

Een duurzaam én betrouwbaar elektriciteitssysteem Ontontkoombaar en uitdagend

Intreerede

Prof.ir. Mart A.M.M. van der Meijden

10 februari 2012

Omslagfoto:

Borwin 1 offshore converterstation (foto: TenneT)

Een duurzaam én betrouwbaar elektriciteitssysteem Onontkooombaar en uitdagend

Intreerede

Prof.ir. Mart A.M.M. van der Meijden

In verkorte vorm uitgesproken op 10 februari 2012
ter gelegenheid van de aanvaarding van het ambt van hoogleraar
Large Scale Sustainable Power Systems
aan de Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica
van de Technische Universiteit Delft

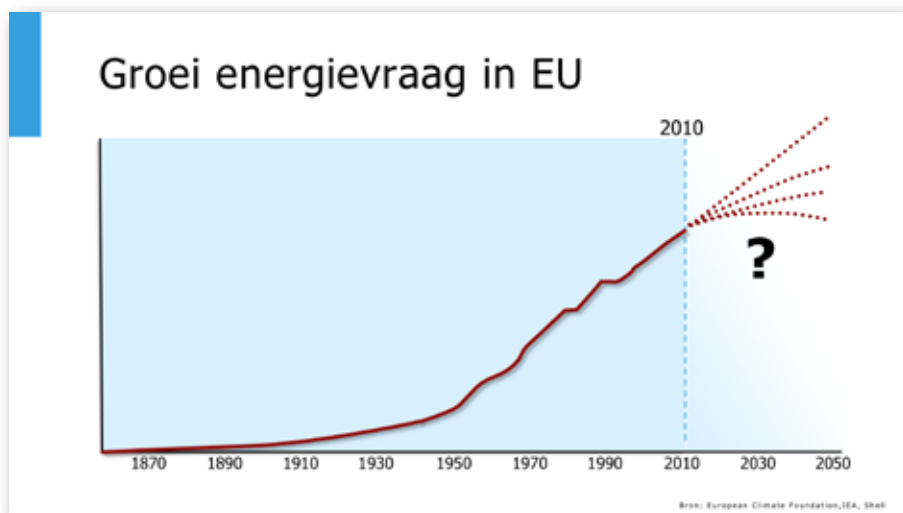
*Mijnheer de Rector Magnificus,
Leden van het College van Bestuur,
Collega Hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap,
Zeer gewaardeerde toehoorders,
Dames en Heren,*

Mijn intrede is een unieke gelegenheid om met u te delen wat het voor onze elektriciteitsnetten betekent als we in de toekomst op grote schaal elektriciteit uit duurzame bronnen opwekken. Ik stel dat we op termijn niet kunnen ontkomen aan het gebruiken van de omvangrijk aanwezige duurzame energiebronnen, zowel lokaal als op grote schaal. Mijn rede gaat over het daarvoor noodzakelijke elektriciteitstransportsysteem van de toekomst en voor welke uitdagingen onze toekomstige ingenieurs staan als we op de lange termijn een duurzaam én betrouwbaar elektriciteitssysteem willen waarborgen.

Is duurzame energie dan niet betrouwbaar vraagt u zichzelf wellicht af. Ik zal daar in deze intrede ruimschoots bij stilstaan en aangeven dat de problematiek uiterst complex is. Een systeem is betrouwbaar als het aan de behoeften van de gebruiker voldoet. Als de mogelijkheden van het systeem afwijken van die behoeften wordt het onbetrouwbaar. Dus om het elektriciteitssysteem betrouwbaar te houden, zijn maatregelen nodig bij de opwekking (verbeter de voorspelbaarheid van het aanbod), het transport (zorg voor flexibiliteit en regelbaarheid) en de afnemers (bevorder energiebewustzijn).

Vraag naar energie groeit

Het energieverbruik in Europa is de laatste 150 jaar sterk gestegen (zie figuur 1) [ECF 2010]. We zien een versnelde groei na de Tweede Wereldoorlog. De eerste energiecrisis 1973 en de tweede energiecrisis in 1979 zijn slechts te zien als een dip.



Figuur 1: Ontwikkeling van de vraag naar energie in Europa

De vraag is: Waar gaat het energieverbruik in Europa in de toekomst naar toe? Wereldwijd groeit het energieverbruik. De 7 miljardste wereldburger is vorig jaar geboren. De verwachting is dat we in 2050 met 9 miljard mensen onze wereldbol bevolken. Op dit moment hebben 1,3 miljard mensen geen beschikking over elektriciteit [IEA 2011a]. In China, India en (hopelijk ook in de toekomst) in Afrika neemt de welvaart toe en gaan steeds meer mensen tot de middenklasse behoren. Dit betekent dat de vraag naar energie sterk toeneemt. De verwachting is dat de energiebehoefte tussen 2010 en 2035 met een derde zal stijgen [IEA 2011b]. Er is zelfs een verwachting dat de energievraag wereldwijd tussen nu en 2050 zal verdubbelen [Shell 2011].

Grenzen aan groei

We weten allen dat grondstoffen en brandstoffen eindig zijn, zelfs als er in de toekomst nog nieuwe ontdekkingen worden gedaan. Uitstoot van vervuiling en broeikasgassen kent zijn grenzen.

Deze boodschappen zijn al diverse malen tot ons gekomen. Ik denk aan de Club van Rome in 1972 met “grenzen aan groei” [Meadows1975], de Commissie Brundtland in 1987 met “Our Common Future” [Brundtland 1987], het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 1988 met “Opwarming aarde gevolg van uitstoot van broeikasgassen” [IPCC 2007] en Al Gore in 2006 met zijn film “Een ongemakkelijke waarheid” (“An inconvenient truth”) [Gore 2006].



Figuur 2 Duurzame ontwikkeling

Duurzame energievoorziening onontkoombaar

De definitie over *duurzame ontwikkeling* van de Commissie Brundtland is voor mij een belangrijke inspiratiebron: “Humanity has the ability to make development sustainable - to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”. *Duurzame ontwikkeling* is dus dé ontwik-

keling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van toekomstige generaties, om in hun eigen behoeften te voorzien, in gevaar te brengen (figuur 2). De definitie geeft voor mij in de kern antwoord op de vraag; Waar gaat het om? Niet alle grondstoffen en brandstoffen van toekomstige generaties opmaken. We hebben in dit fossiele tijdperk geen energietekort. Er is echter wel een overschot aan natuurlijke bronnen waar we vandaag de dag geen gebruik van maken. Het stenen tijdperk is ook niet geëindigd omdat de stenen op waren. Het gaat er dus om, om op een andere wijze met het energievraagstuk om te gaan.

Hoe kunnen we op een verantwoorde wijze met onze energiebehoefte omgaan? Hoe bereiken we de kleinste milieu consequenties? Hoe bereiken we een reductie van CO₂ uitstoot?

Trias Energetica geeft heel kernachtig het antwoord:

1. eerst energie besparen (bijvoorbeeld met warmte isolatie);
2. dan inzet duurzame energiebronnen (bijvoorbeeld zon, wind, biomassa);
3. en waar nodig aanvullen met zuinig en efficiënt gebruik van fossiele bronnen.

Europese ambitie

Een duurzame én betrouwbare energievoorziening houdt niet op bij onze Nederlandse grenzen, maar speelt op Europees niveau. Daarom ben ik verheugd met de lange-termijn zienswijze van de Europese Commissie want deze geeft ons gezamenlijk een langetermijn richting; een punt op de horizon (figuur 3). De Europese Commissie heeft als ambitie een koolstofarme economie in 2050. Dat wil zeggen een reductie van CO₂ uitstoot met 80-95% in 2050 ten opzichte van 1990. Energie besparen en inzet van duurzame energiebronnen spelen daarbij een belangrijke rol.



Figuur 3: Europese lange termijn ambitie

Voordat ik verder inga op de gevolgen van het streven naar een koolstofarme economie wil ik graag een kanttekening plaatsen over toekomstige scenario's.

Trend scenario's

De toekomst van de energievoorziening is moeilijk te voorspellen en vooral als het de langetermijn betreft. Het streven naar een koolstofarme economie, zoals hiervoor genoemd, is een voorbeeld van een doelscenario. Echter er zijn veel ontwikkelingen gaande die elkaar ondersteunen of beconcurreren. Dit is een complex gebeuren op basis waarvan de effecten op de elektriciteitsvoorziening en daarmee samenhangend de behoefte aan elektriciteitstransport en energiediensten moet worden afgeleid. Binnen mijn bedrijf TenneT werken we daarom met verschillende trendscenario's (figuur 4). Trendscenario's zijn geen voorspellingen, maar beschrijvingen van mogelijke toestanden, en zijn een manier om aannames te toetsen. Het is ook een manier om beter voorbereid te zijn op de toekomst.

