

Gas, Wind en CO₂ op Schiphol.

De crash van de windmolens.

Door

C. (Kees) le Pair



clepair@casema.nl

www.clepair.net

Samenvatting voor de gehaaste lezer.

Gas, Wind en CO₂ op Schiphol De crash van de windmolens.

Windmolenparken voor de productie van elektriciteit worden gebouwd om fossiele brandstof te sparen en om minder CO₂ in de atmosfeer te brengen. Of en hoe goed zij dat doen is een onderwerp van discussie. Aanvankelijk nam men aan dat elk kWh elektrische energie met wind geproduceerd een kWh fossiel gemaakte stroom vervangt. Het zou dus de daarvoor benodigde brandstof besparen, wat neerkomt op ~0,2 m³ aardgas/kWh en 0,48 kg CO₂. Deze cijfers worden door voorstanders nog vaak gebruikt. Intussen heeft de regering toegegeven dat tengevolge van rendementsvermindering van de conventionele centrales deze besparing met ongeveer 10% moet worden verlaagd. De berekening waarop dit is gebaseerd, duiden wij aan met het *vigerend model* ter onderscheiding van de eerder genoemde berekening, het *oude model*.

Hoewel het vigerend model een verbetering is, geeft het nog geen goed beeld van de realiteit. De voornaamste bezwaren zijn:

- ‘Schommeling’, het op- en afregelen van de conventionele centrales – cycling in het Engels – als gevolg van de variabiliteit van de wind kost extra brandstof.
- De energiekosten van bouw en installatie van de molens ontbreken.
- Idem de energiekosten van de bekabeling en voorzieningen nodig voor de aansluiting op het elektriciteitsnet.
- Opvang van snelle windveranderingen vergt vaker inzet van snel regelbare generatoren die niet energie-efficiënt zijn.

In dit rapport laten wij zien hoe de besparing uitvalt indien wij deze factoren inbouwen in de berekening.

De berekeningen zijn gedaan aan de hand van een op Nederland toegesneden model. Een constante elektriciteitsvraag van 500 MW wordt gedekt door een windpark van resp. 100, 200 en 300 MW samen met een conventionele centrale van 500 MW. (Omdat er niet altijd wind is, moet een windpark samen opereren met fossiel gestookte generatoren.) Wij kozen daarvoor het meest efficiënte type (CCGT) bijgestaan door een kleine fractie snel regelbare generatoren van het OCGT-type. Wij gebruikten bestaande gegevens en nieuwe informatie over het effect van schommelen. Voor wat betreft de twee laatste bezwaren hebben wij plausibele, voor de wind gunstige, aannames verdisconteerd. De berekening is gedaan voor een verondersteld windpark in de buurt van Schiphol op een normale Nederlandse winddag (data Schiphol 28 aug. 2011).

De 300 MW wind variant stemt relatief ongeveer overeen met de toestand in Nederland wanneer de nu bestaande windparkplannen t/m 2020 zouden worden gerealiseerd.

De uitkomsten staan in de navolgende tabel. De cijfers in de groen gemarkeerde regel komen de werkelijkheid het meest nabij.

Omdat het niet altijd waait, moet het conventionele vermogen te allen tijde in staat zijn aan de stroomvraag te voldoen. Windparken moeten dus als een *extra investering* worden beschouwd. Die is alleen gerechtvaardigd als zij daadwerkelijk een redelijke brandstofbesparing zouden geven. Dat is zoals wij laten zien niet het geval.

De brandstofbesparing van een windpark met naamplaatvermogen, V, in de buurt van Schiphol zou op 28 aug. 2011 – een normale Hollandse winddag – gecombineerd met een moderne efficiënte conventionele generator, CCGT + een kleine OCGT-bijdrage bij constant totaal vermogen van 500 MW, zijn geweest:

V	100 MW wind	200 MW wind	300 MW wind
Oud model	4,2%	8,3%	12,5%
Vigerend model	3,5%	7,1%	10,7%
Met inbegrip van 'schommelen'	1,4%	2,9%	4,4%
Idem+energiekosten, 15 jaar	0,6%	1,2%	1,9%
Idem+energiekosten, 30 jaar	1,0%	2,0%	3,1%
Alle factoren+fractie OCGT, 15 jaar	-0,8%	-1,4%	-2,3%
Idem, 30 jaar	-0,3%	-0,5%	-1,0%

Het blijkt dat de windparken niet alleen geen brandstof sparen en dus ook de CO₂-uitstoot niet verminderen, maar dat zij zelfs extra brandstof vergen. Bij 300 MW windvermogen: in 21½ uur: 47150 m³ gas. M.a.w. de elektriciteitsvoorziening met windmolens belast het milieu meer dan zonder windturbines het geval zou zijn .

De conclusie is: *Een besluit tot miljardeninvesteringen in windmolens om brandstof te sparen en om CO₂-uitstoot te verminderen is onverantwoord. Er wordt niets gespaard, integendeel. Wij achten het onwaarschijnlijk dat betere kennis van de factoren die het systeem beïnvloeden de hier berekende uitkomsten drastisch zouden wijzigen.*

Volk en regering dienen onmiddellijk alle windparkbouw stil te leggen. Er moet eerst nader onderzocht worden of precieze gegevens over het gedrag van de diverse eenheden de juistheid van de huidige uitkomsten weerleggen.

INHOUD

Pagina	§	titel	onderwerpen
1		Titelblad	
2		Samenvatting voor gehaaste lezers.	
5	1	Inleiding	Elektriciteit in Nederland.
6	2	Oud model	Steenkool, CCGT, OCGT, kernenergie. Rendementen. CO ₂ -uitstoot. Verbrandingsgegevens. Schijnbare besparing.
8	3	Vigerend model	Verlaging van het rendement. Besparing waarmee men thans rekent.
10	4	Fouten in het vigerend model	De invloed van schommelen (cycling) op het rendement. Extra brandstof i.p.v. besparing.
12	5	Het resultaat van een dag wind	Windgegevens. Prestatie windpark. Vermogenvariatie. Gemiddelde winddag.
14	6	Schommelen (=cycling)	Het schommelmodel. Berekening opbrengst en besparing van 'een dag wind'.
15	7	Discussie en conclusies	Vigerend model is misleidend. Vergelijking met studies van anderen.
16	8	Complicaties en hun gevolg	Bouw en installatie. Bekabeling enz. Zelfgebruik. OCGT i.p.v. CCGT. Slijtage.
18	9	Slotsom	Resultaat: geen besparing maar verlies.
19		Referenties	
21		Appendix	Details van de rekenwijze: Cycling. Bouw. Bekabeling. Vervanging conventionele generatoren.

De crash van de windmolens.

Samenvatting

Verschillende manieren om te berekenen hoeveel brandstof en CO₂-uitstoot een windpark spaart. De modellen die men daarvoor gebruikt. Zij berusten op stationaire toestanden en houden geen rekening met 'schommelen' (het irreversibele proces van op- en afregelen van conventionele centrales), energiekosten van bouw, aansluiting en gedwongen verandering in de aanwending van het conventionele generatorpark. Inbouw van die elementen leert dat een fictief windpark op een winderige dag bij Schiphol in combinatie met moderne gas-stoom generatie niets bespaart. Het gasverbruik en daarmee de CO₂-uitstoot nemen 2,3% toe ten opzichte van conventionele productie zonder windsteun.

1. Inleiding.

Elektriciteit is een vorm van energie. Die verkrijgen wij in Nederland in hoofdzaak door omzetting van warmte – eveneens energie – afkomstig van verbranding van aardgas of steenkool (fossiele brandstoffen). Voor een klein deel, nucleair, door splijting van atoomkernen van Uraan (in Borsele). Verder importeren wij netto elektriciteit uit het buitenland. Daarnaast produceren ook windmolens elektriciteit. Er zijn nog andere bijdragen zoals bv. verbranding van aardolie, hoogovengas, biomassa en van waterkracht en zonnecellen. De verdeling van de productie tussen die verschillende bronnen is voor elk land anders. Ze is ook niet constant. Op het moment wordt bijvoorbeeld het windaandeel vergroot. De verhouding tussen de hoeveelheden elektriciteit afkomstig van de verschillende bronnen was in 2008 ongeveer:

$$E_{\text{gas}} : E_{\text{kool}} : E_{\text{import}} : E_{\text{nucleair}} : E_{\text{wind}} : E_{\text{overig}} = 59,7 : 20,8 : 14,6 : 3,8 : 3,9 : 11,5$$

De totale binnenlandse elektriciteitsproductie in dat jaar was 389.529 TJ (Terajoule) of 108 201 miljoen kWh). Daarbij moet om het nuttig verbruik te weten de netto import (import – export) 57 060 TJ worden opgeteld en het netverlies (transport) 16 841 TJ worden afgetrokken. Het verbruik was dus 429 748 TJ (= 119 374 miljoen kWh). (Cijfers: CBS Statline.) Voor de jaarcijfers van het land als geheel zijn de GW (Gigawatt) voor het vermogen en de GWyr (Gigawattjaar) voor de hoeveelheid elektrische energie praktischer. In die eenheden is de productie 12,35 GWyr en het verbruik 13,62 GWyr.

