



TECHNISCHE FICHES

Dit document maakt deel uit van 4 fiches

Microwindturbines

1. Het gebruik van windenergie: een veelheid aan mogelijkheden
2. **De elektrische installatie**
3. Netkoppeling, eilandbedrijf en operationele aspecten
4. Wetgevende aspecten, problemen en defecten

Deze technische fiches werden gemaakt voor het project TechnologieWacht

In samenwerking met KHBO en Power-Link

DEEL 2 – De elektrische installatie

1: Inleiding

Het basisprincipe van een windturbine is erg eenvoudig: de wind wordt gebruikt om wieken aan te drijven die op hun beurt een elektrische generator aandrijven. De wind is echter een grillig natuurproduct; de wind varieert in richting en in snelheid (er zijn zowel trage als plotse windsnelheidsvariaties). Dit heeft tot gevolg dat de kinetische energie uit de wind halen en deze omzetten in elektrische energie soms verre van evident is. Er zijn dan ook tal van windturbines (zowel grote als kleine) op de markt die allen hun voordelen en hun nadelen of beperkingen hebben.

Deze tekst richt zich vooral op de elektrische installaties die men gebruikt bij kleinschalige windenergieproductie. Meer specifiek de elektrische generatoren (met bijhorende aandrijving) en de vereiste elektronica worden besproken. Deze elektronica kan er bijvoorbeeld voor zorgen dat vermogen in het publieke net (met een vaste 50 Hz frequentie) geïnjecteerd wordt of dat batterijen bijgeladen worden.

Bij het opbouwen van de volledige elektrische installatie zijn er namelijk diverse mogelijkheden. Het kan de bedoeling zijn het geproduceerd vermogen direct in het publieke elektriciteitsnet te injecteren zonder dat de eigen installatie energieopslagcapaciteit (via bijvoorbeeld batterijen) heeft. De omvormer heeft gewoonlijk een bestaande netspanning nodig om te kunnen functioneren. Dit betekent dat bij het uitvallen van het publieke net geen elektrische energie beschikbaar is. In een streek met een betrouwbaar publiek elektriciteitsnet is dit een veel gemaakte keuze.

Wanneer het publieke elektriciteitsnet vaker uitvalt, kan men overwegen naast de netkoppeling ook eigen energieopslagcapaciteit (via bijvoorbeeld batterijen) te voorzien. Wanneer het net uitvalt, kan de installatie in eilandbedrijf verder werken totdat de problemen in het publieke net opgelost zijn. De energieopslagcapaciteit die hier vereist is, is vrij beperkt.

Het kan ook de bedoeling zijn steeds in eilandbedrijf te werken, dus los van een publiek elektriciteitsnet (mogelijks is er zelfs geen publiek net beschikbaar). In een dergelijk geval wordt de beschikbare energie opgeslagen in batterijen. Zeker hier zijn voldoende batterijen vereist en is er een batterijlader nodig. Bijvoorbeeld bij schepen (pleziervaartuigen zijn vaak met een microwindturbine uitgerust) kunnen de belastingen rechtstreeks met een gelijkspanning afkomstig van de batterij gevoed worden. Een andere mogelijkheid bestaat er in via een inverter alsnog een 230 V wisselspanning (met frequentie $f = 50$ Hz) te bekomen. Deze inverter heeft geen bestaand net nodig om deze wisselspanning te produceren.

2: Elektrische generatoren

2.1: Het gebruik van een tandwielkast

Bij windturbines kampt men vaak met het probleem dat het toerental van de wieken te laag is om rechtstreeks de generator aan te drijven. Dit probleem kan zich zowel voordoen bij grote als bij kleine windturbines. Bijvoorbeeld de VESTAS V90 windturbine (1,8/2,0 MW) heeft een dubbel gevoede inductiegenerator met bewikkelde rotor (de machine heeft vier polen en de rotor is gevoed via koolstofborstels en sleepingen). De rotatiesnelheid van de generator is dus ongeveer 1500 omwentelingen per minuut terwijl de wieken een nominaal toerental van 14,5 toeren per minuut hebben (<http://www.vestas.com>). Er is dan ook een tandwielkast nodig tussen de traag roterende as van de wieken en de snel draaiende rotor van de generator.

Naast dubbel gevoede inductiegeneratoren met bewikkelde rotor (met borstels en sleepingen), bestaan er tegenwoordig ook borstelloze dubbel gevoede inductiegeneratoren. Het elimineren van de borstels reduceert ondermeer het vereiste onderhoud. Dat laatste is zeker in offshore toepassingen erg belangrijk. Bij de VESTAS V90 GridStreamer (<http://www.vestas.com>) wordt eveneens een permanent magneet generator gebruikt.

De E-82/2 MW Enercon turbine heeft geen tandwielkast en men spreekt dan ook van een 'direct drive' systeem. De wieken en de rotor van de generator hebben een zelfde toerental die varieert tussen 6 en 18 omwentelingen per minuut (<http://www.enercon.de>). Een generator in een Enercon windturbine (een synchrone generator) heeft dan ook een groot aantal poolparen teneinde ook bij dit lage toerental een voldoende grote spanning met een voldoende grote frequentie op te wekken.

Windturbines van beperkt vermogen zijn meestal zonder tandwielkast uitgevoerd want het gebruik van een tandwielkast heeft een aantal nadelen.

- Een tandwielkast, of andere overbrengingen die de snelheid verhogen, zorgen voor energieverliezen. Deze energieverliezen doen het rendement dalen en zorgen voor een ongewenste warmteproductie in de turbine.
- Een tandwielkast maakt de installatie complexer qua opbouw. Er zijn meer onderdelen die aangekocht, onderhouden en op regelmatige tijdstippen vervangen moeten worden. Het gebruik van een tandwielkast zorgt dan ook voor extra onkosten.



Figuur 1: De Energy Ball

Het feit dat bij microwindturbines de wieken een hoger toerental hebben dan bij grote turbines bevordert trouwens de keuze voor een direct drive systeem. Bijvoorbeeld de datasheets van de Superwind 350 turbine met een nominaal vermogen van 350 W vermelden snelheden tussen 500 en 1300 omwentelingen per minuut. Bij de Energy Ball V200 (nominaal vermogen van 2250 W) vermeldt de fabrikant (<http://www.homeenergy.nl>) een maximaal toerental van 700 omwentelingen per minuut. Deze toerentallen zijn inderdaad heel wat hoger dan bij die grote Vestas en Enercon windturbines die hierboven vermeld zijn.

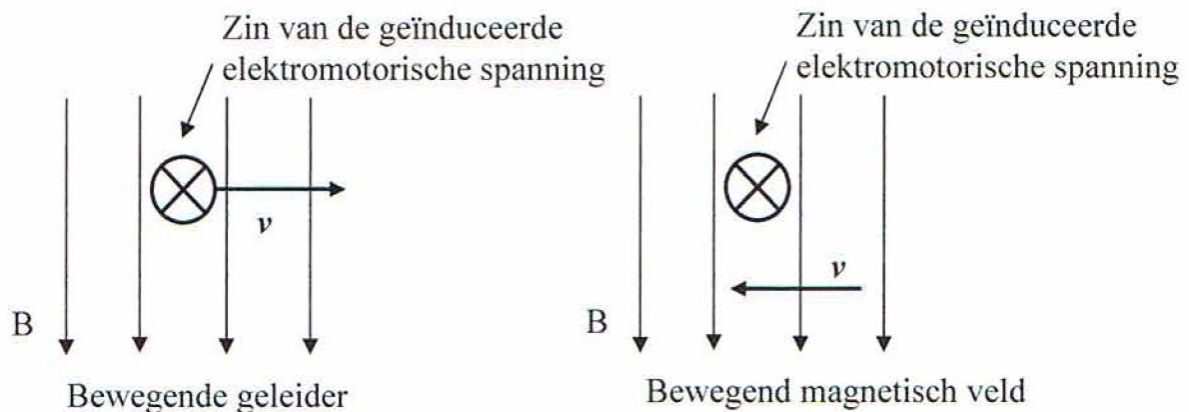
Bij kleinere windturbines waarbij de rotorbladen toch een grotere diameter hebben, is het toerental van de wieken meestal lager zodat het gebruik van een tandwielkast hier toch nuttig kan zijn.

2.2: Basisprincipe van elektrische generatoren

Een elektrische spanning in een generator wordt opgewekt door een elektrische geleider met een lengte l met een snelheid v te laten bewegen in een vast magnetisch veld met inductie B . De zo opgewekte spanning heeft een grootte

$$e = Blv.$$

Zoals Figuur 2 illustreert, is het ook mogelijk dezelfde elektrische spanning op te wekken door een vaststaande elektrische geleider in een bewegend magnetisch veld te plaatsen.



