

AUTONOOM BEDRIJF IN HET TERSCHELLING PV/WIND SYSTEEM

J.H. Boumans, M.J. Hoelijmakers*, E.W. ter Horst, K. Blok

1. SAMENVATTING

Eén van de doelstellingen van het PV/wind systeem op Terschelling is het onderzoeken van het functioneren van het systeem in autonoom bedrijf.

Ten behoeve van de blindvermogenhuishouding zijn de verschillende componenten van het systeem doorgemeten op de blindvermogensvraag. De blindvermogensvraag varieert van 0 tot max. 120 kVAR, maar kan voldoende gecompenseerd worden.

De huidige gelijkrichter is te klein en niet goed regelbaar zodat deze omzetter ongeschikt is voor autonoom bedrijf. Daarom is ervoor gekozen de windturbine via een diodebrug rechtstreeks op de accubatterij aan te sluiten. Deze maatregel vereenvoudigt het systeem aanzienlijk: de mutator van de windturbine en de gelijkrichter zijn hierdoor overbodig. Bij deze koppeling van de windturbine aan de accu's bleek het maximale vermogen van de windturbine direct af te hangen van de accuspanning.

De accu's zijn verouderd en hebben een beperkte opslagcapaciteit. Tevens is het maximale vermogen van de windturbine te groot voor het accu-systeem. Dit leidt tot frequente start/stopacties van de windturbine (ca. 150 per jaar). Om deze start/stopacties te beperken is een deel van de bekrachtigingscondensatoren aan de asynchrone generator van de windturbine afschakelbaar gemaakt, wat een verlaging van het afgeleverde vermogen bewerkstelligt.

De energievraag van de school is in de loop van de jaren sterk toegenomen. Het systeem kan volgens berekeningen de huidige energievraag tijdens autonoom bedrijf slechts voor 62% op jaarbasis dekken.

2. INLEIDING

Het zonne- en windenergieproject bij de Hogere Zeevaartschool op West-Terschelling bestaat uit een zonnege-

Ecofys, Coöperatief Advies- en Onderzoeksburo u.a.
Biltstraat 110
3572 BJ Utrecht

nerator (43 kW), een windturbine (75 kW_{nom}), accu's (360 V, 500 Ah) en conversie- en regelapparatuur. Het voorziet de zeevaartschool van elektriciteit. Bij normaal bedrijf is het energiesysteem met het openbare net gekoppeld. Eén van de uitgangspunten bij de opzet van het systeem was dat het systeem ook autonoom (d.w.z. losgekoppeld van het openbare net) moet kunnen functioneren.

In dit artikel wordt ingegaan op een aantal hoofdproblemen die optreden bij het realiseren van autonoom bedrijf. Dit betreft enerzijds het op korte tijdschalen in evenwicht houden van de (blind-)vermogensbalans en het constant houden van de spanning en de frequentie. ECN heeft met het oog hierop een aantal metingen aan het systeem verricht en geadviseerd in het oplossen van de optredende problemen. Anderzijds is het van belang dat op langere tijdschalen het systeem de elektriciteitsvraag volledig moet kunnen dekken. Omdat het niet mogelijk is het systeem langere tijd autonoom te laten draaien is dit aspect met behulp van een simulatiemodel (SOMES* van de R.U. Utrecht) verkend.

3. BESCHRIJVING VAN HET HUIDIGE SYSTEEM

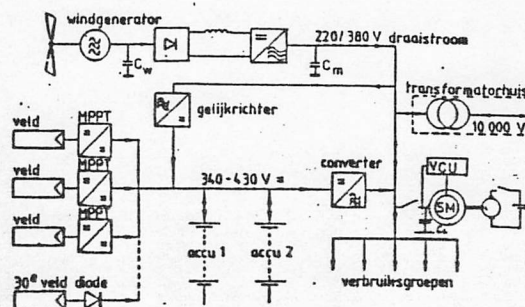


Fig. 1 : Globale opzet van het systeem op Terschelling

In figuur 1 is het zonne- en windenergiesysteem schematisch weergegeven. De energiestromen worden voornamelijk geregeld door een halfstuurbare gelijkrichter (63 A) en een gelijkstroom/wisselstroom-inverter (regelbare chopper en mutator,