De wereldvoorraad aardgas en steenkool is eindig*. Er moet dus zuinig mee worden omgegaan. Bij verbranding komt CO₂ vrij. Volgens de heersende opvatting is dat schadelijk omdat het tot klimaatverandering zou leiden. Wij delen die opvatting niet. Maar zo lang publiek en

*) Theoretisch is ook de Uraanvoorraad eindig. Praktisch gezien is dat niet het geval. Tegen de huidige prijs is de voorraad, indien alle elektriciteit in de wereld van kernsplijting afkomstig zou zijn toereikend voor ~ 70 jaar. Maar tegen 2 x die prijs – waarvoor ook minder toegankelijke voorraden kunnen worden aangesproken – zou er voor ~ 600 jaar genoeg zijn en voor 4 x de huidige kosten zelfs voor 6 miljoen jaar. Omdat bij de elektriciteitsproductie uit kernenergie de brandstofprijzen nagenoeg verwaarloosbaar is, kan Uraan dus als een onuitputtelijke brandstof worden beschouwd.

overheid de mening zijn toegedaan is dat dus een tweede reden om te trachten het verbruik van steenkool en gas te verminderen. Vandaar dat bij ons net als in veel andere landen windmolens worden neergezet. In het jaar 2008 leverden die 0,49 GWyr (3,94% van de nationale productie). Het opgestelde windvermogen was ~ 1,94 GW. Het plan is om dit in 2020 tot 12 GW uit te breiden, wat goed zou zijn voor een jaarproductie van ca. 3 GWyr. (Windmolens zijn voor hun productie afhankelijk van de windsnelheid vandaar dat de molens gemiddeld over het jaar in 2008 slechts ~ 22,6% van de maximaal mogelijke opbrengst leverden.)

Het inzetten van windvermogen vergt extra geld. Het waait niet altijd. En elektriciteit kan hier niet in voldoende mate worden opgeslagen om ons bij te weinig wind te redden. Daarom moet altijd voldoende fossiel- en nucleair vermogen aanwezig zijn om wanneer het niet waait aan de vraag te voldoen. De windstroom installaties komen er dus extra bij. Er kunnen geen gewone centrales verdwijnen. Belastingbetalers en afnemers van elektriciteit betalen die extra kosten na aftrek van eventuele besparingen dankzij de wind. Het is dus verstandig om eens na te gaan hoe groot de besparing door wind is op fossiele brandstof (en verminderde CO₂-uitstoot). Daar is het uiteindelijk om begonnen. Zonder die zou meer geld uitgeven dan nodig is voor een adequate stroomvoorziening niet verstandig zijn.

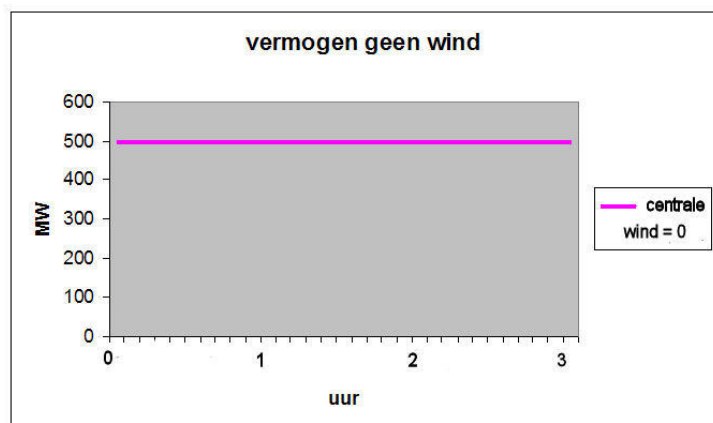
Voor een juiste berekening zijn talloze gegevens nodig: kostprijzen van installaties en verbindinglijnen, productiegegevens enz. Die gegevens zijn niet alle volledig beschikbaar. Verschillende marktpartijen achten bepaalde cijfers concurrentiegevoelig. Zij zijn daarom niet voorhanden. Wij zullen met behulp van wel beschikbare gegevens in een aantal stappen van telkens grotere complexiteit met parallel daaraan grotere nauwkeurigheid laten zien hoe het met de besparingen staat.

2. Oud model

Een tijd lang ging de overheid, in navolging van wat de voorstanders van windstroom beweerden, er van uit dat elke kWh windelektriciteit een kWh fossiel geproduceerde stroom vervangt, waardoor de brandstof die voor die fossiele productie nodig zou zijn geweest, wordt bespaard. Tegelijk zou de CO₂-emissie van die verbranding achterwege blijven. Wij gaan eerst eens na wat deze redenering oplevert.

Kijk naar een conventionele centrale die constant draait op een vermogen van 500 MW. Die verbruikt per uur een hoeveelheid brandstof al naar gelang het type generator dat voor de stroomopwekking wordt gebruikt. De meest gebruikte generatoren zijn:

- De steenkoolgestookte (stoom)turbine, die wij met de letters SKGT zullen aanduiden.
- De kerncentrale, KC, waarin kernsplijting van Uraan de warmte levert.
- De enkelvoudige gasgestookte turbine, OCGT (van het Engelse 'Open Cycle Gas Turbine')



- De gecombineerde gas-stoomgestookte turbine CCGT (Combined Cycle Gas Turbine).

De warmte die aan een turbine wordt toegevoerd, wordt slechts voor een deel in elektrische energie omgezet. Het restant wordt afgevoerd door koelwater of een deel van die ‘afvalwarmte’ wordt nuttig gebruikt voor proceshitte, of voor verwarmingsdoeleinden. Indien we de hoeveelheid warmte die we toevoeren Q noemen en de geproduceerde elektrische energie E dan is het rendement van zo’n generator:

$$\eta = E/Q \quad (1)$$

η verschilt niet slechts voor de genoemde vier categorieën generatoren. Ook binnen zo’n categorie zijn er verschillen. Nieuwere machines zijn zuiniger. Die hebben een hogere η dan hun oudere zusters (meer stroom voor dezelfde hoeveelheid brandstof). In tabel 1 staan de η -waarden die op het moment representatief zijn voor in Nederland opgestelde machines, wanneer zij stationair draaien op het vermogen waarvoor ze zijn ontworpen (geoptimaliseerd). Voor kolen namen wij de modernste eenheid die op het moment onder constructie is. Moderne OCGTs halen onder ontwerp-condities wel een $\eta = 0,36$. Maar er zijn nog veel oudere in gebruik die dat tot na 2020 blijven.

Als wij een uur lang 500 MW genereren is de geproduceerde elektrische energie 500 MWh of wel 500 000 kWh. Kennen wij η dan kunnen we met (1) berekenen, hoeveel warmte daarvoor nodig was. Het is bekend hoeveel warmte verbranding van bv. 1 m³ gas, of 1 kg steenkool oplevert en ook hoeveel CO₂ bij die verbranding vrij komt. Met behulp van die gegevens zijn de gas- en steenkoolhoeveelheden en de CO₂ –uitstoot eenvoudig af te leiden.

De praktijk is ingewikkelder. Net zoals de ene gasturbine een net iets andere η heeft dan zijn zus, zo is ook de verbrandingswaarde van de ene soort steenkool niet dezelfde als die van de andere. Evenzo voor aardgas uit verschillende bronnen. Wij gebruikten waarden die dicht staan bij de in Nederland draaiende machines en de hier gebruikte brandstoffen:

Tabel 1

Gebruikte basisgegevens.

<i>Rendement η van verschillende generatoren¹</i>	
SKGT	0,455
CCGT	0,59
OCGT	0,32
KC	0,377
<i>Verbrandingswarmte²</i>	
Gas [J/m ³]	32 x 10 ⁶
Steenkool [J/kg]	29 x 10 ⁶
Uranium [kWh/kg]	(irrelevant) 7,4 x 10 ⁶
<i>CO₂-productie bij verbranding³</i>	
Gas [kg CO ₂ /m ³]	2,5
Steenkool [kg CO ₂ /kg]	2,6*
Uranium	nihil

*) Indien de CO₂ die bij de winning en het transport naar Nederland vrijkomt erbij geteld wordt, is dit getal 3,1.

Met behulp van deze gegevens berekenen wij van onze model centrale, die constant 500 MW levert, voor verschillende typen generatoren het brandstofverbruik en de CO₂-uitstoot per uur. De uitkomsten staan in tabel 2. Bij steenkool rekenen we in kg, bij gas in m³ van normale temperatuur en druk.

Tabel 2

Continu op 500 MW ontwerpvermogen draaiende centrale, verbruik en uitstoot per uur.

Type generator	Brandstof/uur 500/η MWh	= kg/uur of m ³ /uur	Geproduceerde CO ₂ [kg/uur]	Per kWh conventioneel	Per kWh CO ₂ [kg]
SKGT	1099	136,4 x 10³	354,6 x 10³	0,273 kg kool	0,71
CCGT	847	95,3 x 10³	238,25 x 10³	0,191 m ³ gas	0,48
OCGT	1563	175,8 x 10³	439,5 x 10³	0,352 m ³ gas	0,88
KC	1326	0,179	nihil	0,358 mg Uraan	nihil

Indien het oude model correct zou zijn, zou een bijdrage van 100 MW aan de elektriciteitsproductie door een windmolenpark, waardoor de centrale 400 in plaats van 500 MW hoeft te genereren per uur een besparing opleveren 100 000 maal groter dan de getallen in beide laatste kolommen. Dus bv. 48 ton CO₂ bij een CCGT!

