

DE SYNCHRONE MACHINE MET GELIJKRICHTER

M.J. Hoeijmakers*

SAMENVATTING

Na een korte behandeling van de voor- en de nadelen van de synchrone machine met gelijkrichter bij toepassing in windturbines, wordt de recente ontwikkeling op het gebied van dit systeem binnen de vakgroep Elektromechanica en Vermogenselektronica van de TU Eindhoven behandeld. Hierbij wordt aandacht besteed aan zowel het stationaire als het dynamische gedrag ervan.

Het is gebleken dat het laatste de grootste problemen heeft opgeleverd. Er traden namelijk soms instabiliteiten op, waarvoor twee praktische oplossingen worden aangegeven: stroombronvoeding van de bekrachtigingswikkeling en toepassing van een stuurbare thyristorgelijkrichter in plaats van een diodegelijkrichter in het gelijkstroomvermogenscircuit. De eerste oplossing lijkt voor toepassingen bij grotere systemen minder geschikt in verband met de heftige responsie van deze systemen op netspanningsverstoringen. De tweede oplossing is weliswaar iets duurder, maar zal waarschijnlijk meestal de voorkeur verdienen.

Ten slotte wordt nog aandacht besteed aan het huidige en het toekomstige onderzoek op het voornoemde gebied binnen de vakgroep EMV.

INLEIDING

Een constant of een variabel toerental

Alvorens in te gaan op de recente ontwikkelingen op het gebied van de synchrone machine met gelijkrichter voor windenergie-conversiesystemen is het wellicht zinvol om kort stil te staan bij de keuze van het systeem dat zorgt voor de omzetting van mechanische (roterende as) in elektrische energie. Hierbij kan men kiezen tussen systemen met een (vrijwel) constant en systemen met een variabel toerental.

In het algemeen zal een variabel-toerentalsysteem complexer en duurder zijn dan een systeem met een constant toerental. Daar staan als belangrijke voordelen van het variabel-toerentalsysteem tegenover dat de windturbine optimaal belast kan worden, dat koppelstoten (in het bijzonder die ten gevolge van verstoringen op het elektriciteitsnet) in de mechanische overbrenging door een goede koppelregeling beperkt kunnen worden (goedkopere en lichtere transmissie en toch een lange levensduur) en dat een buffering van kinetische energie in de rotor mogelijk is, waardoor kortetermijnfluctuaties (ten gevolge van windsnelheidsvariaties) in het askoppel en in het elektrische vermogen worden gereduceerd [1].

*Technische Universiteit Eindhoven
Postbus 513
5600 MB Eindhoven

De synchrone machine met gelijkstroom-tussentrap als variabel-toerentalsysteem

Als men eenmaal voor een variabel toerental heeft gekozen, kan men nog kiezen uit een groot aantal systemen [2]. Bij de vakgroep Elektromechanica en Vermogenslektronica (EMV) van de TU Eindhoven is reeds in een vroeg stadium de keuze gevallen op een synchrone machine met gelijkstroomtussentrap [3]. Dit elektromechanische conversiesysteem is een cascadeschakeling van een synchrone machine, een gelijkrichter, een smoorspoel en een wisselrichter, zoals in fig. 1 is aangegeven.

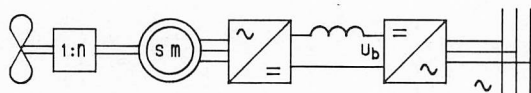


Fig. 1 De synchrone machine met gelijkstroomtussentrap in een windenergie-conversiesysteem

Een belangrijk voordeel van dit systeem ten opzichte van andere systemen met een variabel toerental is dat het een zeer hoog rendement heeft. Voorts worden synchrone machines normaal gesproken borstelloos uitgevoerd, dat wil zeggen dat er geen sleepringen (of commutator) en borstels zijn. Omdat borstel-sleepringcombinaties relatief veel onderhoud vragen en het functioneren ervan sterk afhankelijk is van atmosferische omstandigheden, is dit een belangrijk gegeven voor de keuze van een variabel-toerentalsysteem voor windturbines.

In deze bijdrage wordt een overzicht gegeven van de recente ontwikkelingen (ongeveer chronologisch) en huidige inzichten binnen de vakgroep EMV op het gebied van de synchrone machine met gelijkrichter.