De scenario's onderscheiden zich naar de richting waarin een ontwikkeling gaat. De eerste vrijheidsgraad (op de verticale as) is milieu, met aan de ene kant de ontwikkeling naar een duurzame samenleving en aan de andere een samenleving die voor de energiehuishouding afhankelijk blijft van fossiele brandstoffen.

De tweede vrijheidsgraad (op de horizontale as) is vaak een combinatie van marktwerking en geografische oriëntatie, met als ene uiterste een volledig vrije mondiale markt en als andere uiterste een sterk gereguleerde respectievelijk regionaal of lokaal georiënteerde markt.



Figuur 4: Lange termijn scenario's

De blokken beschrijven het speelveld waarin mogelijke toekomstige ontwikkelingen zich kunnen afspelen. In Visie2030 [TenneT 2008] is dit verder uitgewerkt. Binnenkort wordt deze methode ook binnen ENTSO-E¹ geïntroduceerd als basis voor langetermijn studies. In welke mate in hoe snel duurzame energie zich zal ontwikkelen is door mij niet te voorspellen. Belangrijker vind ik het om te begrijpen wat deze mogelijke ontwikkeling betekent voor het elektriciteitstransportsysteem. In mijn verdere betoog besteed ik daarom aandacht aan de potentie van duurzame energiebronnen en de invloed op het elektriciteitstransportsysteem. Ik wil nu, ter illustratie, met u inzoomen op twee voorbeelden van omvangrijke duurzame energiebronnen.

De kracht van de zon

Als we een collector in de Sahara plaatsen die idealitair alle thermische zonne-energie opvangt gelijk aan de elektriciteitsvraag voor de gehele wereld, hoe groot is dat oppervlak? Het Duitse centrum voor Lucht- en Ruimtevaart (DLR) heeft berekend dat een oppervlakte van 300 km bij 300 km qua energie^{2,3} voldoende is [DLR 2009]. Just imagine the power of the sun.



Figuur 5: de kracht van de zon (bron: Duitse centrum voor Lucht- en Ruimtevaart)

De kracht van wind

In Europa bestaan vele ambities en plannen voor elektriciteitsopwekking uit wind-energie. Zo denkt European Wind Energy Association (EWEA) dat in 2030 voor EU-27 400.000 MW opgesteld vermogen mogelijk is en voorziet voor 2050 600.000 MW opge-

¹ ENTSO-E is het Europese samenwerkingsverband van 41 Transmission System Operators voor elektriciteit

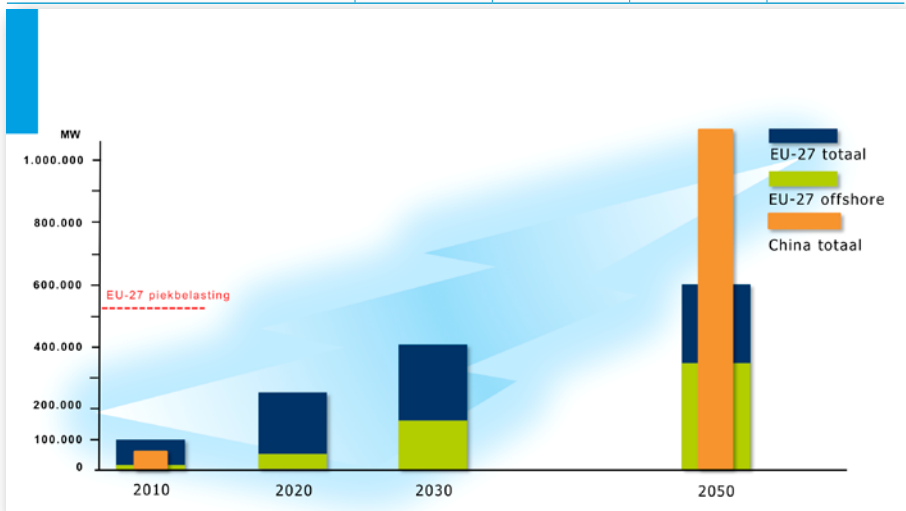
² We spreken hier over energie en er is geen rekening gehouden met de omzetting naar vermogen.

³ De totale installatie inclusief collector beslaat in dit voorbeeld een bruto oppervlakte van 500 km x 500 km.

steld windvermogen. Zie tabel 1. De huidige piek in de Europese elektriciteitsvraag is 521.000 MW [ENTSO-E 2010]. European Wind Energy Association verwacht dat in 2050 50% van de elektriciteitsenergievraag door windenergie kan worden voorzien. Naast wind op land is ook voor een belangrijk deel windvermogen op de Noordzee voorzien: 150.000 MW in 2030 en 350.000 MW in 2050. Ter relativering: China zit ook niet stil. Met ondersteuning van het Internationaal Energie Agentschap (IEA) is voor China een “China Wind Energy Development Roadmap” ontwikkeld waarin een plan voor 1.000.000 MW windvermogen in 2050 is geschetst [IEA 2011b].

Tabel 1: EWEA wind scenario [EWEA 2010], [GEWEC 2011]

	2010	2020	2030	2050
Geïnstalleerde wind capaciteit	84 GW	230 GW	400 GW	600 GW
Waarvan offshore capaciteit	3 GW	40 GW	150 GW	350 GW
Percentage windproductie	4,8%	14%	33%	50% ⁴

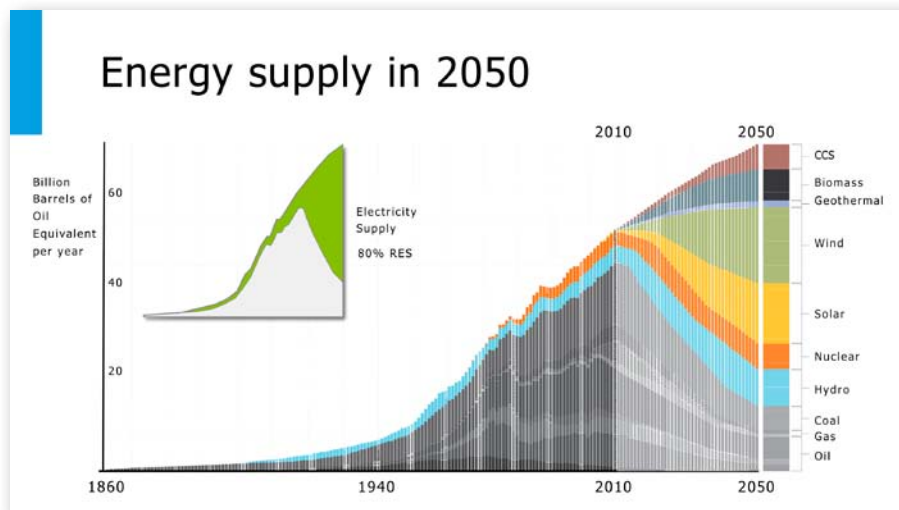


Figuur 6: Ambitieuze ontwikkeling van onshore en offshore windenergie in Europa

De kracht van de verbeelding (Een traject naar 2050)

In 2009 ben ik betrokken geweest bij de ontwikkeling van “Pathway to 2050” van European Climate Foundation (ECF). European Climate Foundation heeft een pad uitgezet naar 2050 waarin ze op verschillende wijze invulling geven aan de ambitie naar een koolstofarme economie van de Europese Commissie (80-95% CO₂ reductie in 2050 t.o.v. 1990). Naast energiebesparing is op verschillende wijze de mate van inzet van duurzame energiebronnen voor elektriciteit (40%, 60%, respectievelijk 80%) bestudeerd.

⁴ EWEA gaat hier voor EU-27 uit van totaal 4000 TWh elektriciteitsconsumptie op basis van een stevige energiebesparing. De elektriciteitsconsumptie in 2010 is 3365 TWh [ENTSO-E 2010].



Figuur 7: "Pathway to 2050" van European Climate Foundation (ECF)

Het rapport concludeert dat op de lange termijn de maatschappelijke kosten van een fossiele economie en een koolstofarme economie in grootte orde op hetzelfde niveau uitkomen [ECF 2010]. De koolstofarme economie kenmerkt zich vooral door de hoge kapitaallasten ten opzichte van de hoge operationele kosten van de fossiele economie. Elektriciteitsopwekking uit wind- en zonne-energie vragen meer investeringen vooraf, vergeleken met kolen- en gascentrales. Maar als de zonnepanelen en de windturbines er eenmaal staan, zijn de operationele kosten behoudens onderhoudskosten verder relatief laag. Wind en zon zijn gratis. Voor kolen- en gascentrales moet voortdurend brandstof worden ingekocht.