Figuur 2: Elektrische generatorwerking

De opgewekte spanning wordt groter indien een geleider met grotere lengte gebruikt wordt, indien de inductie van het magnetisch veld groter is en indien het snelheidsverschil tussen de geleider en het magnetisch veld groter is. Dat laatste verklaart waarom traag draaiende generatoren bouwen niet zo evident is en dat bij windturbines soms een tandwielkast gebruikt wordt om de generator een groter toerental mee te geven dan de wieken van de turbine.

Het magnetisch veld kan bekomen worden met behulp van permanente magneten. Deze permanente magneten zijn vaak de goedkopere ferriet magneten (ferroxdure) of de duurere neodymium magneten. Neodymium magneten zorgen voor een grotere inductie wat toelaat de generator compacter te maken en/of een hogere spanning op te wekken. De sterkte van een permanente magneet kan echter niet veranderd of bijgeregeld worden.

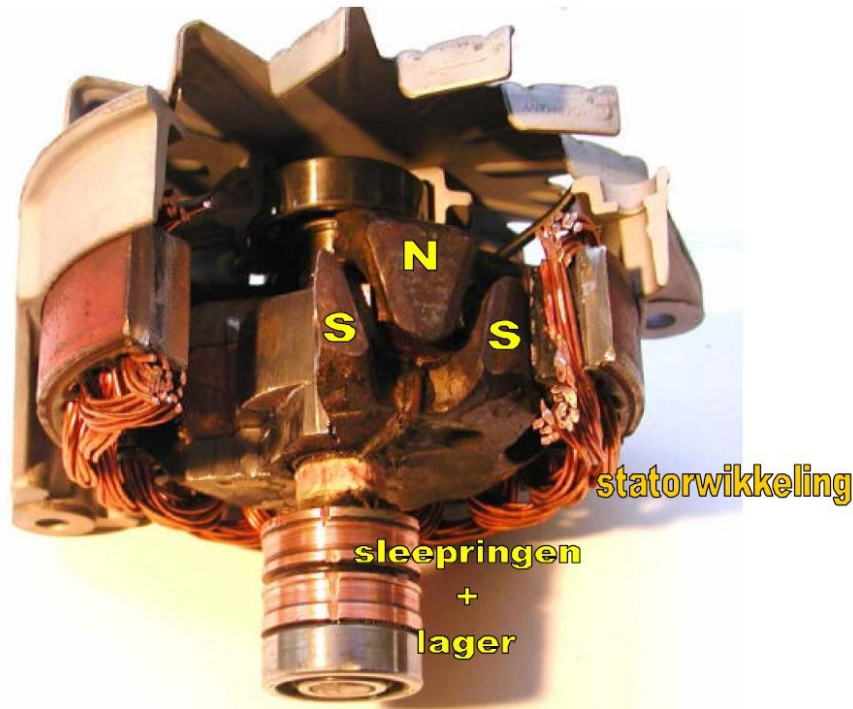
Het magnetisch veld kan ook bekomen worden via een elektromagneet. Wanneer een stroom door een geleider (een spoel) gestuurd wordt, dan ontstaat er een magnetisch veld. Door deze stroomsterkte te laten variëren, kan men de sterkte van het opgewekte magnetisch veld de gewenste waarde geven. De stroom door de spoel zorgt wel voor verliezen wat het rendement doet dalen.

2.3: DC generatoren gebruikt bij microwindturbines

Zowel bij grote windturbines als bij microwindturbines worden diverse types generatoren gebruikt. Er zijn echter verschillen tussen de gebruikte generatortypes bij grote windturbines en bij microwindturbines. Bijvoorbeeld de eerder vermelde dubbel gevoede inductiegenerator is een generatortype dat typisch bij grote windturbines gebruikt wordt. We zullen ons hier beperken tot de generatortypes die bij kleine en microwindturbines gebruikt worden.

Oude microwindturbines waren vaak (of zijn soms nog) uitgerust met een permanent magneet generator (PMG) van het buitenpool type. De permanente magneten bevonden zich in de stator waarbinnen een rotor met elektrische geleiders roteert. In deze elektrische geleiders werd een wisselspanning opgewekt waarvan de amplitude en de frequentie evenredig waren met het toerental van deze rotor en dus van de turbine. Via een collector en borstels werd deze wisselspanning mechanisch gelijkgericht. Dus zonder gebruik te maken van halfgeleider diodes werd een gelijkspanning bekomen.

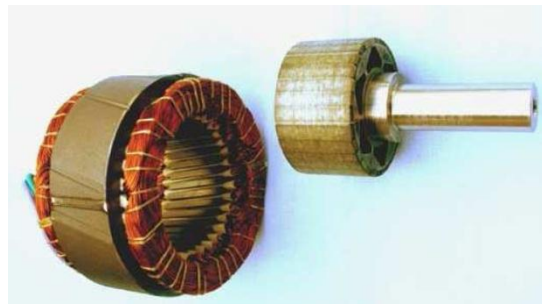
In sommige windturbines wordt gebruik gemaakt van een klauwpoolgenerator die standaard in een auto gebruikt wordt (zeker in ontwikkelingslanden waar deze goedkope generator vaak het enig beschikbare generatortype is). De klauwpoolgenerator is feitelijk een synchrone generator met een driefasige wikkeling in de stator. De opgewekte driefasige wisselspanning wordt via diodes gelijkgericht en een spanningsregelaar houdt de spanning binnen een groot snelheidsbereik ongeveer constant. De zo bekomen gelijkspanning wordt niet alleen gebruikt om bijvoorbeeld een batterij op te laden maar ook om via koolstofborstels de elektromagneten in de rotor te bekrachtigen.



Figuur 3: De klauwpoolgenerator

Het gebruik van koolstofborstels vraagt regelmatig onderhoud zodat men bij kleinere windturbines (kleiner dan bijvoorbeeld 5 kW) vaak voor borstelloze DC generatoren kiest. Deze borstelloze DC generatoren zijn feitelijk permanent magneet synchrone generatoren van het binnenpool type (de permanente magneten zijn gemonteerd in de rotor). De wikkelingen waarin de wisselspanning opgewekt wordt maken deel uit van de stator. Via diodes wordt de opgewekte wisselspanning (die kan zowel enkelfasig als driefasig zijn) gelijkgericht zodat een gelijkspanning bekomen wordt. De zo bekomen gelijkspanning heeft wel een rimpel.

Figuur 4 toont de generator van een Superwind 350 windturbine (nominaal vermogen van 350 W). De rotor bevat zes polen en de opgewekte driefasige statorspanning wordt gelijkgericht.



Figuur 4: Generator van de Superwind 350

Deze permanent magneet synchrone generatoren (PMSG) kunnen een radiaal of een axiaal fluxpatroon hebben. Bij een radiaal fluxpatroon lopen de magnetische fluxlijnen loodrecht tegenover de rotatie as, bij een axiaal fluxpatroon lopen deze fluxlijnen evenwijdig met de rotatie as. Generatoren met een axiaal fluxpatroon worden over het algemeen minder gebruikt omdat grootschalige productie van radiale machines meestal eenvoudiger is.

Toch zijn axiale machines vaak eenvoudiger te construeren wanneer het om kleine reeksen gaat en dikwijls bieden ze vlot de mogelijkheid een groter aantal magneetpolen te monteren. Binnen de wereld van de microwindturbines hebben de axiale fluxmachines wellicht vooral een potentieel naar de toekomst toe. Figuur 5 toont een microwindturbine met de bijhorende axiale flux generator. Bemerkt dat dit generatortype veeleer schijfvormig is.



Figuur 5: DIY windturbine met bijhorende axiale flux generator

2.4: AC generatoren gebruikt bij microwindturbines

Wanneer men batterijen wenst op te laden, is een gelijkspanning ideaal. Wanneer men echter vermogen wil injecteren in het publieke elektriciteitsnet, dan is een inverter nodig die de gelijkspanning omzet in een wisselspanning (met gepaste amplitude en frequentie). Het kan dan ook nuttig zijn rechtstreeks voor een AC generator te opteren. Een keuze tussen een synchrone of een asynchrone generator dringt zich in dit geval op.

Windturbines met een vermogen van enkele kW worden dikwijls met een AC generator uitgerust. Ze kunnen hun energie rechtstreeks aan het net leveren zonder tussenkomst van een inverter of een opslagmedium zoals batterijen. Hoewel synchrone generatoren bij grote windturbines veelvuldig gebruikt worden, is dit bij windturbines met een vermogen van enkele kW minder vaak het geval¹. De frequentie van de opgewekte spanning is namelijk afhankelijk van het toerental en dus van de windsnelheid. Bij grote windturbines is die invloed van het toerental ook aanwezig maar daar plaatst men een frequentieomvormer tussen de generator en het net. Het gebruik van een frequentieomvormer wil men mogelijks bij kleine windturbines vermijden omwille van de kostprijs.