HET STATIONAIRE GEDRAG

De eerste plannen voor een systeem met een synchrone machine (30 kVA) met

gelijkrichter waren nog gebaseerd op een vrij eenvoudig, stationair model van de synchrone machine, waarin bijvoorbeeld de verliezen werden verwaarloosd. Uit een vergelijking van de met dit eenvoudige model berekende karakteristieken met de karakteristieken die gemeten zijn bij de in 1982 in het laboratorium van de vakgroep EMV uitgevoerde experimenten bleek dat dit model voor dit (kleine) systeem redelijk voldoet [4]. Uit de beproeving van het systeem in een windturbine op het testveld van het ECN bleek voorts dat het conversiesysteem bij veranderingen van de windsnelheid de stationaire karakteristiek bleef volgen: de elektrische overgangverschijnselen verlopen blijkbaar relatief snel ten opzichte van de mechanische.

Hieruit kon de conclusie getrokken worden dat voor dit kleine systeem het eenvoudige, stationaire model gebruikt mocht worden. Verder bleek uit de experimenten op het testveld dat het systeem aan de verwachtingen voldeed.

Later werd een uitgebreidere berekeningsmethode voor het stationaire gedrag van de synchrone machine met gelijkrichter ontwikkeld [5]. Hiermee is het mogelijk om bijvoorbeeld stroom- en spanningsvormen in detail te berekenen. Als deze eenmaal bekend zijn, kunnen de extra verliezen die optreden bij de belasting van een synchrone machine met een gelijkrichter nader bepaald worden. Uit dit soort verliesbepalingen is gebleken dat bij een goede keuze van de machine en een lichte overdimensionering daarvan (10 %) de extra verliezen geen problemen behoeven op te leveren.

HET DYNAMISCHE GEDRAG

De eerste problemen

In 1982 bleek al dat de beschouwing van alleen het stationaire gedrag van het systeem onvoldoende was. Bij laboratoriumproeven was namelijk ontdekt dat het systeem soms instabiel werd: het

begon spontaan te oscilleren. Hoewel dit verschijnsel in eerste instantie niet begrepen werd, werd ervoor toch een oplossing gevonden: door de bekrachtigingswikkeling uit een stroom- in plaats van uit een spanningsbron te voeden kon de orde van het systeem met één worden verlaagd. Daarmee was het instabiele gedrag verdwenen.

Bij literatuuronderzoek werd ontdekt dat het verschijnsel al wel bekend was en dat Auinger en Nagel geprobeerd hadden het te verklaren [6]. In een later stadium heeft ook Ernst over deze problemen geschreven [7].

Een synchrone machine zonder demperwikkelingen

De gevonden oplossing (stroom- in plaats van spanningsbronbekrachtiging) kan om praktische redenen alleen bij kleinere machines toegepast worden. Dit betekende dat bijvoorbeeld voor het SEP-windpark een andere oplossing gevonden moest worden. Omdat het verschijnsel nog steeds niet volledig begrepen werd, was dit niet eenvoudig. Er werd toen het idee geopperd om de synchrone machine zonder de gebruikelijke demperwikkelingen uit te voeren. Hierdoor zou de commutatie in de gelijkrichter langzamer worden en dat zou weer een gunstige invloed op de stabiliteit hebben.

Omdat men bij dergelijke grote machines (300 kW) het gedrag niet eenvoudig experimenteel kan bepalen, werd het nader onderzocht door middel van simulatie. Daartoe werd van het systeem een netwerkmodel gemaakt dat vervolgens in een netwerksimulatieprogramma werd gebruikt [8].

Uit de simulaties bleek dat de voeding van de bekrachtigingswikkeling van deze demperloze machine aan praktisch niet realiseerbaar hoge eisen zou moeten voldoen. Mede in verband met de tijdsdruk is toen voor het SEP-windpark een iets duurdere thyristor- in plaats van een diodegelijkrichter gekozen, waardoor het systeem beter beheersbaar

is. Achteraf bezien lijkt dit een zeer goede keuze.

Een gedetailleerd model

De ontwikkelingen op het gebied van de demperloze machine hebben geen wezenlijke bijdrage geleverd aan het begrip van - en daarmee misschien een oplossing voor - de instabiliteiten. Om het systeemgedrag verder te kunnen verklaren werd het onderzoek eerst gericht op het vinden van een geschikt model van het systeem.