Een koolstofarme economie maakt de samenleving onafhankelijker van fossiele bronnen uit politiek instabiele landen, spaart het milieu en leefomgeving, creëert werkgelegenheid en verhoogt het concurrentievermogen op de lange termijn⁵.

Duurzame bronnen in Europa en het noorden van Afrika

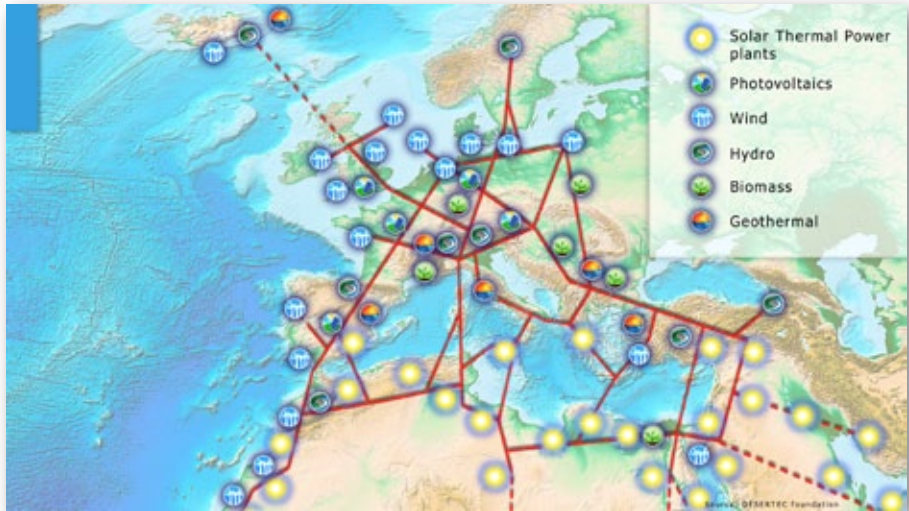
Desertec Foundation presenteerde in 2009 bijgaand plaatje met duurzame bronnen verspreid over Europa en het noorden van Afrika [DLR 2009]. Concentrating Solar-thermal Power⁶ (CSP) in het noorden van Afrika en het zuiden van Europa, (gebouw-

⁵ "The Roadmap 2050 shows that the benefits of the low-carbon transition by far outweigh the challenges and that a commitment now to a systemic low-carbon transformation of the energy sector is ultimately the winning economic strategy for competitiveness, jobs and low-carbon prosperity. Achieving the 80% GHG reductions target in 2050 based on zero carbon power generation in Europe is technically feasible and makes compelling economic sense." [ECF 2010]

⁶ Concentrating Solar-thermal Power (CSP) is een technologie voor het opvangen van zonne-energie in de woestijn. Het gebruikt warmte van de zon om stoomturbines aan te drijven en elektriciteit op te wekken. Deze warmte kan ook in warmteopslag tanks worden bewaard wat betekent dat elektriciteit op verzoek beschikbaar is – zelfs in de nacht.

geïntegreerde) PV panelen in het midden en zuiden van Europa, windenergie in de kustgebieden en op de Noordzee, Ierse zee en Oostzee. Geothermie in Zuid Europa, Waterkracht in Noorwegen, de Alpen, Pyreneeën, en Atlasgebergte.

Biomassa in Midden- en Oost-Europa. De kracht van Europa is de diversiteit van de duurzame energiebronnen met elk hun eigen karakteristieken. In de toekomst zal in het Europees transportnet de richting van de elektriciteitsstromen sterk kunnen wisselen, afhankelijk van het aanbod van duurzame energie. Bijvoorbeeld wind uit de Noordzee of zonne-energie uit Zuid- Europa en het noorden van Afrika.



Figuur 8: Duurzame bronnen in Europa en het noorden van Afrika (bron: Desertec Foundation)

Elektriciteit als dé energiedrager

De vraag naar energie groeit. De vraag naar elektriciteit groeit sneller. Het aandeel van elektriciteit in de totale wereldenergievraag neemt toe. Het Internationaal Energie Agentschap (IEA) becijferde dat het aandeel van elektriciteit van 16% in 2006 toeneemt naar 18% in 2015 (tabel 2). In Nederland was in 2006 het aandeel elektriciteit 14% door het aanwezige gas. Het IEA verwacht dat in haar referentie scenario het aandeel van elektriciteit in de totale wereldenergievraag in 2030 ongeveer 21% zal zijn.

Tabel 2: Mondiale finale energieconsumptie per sector in Mtoe (IEA referentie scenario) [IEA 2008].

	1980	2000	2006	2015	2030	2006-2030 ⁷
Industry	1779	1879	2181	2735	3322	1.8%
Coal	421	405	550	713	838	1.8%
Oil	474	325	329	366	385	0.7%
Gas	422	422	434	508	604	1.4%
Electricity	297	455	560	789	1060	2.7%
Other	165	272	307	359	436	1.5%
Transport	1245	1936	2227	2637	3171	1.5%
Oil	1187	1844	2105	2450	2915	1.4%
Biofuels	2	10	24	74	118	6.8%
Other	57	82	98	113	137	1.4%
Residential, services and agriculture	2006	2635	2937	3310	3918	1.2%
Coal	244	108	114	118	100	-0.5%
Oil	481	462	472	493	560	0.7%
Gas	346	542	592	660	791	1.2%
Electricity	273	613	764	967	1322	2.3%
Other	661	910	995	1073	1144	0.6%
Non-energy use	348	598	740	876	994	1.2%
Total	5378	7048	8086	9560	11405	1.4%

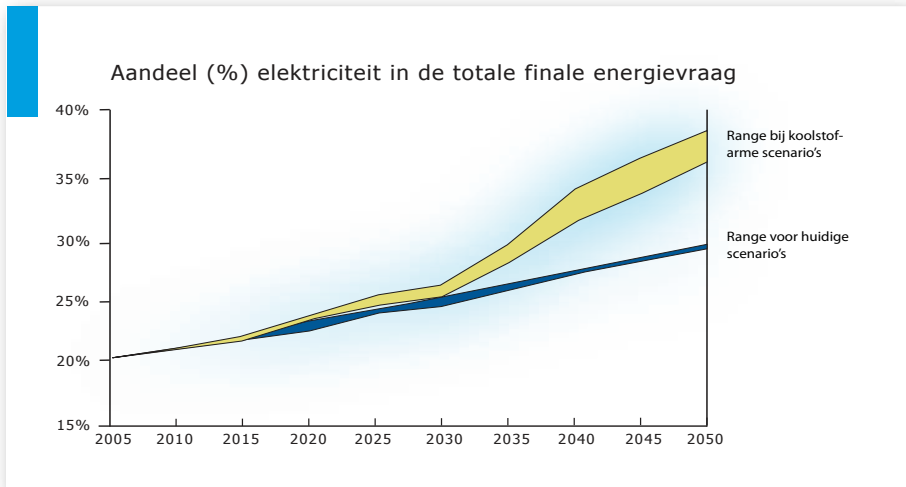
Elektriciteit is wereldwijd een van de snelst groeiende energievormen in het eindgebruik van energie. Ook het streven naar een koolstofarme economie van de Europese Commissie leidt tot meer inzet van elektriciteit in de finale energievraag. De Europese Commissie verwacht in het koolstofarme scenario een groei van het aandeel elektriciteit in de totale finale energievraag naar 36%-39% in 2050⁸ (zie figuur 9) [EC 2011]. Een verdubbeling ten opzichte van vandaag. Hiervoor is een aantal redenen aan te geven. De groei van informatisering leidt tot meer gebruik van nieuwe informatie en communicatie apparaten. Bij een groei van de economie worden steeds meer elektrische apparaten aangeschaft. Energie besparen in verwarmen/koelen van gebouwen leidt in het algemeen tot meer gebruik van elektriciteit. Gasgestookte verwarmingsketels worden bijvoorbeeld vervangen door hoog rendement elektrische warmtepompen (die in de totale keten minder aanslag doen op fossiele brandstoffen). Elektrisch aangedreven personenauto's en lichte vrachtwagens verdringen de traditionele auto's met fossiele brandstoffen. In vervoer leidt op deze wijze energie besparen tot meer gebruik van elektriciteit. Ook efficiencyverhogingen van industriële processen leiden tot meer (efficiënte) elektriciteitstoepassingen.

⁷ Average annual rate of growth

⁸ De Europese Commissie voorziet in de huidige trend scenario's al een aandeel elektriciteit van 29% in de totale finale energievraag in 2050.

Bij de energieopwekking is een groot aantal duurzame bronnen het meest efficiënt te ontsluiten in de vorm van elektriciteit.