Wanneer men toch een windturbine uitrust met een synchrone generator en die generator rechtstreeks aan het net koppelt (dat kan dus wel degelijk), dan drukt de netfrequentie de turbine een vast toerental op. Dit vaste toerental doet bij te hoge en te lage windsnelheden het rendement van de turbine serieus dalen omdat de tip speed ratio λ dan te veel afwijkt van de optimale tip speed ratio λ_{opt} .

Bij kleinere windturbines worden asynchrone generatoren veel vaker gebruikt dan synchrone generatoren. Asynchrone generatoren (men noemt ze ook inductiegeneratoren) met een kooianker zijn goedkoper dan synchrone generatoren wat bij die kleine turbines een belangrijk pluspunt is. Figuur 6 toont een Gaia Wind turbine (nominaal vermogen van 11 kW) die met een asynchrone generator uitgerust is.

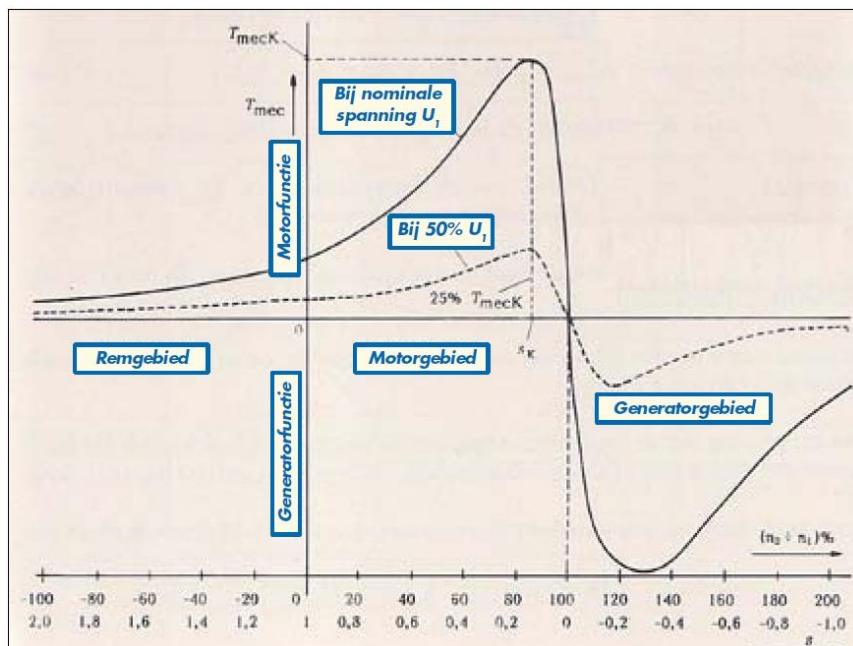
¹ Bij microwindturbines wordt vaak een PMSG gebruikt met bijhorende gelijkrichter. Deze aanpak is hier thuisgebracht onder de rubriek DC generatoren.



Figuur 6: De Gaia Wind turbine met asynchrone generator

Bij asynchrone generatoren, die rechtstreeks op het net aangesloten zijn, kan de rotatiesnelheid (wat) afwijken van de synchrone snelheid die vastgelegd is door de 50 Hz netfrequentie. Wanneer de asynchrone generator oversynchroon draait, injecteert deze actief vermogen in het net. Het is wel zo dat een asynchrone generator reactief vermogen opneemt uit het net om het vereiste magnetisch draaiveld op te wekken. Het is mogelijk een asynchrone generator in eilandbedrijf (dus los van het publieke elektriciteitsnet) te laten functioneren. Het is dan wel noodzakelijk om condensatoren parallel met de asynchrone generator te plaatsen. Deze condensatoren leveren namelijk het reactief vermogen dat de generator verbruikt.

Een asynchrone machine, die rechtstreeks op een bestaand 50 Hz net aangesloten is, zal onder het synchroon toerental niet als generator maar als motor werken (zie Figuur 7). Dit betekent dat via motorwerking de turbine op snelheid gebracht kan worden. De motor verbruikt dan uiteraard tijdelijk actief vermogen om de kinetische energie te kunnen opbouwen. Dit is een bruikbare opstartprocedure. Wanneer de windsnelheid te laag is, dreigt de asynchrone machine gedurende lange tijd subsynchroon, dus als motor, te draaien. De motor verbruikt ook hier vermogen zodat de netkoppeling verbroken moet worden.



Figuur 7: De werksgebieden van een asynchrone machine

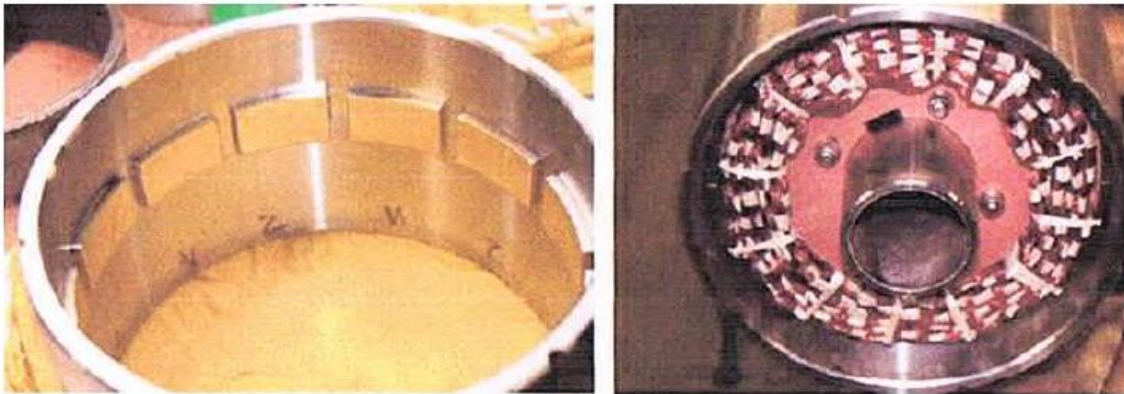
Zowel bij synchrone als bij asynchrone generatoren is de frequentie van de opgewekte spanning evenredig met het aantal poolparen. Wanneer een traag draaiende generator gewenst is (bijvoorbeeld als voor een direct drive systeem gekozen wordt), dan is een groter aantal poolparen vereist. Dat laatste impliceert meestal wel grotere afmetingen voor de generator.

Wanneer men bij lage windsnelheden de windturbine traag wil laten draaien en bij hogere windsnelheden dezelfde windturbine sneller wil laten draaien, dan kan men opteren voor een generator met een omschakelbaar poolpaartal. Bij lage windsnelheden kiest men dan voor een groter aantal poolparen. Dit laat dan toe om zowel bij lage als bij hoge windsnelheden een tip speed ratio λ te bekomen die dicht bij de optimale tip speed ratio λ_{opt} gelegen is. Dit verhoogt het energetisch rendement van de windturbine.

Zowel bij synchrone als bij asynchrone generatoren kan men kiezen voor een enkelfasige dan wel voor een driefasige uitvoering. Een enkelfasige asynchrone generator zal men bijvoorbeeld gebruiken indien men niet over een driefasig maar wel over een enkelfasig net beschikt. Met een enkelfasige generator kan men ook injecteren in een driefasig net, maar dan krijgt men een asymmetrie in dat net wat ondermeer voor extra warmteverliezen in de geleiders van het net zorgt.

3: De vermogenelektronische onderdelen bij een netgekoppelde installatie

Figuur 8 toont de generator van de Energy Ball V100. Het is een windturbine van het direct drive type waarbij de rotor aan de buitenkant gemonteerd is (dus een variant op het generatortype van Figuur 4 waar de stator aan de buitenkant gemonteerd is). Er zijn twaalf magneetpolen aan deze rotor bevestigd (neodymium magneten) die door hun rotatiebeweging een wisselspanning opwekken in de stilstaande statorwikkelingen. De opgewekte wisselspanning kan zonder borstels afgetakt worden.