die op een maximale ontsteekhoek staat ingesteld). De windturbine met een condensatorbekerachtigde asynchrone machine is via een (niet regelbare) gelijkstroom-tussentrap (gelijkrichter, smoorspoel, mutator) met het draaistroomnet gekoppeld. De windturbine is uitgerust met een 46 kVAr condensatorbatterij voor de blindstroomcompensatie. Bij autonoom bedrijf wordt een 60 kVA synchrone machine met het autonome net verbonden voor een variabele blindstroomcompensatie en voor de commutatie van de inverter. Als basisblindstroomcompensatie is dan tevens een condensatorbatterij van 40 kVAr bijgeschakeld.

De zonne-generator bestaat uit 30 velden met gemeten vermogen bij "volle zon" van 43 kW_p. Het accu-systeem bestaat uit twee parallelle groepen van 180 cellen Varta Bloc 2305.

Het huidige belastingpatroon van de Hogere Zeevaartschool laat zich globaal beschrijven door een gemiddelde vraag van 20 kW met een minimum van 3 kW 's nachts en een maximum van 90 kW 's middags [1].

4. BLINDVERMOGENHUISHOUDING

De AC-vermogensbalans ziet er als volgt uit:

$$P_{\text{windturbine}} + P_{\text{inverter}} = P_{\text{gelijkrichter}} + P_{\text{el.vraag}}$$

Het totaal benodigde blindvermogen wordt bepaald door:

$$Q = Q_{\text{windturbine}} + Q_{\text{inverter}} + Q_{\text{gelijkrichter}} + Q_{\text{el.vraag}}$$

De gelijkrichter wordt zodanig geregeld dat de vermogensbalans klopt en dat het vermogen van de inverter nul is als er overschot aan windvermogen is.

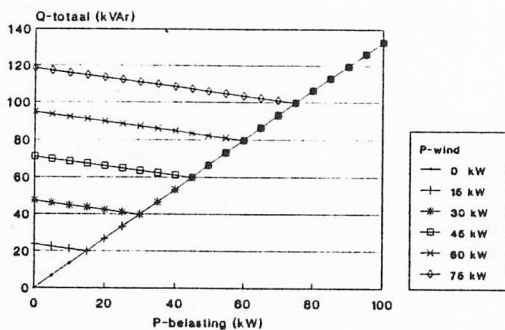


Fig. 2 : Blindvermogensvraag als functie van de belasting met het windvermogen als parameter

Tijdens het autonoom bedrijf is het van belang dat de blindvermogensbalans in evenwicht is. Om de blindvermogenshuishouding in kaart te brengen zijn van de afzonderlijke componenten de arbeidsfactoren bepaald [2].

De mutator van de windturbine werkt bij een nagenoeg constante ontsteekhoek van ca. 150°. Hierdoor zal de blindvermogensvraag evenredig met het vermogen zijn volgens $Q = 0.58 * P$.

Ook de converter werkt bij een nagenoeg constante ontsteekhoek van 150°, zodat ook hierbij de blindvermogensvraag evenredig is met het geleverde vermogen volgens bovenstaand verband. Uit de metingen is gebleken dat de gelijkrichter bij een slechte arbeidsfactor werkt. Dit heeft als consequentie dat de blindvermogensvraag groter kan worden dan het omgezette vermogen. Bovendien varieert de blindvermogensvraag sterk met het vermogen.