Figuur 9: Aandeel van elektriciteit in Europa bij de huidige trend en in de koolstofarme scenario's [EC 2011]



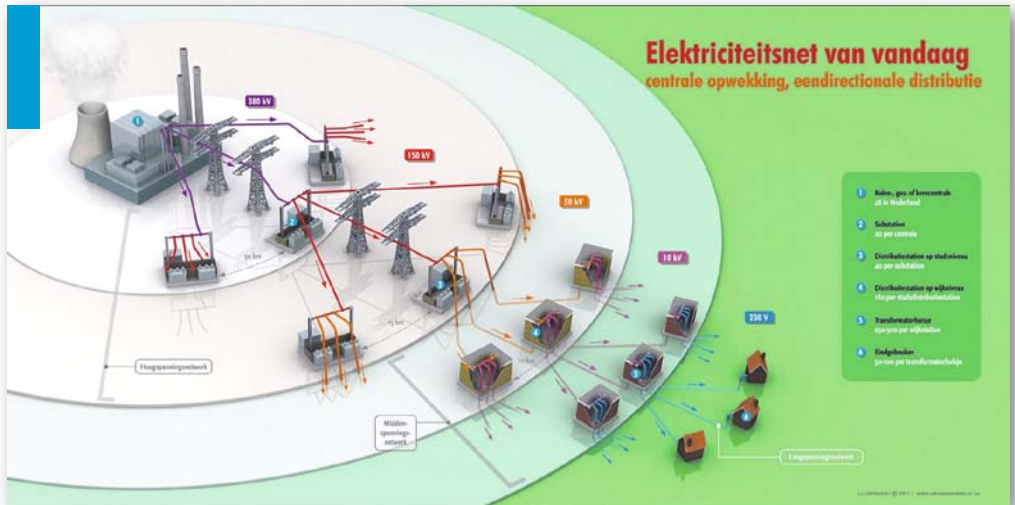
Ontwikkeling elektriciteitssysteem bij omvangrijke introductie van duurzame energie

Ik zal langs vier invalshoeken voorbeelden geven van veranderingen in het elektriciteits-systeem bij een omvangrijke introductie van duurzame energie:

1. Ontwikkelingen in de elektriciteitsinfrastructuur;
2. Ontwikkelingen in transportsystemen op land;
3. Ontwikkelingen in offshore transportsystemen;
4. Balans handhaving (flexibiliteit creëren).

Ontwikkelingen in de elektriciteitsinfrastructuur

Vandaag is de elektriciteitsvoorziening hoofdzakelijk nog eenrichtingsverkeer (zie figuur 10). Van elektriciteitscentrale naar de afnemer.



Figuur 10: Eenrichting distributie [Sluis 2011]/ illustratie: Eric Verdult

In de transitie naar een koolstofarme economie van morgen zien we twee verschillende ogenschijnlijk tegenstrijdige ontwikkelingen in de omvangrijke ontwikkeling van duurzame energiebronnen op lokaal niveau en op nationaal en internationaal niveau. Wat heeft dit voor invloed op de elektriciteitsinfrastructuur?

Lokaal

Een koolstofarme economie vraagt om sterke toename van lokale productie van elektriciteit bij de consumenten en bedrijven (dakgeïntegreerde zon-PV, kleine windgenerator, gecombineerde warmte en kracht opwekking, op het net aangesloten elektrische auto met brandstofcel). Consumenten die zelf elektriciteit produceren worden ook wel *prosumers* genoemd. Dit betekent dat de eindgebruiker in toenemende mate teruglevert aan het elektriciteitsnet (tweerichting verkeer), (zie figuur 11). Het elektriciteitsdistributiesysteem zal daarvoor in de toekomst ingericht worden met toevoeging van nieuwe netwerktechnologieën en nieuwe intelligentie. Mijn stelling is dat er enorme mogelijkheden zijn voor lokaal geproduceerde energie waarbij op efficiënte wijze zowel warmte als elektriciteit wordt gemaakt. Maar niet alle elektriciteit kan in de toekomst lokaal worden opgewekt.



Figuur 11: tweerichting distributie (Sluis 2011)/ illustratie: Eric Verdult

Nationaal en internationaal (centraal)

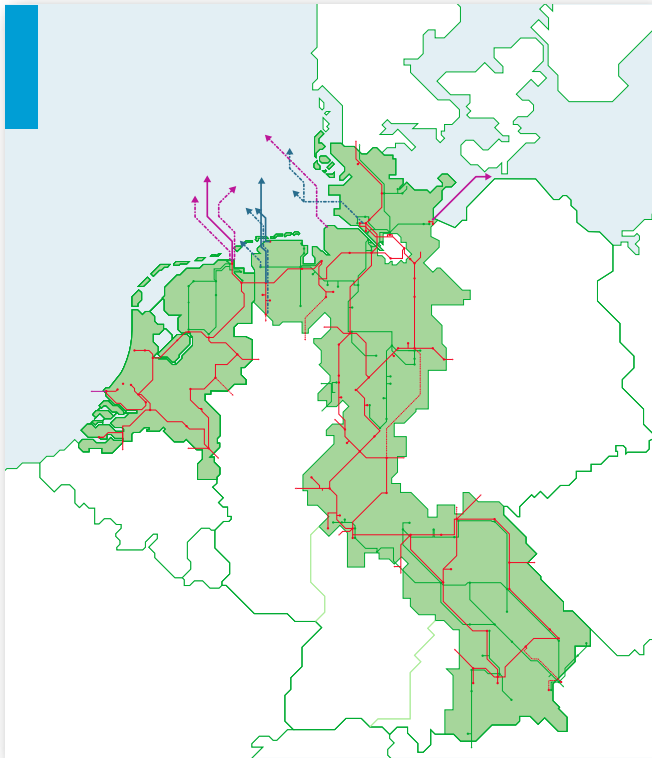
Het elektriciteitstransportsysteem kent al tweerichting verkeer en er is al in hoge mate intelligentie in het systeem aanwezig. Wat voor effect heeft een koolstofarme economie dan op het elektriciteitstransportsysteem? Een belangrijke eigenschap van natuurlijke stromingsbronnen (zoals zon, wind, getijde en golf) is dat de energiedichtheid relatief laag is. Deze bronnen kennen een grote geografische spreiding, zoals ik hiervoor al op de Europese kaart heb laten zien.

Duurzame elektriciteit wordt opgewekt daar waar de natuurlijke bronnen aanwezig zijn. Lage energiedichtheid betekent dat grote oppervlaktes nodig zijn om in de elektrische energie te kunnen voorzien. Zo worden bijvoorbeeld grote windenergieparken in minder bevolkte gebieden of op zee gebouwd, dus op grotere afstand van de woonkernen (zie figuur 11). Dit heeft meer elektriciteitstransport op grotere afstand tot gevolg. Momenteel zijn er ook al andere ontwikkelingen die leiden tot een toename van elektriciteitstransport in grote volumes en/of over grote afstand. Ik geef drie voorbeelden. Toename van grensoverschrijdende (cross border) transporten ten gevolge van de integratie van de Europese elektriciteitsmarkten (marktkoppeling). Op grotere afstand van elektriciteitsverbruikcentra bouwen van traditionele elektriciteitscentrales (bijvoorbeeld nieuwe kolen-, biomassa- en gascentrales kunnen aan de Nederlandse Noordzeekust worden gepland, wegens beschikbaarheid koelwater, gunstig vestigingsklimaat en aanwezigheid havens voor aanvoer van brandstoffen). Uitfasen van elektriciteitscentrales in de buurt van de elektriciteitsverbruikcentra, waarbij oude centrales niet ter plaatse worden vervangen, maar op grote afstand van het verbruik worden gebouwd.

Graag wil ik hier mijn werkgever TenneT introduceren.

TenneT Transmission System Operator

TenneT is tegenwoordig een internationale Transmission System Operator (TSO) voor het transport van elektriciteit (zie figuur 12). Met ongeveer 20.000 km hoogspanningslijnen en 36 miljoen eindgebruikers in Nederland en Duitsland behoort TenneT tot de top 5 van elektriciteitstransporteurs in Europa. TenneT werkt hard aan het faciliteren van de Europese marktintegratie voor elektriciteit, het waarborgen van de leveringszekerheid en het integreren van duurzame energiebronnen. Momenteel werkt TenneT aan de ontwikkeling van 9 stopcontacten op de Noordzee voor het aansluiten van in totaal 5000 MW offshore windparken.