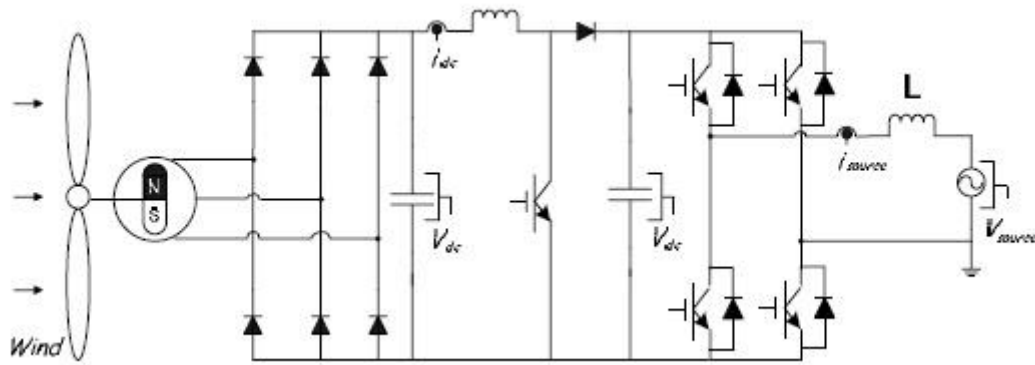


Figuur 8: De generator van de Energy Ball V100

Omdat de snelheid van de windturbine varieert, varieert ook de amplitude en de frequentie van de opgewekte driefasige wisselspanning. Men spreekt dan ook van “wild AC” omwille van het grillig karakter van de opgewekte spanning. Deze wilde wisselspanning wordt door een driefasige diodegelijkrichterbrug omgevormd tot een gelijkspanning. De grootte van deze gelijkspanning varieert mee met de windsnelheid.

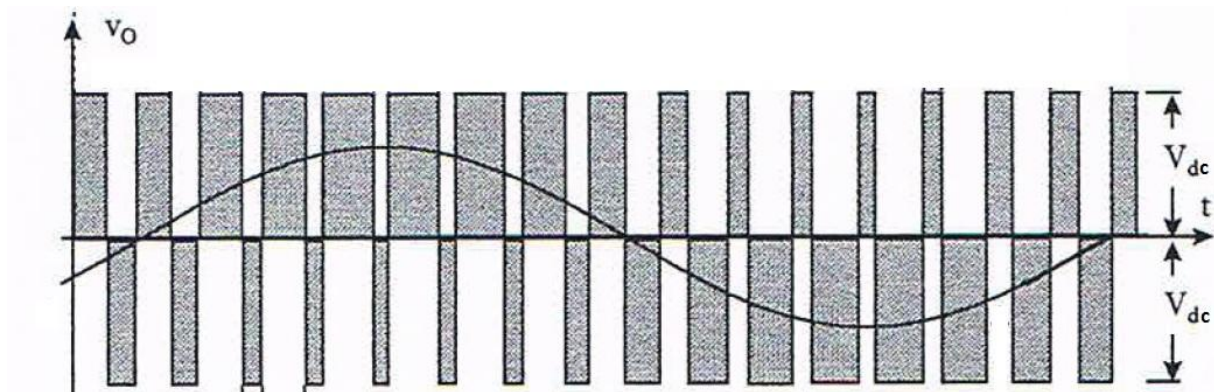
3.1: Via een PMSG vermogen in het distributienet injecteren

Figuur 9 toont een dergelijke permanent magneet synchrone generator (PMSG) met een driefasige diodegelijkrichterbrug met afvlakcondensator. Via een boost chopper kan de variabele gelijkspanning omgevormd worden tot een vaste en hogere gelijkspanning (bijvoorbeeld 350 V). Er is ook hier een elektrolytisch condensator voorzien die de spanning verder constant houdt. Tenslotte zet de netinverter de vaste DC spanning om in de gewenste AC spanning met de gepaste amplitude, de gepaste frequentie (50 Hz) en de gepaste fase.



Figuur 9: PMSG met gelijkrichter, chopper en inverter

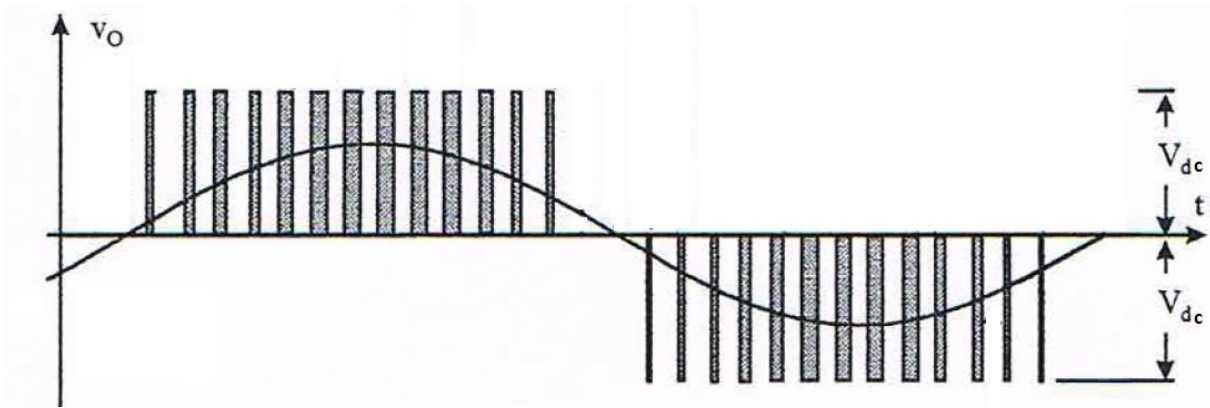
De netinverter in Figuur 9 is een volle H-brug bestaande uit vier schakelaars die elk bestaan uit een IGBT en een diode. Deze netinverter levert geen sinusvormige spanning maar levert een PWM-spanning (PWM = Pulse Width Modulation = PBM = Puls Breedte Modulatie). Wel is het zo dat een dergelijke PWM-spanning de gewenste sinusvorm goed benadert.



Figuur 10: Bipolaire PWM-spanning

Figuur 10 toont een bipolaire PWM-spanning. Wanneer de positieve V_{dc} -pulsen breed zijn en de negatieve V_{dc} -pulsen smal zijn, wordt een hoge positieve ogenblikkelijke sinusspanning benaderd. Wanneer de negatieve V_{dc} -pulsen breed zijn en de positieve V_{dc} -pulsen smal zijn, wordt een sterk negatieve ogenblikkelijke sinusspanning benaderd. Als de positieve en de negatieve pulsen ongeveer even breed zijn, wordt de nuldoorgang van de sinus benaderd.

Figuur 11 toont een unipolaire PWM-spanning. Gedurende de helft van de periode zijn er enkel positieve pulsen en tijdens de andere helft van de periode zijn er enkel negatieve pulsen. Wanneer deze pulsen breed zijn, wordt ofwel een sterk positieve ofwel een sterk negatieve ogenblikkelijke waarde van de sinusspanning benaderd. Als de pulsen smal zijn, wordt de nuldoorgang van de sinus benaderd.



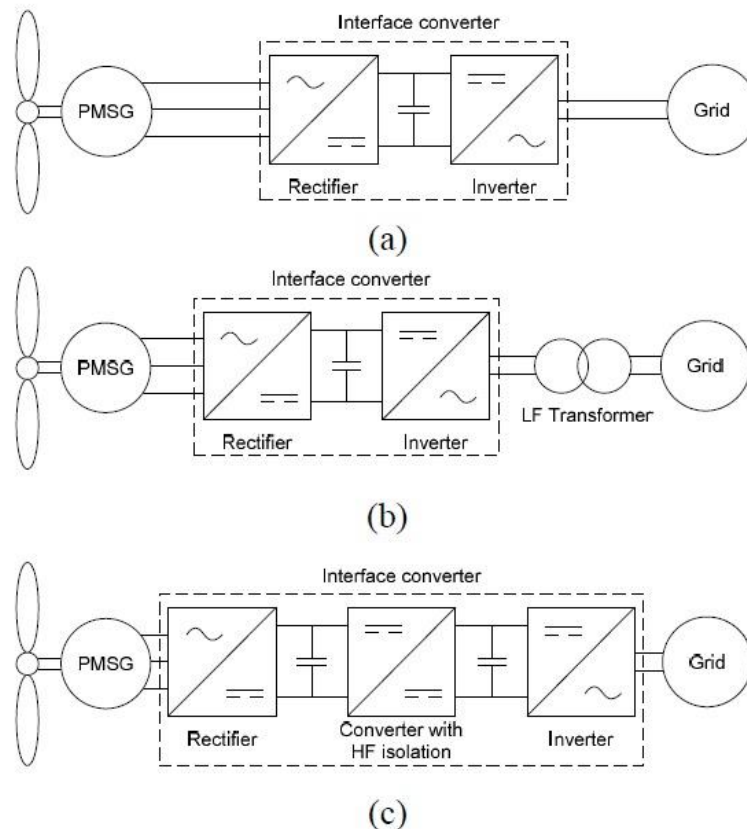
Figuur 11: Unipolaire PWM-spanning

De gewenste sinusspanning wordt meestal benaderd door een paar duizend dergelijke spanningspulsen per seconde. Men kan dan ook wiskundig aantonen dat de PWM-spanning (hetzij bipolair hetzij unipolair) de som is van de gewenste sinus (met een frequentie van 50 Hz) en sinusspanningen met frequenties in het kHz-gebied. Deze kHz-spanningen worden verwijderd door een filter tussen de uitgang van de netinverter (de H-brug) en het net zelf te plaatsen.