Daarbij heeft de ontwikkeling van een nieuw vervangingsschema van de synchrone machine een zeer grote rol gespeeld. Met dit schema kan eenvoudig een netwerkmodel van de synchrone machine (met dempers) met gelijkrichter gemaakt worden dat geschikt is voor gedetailleerde simulaties met behulp van een netwerksimulatieprogramma [9]. Hierbij kan men bijvoorbeeld ook de toestanden in de gelijkrichter onderzoeken, wat van belang is in geval van storingssituaties.

Een eenvoudig model

Nadelen van het gedetailleerde netwerkmodel zijn dat simulaties ermee zeer tijdrovend zijn en dat het niet direct geschikt is voor het ontwerpen van regelingen: het is praktisch niet bruikbaar voor een geïntegreerd model van een complete windturbine. In verband hiermee is uitgaande van het eerdergenoemde nieuwe vervangingsschema van de synchrone machine een eenvoudig model van de synchrone machine met gelijkrichter ontwikkeld, dat deze nadelen niet heeft. Dit model kan echter niet gebruikt worden voor de berekening van zeer snelle overgangsverschijnselen (enige milliseconden).

Voor het geval dat een diodebrug-gelijkrichter wordt toegepast, zijn de berekeningsresultaten met het eenvoudige model vergeleken met de resultaten met het gedetailleerde model [10]. De over-

eenkomst bleek, op de zeer snelle verschijnselen (zoals de rimpel op de gelijkstroom) na, goed te zijn.

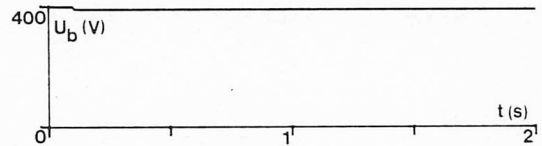
Een beschrijving van het eenvoudige model voor het geval een bestuurbare thyristorgelijkrichter wordt toegepast, is gegeven in [11].

Enige resultaten

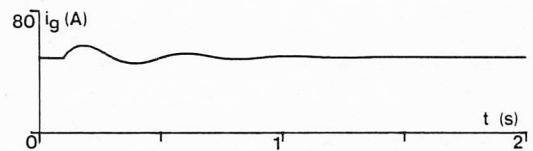
Met het eenvoudige model kunnen de eerste ervaringen met het dynamische gedrag van de synchrone machine met gelijkrichter (diodebrug) eenvoudig gesimuleerd worden. De resultaten van een dergelijke simulatie staan in fig. 2. De synchrone machine werd hierbij aangedreven door een gelijkstroommotor, waardoor het toerental vrijwel constant was. Als het systeem wordt geëxciteerd via een kleine daling (2,5 %) van de spanning in het gelijkstroomcircuit U_b (zie fig. 1 en fig. 2a) kan men zien dat het systeem gevoelig is voor slingeringen (fig. 2b). Bij een iets lagere bekrachtigingsspanning ($U_F=0,7$ V in plaats van $U_F=1$ V) blijkt het systeem zelfs instabiel te worden (fig. 2c). Als nu de weerstand van de bekrachtigingswikkeling door middel van een uitwendige weerstand met een factor 100 wordt vergroot onder gelijktijdige verhoging van de bekrachtigingsspanning met dezelfde factor ($U_F=70$ V en $R_F=0,46$ Ω in plaats van $U_F=0,7$ V en $R_F=4,6$ m Ω), blijft de stationaire bekrachtigingsstroom hetzelfde, maar wordt het systeem veel rustiger (fig. 2d). De voeding van de bekrachtigingswikkeling heeft nu een stroombronkarakter gekregen.

Bij de machine die bij de eerste experimenten werd gebruikt, was het mogelijk om via de borstelloze opwekker een stroombronkarakter te realiseren; dit kan echter niet bij alle borstelloze synchrone generatoren. Als de diodebrug evenwel vervangen wordt door een thyristorbrug die gestuurd wordt door een (nog niet geoptimaliseerde, proportionele) stroomregelaar, kan men toch uitstekende resultaten verkrijgen (fig. 2e).