3. Vigerend model

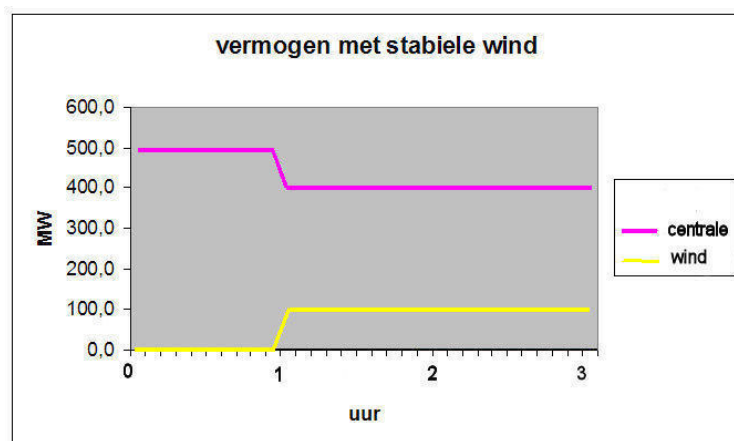
Op het oude model kwam kritiek. Wij droegen daaraan bij^{4,5,6}. Die werd in de Tweede Kamer besproken. De regering erkende dat fossiele centrales die de variatie in de windbijdrage moeten opvangen daardoor minder efficiënt draaien. Zij schatte dat de windwinst bij brandstofbesparing en CO₂-uitstoot daarom met 10% in vgl. tot die in het oude model moet worden verminderd.

De nieuwe schatting houdt rekening met rendementsvermindering aan de hand van zgn. 'heat rate curves' van de conventionele generatoren; bij gereduceerd vermogen is het rendement η lager dan bij vol(ontwerp)vermogen.

De aanname is dat *stationair* gereduceerd vermogen vergelijken met volvermogen de winstvermindering correct berekent.

Dit is onjuist. Maar laten wij eens bezien wat deze redenering voor onze model centrale oplevert. Wij zullen de rendementen bij vol vermogen en die bij gereduceerd vermogen in rekening brengen. Daartoe bezien we bv. wat in het 3^e uur in het plaatje 'vermogen met stabiele wind' gebeurt. Een generator draait dan stationair.

Die gereduceerde rendementen staan in tabel 4.



Tabel 4

Rendement¹ η van de gebruikte eenheden bij 80% & 60% van hun volvermogen.

Type generator	η_{vol}	$\eta_{80\%}$	$\eta_{60\%}$
SKGT	0,455	0,45	0,435
CCGT	0,59	0,57	0,55
OCGT	0,32	0,32	0,31
KC	0,377	0,367	n.v.t.

Hiermee en met de eerder gebruikte gegevens kunnen we verbruik en uitstoot van de centrale uitrekenen bij gereduceerd vermogen.

Tabel 5

Continu op 400 MW gereduceerd vermogen draaiende centrale, verbruik en uitstoot per uur.

Type generator	Brandstof/uur 400/ η [MWhr]	= kg/uur of m^3 /uur	Geproduceerde CO ₂ [kg/uur]	Per kWh conventioneel	Per kWh CO ₂ [kg]
SKGT	888,9	110,3 x 10 ³	286,8 x 10 ³	0,276 kg kool	0,718
CCGT	701,8	78,95 x 10 ³	197,4 x 10 ³	0,197 m ³ gas	0,493
OCGT	1250	140,6 x 10 ³	351,6 x 10 ³	0,352 m ³ gas	0,879
KC	1090	0,147	nihil	3,67 g Uraan	nihil

Tabel 6

Continu op 300 MW gereduceerd vermogen draaiende centrale, verbruik en uitstoot per uur.

Type generator	Brandstof/uur 300/ η [MWh]	= kg/uur of m^3 /uur	Geproduceerde CO ₂ [kg/uur]	Per kWh conventioneel	Per kWh CO ₂ [kg]
SKGT	690	85,7 x 10 ³	222,8 x 10 ³	0,286 kg kool	0,744
CCGT	545	61,4 x 10 ³	153,4 x 10 ³	0,205 m ³ gas	0,511
OCGT	968	108,9 x 10 ³	272,2 x 10 ³	0,363 m ³ gas	0,907
KC	n.v.t.	n.v.t.	nihil	n.v.t.	n.v.t.

Voor onze modelcentrale zou de brandstofbesparing en de verminderde CO₂-uitstoot dankzij de wind in procenten van het brandstofgebruik en de uitstoot zonder wind op de rekenwijze van de Nederlandse regering (en die van veel andere regeringen) zijn als in tabel 7.

Tabel 7

**Besparing brandstofverbruik en CO₂-uitstoot
Volgens het oude model en het vigerende model.**

Type generator	Oud model		Vigerend model	
	20% wind	40% wind	20% wind	40% wind
SKGT	20%	40%	19,1%	37,2%
CCGT	20%	40%	17,2%	35,6%
OCGT	20%	40%	20,0%	38,1%
KC	20% (U)	n.v.t.	17,9% (U)	n.v.t.

Deze berekening stemt aardig overeen met de geruststellende mededeling van de Nederlandse overheid aan het parlement: “10% minder winst”. (Voor 20% resp. 40% wind voor SKGT: 4,5%, resp. 7%, voor CCGT 14,0% resp. 11%, voor OCGT 0% resp. 4,7%). Voor kernenergie is de besparing irrelevant. Men is er terecht van uitgegaan dat de kolen- en kerncentrales nauwelijks meedoen met het opvangen van de variabiliteit van de wind.

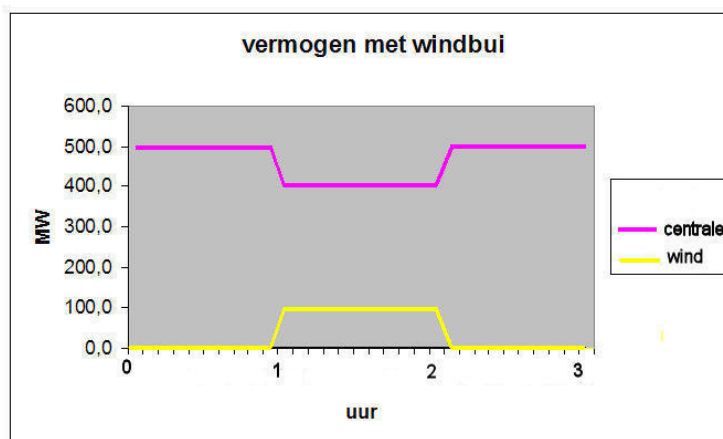
De uitkomsten van het vigerende model toont dus in alle gevallen een besparing op brandstof en een reductie van de CO₂-uitstoot. Dat beantwoordt aan de verwachting: Indien windstroom conventionele stroom vervangt, hoeven conventionele centrales minder te produceren. En dat bereikt men door de brandstoftoevoer te verminderen, ergo minder brandstofverbruik en minder uitstoot.

4. Fouten in het vigerende model

In voorgaande artikelen uitten wij onze twijfel, of de wind werkelijk brandstof en CO₂-uitstoot spaart^{4,5,6}. Wij bestreden de juistheid van het vigerende model. Net als een reeks andere onderzoekers in binnen- en buitenland, die soortgelijke bedenkingen hebben tegen grootschalig gebruik van windmolens bij de elektriciteitsproductie, stuiten wij op gebrek aan volledige gegevens^{10,11,12}.

Het is onjuist om bij de vergelijking van elektriciteitsproductie met- en zonder wind uitsluitend acht te slaan op de verminderde rendementen van de generatoren bij *stationaire* – constant over een lange periode – windinbreng. Het kenmerk (en probleem) van de windmolens is de variatie in het windaanbod. Dat op zichzelf al vervelend verschijnsel wordt versterkt doordat een verandering in de windsnelheid in de derde macht meetelt in de opbrengst van de molens (2 x meer wind geeft 8 x meer energie). Dit kan enigszins worden verbeterd door aanpassingen aan de molens. Het effect daarvan is echter nog onbekend.

Kijken wij bv. eerst eens naar een denkbeeldige windvariatie en de



invloed daarvan op de productie van onze modelcentrale.

We gaan uit van een stationaire toestand waarin de wind niets bijdraagt. Aan het eind van het eerste uur steekt de wind op. Het windpark gaat produceren. De productie neemt toe met 12 MW/minuut. In 8,33 min is het windstroomvermogen dan 100 MW. In dezelfde tijd moet onze modelcentrale het vermogen met 12 MW/min verminderen. Neem aan dat de wind een uur constant blijft. Na ongeveer een uur valt de wind weer weg en moet de centrale terug naar volvermogen met een toename van 12 MW/min. Volgens berekening met het vigerende model zouden we in dat uur met een CCGT generator aan **gas**

$$(95,3 - 78,9) \times 10^3 = 16,4 \times 10^3 \text{ m}^3$$

sparen. (Een CCGT zou een dergelijke verandering kunnen bijhouden. Een kolen- of een kerncentrale zou dat niet zo snel kunnen.) Dientengevolge zou $41 \times 10^3 \text{ kg CO}_2$ minder zijn uitgestoten.