De omvormer in Figuur 9 die de wilde wisselspanning van de PMSG omzet in een netspanning van 50 Hz (met gepaste fase en amplitude) wordt door veel fabrikanten 'inverter' genoemd hoewel strikt gezien slechts de H-brug een inverter is.

3.2: Via een PMSG vermogen in het distributienet injecteren: varianten

Figuur 9 toont een enkelfasige netinverter. Het is echter mogelijk een driefasige netinverter te gebruiken die een driefasige PWM-spanning genereert en zo het vermogen afkomstig van de windturbine symmetrisch in een driefasig net injecteert.

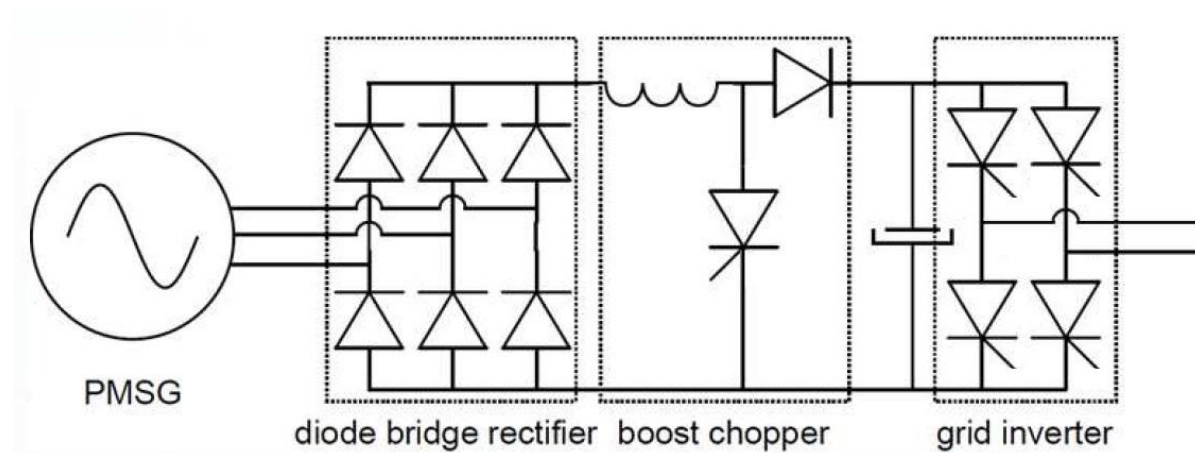


Figuur 12: Omvormer voor PMSG zonder of met galvanische scheiding

In Figuur 9 is de boost chopper opgebouwd uit een zelfinductie, een IGBT en een diode maar ook andere configuraties zijn mogelijk. De boost chopper in Figuur 9 is een DC-DC-omzetter zonder galvanische scheiding. De situatie zonder galvanische scheiding is schematisch weergegeven in deelfiguur (a) van Figuur 12. Zoals deelfiguur (b) aantoont, is het mogelijk een galvanische scheiding tussen de generator en het net te bekomen door een laagfrequente 50 Hz transformator (LF transformator) na de netinverter te plaatsen.

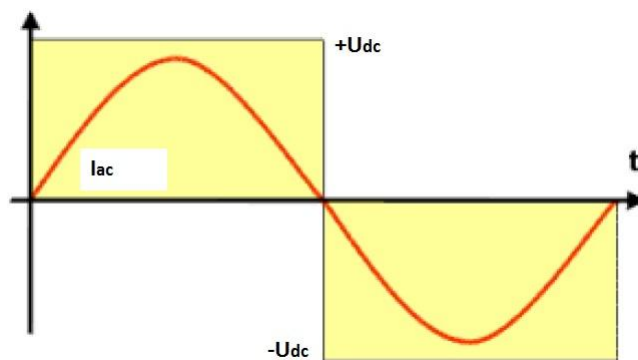
Een 50 Hz transformator is echter relatief zwaar, groot in omvang en ook niet echt goedkoop. Daarom wordt in sommige gevallen de galvanische scheiding bekomen via een hoogfrequent transformator. Een dergelijke transformator is namelijk lichter en kleiner in omvang. Deze hoogfrequent transformator maakt in Figuur 12 (c) deel uit van de 'converter with HF isolation' die een DC-DC-omzetter is en de boost chopper in Figuur 9 vervangt.

Zoals Figuur 13 illustreert, is het ook mogelijk de IGBT gebaseerde netinverter in Figuur 9 te vervangen door vier thyristoren. Deze netgestuurde of netgecommuteerde netinverter levert een blokgolfvormige wisselspanning van 50 Hz. Deze blokgolfvormige spanning is te schrijven als de som van een sinusvormige 50 Hz grondharmonische spanning en sinusvormige spanningsharmonischen van 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz ... (die allen een bepaalde amplitude en fase hebben). Teneinde de stroomvorm aan netzijde meer sinusvormig te maken is het plaatsen van een filter tussen de uitgang van de netinverter en het net wenselijk. Deze filter heeft wel zelfinducties en condensatoren met een grotere waarde dan wanneer de netinverter een PWM-spanning levert (met de IGBT-gebaseerde netinverter van Figuur 9 is het trouwens ook mogelijk een blokgolfvormige spanning te bekomen).



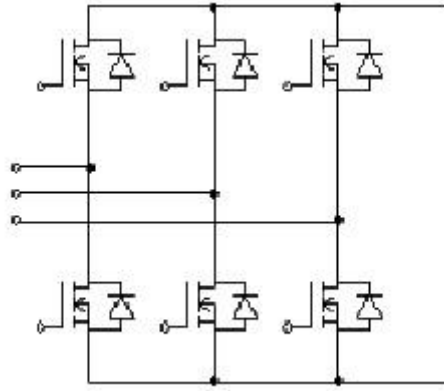
Figuur 13: PMSG met gelijkrichter, chopper en netgestuurde inverter

Figuur 14 toont in het geel de (geïdealiseerde) blokgolfvormige spanning geleverd door de netinverter van Figuur 13. Dankzij de aanwezigheid van een filter, wordt (in ideaal geval) aan het net een sinusvormige stroom geleverd (in het rood weergegeven).



Figuur 14: Spanning en stroom afkomstig van een netgestuurde inverter

Zowel in Figuur 9 als in Figuur 13 gebeurt de gelijkrichting van de wilde wisselspanning met behulp van een driefasige diodegelijkrichterbrug. Indien de PMSG een enkelfasige wisselspanning genereert, is uiteraard een enkelfasige diodegelijkrichterbrug vereist. Zowel in het driefasige als in het enkelfasige geval kan de diodegelijkrichterbrug ook vervangen worden door een gepast aangestuurde IGBT-brug zoals weergegeven in Figuur 15.



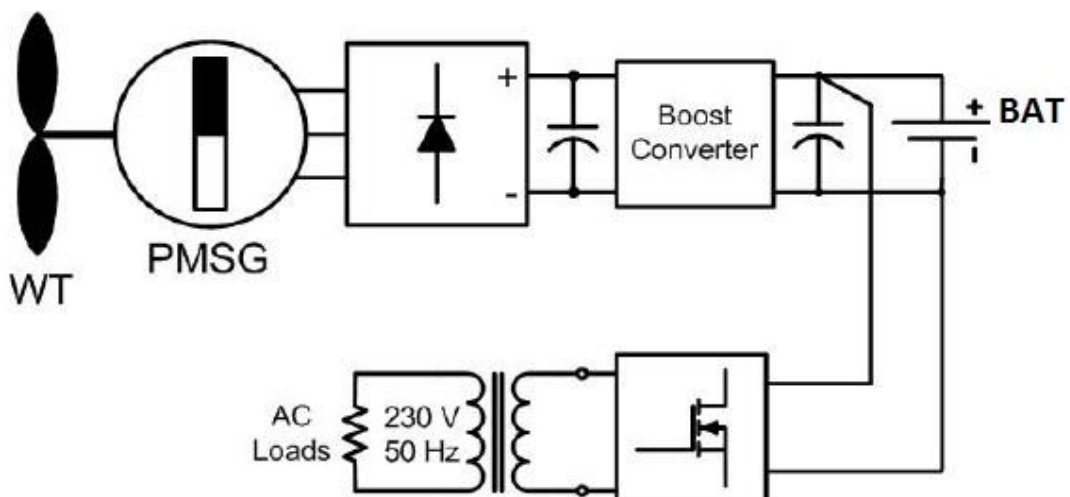
Figuur 15: Gelijkrichting op basis van een IGBT-brug

Een dergelijke IGBT-brug is complexer dan de eenvoudige diodegelijkrichterbrug, ook wat betreft de aansturing (die het opmeten van de rotorpositie van de generator kan vereisen). Via een gepaste aansturing kan echter meer vermogen uit de generator gehaald worden.