Figuur 12: TenneT 400 kV (rood) en 220 kV (groen) transportnetwerk

Ontwikkelingen in transportsystemen op land

Momenteel is het hoogste spanningsniveau van het Europese transportnet gestandaardiseerd op 400 kV (figuur 13). Bij toenemende vermogens wordt de transportafstand bij High Voltage Alternating Current (HVAC) transportsystemen een beperking. Bij grote vermogenstransporten in lange AC-verbindingen nemen de spanningsverschillen toe en ontstaat het risico van instabiliteit in het elektriciteitssysteem.



Figuur 13: Vakwerkmast HVAC 400 kV 2 x 2000 MVA (foto: TenneT)

Hogere transportcapaciteit kan worden gerealiseerd met een hogere AC-spanning, bijvoorbeeld van 400 naar 750 kV. Hogere spanning gaat gepaard met tracés met hogere masten. De verwachting is dat de corridors met hogere mastconstructies die horen bij de hogere AC transportspanning in Europa op (te) grote publieke weerstand zullen stuiten.

Verder levert groot transport op één enkele verbinding verhoogde risico's voor de betrouwbaarheid van de elektriciteitsvoorziening. Als die om wat voor reden dan ook uitvalt, moet dat opgevangen kunnen worden. Onderzoek naar de risico's van grote transporten over grote afstand is nodig.

High Voltage Direct Current (HVDC)-verbindingen hebben kleinere spanningsverschillen dan AC-verbindingen en de transportafstanden voor HVDC-verbindingen zijn in theorie onbeperkt.

De klassieke Current Source Converter High Voltage Direct Current (CSC-HVDC) kan alleen punt-puntverbindingen verzorgen. De bovengrondse uitvoering kan grote afstanden en grote vermogens transporteren (figuur 14 toont een 800 kV HVDC lijn in China met een capaciteit van 5000 MW). Deze masten zijn hoger dan de huidige Donaumasten. De ondergrondse uitvoering wordt in capaciteit beperkt (tot 1000 - 1500 MW) door de maximale transportcapaciteit van de verbindingkabels. Bij uitval van een netdeel kan de CSC-HVDC zichzelf niet opstarten waardoor deze technologie niet geschikt is voor integratie in het AC-net.



Figuur 14: Vakwerkmast 800 kV HVDC, China, 5000 MW (foto Siemens).

De nieuwe VSC HVDC kan na uitval van een netdeel wel weer zelf opstarten. VSC HVDC kan uitgevoerd worden met aftakkingen (multi-terminal), wat gewenst is voor efficiënte integratie van HVDC in de transportnetten. In het vermaasd AC-systeem inpassen van multi-terminal VSC HVDC vergt nog het nodige onderzoek naar bijvoorbeeld DC-schakelaars, inzet van ICT, beveiligingsconcepten, regelalgoritmes en besturingsconcepten.

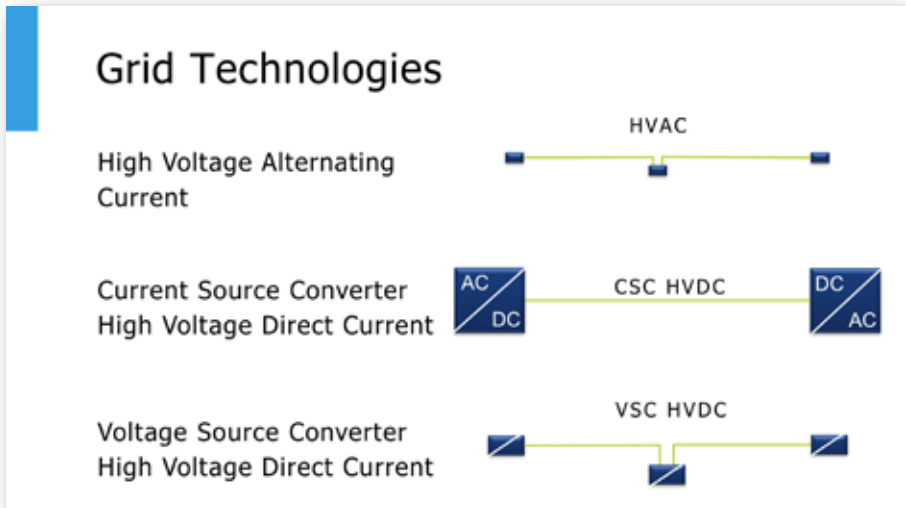
VSC HVDC biedt mogelijkheden voor spanningsondersteuning aan het AC net waardoor deze technologie kan bijdragen aan de netstabiliteit. Ook hier is nog het nodige onderzoek te verrichten.

Een mogelijke toekomstige ontwikkeling op de lange termijn zou kunnen zijn dat de HVDC-systemen voornamelijk bulk elektriciteit (internationaal) over grote afstanden vervoeren, terwijl de HVAC-systemen in toenemende mate regionaal elektriciteit transporteren.

Het op grote schaal integreren van duurzame variabele bronnen in het elektriciteits-systeem, het completeren van de interne elektriciteitsmarkt en het waarborgen van de betrouwbaarheid betekenen de nodige aanpassingen in het elektriciteitstransport-systeem op nationaal, grensoverschrijdend en Europees niveau. Voor universiteiten en industrie nog veel en interessant onderzoek te doen.

Ontwikkelingen in offshore transportsystemen

Voor het aansluiten van offshore windparken beschouwen we 3 alternatieve technologieën [ENTSO-E 2011a] (figuur 15).



Figuur 15: Schematisch overzicht van 3 offshore transportnettechnologieën

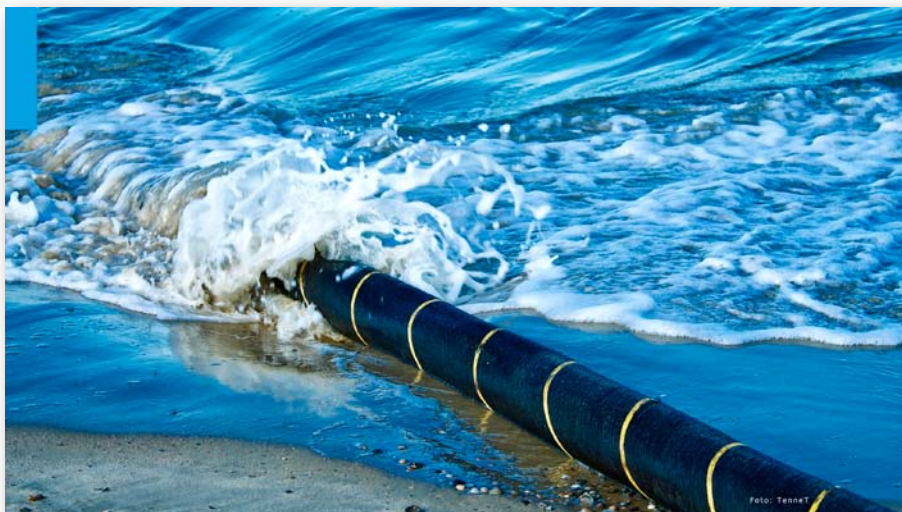
High Voltage Alternating Current (HVAC) transportsystemen die worden gebruikt om offshore wind parken dicht bij de kust met onderzeese kabels te verbinden met het transportnet op het vaste land. In het algemeen worden AC-kabels voor korte afstanden gebruikt. Een voorbeeld is de aansluiting van het Prinses Amaliawindpark 23 kilometer uit de kust ter hoogte van IJmuiden (figuur 16). Een belangrijke beperking voor alle type AC-kabels is hun hoge elektrische capacitieve eigenschap: de kabel gedraagt zich als een condensator. Dit betekent dat voor grotere kabellengtes de capacitieve laadstroom aanmerkelijk wordt. Dit resulteert in een reductie van de mogelijkheid om werkzaam vermogen te transporteren. Het negatieve effect van deze kabellaadstromen neemt toe met de toename van de spanning. De praktische maximale lengte van de AC-aansluiting ligt tussen 60 km en 100 km. Dit heeft geleid tot de toepassing van HVDC-technologie in langere offshore verbindingen. HVDC-kabels hebben geen last van de laadstroombeperkingen zoals bij AC-kabels en de transportafstanden voor HVDC-kabels zijn in theorie onbeperkt.



Figuur 16: Offshore Prinses Amaliawindpark (foto: Eneco)

Zoals eerder aangegeven zijn er binnen HVDC nog twee technieken mogelijk.

Current Source Converter High Voltage Direct Current (CSC HVDC) transportsystemen, ook wel conventionele HVDC genoemd. Deze worden sinds de jaren '70 toegepast voor het offshore verbinden van synchrone netten tussen verschillende landen. Een voorbeeld is de NorNed interconnector tussen Nederland en Noorwegen (figuren 17 en 18).