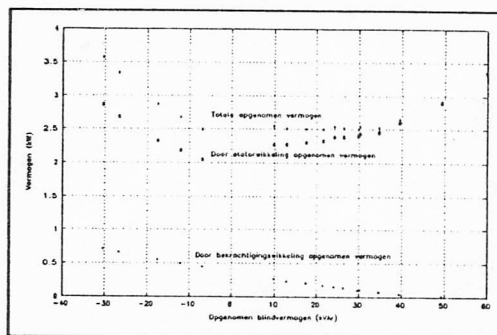
Als we nu aannemen dat de belasting een arbeidsfactor van 0.8 heeft, kunnen we de benodigde blindvermogenscompensatie bepalen.

Er geldt dus:

$$\begin{aligned} Q_{\text{windturbine}} &= 0.58 * P_{\text{windturbine}} \\ Q_{\text{inverter}} &= 0.58 * P_{\text{inverter}} \\ Q_{\text{gelijkrichter}} &= 1.0 * P_{\text{gelijkrichter}} \\ Q_{\text{belasting}} &= 0.75 * P_{\text{belasting}} \end{aligned}$$

Hierbij is de blindvermogensvraag van de gelijkrichter een eerste benadering.

In figuur 2 is de totale blindvermogensvraag uitgezet als functie van de belasting, met het windvermogen als parameter.



Figuur 3 Het via de bekrachtigingswikkling toegevoerde vermogen $U_s^2 I_s$, het via de statorwikkling toegevoerde vermogen P_s en de som van deze twee uitgezet als functie van het door de synchrone condensator opgenomen blindvermogen Q_s .

Het belastingpatroon van de zeevaartschool heeft een piek rond het middaguur van ca. 90 kW. De benodigde blindstroomcompensatie ligt dientengevolge tussen de 0 en 120 kVAr. In principe is het dus met de aanwezige blindstroomcompensatie-units van totaal 86 kVAr en de meedraaiende 60 kVA synchrone machine mogelijk om het blindvermogen te compenseren. Bij weinig belasting en windvermogen kan zelfs een behoorlijke overcompensatie ontstaan.

Bij blindvermogenscompensatie via een meedraaiende synchrone machine moet er voor gewaakt worden dat in deze machine geen grote energieverliezen optreden. Daarom is de vermogensopname van deze machine gemeten als functie van het blindvermogen. In figuur 3 is het totaal toegevoerde vermogen uitgezet tegen het door de synchrone condensator opgenomen blindver-

mogen. Te zien is dat het verlies minimaal 2,5 kW is. De synchrone condensator dient maximaal 40 kVAR capacitef (unit van de converter) en 60 kVAR inductief vermogen te compenseren. Het verlies kan daarbij tot hooguit 4 kW oplopen. Deze verliezen zijn niet zo groot dat dit aanleiding geeft tot een ander schakelpatroon van de blindvermogenscompensatie.

5. OVERIGE PROBLEMEN ROND DE REALISATIE VAN AUTONOM BEDRIJF

Bij het systeem heeft oorspronkelijk een windturbine van 40 kW (Polenko) gestaan. Hierop is de gelijkrichter gedimensioneerd. Het nominale vermogen van de nieuwe windturbine (Lagerwey LW 15/75) is bijna twee keer zo groot. De gelijkrichter is niet in staat om bij een lage belasting van de school al het windvermogen in de accu's te laden. Tevens is de gelijkrichter traag door de indirecte aansturing en veroorzaakt hij wat netspanningsvervuiling. Met daar bovenop nog de weliswaar beheersbare maar toch aanzienlijke blindvermogensbehoefte, maakt dit alles de gelijkrichter ongeschikt voor autonoom bedrijf.

De accu's zijn verouderd. Dit maakt dat de opslagcapaciteit nog maar beperkt is, terwijl de inwendige weerstand tweemaal zo groot is geworden. Voor langdurige experimenten met autonoom bedrijf is echter een aanzienlijke opslagcapaciteit noodzakelijk om het overschot aan windvermogen te kunnen bufferen. De windturbine moet namelijk gestopt worden als de accu's vol zijn. Bij een kleine opslagcapaciteit resulteert dit in een frequent starten en stoppen van de windturbine. Stopacties bij deze windturbine zijn noodmaatregelen en zijn niet bevorderlijk voor de levensduur van de machine. Nieuwe accu's zijn dan ook wenselijk en de grootte van de accubatterij zal opnieuw bekeken moeten worden.