4: Netgekoppelde systemen en systemen in eilandbedrijf

Naast de zonet besproken systemen die het geproduceerde vermogen direct in het publieke distributienet injecteren, bestaan er ook systemen die energieopslagcapaciteit bezitten. Dergelijke systemen kunnen in eilandbedrijf werken of ze kunnen netgekoppeld zijn.

4.1: Een PMSG-installatie in eilandbedrijf



Figuur 16: Via een PMSG in eilandbedrijf werken

Figuur 16 toont een omvormer die in eilandbedrijf kan werken, dus zonder aanwezigheid van het publieke distributienet. Net zoals in Figuur 9 is de PMSG, de gelijkrichter, een eerste afvlakcondensator, de boost chopper (hier boost converter genoemd), een tweede afvlakcondensator en de inverter aanwezig.

Daarbovenop is een 50 Hz scheidingstransformator aanwezig die toelaat de belastingen te voeden (AC loads) zoals dit het geval is in Figuur 12 (b).

Omdat er evenwel geen bestaand net aanwezig is, is er een energie opslagmedium vereist. Hier is dit een batterij weergegeven als BAT. Inderdaad, de variaties in de windsnelheid zorgen er voor dat het geproduceerde vermogen door de windturbine varieert. Het vermogen vereist door de belastingen varieert ook maar met een patroon dat los staat van de productievariaties van de windturbine. Denkende aan de wet van behoud van energie is het dan ook nodig het overschot aan energie op te slaan in de batterij indien de windturbine meer vermogen genereert dan er verbruikt wordt. Omgekeerd, de batterij moet het tekort aan vermogen bijpassen indien de windturbine minder vermogen genereert dan er verbruikt wordt.

4.2: Energieopslag met behulp van batterijen

In de toepassingen die hier beschouwd worden, is het gebruik van lood-zuur batterijen of Li-ion batterijen het meest voor de hand liggend. Li-ion batterijen hebben in vergelijking met lood-zuur batterijen het voordeel

- eenzelfde opslagcapaciteit te hebben met een kleiner volume en een kleiner gewicht,
- een hoger rendement te hebben,
- een grotere levensduur te hebben.

Toch is in de huidige marktsituatie het gebruik van lood-zuur batterijen gebruikelijk omdat ze merkkelijk goedkoper zijn dan Li-ion batterijen. Vooral het gebruik van VRLA-batterijen (Valve Regulated Lead-Acid Battery), en dan meer specifiek de gelbatterij, is populair (<http://www.miton.nl>).

Bij het kiezen van een batterij moet ook rekening gehouden worden met de gebruikswijze. Het kiezen van een startbatterij uit een auto is bijvoorbeeld geen goede optie. Startbatterijen zijn geschikt om grote stroompieken te leveren, maar ze worden best continu opgeladen en hun levensduur daalt sterk indien ze te diep ontladen worden.

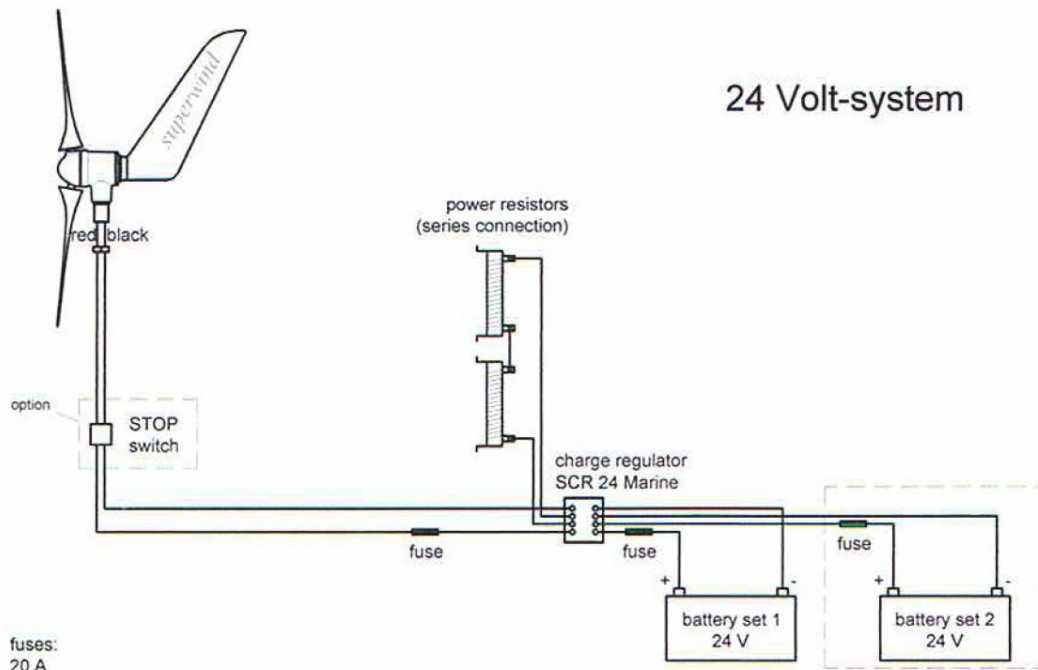
Er zijn echter batterijen op de markt die speciaal geschikt zijn om gebruikt te worden in combinatie met hernieuwbare energieopwekking. Deze batterijen zijn bestand tegen lage laad- en ontladstromen. Ze zijn bestand tegen onregelmatige laad- en ontladcycli (dat hebben we hier inderdaad) en ze vertonen weinig zelfontlading. Tot slot zijn deze batterijen goed bestand tegen diepe ontladingen. Dit laatste laat toe de opgeslagen energie bijna volledig te gebruiken wanneer er gedurende een (langere) periode weinig wind is.

4.3: Het gebruik van een dump load

Figuur 17 toont hoe het mogelijk is op basis van een Superwind 350 microwindturbine twee sets van 24 V batterijen op te laden via een laadregelaar (SCR 24). Een dergelijk type opstelling wordt typisch aan boord van een jacht gebruikt zodat ook hier van eilandbedrijf sprake is. De gelijkspanning van de batterijen wordt gebruikt om diverse belastingen aan boord van het schip te voeden.

Het is de bedoeling het door de microwindturbine opgewekte vermogen te gebruiken om de batterijen bij te laden. Maar als deze batterijen volledig opgeladen zijn, moet het vermogen van de windturbine ergens naartoe. Daarom is de laadregelaar verbonden met een “dump load”. Een dump load is een weerstand die toelaat het teveel aan vermogen om te zetten in warmte. Het is eventueel mogelijk de warmte die ontwikkeld wordt in deze weerstand nuttig te gebruiken om bijvoorbeeld water op te warmen. Bij dit laatste wordt de energie feitelijk thermisch opgeslagen.