Figuur 17: NorNed HVDC zeekabel (foto: TenneT)



Figuur 18: NorNed HVDC converterinstallatie (foto: TenneT)

Een eigenschap van deze technologie is dat de AC/DC converterstations een groot oppervlakte innemen en een groot beslag doen op de schaarse ruimte.

Een belangrijke beperking van deze conventionele HVDC is dat het systeem aan beide zijden verbonden moet zijn met een sterk AC-netwerk. Daarom komt CSC HVDC niet in aanmerking voor het radiaal verbinden van offshore windparken met het transportnet op het vaste land. Daarnaast zijn CSC HVDC verbindingen meestal punt-puntverbindingen waarop moeilijk tussenliggende windparken aan te sluiten zijn.



Figuur 19 BorWin1 offshore stopcontact (foto: TenneT)

Voltage Source Converter High Voltage Direct Current (VSC HVDC) transport systemen zijn relatief nieuw (worden sinds 1997 toegepast) en wordt gebruikt om offshore wind parken ver van de kust met onderzeese kabels te verbinden met het transportnet op het vaste land.

Een belangrijke eigenschap van deze technologie is dat het systeem niet aan beide zijden verbonden hoeft te zijn met een sterk AC-netwerk. Daarom komt VSC HVDC in aanmerking voor het radiaal verbinden van offshore windparken met het transportnet op het vaste land. De VSC HVDC converterstations zijn veel kleiner dan van de conventionele converterstations omdat er minder filters nodig zijn. Beperkt gewicht en volume van de converterstations maken deze technologie geschikt voor toepassing op offshore platformen (figuur 19).

De nieuwe VSC HVDC kan uitgevoerd worden in netwerken met aftakkingen (multi-terminal), hetgeen de mogelijkheid biedt om meerdere offshore windparken op één verbinding aan te stuiten.

De multi-terminal faciliteit biedt de mogelijkheid om aansluitingen van offshore windparken en interconnectoren tussen twee landen slim te combineren. Dit is een belangrijke eigenschap om de architectuur van het transportnet te kunnen optimaliseren.

Het plaatje in figuur 20 laat schetsmatig een voorbeeld zien van een mogelijke ontwikkeling van het toekomstige offshore net op de Noordzee. Op dit moment is er een aantal HVDC interconnectoren te zien zoals NorNed naar Noorwegen en BritNed naar het Groot-Brittannië. De eerste windparken worden individueel op het landnet aangesloten. Eerst op de kustlocaties, later meer landinwaarts. In stappen worden meerdere interconnectoren tussen Noordzee-landen aangelegd. De windenergieparken worden steeds verder uit de kust aangelegd en de aansluitingen worden gecombineerd met interconnectoren met behulp van de multi-terminal VSC HVDC. Dit is een onderdeel van de visie van TenneT.



Figuur 20: offshore grid voorbeeld

Ik vind het van belang dat de ontwikkeling van internationale uitwisseling van elektriciteit, offshore duurzame energieopwekking en de ontwikkeling van het net op land integraal wordt beschouwd.

Met een aantal ENTSO-E collega's heb ik een langetermijnstudie uitgevoerd. ENTSO-E heeft in het voorjaar van 2011 de resultaten gepubliceerd: Een eerste langetermijnvisie voor 2030 waarin de voordelen van een geïntegreerde ontwikkeling van de offshore elektriciteitsinfrastructuur [ENTSO-E 2011b] zichtbaar zijn gemaakt. Een toename van transportcapaciteit voor de grensoverschrijdende markt bij 10% lagere investeringen.

Balans handhaving

Elektriciteit kan niet direct op grote schaal worden opgeslagen. Vraag en aanbod van elektriciteit op het elektriciteitsnet moet in evenwicht zijn. Een te grote of lange verstoring van deze balans kan leiden tot een black-out. Daarnaast moet er ook regionaal evenwicht gehouden worden. Het permanent bewaken, handhaven en herstellen van de balans in Nederland is een van de taken van TenneT Transmission System Operator.

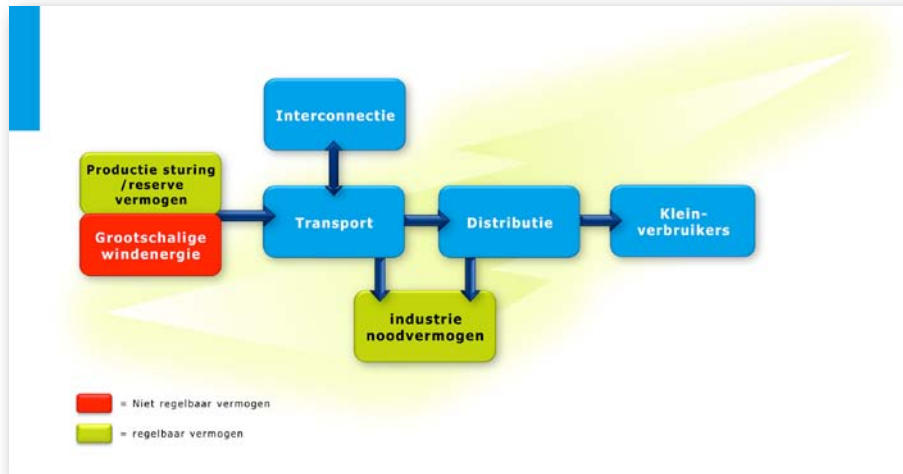


Figuur 21: Elektriciteit moet altijd in balans zijn

Balanshandhaving/flexibiliteit vandaag in Nederland

In Nederland zijn partijen vrij om elektrische energie te kopen of verkopen aan wie ze maar willen. Voor deze transacties gaan partijen contractuele koop- en verkooprelaties aan. Deze transacties leiden tot transporten via het elektriciteitsnet. In de praktijk verlopen de daadwerkelijke productie en/of het verbruik niet altijd precies volgens de afspraken. Daarom is er een systeem nodig om de verschillen tussen prognoses en werkelijkheid te beheersen. In Nederland kennen we vandaag de dag het systeem van programmaverantwoordelijken waarin een beperkt aantal grote partijen, zoals grote elektriciteitsproducenten, grote industriële afnemers, handelaren en elektriciteitsleveranciers (figuur 22) een cruciale rol spelen. Dit systeem van programmaverantwoordelijk-

heid (“productie volgt verbruik”) voldoet goed in Nederland, omdat er naar verhouding tot het totale regelbare productiepark, nog maar een beperkte hoeveelheid elektriciteit uit variabele energiebronnen (zon en wind) wordt opgewekt. De programmaverantwoordelijke partijen kunnen in principe zelf met hun eigen opwekeenheden of via contracten de fluctuaties weggeregelen. Er is in Nederland voldoende flexibiliteit in het huidige systeem aanwezig.

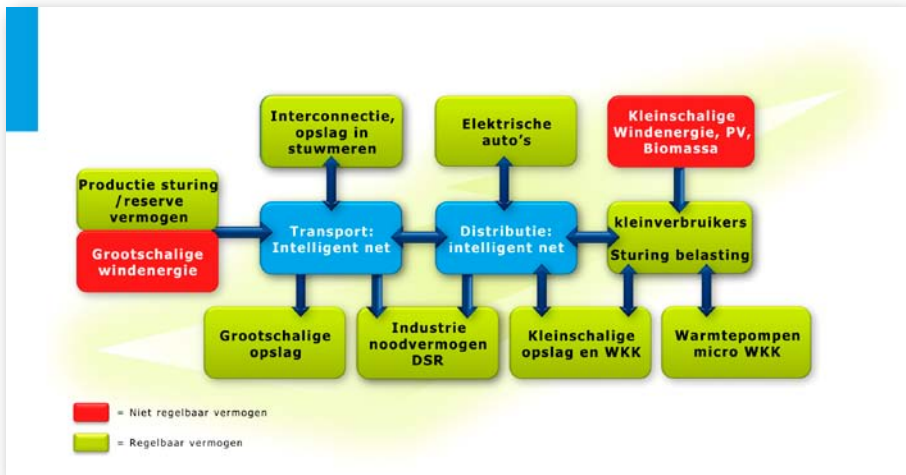


Figuur 22: Traditioneel regelbaar vermogen ten behoeve van balanshandhaving

Balanshandhaving/flexibiliteit in de toekomst

Balanshandhaving wordt een uitdaging als in toenemende mate elektriciteitsopwekking wordt gerealiseerd met variabele duurzame energiebronnen die beperkt of niet regelbaar zijn en waarvan het moeilijk is om lang van te voren het werkelijke productievolume te voorspellen.