De vraag van de school is in de loop van de jaren sterk toegenomen. Het systeem is hierdoor niet meer in staat om de vraag van de school in z'n geheel te dekken.

Gekozen is voor de opzet om de windturbine direct via een diodenbrug plus smoorspoel met de accubatterij te koppelen. Hierdoor worden namelijk de mutator van de windturbine en de oorspronkelijke gelijkrichter overbodig. De nieuwe systeemopzet is weergegeven in figuur 4.

Dit komt het omzet-rendement en het regelgedrag ten goede: de totale systeemregeling kan dan namelijk door de inverter worden verzorgd.

Zoals al eerder is vermeld, is het maximaal vermogen van de windturbine aan de hoge kant. Om het maximale vermogen te beperken is een deel van de bekrachtigingscondensatoren aan de generator van de windturbine afschakelbaar gemaakt.

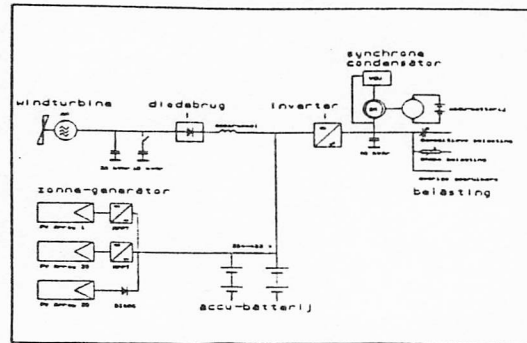


Fig. 4 : Systeemopzet autonoom bedrijf

6. RESULTATEN

Aan het systeem in de nieuwe opzet zijn in autonoom bedrijf metingen verricht [3].

6.1 Afhankelijkheid van het windturbine vermogen van de accu-spanning

Normaal is de windturbine via een gelijkstroomtussentrap (gelijkrichter-smoorspoel-wisselrichter) op het lokale net aangesloten. Hierbij varieert de gelijkspanning (450 V) in de gelijkstroomtrap nauwelijks, omdat de ontsteekhoek van de wisselrichter en de driefasennetspanning constant zijn. Als de windturbinegenerator via de gelijkrichter en de smoorspoel aangesloten is op de accubatterij is dit niet meer het geval. Om de invloed van de accuspanningsvariaties op het gedrag van de windturbine te onderzoeken zijn een aantal metingen verricht. In figuur 5 zijn de gemeten P-n-curven opgenomen bij verschillende accuspanningen. Duidelijk is te zien dat het maximale vermogen van de windturbine bepaald wordt door de accuspanning. Elke 10 V scheelt ca. 2 kW in het windturbine vermogen. Het maximale werkgebied van de accu-spanning ligt tussen de 324 en 423 V.

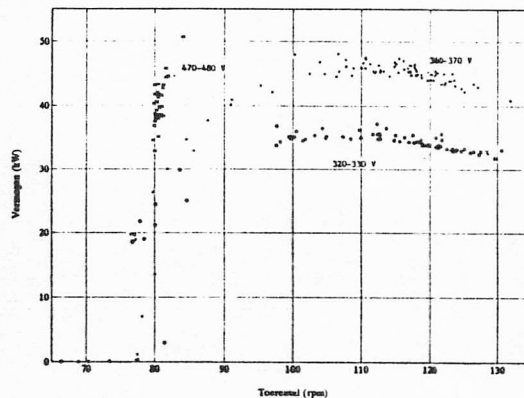


Fig. 5 : De vermogenstoeren-karakteristiek bij 30 kVAR aan bekrachtigingscondensatoren aan de asynchrone generator met de accuspanning als parameter

