de getijdencentrale stroom opwekt terwijl er nauwelijks vraag is (midden in de nacht) dan is de toegevoegde waarde klein.

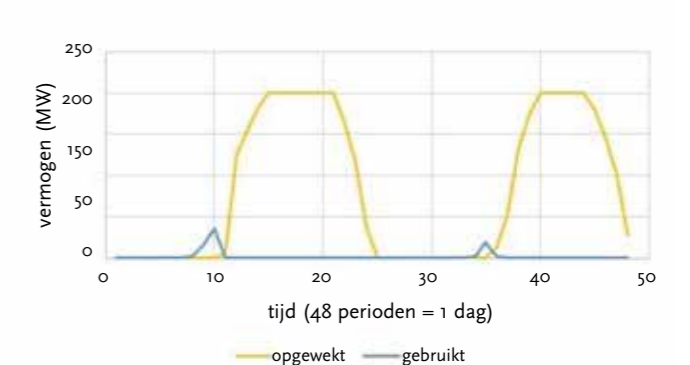
### Eenvoud versus complexiteit

De voorwaarden die standaard aan dergelijke energieplanningsmodellen meegegeven worden zijn voor een groot deel lineair (als er een 500MW gascentrale is gebouwd kan die niet meer dan 500MW elektriciteit leveren) of ze zijn tot lineaire voorwaarden te versimpelen zonder dat het model te veel aan waarde verliest. Bij het

WATERNIVEAUS BINNEN EN BUITEN HET RESERVOIR



OPGEWEKT EN GEBRUIKT VERMOGEN



Figuur 1. Waterniveau binnen en buiten een reservoir (links) en de corresponderende vermogensproductie door turbines of gebruik door pompen (rechts) gedurende één dag. Een weergave van het dagelijkse patroon van energiewinning uit een reservoir bij een geïnstalleerd vermogen van 200MW. Dit is een realistisch vermogen voor een reservoir in de monding van de Severn bij Wales.

bouwen van modellen moet altijd een afweging worden gemaakt tussen zoveel eenvoudig als mogelijk en zoveel complexiteit als nodig (DeCarolis, 2017).

De formule die energieopwekking uit getijden beschrijft is bi-lineair. In formule 1 zijn namelijk zowel het volume als het hoogteverschil beslissingsvariabelen. We kunnen kiezen hoe ver we de sluizen openzetten en wanneer. We kunnen deze nonlineariteit op twee manieren aanpakken: óf we kiezen voor eenvoud en lineariseren de elektriciteitsproductie door het volume of het hoogteverschil een constante waarde te geven, óf we kiezen voor complexiteit en bouwen een niet-lineair model.

Als we een van de beslissingsvariabelen een constante waarde geven en voor een lineaire aanpak kiezen, krijgen we een snel oplosbaar model, maar beperken we de elektriciteitsproductie door getijdencentrales tot een suboptimaal patroon. We beperken daarmee de mogelijkheid om in te spelen op veranderende vraag naar elektriciteit. Wel blijven de getijden en daarmee de energie-opbrengst perfect te voorspellen, waarmee het toch een streepje voor heeft op zon en wind. Een voordeel van een lineair model is dat er algoritmes bekend zijn die snel een oplossing vinden en dat je zeker weet dat die oplossing ook globaal optimaal is.

Een niet-lineair model geeft veel meer mogelijkheden, maar vereist wel een ingewikkelder aanpak. Wanneer het niet-lineaire deel in het model als geheel wordt opgenomen, maakt dit het hele model zeer traag. Daarom is het interessant om het niet-lineaire deel van het probleem te isoleren (Salam, 1998). Alleen de uitvoerfase van getijdenstroomopwekking is niet-lineair. De planningsfase is lineair, net als de uitvoerfase van de rest van netwerk. Er wordt daarom een lineair planningsprobleem inclusief getijdenstroom, een lineair uitvoerprobleem exclusief getijdenstroom, en een niet-lineair uitvoerprobleem voor getijdenstroom geformuleerd. De lineaire problemen zijn met behulp van de simplexmethode snel en optimaal op te lossen.