In werkelijkheid is dat niet wat in een centrale gebeurt. Het af- en opregelen is beduidend minder efficiënt. Analyses van de feitelijke datastroom (verbruik op elk moment) van een Nederlandse steenkool gestookte eenheid toonden dat in dat geval het brandstofverbruik in werkelijkheid 1 à 1,2% *toeneemt*. Voor een CCGT zou dit ~ 1% zijn⁷. D.w.z. er wordt in dat uur

950 m³ gas

extra verbruikt (en 2,37 ton CO₂ meer uitgestoten) dan wanneer CCGT-generatoren gewoon op volvermogen waren blijven produceren. *De winst van het vigerende model is dus in werkelijkheid een verlies. De CO₂-uitstoot neemt toe in plaats van af.*

In hoeverre is de genoemde eenheid representatief. Gaat het hier niet om een bijzonder geval? Wij zijn wat dat betreft gerust. Enkele decennia geleden ongeveer tegelijk met de opkomst van de windelectriciteit, was er een andere 'hype', die van de privatisering. Nutsinstellingen in handen van gemeentelijke en regionale overheden werden verkocht aan particulieren. Sindsdien zijn allerlei productiegegevens niet meer beschikbaar. Voordien werkten de bedrijven samen in de SEP. Zij wisselden onderling gegevens uit en optimaliseerden de productie landelijk naar de laagste variabele kosten. Daartoe moesten de 'heat rate curves' van de afzonderlijke eenheden precies bekend zijn, geen theoretische maar experimentele gegevens. Het bleek dat het werkelijk brandstofverbruik altijd zo'n 0,3 – 0,5% hoger was dan het berekende. Dit opmerkelijke verschil is toegeschreven aan de 'hysterese' bij het schommelen. Variaties in de vraag noodzakten de generatoren om op- en af te regelen. Dat veroorzaakte het extra verbruik. Men moet bedenken dat slechts ca. 30% van de eenheden meedeed aan het schommelen. Zij zorgden voor de variatie opvang. De variatie in de vraag was overigens goed voorspelbaar. Die bestond min of meer uit twee volledige schommelingen per dag. En toch: 0,3 – 0,5% meer brandstof voor de hele topproductie per dag. Dit versterkt het vertrouwen in de generaliseerbaarheid van de test.

Wij beschouwen dit als een hard empirisch gegeven voor het gedrag van schommelende eenheden.

De windsnelheid varieert voortdurend en daarmee vrijwel tegelijk maar evenredig met de derde macht van de windsnelheid het vermogen van een windpark. Onze CCGT-generator moet constant worden af- en opgeregeld tegelijk met het toe- en afnemen van de wind. Een berekening die uitgaat van stationaire gegevens heeft dan dus geen zin!

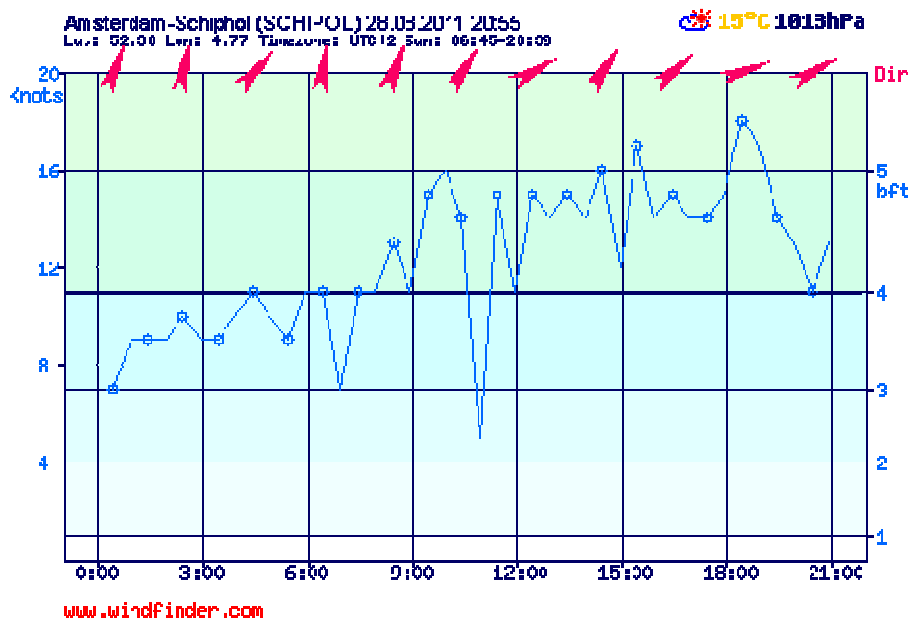
Fred Udo analyseerde onlangs de gegevens die EirGrid, de Ierse net-operator beschikbaar stelt⁸. Het zijn o.m. productie gegevens per kwartier zowel van de windparken als van de conventionele eenheden. EirGrid vermeldt ook uitstoot gegevens van CO₂ die met het vigerende model worden berekend. Udo laat zien dat de besparing miniem is in vergelijking tot de grote Ierse windcapaciteit. (In 2010: 9,8% van het totale verbruik van ~ 3½ GWyr.) En ook dat bij toenemende windpenetratie de besparing afneemt (!). Buitenlandse collega's meenden dat zijn publicatie de 'smoking gun' van de windmolenblunder op tafel legt.

5. Het resultaat van een dag wind

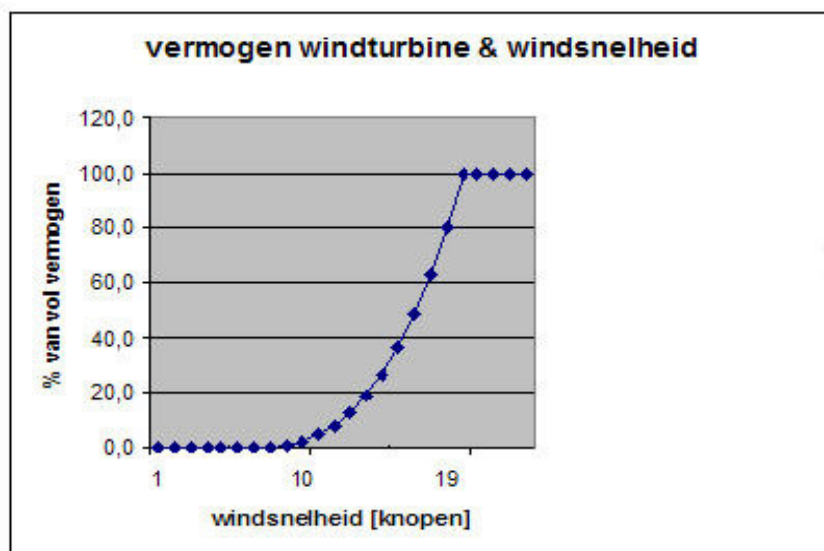
Wij zullen nu nagaan wat schommelen, het op- en afregelen (in het Engels 'cycling') van een conventionele centrale om de windvariatie bij te houden betekent voor de besparing. Wij zagen in de voorgaande § dat schommelen extra brandstof kost.

Een windturbine is voor zijn energieproductie afhankelijk van de energie inhoud van de passerende wind.

Beneden een windsnelheid van 5 knopen (~2,5 m/sec) levert hij geen stroom. (Ook al draaien dan soms nog de wieken. Dat is o.a omdat het beter is voor de lagers.) Bij ongeveer 19 knopen (~10 m/sec) levert hij zijn vol vermogen. Bij meer wind verandert dat niet meer. Boven 36 knopen worden de molens meestal stilgezet i.v.m. mogelijke beschadiging.



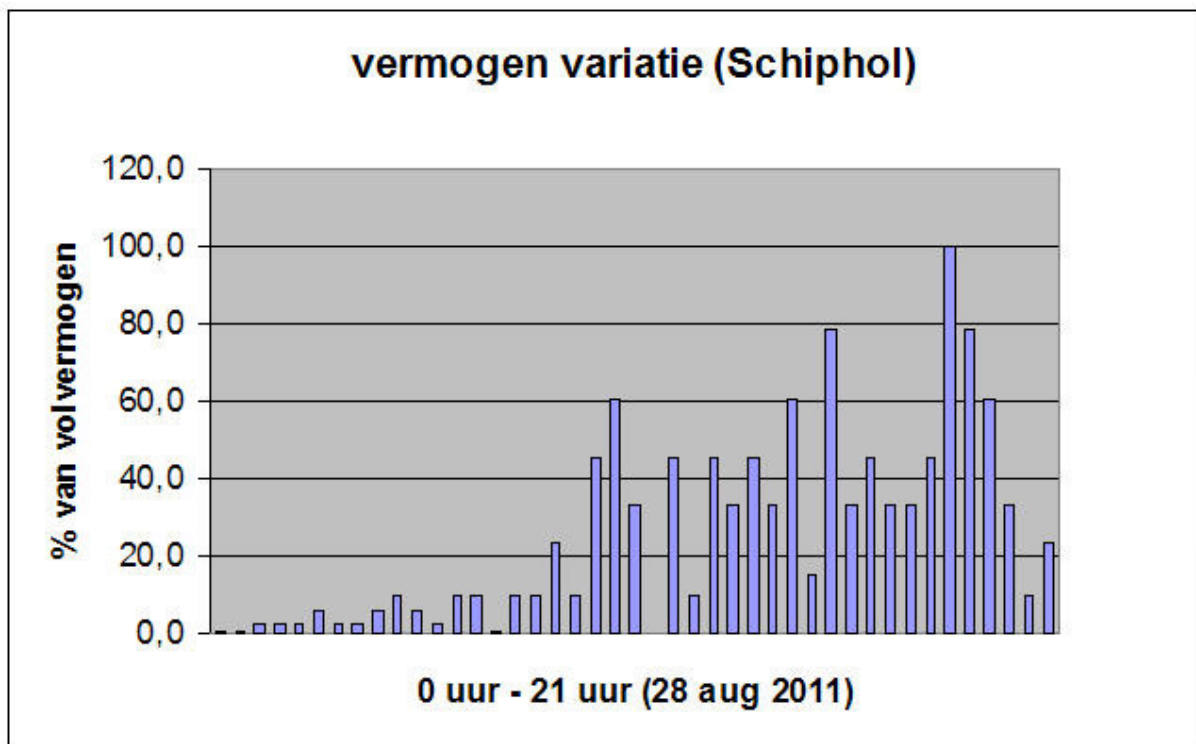
Hoe presteert het door ons als voorbeeld gekozen systeem op een 'gewone' winddag? Daartoe kijken we naar het windrapport⁹ van Schiphol op 28 augustus 2011. Van de daar geplaatste grafiek lezen we per half uur de windsnelheid af. Die bepaalt het vermogen van de windturbines op elk moment. En we