6.2 Afhankelijkheid van het windturbine vermogen van de bekrachtigingscondensatoren

Om de invloed van de bekrachtigingscondensatoren aan de asynchrone generator op de P-n-karakteristiek van de windturbine na te gaan, is 10 kVAr van de 30 kVAr-condensatorbatterij afgeschakeld. Vervolgens zijn weer de P-n-curves bepaald bij verschillende accu spanningen. In figuur 6 zijn de P-n-curves bij 20 kVAr aan blindstroomcompensatie aan de asynchrone generator opgenomen. Te zien is dat niet alleen het maximale vermogen van de windturbine bij de verschillende accu spanningen lager ligt dan bij 30 kVAr bekrachtiging maar ook dat het toerental waarbij de windturbine begint te leveren zo'n 20% hoger ligt.

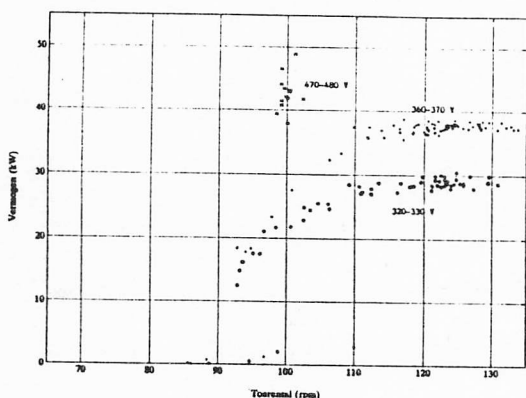


Fig. 6 : De vermogenstoeren-karakteristiek bij 20 kVAr aan bekrachtigingscondensatoren aan de asynchrone generator met de accu spanning als parameter

6.3 Autonomo bedrijf

In januari 1990 is gedurende enkele uren, met succes, het autonoombedrijf gerealiseerd. Het gevraagde vermogen varieerde tussen de 0 en de 50 kW. Vanwege de weersomstandigheden stond de windturbine vrijwel steeds het maximale vermogen te leveren en de zonne-generator niets. Het systeem bleek zeer goed te functioneren terwijl de netspanning en frequentie binnen de norm bleven.

7. SIMULATIE BEREKENINGEN

In autonoom bedrijf is het van belang dat de vermogensvraag zo goed mogelijk gedekt wordt. Hier komt nog bij dat het aantal stopacties van de windturbine beperkt moeten blijven. Om nu het effect op de dekking van de elektriciteitsvraag en het aantal start/stop-acties van de windturbine na te gaan is met behulp van het SOMES simulatie-programma de invloed van de volgende optimaliseringsmaatregelen doorgerekend:

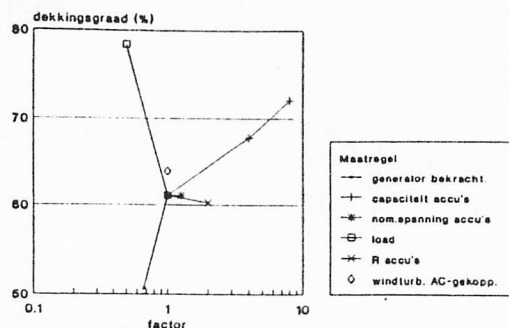


Fig. 7 : De invloed van verschillende maatregelen op de dekkinggraad

- Het afschakelen van 10 kVAr-bekrachtigingscondensatoren aan de generator van de windturbine.
- Het verhogen van de nominale spanning van de accu's tot 450 V. (Dit is de spanning waarop de mutator van de windturbine is afgeregeld).
- Het vergroten van de accu-capaciteit met een factor 4 en 8.
- Het verkleinen van de belasting met een factor 2.
- Het vergroten van de inwendige weerstand van de accu's met een factor 2 (bijv. veroudering accu's).
- De situatie waarbij de windturbine via de mutator aan het AC-net is gekoppeld en de gelijkrichter voldoende groot is om het overschot aan windvermogen gelijk te richten.