De plannings- en uitvoerproblemen worden door middel van een Benders Decompositie gekoppeld (Benders, 1962). De twee uitvoerproblemen worden in een *master-slave* constructie aan elkaar gekoppeld via de lokale marginale prijs (LMP). Deze duale variabelen geven de waarde weer van een extra hoeveelheid vermogen als dat op een zeker tijdstip geproduceerd zou worden (Gunn, 1992). Wanneer er veel vraag is en goedkope generatoren al op volle capaciteit draaien zou het heel duur zijn om aan extra vraag te moeten voldoen en is de LMP hoog. Omgekeerd is de LMP laag als er volop wind- of zonne-energie is en de vraag laag is. Het niet-lineaire uit-

voerprobleem maximaliseert de waarde van de getijdenstroom en wordt opgelost met behulp van de inwendige punt methode.

Een laatste truc om de snelheid van de probleemoplossing te verbeteren wordt geleverd door het niet-lineaire probleem een goede startoplossing mee te geven. Anders dan bij lineaire problemen, kan er bij een niet-lineair probleem een oplossing gevonden worden die wel lokaal optimaal is, maar niet globaal optimaal. Het is daarom van groot belang om een startwaarde te hebben in de buurt van de globale oplossing (Catalao, 2012). Hiermee kan een globale oplossing nog steeds niet worden gegarandeerd, maar wordt die wel waarschijnlijker. Ook neemt de oplossingstijd af. De startoplossing wordt gevonden door het niet-lineaire probleem te discretiseren met een achterwaartse dynamisch programmering op te lossen. Deze methode werkt altijd snel en vindt een globale oplossing van de discretisatie.

## Resultaten

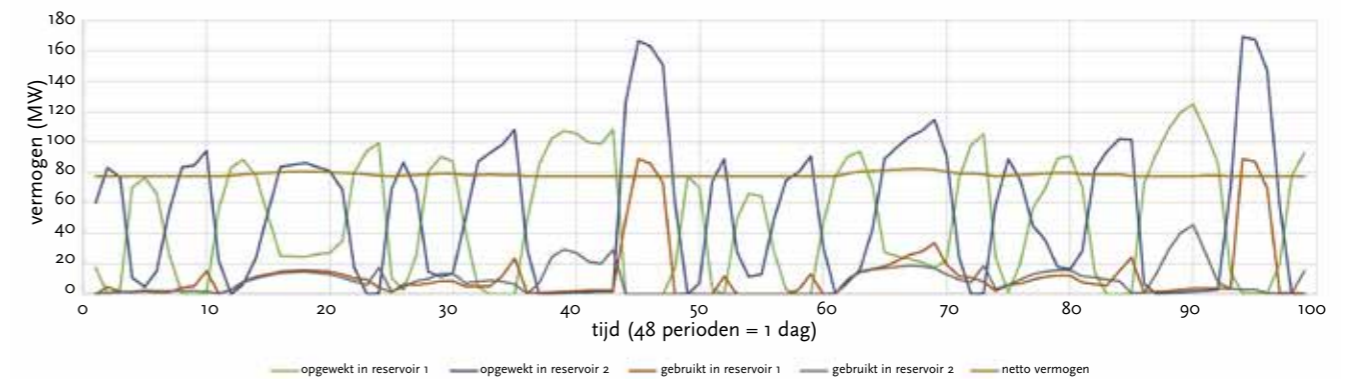
Met bovenstaande technieken is een model gebouwd voor een getijdencentrale in de Severn Estuary, aan de zuidgrens van Wales in Groot-Brittannië (Dixon, 2017). Hier lopen de verschillen tussen laag- en hoogwater tijdens springtij op tot 12 meter en hebben Britse en lokale overheden plannen om op korte termijn een getijdencentrale te bouwen.

Twee eigenschappen waarop de methoden (lineaire en niet-lineaire aanpak) vergeleken worden, zijn de maximale bezettingsgraad die de getijdencentrale onder dezelfde externe omstandigheden behaalt en de tijd die nodig is om een oplossing te vinden.

In een run van een spring- en doottij cyclus haalde het gelineariseerde model een bezettingsgraad van hoogstens 18%: dat was wanneer het hoogteverschil vooraf was vastgesteld. Deze techniek is duidelijk suboptimaal: het niet-lineaire uitvoeringsmodel schroefde de bezettingsgraad op tot boven 30%. Met die bezettingsgraad en uitgaande van huidige kostenprojecties zou getijdenstroom nu al concurreren met windenergie, en wanneer CO<sub>2</sub>-belastingen toenemen, ook met conventionele energiebronnen.

Het kost het gelineariseerde model enkele seconden om een planningsprobleem met een looptijd van een maand op te lossen. De gekoppelde lineaire en niet-lineaire problemen hebben grofweg 2000 Benders-iteraties nodig om tot een oplossing te convergeren, zelfs wanneer stabiliserende mechanismen worden ingezet.