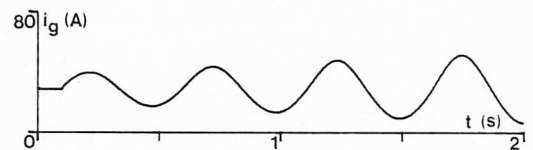
Bij grotere systemen ligt de zaak anders. Als voorbeeld wordt hier een windturbinesysteem met een synchrone machine van 375 kVA gebruikt volgens [11], waarbij bovendien is verondersteld dat de mechanische overbrenging tussen de



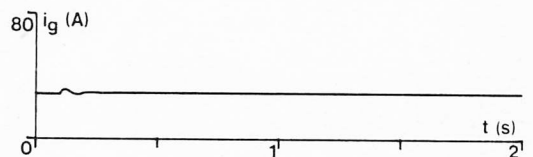
a De gelijkspanning als excitatie



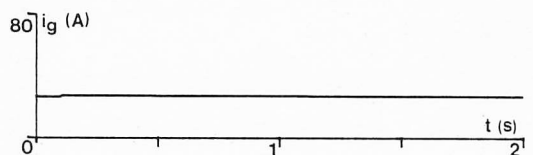
b De gelijkstroom bij $U_F=1$ V en $R_F=4,6$ m Ω ; diodebrug



c De gelijkstroom bij $U_F=0,7$ V en $R_F=4,6$ m Ω ; diodebrug



d De gelijkstroom bij $U_F=70$ V en $R_F=0,46$ Ω ; diodebrug



e De gelijkstroom bij $U_F=0,7$ V en $R_F=4,6$ m Ω ; thyristorbrug

Fig. 2 De synchrone machine (30 kVA) met gelijkrichter aangedreven door een gelijkstroommotor

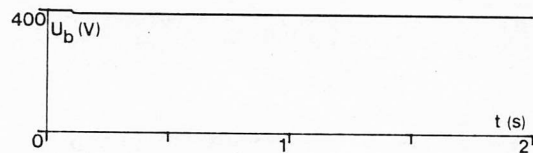
turbine zelf en de generator oneindig stijf is. Bij de simulaties is weer uitgegaan van een excitatie door middel van een gelijkspanningsdaling van 2,5 % (fig. 3a). Ook nu is het systeem weer gevoelig voor slingeren, maar stabiel (fig. 3b). Als de bekrachtigingswikkeling nu gevoed wordt uit een voeding met een stroombronkarakter, verdwijnt weliswaar de slingering, maar de responsie op de kleine spanningsdaling is relatief heftig (fig. 3c). Dit verschijnsel is in het algemeen bij grotere machines sterker dan bij kleinere, omdat de tijdconstanten van de dempers bij grotere machines normaal gesproken groter zijn dan bij kleinere. Dit impliceert dat men bij grotere systemen snel aangewezen is op een stuurbare thyristorgelijkrichter met regeling (fig. 3d).

Kortheidshalve zijn de simulatieresultaten voor het generatoraskoppel niet weergegeven. Deze lijken overigens zeer veel op die voor de gelijkstroom.

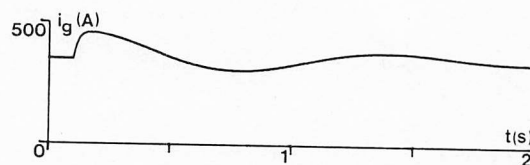
Het huidige en het toekomstige onderzoek

Het huidige onderzoek binnen de vakgroep EMV is gericht op de experimentele verificatie van het eenvoudige model. Voordat een model echter geverifieerd kan worden, zullen de parameters van dat model bekend moeten zijn. Met name over de bepaling van de parameters van een synchrone machine die belast wordt met een gelijkrichter is nog zeer weinig bekend. Op het moment wordt gewerkt aan een in de praktijk eenvoudig toe te passen bepalingsmethode die gebaseerd is op moderne parameterschattings technieken [12].