Er zal meer aanspraak worden gedaan op de flexibiliteit van het energiesysteem en in het bijzonder flexibiliteit van het elektriciteitssysteem. De huidige methode op basis van “productie volgt verbruik” schiet dan tekort. Dit vormt een nieuwe uitdaging. Nieuwe oplossingen en nieuwe partijen (lokaal, nationaal en internationaal) zijn nodig. In figuur 23 is een aantal, niet limitatief, voorbeelden gegeven waarbij er vanuit wordt gegaan dat alle elektriciteitsnetten geschikt zijn voor tweezijdig verkeer. Lokale opslag met batterijen in het distributienet, in de meterkast of slim laden van de accu’s van elektrische auto’s. Elektriciteitsafname sturen van warmtepompen voor ruimteverwarming waarbij warmteopslag zorgt voor de benodigde regelruimte van de warmtepomp. Lokaal wordt een gedeelte van de belasting bijvoorbeeld in koelhuizen aangepast aan het aanbod (Demand Side Response, DSR). Elektriciteit wordt virtueel in warm water respectievelijk in bevroren producten tijdelijk opgeslagen. Elektriciteitsproductie sturen met warmtekrachtkoppeling bij tuinders waarbij ook hier warmteopslag zorgt voor de benodigde regelruimte.

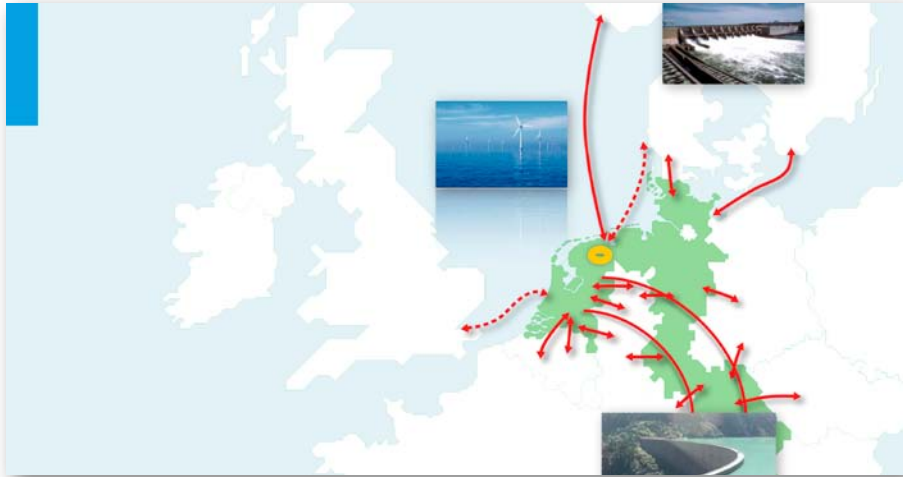


Figuur 23: Nieuwe vormen van flexibiliteit in de toekomst voor het op grote schaal inpassen van duurzame energiebronnen

Via internationale elektriciteitstransportverbindingen (interconnectoren) kunnen de waterreservoirs (pumped hydro) in bijvoorbeeld Noorwegen en in de Alpen ingezet worden voor het leveren van flexibiliteit (figuur 24). Ook ideeën die in Nederland bestaan zoals een energie-eiland voor de kust van Walcheren (PAC) kunnen in de toekomst een bijdrage leveren aan flexibiliteit. Er komt een behoefte aan flexibele traditionele opwekeenheden met snelle opregelmogelijkheden. Betere nauwkeurigheid van voorspellingen van elektriciteit uit wind en zon en aggregatie van deze voorspellingen uit een groter gebied reduceren de aanspraak op reservevermogen en flexibiliteit. Iedere oplossing heeft zijn eigen karakteristiek, regelruimte, investeringsniveau, ontwikkeltraject, belang/niche en prijs.

In mijn optiek is het onbegonnen werk om te pogen dit alles vanuit één centraal punt te regelen en besturen. Een systematiek op basis van marktmechanisme [Meijden, 2010], [Bosch, 2010] en prijsprikkels geeft meer oplossingsruimte en -kansen. Het is goed dat zodanige marktmechanismen worden ontwikkeld dat zowel decentrale kleinschalige als grootschalige oplossingen optimaal kunnen worden ontsloten voor inzet van korte en lange termijn flexibiliteitsfuncties. Voor het inrichten van markten is online informatie uitwisseling van belang. Veel onderzoek vanuit verschillende invalshoeken en disciplines (marktmechanisme, techniek, regulering, economie, gedrag) is nodig om een goede oplossing te vinden.

Het moge duidelijk zijn dat het elektriciteitssysteem nog niet voldoende toegerust is voor deze langetermijnontwikkelingen en er is nog veel onderzoek nodig op het gebied van systeemintegratie waarbij flexibiliteit een belangrijke ontwerpparameter is.



Figuur 24: TenneT net verbindt grootschalige energieopslag opslag in Noorwegen (hydro), Alpen (hydro) en Groningen (gas)

Systemintegratie

De afdeling Electrical Sustainable Energy van de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica waarbinnen mijn leerstoel is gesitueerd heeft een rijke ervaring en wetenschappelijke kennis opgebouwd op belangrijke gebieden zoals bijvoorbeeld systeemstabiliteit, systeembetrouwbaarheid, netarchitectuur, ontwikkeling simulatiemodellen, integratie van DC en AC, transiënte verschijnselen en beveiliging, monitoring systeemprestatie, systeembesturing en real time simulatie.

Mijn persoonlijke expertise ligt op het vlak van de invloed van nieuwe technologieën op netarchitectuur bij grootschalige inpassing van lokale en geconcentreerde vormen van duurzame energie. Deze expertise is gebaseerd op mijn achtergrond in de industriële procesautomatisering en jarenlange ervaring in de energiedistributie en elektriciteitstransport.

Voor mijn leerstoel Large Scale Sustainable Power Systems is het sleutelwoord *systemintegratie*.

De onderzoeksvraagstukken die voortvloeien uit de toekomstige eisen aan een betrouwbaar én duurzaam energiesysteem zijn divers en complex.

Voor mijn leerstoel zie ik twee belangrijke drivers:

- Op grote schaal integreren van duurzame energiebronnen
- Nieuwe netwerktechnologieën en toepassing informatie & communicatie technologie

Ik onderscheid twee aandachtsgebieden:

- Planning van het elektriciteitstransportsysteem
- Bedrijfsvoering van het elektriciteitssysteem

Dit resulteert in 4 onderzoeksgebieden (zie figuur 25) voor systeemintegratie.

Drivers	Aandachtsgebieden	
	Planning van het elektriciteitstransportsysteem	Bedrijfsvoering van het elektriciteitsysteem
Integreren van duurzame bronnen	<ul style="list-style-type: none"> Betrouwbaarheid en stabiliteit Planningsmethodes en analysegereedschappen 	<ul style="list-style-type: none"> Flexibiliteit en bestuurbaarheid van het elektrische energiesysteem Integreren netwerk- en marktsimulaties
Nieuwe netwerktechnologieën en ICT	<ul style="list-style-type: none"> Invloed van ICT en netwerktechnologie op Europees transportnet Multi-terminal VSC HVDC integreren in HVAC-net 	<ul style="list-style-type: none"> Wide Area Measurement Intelligente netwerk beveiliging

Figuur 25: Research onderwerpen Systeemintegratie

Ik geef een aantal voorbeelden van onderzoeksvragen. Gelet op de beperkte tijd van mijn deeltijdrol moet ik mij begrenze tot een beperkt aantal onderzoeksvragen. Ik zal daarom het promotiewerk noemen waar ik bij betrokken ben en waarbij dr. Madeleine Gibescu de dagelijkse begeleiding verzorgt.

- Wat zijn de invloeden van nieuwe netconcepten ten behoeve van de integratie van duurzame energiebronnen op grote schaal op de **betrouwbaarheid** en **stabiliteit** van het elektriciteitssysteem?
Promovendus *Bart Tuinema*: "Reliability Evaluation of Offshore Wind Energy Networks and the Dutch Power System".
- Welke nieuwe **planningsmethodes** en **analysegereedschappen** dragen bij aan het effectief integreren van duurzame energiebronnen met behoud van een betrouwbare leveringszekerheid?
Promovenda *Ana Ciupuliga*: "Transmission Expansion Planning with Large Scale Wind Power Integration".
Promovendus *Shahab Shariat Torbaghan*: "Developing a Transnational Electricity Infrastructure Offshore: Design, Operations and Regulatory Solutions".
- Welke mogelijkheden bieden nieuwe **netwerktechnologieën** en **informatie en communicatie technologie** op de planning van duurzame **Europese transportnetten** en wat is de invloed op de prestatie van het elektriciteitssysteem?