nemen weer aan dat de CCGT het windvermogen aanvult tot 500 MW. Van 0 – 5 knopen is het windvermogen nul vanaf 19 knopen blijft het vermogen 100% van de 100 MW die het denkbeeldige windpark bij gunstige wind en volvermogen zou leveren. De energieflex van de wind is evenredig met v^3 (v = windsnelheid). Tussen 0 bij windsnelheid 5 kn en 100% bij windsnelheid 19 kn interpoleren wij het windturbinevermogen m.b.v.

$$\propto 0,03644 \times (v - 5)^3 \quad (2)$$

Wat een windkracht afhankelijk verlies veronderstelt. (Het verlies dat bij $v \leq 5$ kn maakt dat er geen elektriciteit wordt geleverd.) Het vermogenverloop is in beeld gebracht in de grafiek ‘vermogen windturbine & windsnelheid’.



Wij kijken opnieuw naar onze 500 MW CCGT-centrale, die in combinatie met een windpark 500 MW vermogen moet leveren.

Op 28 augustus zou het park hebben gepresteerd als in het bovenstaande plaatje is weergegeven. Indien we de brandstofbesparing die een windpark van 100 MW oplevert berekenen m.b.v. het *oude model* – elk kWh wind spaart een kWh conventioneel met daarbij horend het fossiele verbruik berekend met het optimale rendement – voor elk half uur van de gegevens, dan levert de wind op die dag een besparing van 4,2% op het brandstofverbruik van de conventionele centrale, indien die alle stroom alleen zou hebben geleverd. (Details van de berekening staan in de appendix van dit artikel.)

Windstroom deskundigen rekenen voor Nederland met een capaciteitsfactor van de windmolens op het land van ~ 25%. Dat wil zeggen dat zij verwachten dat gemiddeld over het jaar een park met 100 MW naamplaatvermogen 25 MW effectief levert, een kwart van het maximale vermogen. Het maximale vermogen zou met 100 MW volgens het oude model 20% brandstof hebben bespaard. Dat wordt dus naar die schatting 5% effectief gemiddeld. Echter blijktens gegevens van het CBS (Statline) was over heel 2008 de opbrengst van de molens 22,63% van het opgestelde vermogen. Hetgeen voor een gemiddelde dag voor onze model

centrale 4,5% besparing zou hebben betekend. We zien dus dat 28 augustus een vrijwel gemiddelde winddag in het jaar 2008 was.

6. Schommelen (= cycling, op- en afregelen).

De Schiphol data geven ons de windsnelheid elk half uur (i). M.b.v. (2) kunnen we het windvermogen, $P_{w,i}$, elk half uur berekenen voor parken van 100, 200 en 300 MW. Daarmee weten we ook elk half uur het vermogen, $P_{GT,i}$, dat de conventionele eenheden moeten leveren om aan de eis, constant 500 MW te voldoen:

$$P_{GT,i} = 500 - P_{w,i} \quad (3)$$

In het vigerende model rekt men alsof de overgang van het ene vermogensniveau naar het volgende instantaan gebeurt, dus abrupt van het ene vermogen van stationaire operatie naar het volgende. Dit beschrijft natuurlijk niet de werkelijkheid. Wij zullen gebruik maken van een uit de thermodynamica bekende methode van quasi stationaire veranderingen. Daarbij nemen wij aan dat tijdens het op- en afregelen, dat een zekere tijd in beslag neemt, voortdurend een toestand van evenwicht blijft bestaan. Bij een enkele schommeling verschilt de uitkomst van de berekening met quasi stationaire model weinig van die van het vigerend model. Maar bij voortdurende schommelingen maakt het wel degelijk een verschil.

De uitkomst van het quasi stationaire model corrigeren wij vervolgens voor het irreversibele schommelproces, waarbij wij gebruik maken van de experimentele gegevens van § 4.

Wij weten wat af- en opregelen doet in het geval van een 100% naar 80% en terug naar 100% schommeling in een uur van een op CCGTs draaiende centrale. Bij een verandering van 12 MW/min – die is goed haalbaar voor dit soort eenheden – hebben we dus eerst een periode van 8,3 min waarin het vermogen terugloopt en er brandstof wordt gespaard. Dan een stationaire toestand van 43,4 min op het lagere niveau en dus met minder brandstof verbruik en vervolgens een toeneming weer in 8,3 min tot vol vermogen, waarin extra gestookt moet worden.

Omdat η slechts weinig verloopt tussen twee opeenvolgende stationaire toestanden kunnen we tijdens het schommelen met een gemiddelde rekenen van de twee niveaus: $\frac{1}{2}(\eta_{i-1} + \eta_i)$. De details van de berekening staan in de appendix.

Wij vinden bij genoemde schommeling een besparing m.b.v. het quasi stationaire model. Feitelijk is er echter in dat uur een netto meerverbruik van 1% van het vermogen op (i-1). Het verschil tussen die besparing en het experimenteel gevonden verlies is het *netto schommelverlies*.

Dit netto schommelverlies is puur het gevolg van het niet evenwichtsproces. Zolang de veranderingssnelheid van 12 MW/min niet wordt overschreden zou een even groot verlies optreden bij een zelfde schommeling in een periode van een half uur. Alleen de tijd van stationair draaien vermindert.

De verliezen bij een willekeurige schommeling op een willekeurig niveau zijn afhankelijk van de schommeluitslag, de amplitude, en daardoor ook van de tijd. Hoe groter de amplitude, hoe langer het duurt voor er weer stationaire productie is. In principe speelt ook het vermogen niveau een rol.

Om de berekeningen uit te voeren maken wij de volgende veronderstellingen:

1. Het netto schommelverlies hangt *niet* af van het vermogensniveau. (Waarschijnlijk zijn de verliezen bij een laag conventioneel vermogen – meer windvermogen – groter. De relatieve verschillen zijn er groter en de CCGTs hebben daar een lagere efficiëntie.)
2. Het netto schommelverlies is evenredig met de amplitude. Het is nul indien de amplitude = 0 (stationair) en bij een amplitude van 100 MW is het gelijk aan dat in het voorbeeld.
3. Gedurende de halve uren van de windgegevens zien we alleen halve schommelingen. Wij nemen aan dat we dan ook slechts het halve schommelverlies lijden. Omdat de windsnelheid na verloop van tijd altijd weer terugkeert naar een eerdere waarde, zal onze CCGT centrale op den duur evenveel op- als neer regelen, wat deze veronderstelling rechtvaardigt.

Met deze gegevens en aannames kunnen we voor elk half uur de besparingen van het systeem berekenen: de quasi stationaire besparing minus het desbetreffende netto schommelverlies. Sommering over de 21½ halve uren en vergelijking met het brandstofverbruik van de gasturbines gedurende 21½ uur vol vermogen geeft het besparingspercentage over die tijd.

Omdat Nederland met een wind bijdrage in 2008 van 3,9% van de elektriciteitsproductie en een opgesteld windvermogen van ~ 2 GW plannen heeft voor uitbreiding tot 12 GW in 2020, hebben wij de berekening niet slechts uitgevoerd voor een windpark van 100 MW, maar ook voor 200 en 300 MW. Het laatste komt dan in ons model relatief aardig overeen met de landelijke toestand in 2020.

De uitkomsten m.b.t. het schommelen van conventionele centrales als gevolg van de toevoeging van windelektriciteit staan in tabel 8 (§ 9) tezamen met die welke het oude en het vigerende model zouden hebben gegeven. In dezelfde tabel zijn ook de gevolgen van andere beperkende factoren te zien. Voor de berekeningen verwijzen wij naar de appendix.

7. Discussie en conclusies

Het resultaat verschilt flink van de besparing op brandstof (en de daarmee corresponderende CO₂-uitstoot) zoals die door de Nederlandse regering en andere, zoals bv. EirGrid, worden aangenomen. De laatste werden berekend met het vigerend model. Het irreversibele schommelproces maakt dat de besparingen die *het vigerend model opleveren niet deugen*.

Tevens blijkt bij meer windvermogen de besparingsgroei af te nemen. Die trend werd ook door Udo gevonden bij analyse van de gegevens van EirGrid⁸.