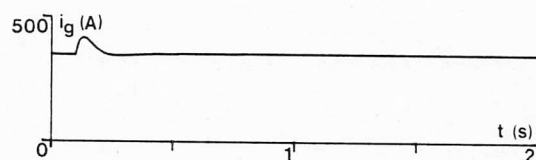
Als de verificatie met goed gevolg is afgerond, ligt er een model van de synchrone machine met gelijkrichter klaar dat gebruikt kan worden bij de vergelijking van dit systeem met andere conversiesystemen. Voor de verdere optimalisatie van het systeem zal het onderzoek hieraan zeker moeten worden vervolgd. Hierbij kan men denken aan aspecten zoals bijvoorbeeld de modellering



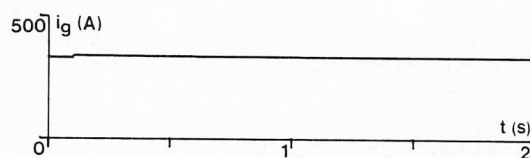
a De gelijkspanning als excitatie



b De gelijkstroom bij $U_F=0,4$ V en $R_F=0,24$ m Ω ; diodebrug



c De gelijkstroom bij $U_F=40$ V en $R_F=24$ m Ω ; diodebrug



d De gelijkstroom bij $U_F=0,4$ V en $R_F=0,24$ m Ω ; thyristorbrug

Fig. 3 De synchrone machine (375 kVA) in een windturbine

van de borstelloze opwekker en het in rekening brengen van ijzerverzadiging in het model.

CONCLUSIE

Uit de getoonde simulatieresultaten blijkt dat men in veel gevallen de voorkeur moet geven aan een stuurbare thyristorgelijkrichter boven een niet-stuurbare diodegelijkrichter.

Voorts is gebleken dat een praktisch realiseerbaar systeem van 300 kW (375 kVA) stabiel kan zijn, wat niet overeenkomt met de verwachtingen in [6].

en dat het gebruik van stationaire koppeloerarakteristieken van de synchrone machine met gelijkrichter voor onderzoek aan het mechanische deel van een windturbine in het algemeen niet zinnig is [11].

Dankzij het goede dynamische en het goede stationaire gedrag van de synchrone machine met (stuurbare) gelijkrichter is dit systeem zeer geschikt voor de toepassing bij windturbines.

LITERATUUR

- [1] J.A.N. de Bonte; M.J. Hoeijmakers: Elektrische conversiesystemen voor windturbines. PT/Werktuigbouw 42 (1987), no.4, p.32-35
- [2] G.A. Bohlander; Hans Lodder: Het kritisch volgen van de ontwikkelingen op het gebied van de elektromechanische conversiesystemen. Rapport TU Delft, Nr. 7431.p69, 1986
- [3] A.J.T.M. Koenraads; L.J.J. Offringa; F.J.C. Schellens; W.J. de Zeeuw: Some aspects of the Dutch National Research Programme for Wind Energy. Journal A 20 (1979), no.3, p.151-159
- [4] J.A.N. de Bonte; M.J. Hoeijmakers: Windturbinesysteem met variabel toerental. PT/Elektrotechniek/Elektronica 37 (1982), no.8, p.66-73
- [5] M.J. Hoeijmakers: On the steady-state performance of a synchronous machine with convertor: with special attention to wind energy conversion systems. Proefschrift TU Eindhoven, 1984
- [6] H. Auinger; C. Nagel: Vom transienten Betriebsverhalten herruehrende Schwingungen bei einem ueber Gleichrichter belasteten Synchrongenerator Siemens Forsch.- u. Entwickl.-Ber. 9 (1980), no.1, p.1-7, no.2, p.85-87
- [7] J. Ernst: Control of a variable speed wind energy converter with synchronous generator and a d.c. link converter. Proc. European Wind Energy Conf., 22-26 oktober 1984, Hamburg, p.606-611
- [8] M.J. Hoeijmakers: Resultaten van enkele simulaties van overgangsverschijselen bij een demperloze synchrone generator met gelijkrichter. Rapport TU Eindhoven, EMV 84-33, 1984
- [9] M.J. Hoeijmakers: Simulation of a synchronous machine with diode rectifier by means of a network model. Proc. Int. Conf. on Electrical Machines, Muenchen, 8-10 sep. 1986, p.733-736
- [10] M.J. Hoeijmakers: A simple model of a synchronous machine with diode rectifier using state variables. Proc. of the Int. Symp. on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Power Systems, Quebec 1987, p.191-199
- [11] M.J. Hoeijmakers: Some numerical experiments with a linearized model of a synchronous machine with rectifier. Int. Conf. and Exhibition on Windfarms, Leeuwarden, 13-16 okt. 1987
- [12] J.M. Vleeshouwers: Enkele onderwerpen in verband met de modelvorming van de synchrone machine met mutator. Afstudeerverslag TU Eindhoven, EMV 87-17, 1987