- Welke beveiligings- en besturingsconcepten zijn nodig om de **multi-terminal VSC HVDC** betrouwbaar te integreren in het HVAC transportnet?
Promovendus *Arjen van der Meer*: "Offshore VSC-HVDC Networks – and their Influence on Transient Stability of AC Transmission Systems".
- Hoe kan de **flexibiliteit** en **bestuurbaarheid** van een **transportsysteem** worden vergroot?
- Welke bijdrage (met **ancillary services**) kan van de duurzame energiebronnen zelf worden verwacht aan systeemprestatie en systeemstabiliteit?
Promovendus *Jens Bömer*: "Stability Analysis of Transmission and Distribution Systems with Distributed Generation".
- Hoe kunnen **netwerksimulaties** en **marktsimulaties** onder grensoverschrijdende netcongestie omstandigheden efficiënt worden geïntegreerd?
Promovenda *Ana Ciupuliga*: "Round-the-year Security Analysis with Bottleneck Ranking for Interconnected Power Systems with Large-Scale Wind Power".
- Hoe kunnen nieuwe HVDC technologieën, **intelligente beveiliging** en **Wide Area Measurement** bijdragen aan een betere prestatie (transportcapaciteit, betrouwbaarheid, netstabiliteit) van het Europese elektriciteitstransportsysteem?
Dit is het onderzoeksgebied van dr. Marjan Popov.

Mijn inzet is om kennis over systeemintegratie binnen TU Delft verder uit te bouwen en een bijdrage te leveren aan goed opgeleide ingenieurs ten behoeve van realiseren en waarborgen van een duurzaam én betrouwbaar elektriciteitssysteem in de toekomst.

Slotwoord

Ik ervaar het als een voorrecht om in het wetenschappelijke domein een bijdrage te mogen leveren aan onderwijs en onderzoek. Het is heel bijzonder om twee werelden te mogen verbinden de wetenschap en de industrie. Op dit snijvlak voel ik me op mijn best. TenneT als internationale elektriciteitstransporteur midden in de actuele vraagstukken zoals integratie van grootschalige duurzame bronnen, faciliteren van de marktontwikkeling, omgaan met publieke acceptatie bij nieuwe verbindingen, faciliteren van grootschalige uitbreiding fossiele opwekeenheden aan de Noordzeekust en het opvangen van de uitfasering van kernenergie in Duitsland. Mijn collega-vakmensen in Nederland en Duitsland zijn een rijke inspiratiebron voor mij wat ook de TU gemeenschap ten goede komt. Binnen de universiteit is niet alleen sprake van kennis overdragen vanuit ons bedrijf, ook TenneT leert iedere keer weer van studenten, promovendi en wetenschappers.

Gaarne dank ik het College van Bestuur van de TU Delft en het bestuur van de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica voor mijn benoeming en het in mij gestelde vertrouwen.

Zeer erkentelijk ben ik de directie van TenneT dat ik in de gelegenheid wordt gesteld om deze deeltijd leerstoel te vervullen. Het was de CEO van TenneT Mel Kroon die me destijds polste voor deze functie en ik waardeer het vertrouwen en de steun van het bedrijf.

Een aantal collega's van TenneT is bereid een aantal taken van mij over te nemen, zodat ik deze deeltijd functie naast mijn andere werk kan invullen. De welgemeende belangstelling voor wat er op deze universiteit gebeurt en de actieve betrokkenheid bij het onderzoek en het begeleiden van stagiaires en afstudeerders stel ik bijzonder op prijs.

Prof. Michel Antal dank ik van harte voor de wijze adviezen en de support.

Prof. Ronnie Belmans ben ik erkentelijk voor de inspirerende gedachtenwisselingen en discussies.

Collega hoogleraren van de Technische Universiteit Delft en andere collega's in Nederland en buitenland dank ik voor de positieve wijze waarop ze reageerden op mijn benoeming hier in Delft. Ik verheug me op een goede samenwerking in de toekomst. Ik ben mijn collega hoogleraren prof. Bram Feirrer, prof. Lou van der Sluis, prof. Johan Smit en prof. Miro Zeman, wetenschappelijke medewerkers dr. Madeleine Gibescu en dr. Marjan Popov, medewerkers en secretariaat binnen de afdeling Electrical Sustainable Energy erkentelijk voor de praktische steun tijdens mijn inwerken en de prettige samenwerking tot dusverre.

Mijn voorganger prof. Kling en ik mag nu zeggen collega, beste Wil. Met enthousiasme breng je het vakgebied over aan de studenten en promovendi. Ik verheug me op een goede samenwerking in de toekomst met jou en de leden van je capaciteitsgroep Electrical Energy Systems in Eindhoven.

Tot slot richt ik me graag tot de studenten. Ik heb met mijn intrede willen aangeven dat elektriciteit een steeds belangrijker onderdeel van de samenleving gaat worden. Een veranderende energiemix met meer duurzaam, integratie van de Europese elektriciteitsmarkt, toenemende afhankelijkheid van de samenleving van elektriciteit, toenemende weerstand van diezelfde samenleving tegen zichtbare grote infrastructurele werken, maken dat nieuwe onconventionele oplossingen moeten worden bedacht om de vraagstukken van overmorgen het hoofd te kunnen bieden.

Stevige investeringen in de internationale elektriciteitsinfrastructuur worden in de komende decennia verwacht en er ligt veel interessant werk. Het waarborgen van een duurzaam én betrouwbaar elektriciteitssysteem is een ware uitdaging voor de toekomstige generatie ingenieurs. Never a dull moment.

Ik dank u allen voor uw belangstelling.

Ik heb gezegd

Referenties

- [Bosch, 2011] Van den Bosch P.P.J., Jokic A., Frunt J., Kling W.L., Nobel F., Boonekamp P., De Boer W., Hermans R.M., Virag A. "Price-based control of ancillary services for power balancing", European Transactions on Electrical Power (ETEP), September 2011, Vol 21(6), p. 1889–1901
- [Brundtland 1987] "Our common Future, Report of the World Commission on Environment and Development", World Commission on Environment and Development, August 2, 1987 Transmitted to the General Assembly as an Annex document A/42/427 – Development and International Co-operation: Environment
- [DLR, 2009] German Aerospace Center (DLR) Desertec study, 2009, www.desertec.org
- [EC 2011] "Energy Roadmap 2050", European Commission, COM (2011) 885/2
- [ECF 2010] Roadmap 2050, A practical guide to a prosperous, low-carbon Europe, European Climate Foundation, April 2010
- [ENTSO-E 2010] System Adequacy Retrospect 2010, ENTSO-E report
- [ENTSO-E 2011a] "Offshore Transmission Technology", ENTSO-E report, 24 November 2011
- [ENTSO-E 2011b] Offshore Grid Development in the North Seas ENTSO-E views, ENTSO-E, February 2011
- [EWEA 2010] The European Wind Energy Association, "2050: Facilitating 50% Wind Energy, Recommendations on transmission infrastructure, system operation and electricity market integration", www.ewea.org
- [GEWEC 2011] www.gewec.net, site visit November 2011
- [Gore 2006] Al Gore, "An Unconvenient truth", Paramount Classics, 24 May 2006
- [IEA 2008] International Energy Agency, World Energy Outlook 2008, Global energy trends to 2030
- [IEA 2011a] International Energy Agency, World Energy Outlook 2011, Energy for all
- [IEA 2011b] International Energy Agency, World Energy Outlook 2011
- [IPCC 2007] "Climate Change 2007: Synthesis Report, Summary for Policymakers", An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, approved at IPCC Plenary XXVII, Valencia, Spain, 12-17 November 2007
- [Meadows1975] "De grenzen aan de groei", Club van Rome, Meadows, Dennis / 9e druk, 1975, uitgever Het Spectrum, ISBN 9027452466
- [Meijden, 2010] M.A.M.M. van der Meijden, I.J. Tigchelaar, F.J.C.M. Spaan, P.G.H Jacobs, "Long-term grid planning in the Netherlands", CIGRE session, Paris 2010, paper C1-303
- [Shell 2011] ENERGYFUTURE, een initiatief van Shell Nederland, 2011
- [Sluis 2011] Lou van der Sluis, "Opgewekt door de Buurt", TU Delft Library, 2011, ISBN 978-94-6186-009-5
- [TenneT 2008] "Vision2030, TenneT's long term vision on the 380 kV and 220 kV electricity transmission grid", report on www.tennet.eu, Arnhem, February 2008

©2012 – TU Delft

Layout en beeldbewerking:

MultiMedia Services TU Delft

Druk:

MailSupport, Zoetermeer

Technische Universiteit Delft
Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica

Mekelweg 4
2628 CD Delft

T: +31 15 278 45 68

F: +31 15 278 70 22

E: bureau@ewi.tudelft.nl