Ons vermoeden en dat van vele anderen (zie bijv. Refs. 10, 11 & 12) dat de investering in windmolens niet gerechtvaardigd wordt door besparing op brandstof en CO₂-uitstoot is door verdiscontering van de gevolgen van het veelvuldig op- en afregelen sterker dan ooit.

Het BENTEK-onderzoek¹³ gebruikmakend van de feitelijke uitstootgegevens in Texas en Colorado, regio met een met Nederland redelijk vergelijkbare brandstof mix, bracht ook al aan het licht dat daar de wind geen besparing of CO₂-uitstootvermindering brengt.

Men moet steeds in gedachten houden dat het opgestelde conventionele vermogen in het land bij zelfvoorziening toereikend is om aan de elektriciteitsvraag te voldoen. De windparken komen er slechts als technisch onnodige, extra investering bovenop. Uiteraard zijn de

resultaten van een enkele winddag, ook al oogt die aardig representatief voor het gedrag van de wind in ons land, niet voldoende om definitieve conclusies te trekken.

De door ons gebruikte feitelijke data omtrent schommeling van de diverse conventionele eenheden zijn niet toereikend om het effect ervan nauwkeurig te berekenen. Wij dringen al jaren aan op vrijgeven van die gegevens. De nu gebruikte algoritme op basis van twee reële data zijn slechts een redelijke benadering. De feitelijke brandstofbesparing door de molens als functie van de veranderlijke wind moet dus nog verder worden verfijnd.

Hetzelfde geldt voor het feitelijke gedrag van de vele productie-eenheden, elk met hun eigen karakteristieken. Wij compenseerden de windvariatie tot nu toe alleen met moderne CCGTs. In de praktijk spelen ook andere generatoren hun rol.

8. Complicaties en hun gevolg.

Er zijn buiten de afname van de rendementen bij lagere vermogens en het schommel effect andere redenen waarom de tot nu toe gebruikte schattingen over de voordelen van wind geen goed beeld geven van de werkelijke brandstofbesparing en vermindering van de CO₂-uitstoot. Zij werden ook in de studies van de gegeven referenties weliswaar hier en daar aangeduid, maar niet in de feitelijke berekeningen meegenomen. Wij zullen die hieronder achtereenvolgens bespreken en uiteen zetten hoe wij die factoren in onze berekeningen verdisconteren.

8.1 Energiekosten van bouw en installatie van windturbines.

Moderne windmolens zijn grote constructies. Zij vergden energie verkregen uit fossiele brandstof voor hun onderdelen en voor de installatie. Een van de bedrijven die dit soort werkzaamheden verricht, zie ref. 5, noot 13, heeft dit eerder al nagegaan. Het komt er op neer dat een windmolen gedurende een periode van 1½ jaar stroom moet produceren om deze energie investering terug te verdienen. Deze investering moet worden afgeschreven tijdens de volle levensduur van de machine. De voorstanders van windelektriciteit veronderstellen dat die levensduur 25 jaar is. Wij hebben echter recent gezien dat een heel windpark – dat van NUON op de IJsselmeerdijk - al na 12 jaar moest worden vernieuwd. Daarom achten wij een levensduur van 15 jaar realistischer. De condities op open zee zijn ongunstiger, waardoor de levensduur daar zeker niet langer zal zijn. Wij rekenen daarom met een afschrijving van de energiekosten in 15 jaar. (Om de windvoorstanders ter wille te zijn, zullen we ook de resultaten tonen van een berekening waarin van een levensduur van 30 jaar wordt uitgegaan.) Gebruikmakend van de gegevens van de research afdeling van Kon. Volker Wessels Stevin en een levensduur van 15 jaar moet er 10% van de energie opbrengst van de molens worden afgetrokken voor het berekenen van de besparing. Indien we een onrealistische levensduur van 30 jaar hanteren is de aftrek 5%. Voor rekendetails verwijzen wij naar de appendix.

8.2 Energiekosten van de bekabeling en de net adaptatie van windelektriciteit.

Net als in § 8.1 moet bij de becijfering van de opbrengst rekening worden gehouden met de energiekosten van de bekabeling en de installaties – omvormers en transformatoren - nodig voor de inpassing van de windstroom in het net. Ook hierbij gaat het niet om verwaarloosbare kleinigheden. Duitsland moet voor de uitvoering van zijn windplannen tot 2020 bijv. 2700 km extra hoogspanningsleidingen aanleggen. Nederland heeft o.a met het oog op de windstroom

onderzeese kabels moeten aanleggen voor verbindingen met Noorwegen en Engeland. De Noorse connectie moest al na twee jaar gedeeltelijk worden vernieuwd. Het nieuwe 'off shore' windpark 'Gwynt y Môr' van de Engelsen gaat ca. 2 G€ kosten. Daarvan is 1,2 G€ bestemd voor de molens. De rest is bestemd voor de hier bedoelde bekabeling en aansluiting. Wij sluiten in onze berekeningen daarom een zelfde afschrijving van de energiekosten in als die in § 8.1 voor de molens zelf zijn genoemd, resp. 10% en 5% van de opbrengst. (TenneT is om nadere gegevens gevraagd.)

8.3 Inzet van gasturbines met een laag rendement.

Voor de opvang van de windvariaties zijn kolengestookte en nucleaire centrales ongeschikt. Hun schommelsnelheid is daarvoor te laag. De netstabilisatie wordt derhalve bereikt door gasturbines. Grosso modo zijn er daarvoor twee types: CCGTs en OCGTs. CCGTs zijn schitterende instrumenten. Hun optimale thermische efficiëntie zal over niet al te lange tijd tot 60% toenemen. Zij zijn echter minder geschikt om snelle fluctuaties op te vangen. Denk aan periodes van $\sim \frac{1}{2}$ uur. Maar veelvuldig op- en afregelen is schadelijk voor hun levensduur en vergroot het onderhoud, zie hierna. OCGTs aan de andere kant kunnen wel snelle variaties aan. Denk daarbij aan enkele minuten. Maar hun efficiëntie is helaas laag. Die ligt voor de bestaande machines rond de 0,32, d.w.z. ongeveer half zo goed als hun mooie zusters. Nieuwere OCGTs kunnen onder optimale condities een rendement halen van 0,34. Maar wij hebben in Nederland een behoorlijk aantal oudere opgesteld, die zeker tot na 2020 operationeel blijven.

Variaties in de elektriciteitsvraag maken op- en afregelen van centrales tot een normale routine in de elektriciteitsvoorziening. Echter die variaties zijn goed voorspelbaar. Zij komen in hoofdzaak neer op twee schommelingen per etmaal. De veel frequentere windvariaties komen daar dus vrijwel in hun geheel bovenop. Dat we hier niet te maken hebben met een verwaarloosbare complicatie werd onlangs nog komisch geïllustreerd in een televisie interview met de directeur van de Gasunie, de voornaamste gasleverancier van de sector. Hij antwoordde op de vraag over de grote uitbreidingen van het gasnet die momenteel worden uitgevoerd: "Dat is omdat al die wind zoveel gas vraagt."

De gecentraliseerde net regulering wordt in belangrijke mate bepaald door de frequentie regulering. (50 Hz moet 50 Hz blijven en faseverschuiving moet worden voorkomen.) Dit vergt uiterst gespecialiseerde manipulatie van de beschikbare generatoren. Als gevolg daarvan is het vaak nodig eenheden op minder dan hun ontwerpvermogen te laten draaien. Dat gaat uiteraard ten koste van de efficiëntie. Het is dus nodig regelmatig OCGTs in te zetten om aan de netstabiliteitseisen te kunnen voldoen.

Wij veronderstellen dat in het voorbeeld met windparken met vermogens van resp. 100 MW, 200 MW en 300 MW een extra inzet van OCGTs ter opvang van de snelle veranderingen nodig is van 3%, 6% en 10%. Die vervangen dan voor dat aandeel het gebruik van de efficiënte CCGTs.

In onze berekeningen verminderden we daarom de effectieve η van de conventionele in hoofdzaak CCGT-installaties overeenkomstig de genoemde percentages met de η van de OCGTs, waarvoor wij $\eta_{\text{OCGT}} = 0,32$ gebruikten. (Zie appendix.)

8.4 Zelfverbruik.

Windmolens produceren niet alleen elektriciteit. Zij verbruiken ook stroom. Zij hebben elektriciteit nodig om te starten en bepaalde onderdelen moeten worden verwarmd. Ook de

omvormers verbruiken stroom in periodes waarin niet wordt geproduceerd. De Engelse consumentenorganisatie ‘WHICH?’ ontdekte dat kleine molens voor privé gebruik over een langere tijd meer stroom verbruiken dan leveren. De ‘omvormer’ bleek de grootste boosdoener. Het is niet bekend of de CBS-gegevens netto productiecijfers zijn. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat de molens indien zij stroom produceren, in hun eigen behoefte voorzien. Maar als dat niet het geval is, kan dat niet.

Bij gebrek aan gegevens zullen wij in onze berekeningen dit verlies niet meenemen.

