

Die beheer van 'n elektriese kragnetwerk-vervormingskompensator-hibried deur 'n kunsmatige neurale netwerk

I.S. Shaw, J.D. van Wyk*, R.W. Pretorius**

Navorsingsgroep vir Industriële Elektroniese Tegnologie, Fakulteit Ingenieurswese, Randse Afrikaans Universiteit, Posbus 524, Auckland Park, 2006

Ontvang 13 Mei 1997; aanvaar 2 Februarie 1998

UITTREKSEL

'n Toenemende belangstelling in die verwydering van vervorming in elektriese kragnetwerke het tot die ontwikkeling van verskillende kompensatortopologieë gelei. Weens die toenemende koste van elektriese energie moet 'n kompensator van enige topologie 'n koste-effektiewe diens lewer. Hierdie artikel handel oor die ontwikkeling van 'n kunsmatige neurale netwerk, opgelei deur die trpropagasiemethode, wat die koste-effektiewe bedryf van 'n kompensatorhibried beheer. Die kompensatorhibried bevat verskillende omsetters en filters. Die beheerder ontleed die lastoestande, operasionele eienskappe en verliese van die omsetters en filters en stel 'n optimale koste-effektiewe kompensasiestrategie daar. Die modellering van operasionele verliese en omsettereienskappe asook die vereiste beheerstrategie word bespreek.

ABSTRACT

Control of a hybrid compensator in a power network by an artificial neural network

Increased interest in the elimination of distortion in electrical power networks has led to the development of various compensator topologies. The increasing cost of electrical energy necessitates the cost-effective operation of any of these topologies. This paper considers the development of an artificial neural network based controller, trained by means of the backpropagation method, that ensures the cost-effective operation of the hybrid compensator consisting of various converters and filters. The controller continuously analyzes the load conditions, operational characteristics and losses of the converters and filters and proposes an optimal cost-effective control strategy. The modelling of operational losses and converter characteristics as well as the required control strategy are discussed.

1. INLEIDING

Die toename in die gebruik van drywingselektroniese toerusting en die gepaardgaande toename in golfvormvervorming, veroorsaak deur variërende nielineêre laste in elektriese kragnetwerke, het tot die ontwikkeling van verskeie kompensatortopologieë gelei. Vir die kompensering van verskillende vervormingskomponente kan daar 'n breë spektrum van drywingselektroniese mutators gebruik word.

Die drywingskompensators wat in die verlede ontwikkel is, is gewoonlik effektief slegs vir die kompensering van 'n bepaalde vervormingskomponent. In die teenwoordigheid van talle vervormingskomponente word gewoonlik van 'n kombinasie van verskillende kompensatortopologieë gebruik gemaak. Een van hierdie kombinasies van kompensatortopologieë is die kompensatorhibried wat die gebruiker in staat stel om oor 'n wye bestek van lastoestande vir die golfvervorming te kompenseer.^{1-3,7-9}

Onlangs ontwikkelde toestelle is:

- Statiese VAR-kompensator (Arbeidsfaktor-verbeterings-kapasitor (FK) en tiristorgeskakelde reaktor (TGR)), vir die kompensasie van reaktiewe drywing by fundamentele frekwensie.
- Filterbank-tiristorgeskakelde reaktor (FB-TGR) kompensator, vir die kompensasie van reaktiewe drywing by fundamentele frekwensie, asook harmoniese reduksie.¹²

- Dinamiese (aktiewe) vervormingskompensators (spannings-gevoede (SGK) of stroomgevoede (STGK)), vir harmoniese en nieharmoniese drywingskompensasie afhanklik van die energiestoor.^{1,2,3,6}
- Kompensatorhibried vir reaktiewe drywingskompensasie by grondfrekwensie, asook harmoniese/nieharmoniese drywingskompensasie.

Die keuse van 'n kompensator is in 'n groot mate van die tipe las, die kragnetwerk se vervormingsvlak, die kompensator se effektiwiteit en die koste-implikasies vir die gebruiker afhanklik. Onder konstante las is 'n spesifieke kompensator genoegsaam. Wanneer die las en die ooreenkomstige vervorming tydafhanklik is (ingeval van die huidige kragnetwerke met nielineêre dinamiese hoëdrywingslaste), is hierdie benadering onvoldoende en 'n behoefte ontstaan om verskillende kompensators wat vir die gegewe omstandighede meer effektief is, in te skakel. Dus word 'n enkele kompensator wat uit 'n aantal omsetters bestaan, met ander woorde, 'n kompensatorhibried, gebruik. Dit sal die gebruiker in staat stel om die vervorming te alle tye vir alle omstandighede te kompenseer.^{7,8,9} Ten einde 'n kompensatorhibried koste-effektief te bedryf, word 'n intelligente beheerder verlang wat in staat is om die kompensasiestrategie van die kompensatorhibried aan te pas na gelang van die aard van die nie-aktiewe drywingskomponentveranderinge. Indien in gedagte gehou word dat die tegnologie dit vandag moontlik maak om 'n kompensatorhibried vir tydperke van tot twintig jaar aaneen-

* Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word.