## OPGEWEKT, GEBRUIKT EN NETTO VERMOGEN



Figuur 2. Vaste minimumcapaciteit. Elektriciteitsproductie en -gebruik (voor pompen) van vermogen door twee getijdencentrales in hetzelfde kustgebied. De minimale gezamenlijke netto productie wordt gemaximaliseerd. De twee dagen uit deze run vinden plaats tijdens springtij en de maximale bezettingsgraad van individueel opererende getijdencentrales ligt rond de 50%.

Elke iteratie kost bovendien zo'n vijf seconden, waarvan de meeste tijd gaat zitten in het niet-lineaire probleem. Versnelling met behulp van betere stabilisatie-technieken of versimpeling van het model zijn dan ook nodig voor dit energieplanningsmodel effectief kan worden gebruikt.

Het niet-lineaire model kan echter al wel gebruikt worden om de flexibiliteit van getijdenstroom te illustreren. Zo is het mogelijk om met twee reservoirs een vast vermogen over de hele dag te garanderen. Dit is niet mogelijk met wind- of zonne-energie. De twee naast elkaar geplaatste reservoirs zijn beide uitgerust met turbines die zowel tijdens het volstromen als leegstromen elektriciteit kunnen opwekken en maken handig gebruik van pompen om de reservoirs nog extra bij te vullen voordat ze weer leeg lopen. Ze volgen elk een ander operationeel patroon en wekken samen te allen tijde stroom op, zie ook figuur 2. De bezettingsgraad van de twee reservoirs is lager dan wanneer ze los van elkaar hun productie zouden maximaliseren, maar dit voorbeeld toont aan dat getijdenstroom een betrouwbare bron van energie kan vormen en zeker meer onderzoek en investering waard is.

In Nederland zijn de toepassingen van getijdenstroomopwekking beperkt, omdat het hoogteverschil tussen hoog- en laagwater relatief klein is. In La Rance, Frankrijk is een van grootste getijdencentrales met een capaciteit van 240MW al sinds de jaren zestig werkzaam. Ook Japan brengt deze techniek in de praktijk. In Canada loopt een onderzoek naar het benutten van de getijden in de Bay of Fundy. Vergelijkbare technieken worden bovendien toegepast in *run-of-river scheme's* in rivierenstelsels in Zuid-Amerika.

## Conclusie

Energiewinning uit getijden heeft veel potentie: de getijden zelf zijn voorspelbaar, de energie is schoon en de productie deels te plannen. Echter, het modelleren van een getijdencentrale als onderdeel van een groter energienetwerk heeft nog wat complicaties. Het is een mooie uitdaging om een niet-lineair optimaliseringsmodel te creëren dat de mogelijkheden van getijdenstroom volop benut en toch binnen redelijke tijd een oplossing vindt.

## LITERATUUR

- Benders, J.F. (1962). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 4(1), 238–252.
- Catalao, J.P.S., Pousinho, H.M.I., & Contreras, J. (2012). Optimal hydro scheduling and offering strategies considering price uncertainty and risk management. *Energy*, 37, 237–244.
- DeCarolis, J., et al. (2017). Formalising best practise for energy system optimization modelling. *Applied Energy*, 194, 184–198.
- Dixon, A., Watt, T. (2017). Swansea Bay Tidal Lagoon Power Plant; a world first. *Civil Engineering*, 7, 15–20.
- Greenberg, D.A. (1987). Modeling tidal power. *Scientific American*, 257(5), 128–133.
- Gunn, E.A., Rogers, J.S., & Zenetos, P. (1992). An optimization structure for tidal power evaluation. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 30(3), 274–296.
- Salam, S., Nor, K.M., & Hamdan, A.R. (1998). Hydrothermal Scheduling Based Lagrangian Relaxation Approach To Hydrothermal Coordination. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(1), 226–235.

LOTTE KONINGS werkt bij TNO, unit Defensie en Veiligheid, waar ze onderzoek doet naar besluitvorming-ondersteunende methodieken. Ze heeft haar master Operational Research gedaan aan de Universiteit van Edinburgh. Dit artikel is geschreven op basis van haar afstudeerscriptie. Aan de Universiteit Leiden heeft ze de bachelors Wiskunde en Geschiedenis gevolgd (specialisaties in verkiezingen en groeps- en identiteitsvorming). E-mail: lotte.konings@tno.nl