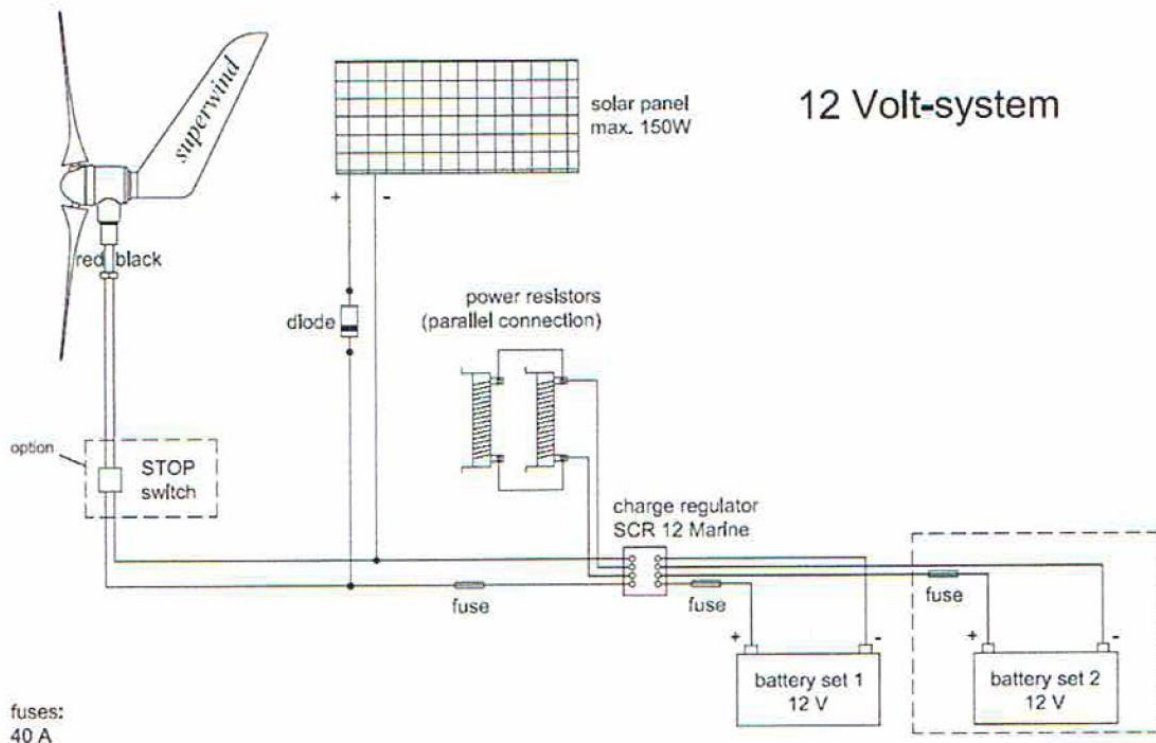
Het gebruik van een dump load vindt men trouwens niet alleen bij microwindturbines. Bij fotovoltaïsche installaties of kleinschalige hydraulische installaties, die gebruikt worden om batterijen op te laden, treft men die ook aan. Figuur 18 toont een installatie die het gebruik van een microwindturbine combineert met fotovoltaïsche panelen.



Figuur 17: Het opladen van batterijen met behulp van een Superwind microwindturbine

Een hybride systeem die windenergie en zonne-energie combineert heeft ondermeer het voordeel dat de energieproductie minder varieert in de tijd. Het is namelijk zo dat er tijdens zonnig weer meestal minder wind is en dat er meer wind is wanneer er geen of minder zon is. 's Nachts produceren de fotovoltaïsche panelen uiteraard geen vermogen maar 's nachts is er gemiddeld meer wind dan overdag.

Bemerk zowel in Figuur 17 als in Figuur 18 de aanwezigheid van gepaste smeltveiligheden in de DC-kring. Hoe lager de spanning (in Figuur 18 is dit 12 V_{DC} en geen 230 V_{AC}), hoe groter de stroomwaarde bij eenzelfde vermogen. De koperen geleiders moeten dan ook een voldoende grote sectie meekrijgen.



Figuur 18: Het opladen van batterijen via een hybride systeem

4.4: Een netgekoppelde PMSG-installatie met energieopslag

Ook wanneer een netgekoppeld systeem voorzien is, kan energieopslag met behulp van batterijen nuttig zijn. Deze batterijen kunnen er voor zorgen dat bij een uitval van het publieke elektriciteitsnet de belastingen nog steeds gevoed worden. Op die manier wordt een UPS-functie voorzien (UPS = Uninterruptible Power Supply).

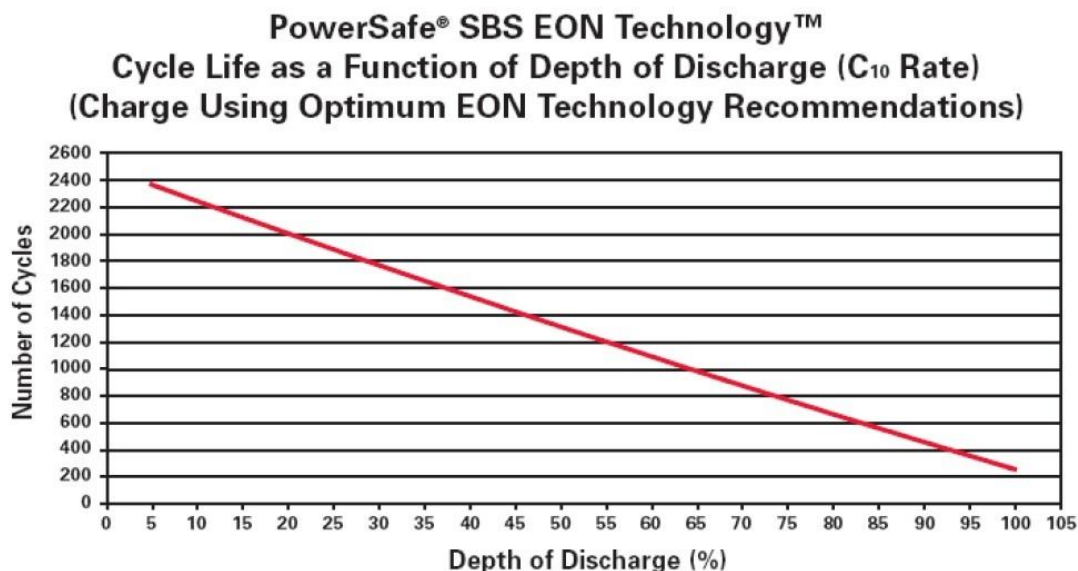
Meestal wordt de opslagcapaciteit van de batterijen beperkter gedimensioneerd (wat de vereiste investering beperkt) dan wanneer in eilandbedrijf gewerkt wordt. Inderdaad, de batterijen moeten enkel maar energie leveren op de ogenblikken dat het publieke net uitgevallen is. De vereiste opslagcapaciteit is bepaald door:

- het vermogen dat aan de belastingen geleverd moet kunnen worden (hier telt het verbruikte vermogen tijdens de netuitval want mogelijks blijft men tijdens een netuitval enkel de belangrijkste belastingen voeden),
- de tijdsduur van de verwachte netuitvallen,
- de gewenste levensduur van de batterijen.

De eerste twee criteria bepalen een ultieme ondergrens voor de vereiste opslagcapaciteit. Indien deze ultieme ondergrens niet voorzien is, kan men zelfs met nieuwe en volledig opgeladen batterijen de verbruikers niet één keer blijven voeden tijdens een netuitval.

De geïnstalleerde opslagcapaciteit bepaalt echter ook de levensduur van de batterijen waardoor het mogelijks nuttig en economisch voordelig is meer opslagcapaciteit te voorzien dan het strikte minimum.

Stel dat voor de netuitval de batterijen allemaal volgeladen zijn (een State of Charge = SOC = 100%). Bij een bepaalde duur van de netuitval en bij een bepaald vereist vermogen wordt dan ook een bepaalde hoeveelheid energie aan de batterijen onttrokken. Bij een kleinere opslagcapaciteit van de batterijen, zullen deze procentueel dan ook dieper ontladen worden wat hun levensduur beperkt. Figuur 19 geeft, bij wijze van voorbeeld, voor Powersafe SBS EON batterijen (<http://www.enersys-emea.com>) de relatie tussen de levensduur en de procentuele diepte van ontlading. De levensduur van de batterijen is hier uitgedrukt als het aantal realiseerbare ontladingen.



Figuur 19: Levensduur batterij in functie van de diepte van ontlading

Betreffende de te voorziene opslagcapaciteit bestaat er dan ook een optimum. Wanneer een te grote opslagcapaciteit voorzien wordt, is de investeringskost te groot. Wanneer een te kleine opslagcapaciteit voorzien wordt, worden de batterijen dieper ontladen en daalt de levensduur. Hierdoor moeten ze rapper door nieuwe batterijen vervangen worden wat economisch ook niet voordelig is.

Door bij een netgekoppeld systeem energieopslag met behulp van batterijen te voorzien, is het niet alleen mogelijk een UPS-functie te voorzien. Het is ook mogelijk om energie op te slaan (hetzij afkomstig van de windturbine hetzij afkomstig van het net aan nachttarief) en deze energie (tegen dagtarief) overdag zelf te gebruiken of eventueel in het net te injecteren.

5: Een grote diversiteit

De hierboven beschreven diversiteit aan windturbines, generatoren en vermogenelektronica leidt er toe dat het maken van een keuze vaak verre van evident is. Mede vanuit die vaststelling zijn een aantal projecten opgestart (zowel in het buitenland als in het binnenland) die de energieopbrengsten van diverse installaties met elkaar vergelijken.