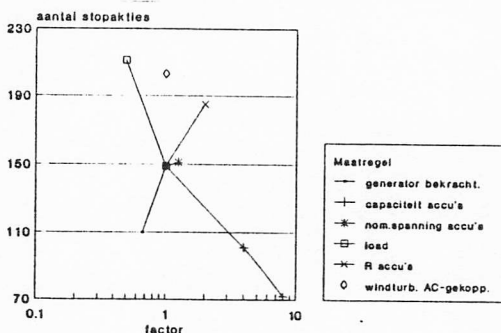


Fig. 8 : De invloed van verschillende maatregelen op het aantal stop-acties van de windturbine

De resultaten zijn in figuur 7 en 8 weergegeven in de vorm van een spider-diagram. De kern van de spider is het Terschelling PV/windsysteem in de opzet voor autonoom bedrijf. We hebben in de berekeningen de eigenschappen van een nieuwe accu-batterij gebruikt. Daarnaast zijn het belastingpatroon van de zeevaartschool van 1989 en de meteorologische gegevens van 'De Kooy' van 1975 gebruikt.

We zien in de diagrammen dat een hoge dekkinggraad alleen gehaald wordt bij een sterke vergroting van de accu-capaciteit of het beperken van de vermogensvraag. Een dekkinggraad dicht bij 100% lijkt echter zeer moeilijk haalbaar, tenzij een vele malen groter systeem wordt geplaatst. In feite is dit systeem als

autonoom systeem vooral geschikt in combinatie met een back-up vermogen (bv. een dieselgenerator).

Het aantal stopacties blijft bij de verschillende maatregelen beperkt.

Uit de berekeningen blijkt dat aanpassing van de nominale accuspanning aan de windturbine weinig invloed heeft op de dekkingsgraad en op het aantal stopacties.

In de diagrammen is ook te zien dat het afschakelen van condensatoren om het vermogen van de windturbine te beperken een negatieve invloed heeft op de energieopbrengst indien ze het hele jaar door gebruikt wordt. Deze beperking moet dan ook selectief gebruikt worden om het aantal stopacties te beperken. Het afschakelen van condensatoren zal dan deel uit moeten maken van de regeling van het integrale systeem.

Ter vergelijking zijn in de diagrammen ook opgenomen de situatie waarbij de windturbine via de mutator gekoppeld is aan het lokale net en de situatie waarbij de accu's sterk verouderd zijn.

8. CONCLUSIES

- Het blindvermogen is in dit systeem goed te compenseren door de aanwezigheid van vaste compensatie-condensatoren en een synchrone condensator van 60 kVA.
- Autonoom bedrijf is haalbaar en gerealiseerd gedurende korte tijden. De dekkingsgraad van de huidige belasting is ca. 62% op jaarbasis.
- Het koppelen van de windturbine via een diodebrug aan de accu's is een interessante optie. Het vereenvoudigt het systeem aanzienlijk.
- Beperking van het aantal start/stop-acties van de windturbine is realiseerbaar door het afschakelbaar maken van condensatoren aan de asynchrone generator.

9. LITERATUUR

1. Terschelling PV-Wind Project, Repair and Optimization Project, Final Report, ECOFYS NL-Utrecht, 1990 (in voorbereiding).
 2. Zonne- en windergiesysteem Terschelling, Metingen en experimenten voor realisatie van autonoom bedrijf; J.A.N. de Bonte, J. van Twisk; ECN Petten, nov. 1989
 3. Nader onderzoek voor autonoom bedrijf van het zonne- en windenergiesysteem Terschelling; M.J. Hoeijmakers, J. van Twisk; feb. 1990 (rapp. in voorbereiding)
- * ECN, Petten. Met dank aan J.A.N. de Bonte en J. van Twisk.
! Tevens dank aan V.A.P van Dijk (RUU) en W. Smit (HZS).
SOMES is het computersimulatiemodel van de R.U. Utrecht, om autonome energiesets door te rekenen.
\$ Dit project is financieel ondersteund door NOVEM en de EG.