8.5 Extra slijtage.

Levensduur en onderhoud van conventionele eenheden hangt grotendeels af van de mate van op- en afregelen. Meer dan van het aantal stationaire bedrijfsuren. Schommelen is als gezegd normaal bij elektriciteitsproductie, maar de verbinding met de wind vergroot die activiteit. De windfluctuaties zijn ook minder voorspelbaar dan variaties van de vraag, waardoor de schommelactiviteit slechter te plannen is. Dit nadeel was reden voor onze regering om er een speciale studie aan te wijden. Het rapport daarover werd gemaakt door een onderzoeksgroep van de TU Delft. Het verscheen in april 2009¹. Dat rapport bevat ernstige waarschuwingen voor deze complicatie.

In de Verenigde Staten zijn dankzij de inbreng van windelektriciteit reeds verschillende consulting firma’s actief, wier werk het is elektriciteitsproducenten te adviseren over efficiënte manieren om het op- en afregelen uit te voeren om zodoende meer dan de absoluut noodzakelijke brandstofverliezen en slijtage van de installaties te beperken.

Het extra onderhoud en de levensduurverkorting van de conventionele installaties moet consequenties hebben in termen van energiekosten.

Wij moeten bij gebrek aan informatie over de omvang van dit verlies deze factor in onze berekeningen buiten beschouwing laten.

8.6 Draaiende reserve.

In actuele situaties moeten conventionele productie eenheden soms worden uitgeschakeld als gevolg van de voorrang die windelektriciteit op het net heeft. (Die voorrang is niet slechts het gevolg van een regeringsbepaling. Ook de subsidieregeling voor windelektriciteit bevordert die. Indien als gevolg van vraag en aanbod de stroomprijs voor conventionele centrales daalt tot beneden de kostprijs van bv. 5 cent, zullen zij hun levering stilzetten. Een windproducent, die voor elke kWh geleverd 10 cent gegarandeerd ontvangt, zal in dat geval nog met profijt blijven leveren. Pas bij negatieve prijzen van meer dan 10 cent haken ook zij af.)

In zulke situaties moeten de conventionele eenheden vanwege lange opstarttijden, voorkoming van grote slijtage en ter bewaking van de netstabiliteit vaak ijdel blijven doordraaien ook al leveren ze dan geen stroom. Die ‘draaiende reserve’ kost brandstof.

Gegevens over de omvang van dit verschijnsel en het aandeel daarvan dat aan de windelektriciteit is te wijten, zijn er niet.

Om die reden laten we ook dit verlies in onze berekeningen buiten beschouwing.

9. Slotsom

Met verwijzing naar details over de berekeningen in de appendix hebben wij de resultaten van de berekeningen bijeengebracht in tabel 8. Om een indruk te geven van de invloed van de

afzonderlijke factoren hebben wij de gevolgen ervan in het overzicht opgenomen. Het spreekt vanzelf dat het uiteindelijk gaat om de uitkomsten met inbegrip van *alle* relevante factoren. Die staan in de regel met groene achtergrond. Negatieve cijfers zijn rood. Het zijn de verliezen, d.w.z. meer brandstofverbruik en meer CO₂-uitstoot dan wanneer de stroomvoorziening alleen door de gasturbines zou zijn verzorgd. De percentages hebben betrekking op het verbruik van de 500 MW conventionele centrale op vol vermogen.

Merk op dat het conventionele vermogen op zichzelf toereikend is om aan de vraag te voldoen. *Het blijkt, dat de besparing die 100 MW, 200 MW en 300 MW windvermogen toevoegt negatief is. Er wordt dus meer brandstof gebruikt en meer CO₂ uitgestoten dan indien de elektriciteitsvoorziening geheel conventioneel zou hebben plaatsgevonden.*

Tabel 8

De brandstofbesparing van een windpark met naamplaatvermogen, V, in de buurt van Schiphol zou op 28 aug. 2011 – een normale Hollandse winddag – gecombineerd met een moderne efficiënte conventionele generator, CCGT + een kleine OCGT-bijdrage bij constant totaal vermogen van 500 MW, zijn geweest:

V	100 MW wind	200 MW wind	300 MW wind
Oud model	4,2%	8,3%	12,5%
Quasi stationair ≈ vigerend model	3,5%	7,1%	10,7%
Met inbegrip van ‘schommelen’	1,4%	2,9%	4,4%
Idem+energiekosten, 15 jaar	0,6%	1,2%	1,9%
Idem+energiekosten, 30 jaar	1,0%	2,0%	3,1%
Alle factoren+fractie OCGT, 15 jaar	-0,8%	-1,4%	-2,3%
Idem, 30 jaar	-0,3%	-0,5%	-1,0%

WINDSTROOM IS MILIEU ONVRIENDELIJK

Een 300 MW windpark bij Schiphol op 28 augustus 2011, een normale Nederlandse winddag, zou gedurende 21,5 uur de hoeveelheid **aardgas nodig voor de elektriciteitsproductie van 500 MW met 47150 m³ gas hebben verhoogd. Dit zou een extra emissie van 117,9 ton CO₂ in de atmosfeer hebben gegeven.**

Het is zonneklaar. Een besluit tot miljardeninvesteringen in windmolens om brandstof te sparen en om CO₂-uitstoot te verminderen is onverantwoord. Er wordt niets gespaard, integendeel. Wij achten het onwaarschijnlijk dat betere kennis van de factoren die het systeem beïnvloeden de hier berekende uitkomsten drastisch zouden wijzigen.

Nieuwegein, 2011 10 08.
Laatst gewijzigd: 2011 10 10.

Referenties

- ¹) G. Dijkema, Z. Lukszo, A. Verkooijen & L. de Vries, M. Weijnen: De regelbaarheid van elektriciteitscentrales; een quickscan i.o.v. het Ministerie van Economische Zaken, 20 april 2009. (η's afgelezen van grafiek 9.2.)

-
- 2) Oscar Vlijmen:
<http://home.kpn.nl/vanadovv/Eenhset.html>
 - 3) http://www.co2minderen.be/UW_CO2-PROFIEL/uw_co2-profiel.htm
 - 4) K. de Groot & C. le Pair: De brandstofkosten van windenergie; een goed bewaard geheim; SPIL 263 - 264 (2009) nr. 5, p.15/17 &
<http://www.clepair.net/wind-SPIL-1.html>
 - 5) C. le Pair & K. de Groot: De invloed van elektriciteit uit wind op fossiel brandstofverbruik.
<http://www.clepair.net/wind-SPIL-2.html>
 - 6) F. Udo, K. de Groot & C. le Pair: Windmolens als stroombron
<http://www.clepair.net/windstroom%20e+nl.html>
 - 7) KEMA: priv. comm.
 - 8) F. Udo: Wind energy in the Irish Power System
<http://www.clepair.net/IerlandUdo-e.html>
 - 9) www.windfinder.com
 - 10) Kent Hawkins: Wind Integration Realities: Case Studies of the Netherlands and of Colorado.
<http://www.masterresource.org/2010/05/wind-integration-realities-part-i>
 - 11) W. Post: Wind Power and CO₂ emissions.
<http://theenergycollective.com/willem-post/57905/wind-power-and-CO2-emissions>
 - 12) Hugh Sharman: Wind energy, the case of Denmark.
http://www.cepos.dk/fileadmin/user_upload/Arkiv/PDF/Wind_energy_-_the_case_of_Denmark.pdf
 - 13) How less became more: Wind power and unintended consequences in the Colorado energy market; by BENTEK Energy

Appendix

Gas, Wind en CO₂ op Schiphol

De crash van de windmolens.

Oud Model.

De thermische efficiëntie van een generator, η , is gedefinieerd als:

$$\eta = E / Q \quad (1)$$

Hierin is E = de geproduceerde elektrische energie, [kWh]

Q = de benodigde warmte; zelfde eenheden.

De warmte nodig voor de productie van 1 kWh is:

$$1 / \eta \text{ kWh} = 1000 / \eta \text{ Wh} = 3,6 \times 10^6 / \eta \text{ Ws (J)} \quad (2)$$

Tabel
De vermogensafhankelijkheid.

η is vermogensafhankelijk				
vermogen	η steenkool	η CCGT	η OCGT	η nucleair
100%	0,455	0,59	0,32	0,377
80%	0,45	0,57	~	0,37
60%	0,43	0,55	~	n.v.t.
40%	n.v.t.	0,49	~	n.v.t.

NB: Deze η -waarden zijn gemeten bij stationair draaiende generatoren.

Zij gelden niet indien de generator op- of afregelt naar een ander vermogensniveau!

De cijfers maken het mogelijk de warmte energie of het –vermogen te berekenen die nodig is om elektrische energie of vermogen te produceren. (Vermenigvuldig met $1/\eta$). Zelfde eenheden gebruiken! In het artikel gebruiken we MWh & kWh, of MW & kW. Indien nodig voegen we het subscript "therm" toe, als warmte is bedoeld..

Tabel 1 (in het rapport) meldt de latente warmte van aardgas ($32 \times 10^6 \text{ J/m}^3$). Dus 1 kWh elektrische energie vergt $6,10 / 32 \text{ m}^3 = 0,19 \text{ m}^3$ gas.

De CO₂-emissie bij gasverbranding staat in dezelfde tabel ($2,5 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$).

Dat geeft $0,475 \text{ kg CO}_2$ voor 1 kWh elektriciteit.

In het oude model is dit de besparing die 1 kWh windelektriciteit oplevert.