Figuur 20 toont een tabel gebaseerd op metingen uitgevoerd in het Nederlandse Schoondijke (Sluis). De energieopbrengsten van diverse types windturbines worden met elkaar vergeleken. Bemerkt dat sommige windturbines niet alleen energie leveren aan het net maar ook energie verbruiken. Dit kan bijvoorbeeld optreden omdat de asynchrone machine, die met het bestaande 50 Hz net gekoppeld is, bij lage windsnelheden niet als generator maar als motor werkt. Naast deze ongewenste situatie, kan de generator ook doelbewust als motor gebruikt worden om de turbine op snelheid te brengen.

RESULTATEN TESTPROJECT KLEINE WINDTURBINES ZEELAND (SCHOONDIJKE 1/04/'08 – 31/03/'12)					
TYPE	WRE 060	SKYSTREAM	AIRDOLPHIN	WRE 030	ENERGY BALL
OPBRENGST EERSTE JAAR	485 kWh	2109 kWh	393 kWh	404 kWh	73 kWh
OPBRENGST TWEEDE JAAR	526 kWh	2171 kWh	406 kWh	612 kWh	65 kWh
OPBRENGST DERDE JAAR	562 kWh	2271 kWh	244 kWh	649 kWh	27 kWh
OPBRENGST VIERDE JAAR	613 kWh	2283 kWh		684 kWh	
VERBRUIK GEDURENDE VIER JAAR	46 kWh	90 kWh	186 kWh	30 kWh	0 kWh

RESULTATEN TESTPROJECT KLEINE WINDTURBINES ZEELAND (SCHOONDIJKE 1/04/'08 – 31/03/'12)				
TYPE	PASSAAT	MONTANA	TURBY	AMPAIR
OPBRENGST EERSTE JAAR	578 kWh	2691 kWh	247 kWh	245 kWh
OPBRENGST TWEEDE JAAR	660 kWh	2315 kWh	326 kWh	341 kWh
OPBRENGST DERDE JAAR	665 kWh	2677 kWh	232 kWh	358 kWh
OPBRENGST VIERDE JAAR	663 kWh	3063 kWh	67 kWh	343 kWh
VERBRUIK GEDURENDE VIER JAAR	12 kWh	5 kWh	372 kWh	46 kWh

Figuur 20: Resultaten testproject kleine windturbines te Schoondijke

Opmerking 1: De gemiddelde windsnelheid bedroeg tijdens het eerste jaar 3,7 m/s, tijdens het tweede jaar 3,8 m/s, tijdens het derde jaar 3,7 m/s en tijdens het vierde jaar 3,8 m/s.

Opmerking 2: Er werden ook nog enkele andere types getest, maar niet gedurende de volledige periode. De energieproductie van de Airdolphin en de Energy Ball is beëindigd gedurende het derde jaar van de metingen.

Opmerking 3: Meer informatie en cijfermateriaal is te vinden op: http://kreeft.zeeland.nl/zeesterdoc/ZBI-O/ZEE/ZEE0/8012/801257_1.pdf

In Groot-Brittannië zijn in het kader van het Warwick project diverse types windturbines met elkaar vergeleken. Hierbij zijn de windturbines meestal in een stedelijke omgeving uitgetest waar ten gevolge van bijvoorbeeld huizen en hoge gebouwen onregelmatige windpatronen optreden. Bemerk dat als omvormer tussen de generator en het net vaak een Sunny Boy of een Windy Boy gebruikt is (<http://www.SMA-Solar.com>). Een Sunny Boy is een omvormer die de DC-spanning afkomstig van fotovoltaïsche cellen omzet in een 50 Hz spanning en vermogen injecteert in een bestaand net.

RESULTATEN TESTPROJECT WARWICK TRIALS PROJECT (GROOT-BRITANNIË 1/10/'07 – 1/10/'08)				
TURBINE	AMPAIR	ZEPHYR	AMPAIR	WINDSAVE
INVERTER	SUNNY BOY	WINDY BOY	SUNNY BOY	WINDSAVE
TOTALE OPBRENGST	53,67 kWh	63,75 kWh	74,63 kWh	109,13 kWh
GESCHATTE OPBRENGST	154,81 kWh	217,43 kWh	1012,26 kWh	204,82 kWh
WIND SNELHEID	2,22 m/s	2,18 m/s	4,59 m/s	2,74 m/s
NAAM SITE	Lilington Road	Leicester	Southorn Court 1	Daventry Town Hall

RESULTATEN TESTPROJECT WARWICK TRIALS PROJECT (GROOT-BRITANNIË 1/10/'07 – 1/10/'08)				
TURBINE	AMPAIR	WINDSAVE	AMPAIR	ZEPHYR
INVERTER	SUNNY BOY	WINDSAVE	WINDY BOY	WINDY BOY
TOTALE OPBRENGST	50,27 kWh	55,79 kWh	51,64 kWh	14,20 kWh
GESCHATTE OPBRENGST	1084,48 kWh	68,78 kWh	1295,44 kWh	32,35 kWh
WIND SNELHEID	5,02 m/s	2,04 m/s	6,22 m/s	2,02 m/s
NAAM SITE	Southorn Court 2	Daventry Country Park	Eden Court 2	Thatcham

Figuur 21: Resultaten van het Warwick testproject

Opmerking 1: In het testproject zijn een groter aantal windturbines getest, hierboven is een selectie weergegeven. Sommige turbines werden tijdelijk stilgelegd wegens geluidsoverlast of vervanging van onderdelen.

Opmerking 2: Meer informatie en cijfermateriaal is te vinden op: <http://www.warwickwindtrials.org.uk>, <http://www.warwickwindtrials.org.uk/2.html>.

De Windy Boy is ontworpen om het vermogen afkomstig van de generator van een windturbine te injecteren in het bestaande 50 Hz net. Bijvoorbeeld de SMA Windy Boy protectie Box 400 vertrekt van de driefasige wilde wisselspanning, richt deze gelijk met een driefasige gelijkrichter en via een inverter wordt het vermogen in het net geïnjecteerd.

Die wilde wisselspanning kan zowel in grootte als in frequentie sterk wijzigen in functie van de windsnelheid en dus de rotatiesnelheid van de turbine (spanningen kunnen bijvoorbeeld variëren tussen 0 V en 500 V, de opgewekte frequentie kan variëren tussen bijvoorbeeld 0 Hz en 400 Hz). De omvormer bevat trouwens een overspanningbeveiliging.

Resultaten van een gelijkaardig project gerealiseerd in het West-Vlaamse wetenschapspark Greenbridge zijn opgenomen in Figuur 22. Meer informatie is online raadpleegbaar via de website <http://tools.power-link.be/monitoring>.

RESULTATEN TESTPROJECT SMALL WIND TURBINE DEMONSTRATION SITE				
TYPE	ENERGY BALL V100	ENERGY BALL V200	RAUM 1,5k	RAUM 3,5k
VERMOGEN	500 W	2250 W	1500 W	3500 W
DATUM OPSTART	1/01/'10	1/07/'10	1/07/'10	26/08/'10
AANTAL DAGEN IN BEDRIJF	958	86	777	721
TOTALE PRODUCTIE	77 kWh	27 kWh	1603 kWh	2866 kWh
JAARLIJKSE PRODUCTIE	29 kWh	115 kWh	753 kWh	1451 kWh

Opmerking 1: De hier vermelde cijfers dateren van 15/08/'12 met uitzondering van de gegevens voor de Energy Ball V200 die dateren van 24/09/'10.

Opmerking 2: De cijfers bij jaarlijkse productie zijn geëxtrapoleerde/geïnterpoleerde waarden. De gemiddelde opgemeten windsnelheid op 15m hoogte tussen juni en september 2010 bedroeg 4,18 m/s

Opmerking 3: Meer informatie is te vinden op: <http://tools.power-link.be/monitoring>.

Figuur 22: Resultaten van de Small Wind Turbine Demonstration Site

6: Besluit

De diversiteit aan generatoren en vermogenelektronische schakelingen bij kleine windturbines is besproken. Deze windturbines kunnen vermogen injecteren in een bestaand 50 Hz net, zonder behoefte aan elektrische energieopslag, maar ze kunnen ook gebruikt worden om batterijen op te laden. Het gebruik van batterijen laat toe in eilandbedrijf te werken of een UPS-functie te voorzien.

Auteurs: Joan Peuteman – KHBO / Joannes Laveyne – Power-Link

Heeft u nog verdere vragen of opmerkingen?

Aarzel niet om ons te contacteren!



Vlaams Elektro Innovatiecentrum
Kleinhoefstraat 6
2440 Geel
tel: 014/57.96.10
info@vei.be
www.vei.be