Vigerend

model

De thermische efficiëntie hangt af van het vermogensniveau. Het is maximaal op ontwerp(vol)vermogen. En lager in 'deellast'. Voorgaande tabel geeft de mogelijkheid de relatieve besparingen te berekenen bij verschillende vermogens.

$$\{(\text{vermogen } 100\%)/\eta_{100\%} - (\text{vermogen } X\%)/\eta_{X\%}\} / \{(\text{vermogen } 100\%)/\eta_{100\%}\} \quad (3)$$

Relatieve tegenvallers zijn op dezelfde manier berekend:

$$(\text{besparing oud model} - \text{besparing vigerend model}) / (\text{besparing oud model}) \quad (4)$$

In de berekeningen gebruiken we η -waarden op allerlei vermogenniveaus van CCGTs. Die interpoleerden we m.b.v. rechte lijnen. Een voor het gebied 100% - 60% en de ander tussen 60% en 40%.

Wanneer windstroom het net ingaat, moeten de conventionele eenheden terugregelen. Als ze dan weer stationair draaien kan het brandstofverbruik met de daar geldende η -waarden gevonden worden. Dit levert de besparingscijfers in tabel 7 van het rapport. Bij gedetailleerde berekeningen aan de hand van gemeten windsnelheden interpoleerden wij deze η -waarden als gezegd.

Quasi stationair schommelen

Quasi stationair schommelen is een theoretische constructie die geen niet-evenwichts verschijnselen van schommelen omvat. Hierin veronderstellen we dat tijdens het schommelen, waarvoor tijd nodig is, het brandstofverbruik op elk moment kan worden berekend met de op dat vermogensniveau geldende η . Wij splitsen het verbruik gedurende een half uur in een schommeldeel en een stationair deel. Het eerste duurt $t_{r,i} = \Delta_i / 12$ min. Het tweede, stationaire deel: $t_{s,i} = 30 - \Delta_i / 12$ min.

$$\Delta_i = |P_{GT,i-1} - P_{GT,i}| \quad (5)$$

Hierin staat $P_{GT,i}$ voor het vermogen van de CCGT+ gedurende een half uur (i). Bijgevolg is het quasi stationaire brandstofverbruik gedurende elk half uur, $F_{qs,i}$:

$$F_{qs,i} = (t_{r,i} / 60) \times (P_{GT,i-1} + P_{GT,i}) / (\eta_{i-1} + \eta_i) + (t_{s,i} / 60) \times P_{GT,i} / (\eta_i) \quad [\text{MWh}_{\text{therm}}] \quad (6)$$

Het brandstofverbruik tijdens dat halve uur moet worden vergeleken met dat van een CCGT+ zonder windbijdrage. Die is: $1/2 \times 500 / \eta_{100\%}$ $[\text{MWh}_{\text{therm}}]$.

Het quasi stationaire model geeft dus een brandstofbesparing, $S_{qs,i}$:

$$S_{qs,i} = 1/2 \times 500 / \eta_{100\%} - F_{qs,i} \quad [\text{MWh}_{\text{therm}}] \quad (7)$$

Cycling.

Gedurende een volledige schommel in één uur van 100% vermogen terug naar 80% en op naar 100% gebruikt de CCGT 1,01 keer de brandstof, die het zou gebruiken tijdens een uur op 100%. D.w.z.: $1,01 \times 500 / \eta_{100\%} = 855,9 \text{ MWh}_{\text{therm}}$. Als die eenheid stationair zou draaien, zou hij 847,5 $\text{MWh}_{\text{therm}}$ hebben gebruikt. Het verschil, 8,44 $\text{MWh}_{\text{therm}}$ komt overeen met 950 m^3 gas.

Volgens het quasi stationaire model zou het gebruik zijn: $F_{\text{qs},80\%}$ met

$$t_{r,80\%} = 2 \times 100 / 12 = 16,7 \text{ min}$$

$$t_{s,80\%} = 60 - t_{r,80\%} = 43,3 \text{ min}$$

$$\eta_{100\%} = 0,59$$

$$\eta_{80\%} = 0,57$$

$$P_{\text{GT},100\%} = 500 \text{ MW}$$

$$P_{\text{GT},80\%} = 400 \text{ MW}$$

Wat oplevert: $F_{\text{qs},80\%} = 722,4 \text{ MWh}_{\text{therm}}$.

Het betekent dat het *netto schommelverlies* is: $855,9 - 722,4 = 133,5 \text{ MWh}_{\text{therm}}$.

Hetzelfde netto schommelverlies zou optreden, als het had plaatsgevonden in een half uur, zo lang de schommelsnelheid 12 MW/min was gebleven.

Voor een halve schommeling veronderstellen we dat het half zoveel is: 66,75 $\text{MWh}_{\text{therm}}$. In overeenstemming met de veronderstellingen in § 6: 1, 2 & 3 kunnen we nu voor elk half uur de echte brandstofverbruik besparing berekenen door het quasi stationaire resultaat ($S_{\text{qs},i}$) te corrigeren met het netto schommelverlies $C_i = (\Delta_i / 100) \times 66,75 \text{ MWh}$.

Op die manier verkrijgen we voor de brandstof bespaard elk half uur:

$$S_i = S_{\text{qs},i} - C_i \quad [\text{MWh}_{\text{therm}}] \quad (8)$$

De som daarvan,

$$\sum_i S_i \quad [\text{MWh}_{\text{therm}}] \quad (9)$$

Geeft de totale besparing voor de hele periode rekening houdend met het schommeleffect.

Energiekosten voor constructie en installatie, bekabeling en net adaptatie van windturbines

Wij voerden dit uit voor levensduren van 15 en 30 jaar en combineerden de adaptatie en de constructie. In het laatste geval moeten we voor beide 5% aftrekken van de geproduceerde windelektriciteit, samen 10%.

In het eerste 10% elk, of 20% samen. Deze verminderde elektrische energie werd geleverd door de gasturbines. Met als gevolg extra energie verbruik. Die berekenen we met $\eta_{100\%}$.

Windvermogen	100 MW	200 MW	300 MW
wind el. Productie [MWh]	448,7	897,4	1346,1
Levensduur 30 yr [MWh]	44,9	89,7	134,6
Levensduur 15 yr [MWh]	89,7	179,5	269,2
Brandstof (30 yr) [$\text{MWh}_{\text{therm}}$]	76,1	152,2	228,2

Brandstof (15 yr) [MWh _{therm}]	152,1	304,2	456,3
---	-------	-------	-------

De geel gemarkeerde hoeveelheden moeten worden afgetrokken van de besparingen resulterend in de vorige § om de energie investering in bouw, plaatsing en connectie te incorporeren.

Meer OCGTs.

Overeenkomstig § 8.3 veronderstellen we dat t.g.v. de eisen van netstabiliteit, m.a.w. ter compensatie van snelle windvariaties, een deel van de hoog efficiënte CCGTs vervangen wordt door OCGTs. Die kunnen sneller gereguleerd worden. Hun efficiëntie is minder dan die van een CCGT. De veronderstelling is: voor 3% bij een windpark van 100MW. Bij 200 MW en 300 MW resp.: 6% en 10%. Wij vinden dan een nieuwe effectieve η_{eff} op de volgende manier:

Eerst berekenen we de gemiddelde η gedurende de 21,5 uur van CCGT werk. Die verschillen licht voor de verschillende windparken:

$$\eta_{\text{av},100} = 0,5858$$

$$\eta_{\text{av},200} = 0,5817$$

$$\eta_{\text{av},300} = 0,5771$$

Die gebruiken we samen met de elektriciteitsproductie van de gasturbines zonder schommelen en levensduur correctie. Dat levert de verbruikte brandstof gedurende de 21½ uur indien er geen OCGTs nodig zouden zijn geweest. (Resp. 10301,3 MWh; 9852,6 MWh & 9403,9 MWh) Vervolgens berekenen we de effectieve η van de combinatie van CCGT & OCGT:

$$\eta_{\text{eff},100} = 0,97 \times 0,5858 + 0,03 \times 0,32 = 0,5778$$

$$\eta_{\text{eff},200} = 0,94 \times 0,5817 + 0,06 \times 0,32 = 0,5660$$

$$\eta_{\text{eff},300} = 0,90 \times 0,5771 + 0,10 \times 0,32 = 0,5514$$

Met deze waarden berekenen we opnieuw het brandstofverbruik van de gasturbines. Het verschil met de vorige is het brandstofverlies als gevolg van de vervanging. Dat is in die 21½ uur op 28 augustus: 243,7 MWh_{therm}; 469,9 MWh_{therm} & 759,8 MWh_{therm}.

Deze hoeveelheden moeten worden afgetrokken van de hiervoor gevonden besparingen. Het resultaat staat samen met de eerder berekende pseudo besparingen in tabel 8 van het rapport. Het is negatief in alle configuraties.

Slotsom

Een verlies van 2,3% van het totale brandstofverbruik met een 100% draaiende 500 MW generator komt neer voor de 21½ uur periode op:

$$0,023 \times 21,5 \times 500 / 0,59 = 419,1 \text{ MWh}_{\text{therm}} \quad (10)$$

Dit komt overeen met $419,1 \times 10^6 \times 3600 = 1508,8 \times 10^9 \text{ J}$.

Waarvoor nodig zou zijn geweest $1508,8 \times 10^9 / 32 \times 10^6 = 47150 \text{ m}^3 \text{ gas}$.

Dat zou uitgestoten hebben $2,5 \times 47150 = 117,9 \text{ ton CO}_2$ in de atmosfeer.

-o-o-o-o-o-o-