** Tans werksaam by die Wetenskaplike en Nywerheidsnavorsingsraad.

lopend te bedryf, is dit duidelik dat die koste-effektiewe bedryf van 'n kompensatorhibried tot groot finansiële besparing vir die gebruiker daarvan kan lei.

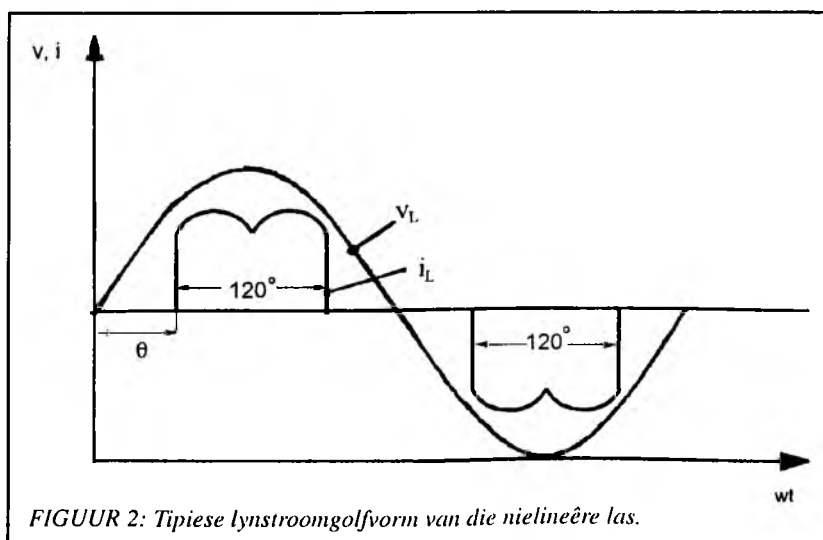
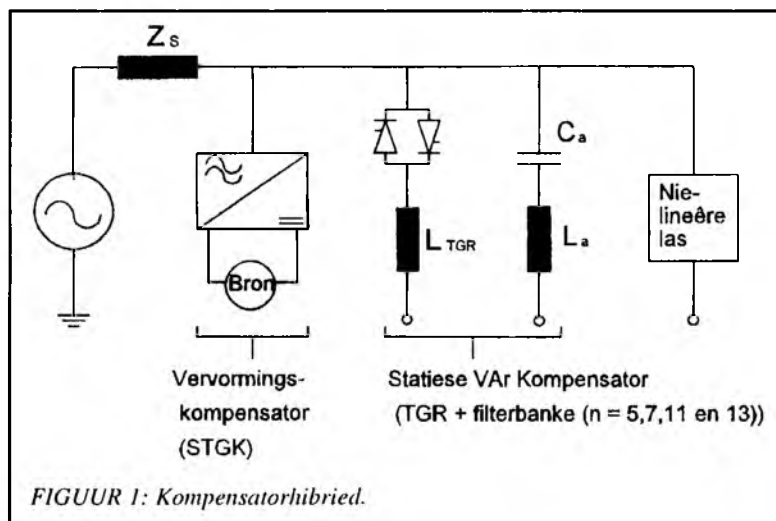
In hierdie artikel word die ontwikkeling en eienskappe van 'n kunsmatige neuralenewerk-beheerder vir die koste-effektiewe bedryf van 'n kompensatorhibried ondersoek. Spesiale aandag is geskenk aan die volgende essensiële aspekte vir die ontwikkeling van 'n kunsmatige neuralenewerk-beheerde kompensator:

- Die modellering van die operasionele verliese van die kompensatorhibried.
- Die modellering van die koste-effektiewe beheerstrategie, die opleiding en die toetse van die kunsmatige neurale netwerk.

2. KOMPENSATORTOPOLOGIE

Die kompensatorhibried bestaan uit die volgende komponente (figuur 1), gebaseer op apparaat wat in die laboratorium beskikbaar was:

- 'n 21 kVAr-driefasfilterbank en tiristorbeheerde reaktor (FB-TGR) met LC-filters ingestem by die 5de, 7de, 11de en 13de harmonieke frekwensies, almal afsonderlik geskakel (LC5, LC7, LC11, LC13).
- 'n 6 kVAr driefase stroomgevoede dinamiese kompensator (STGK).



25 kVAr nielineêre las (NLL), wat 'n induktief-belaste tiristor-beheerde gelykrichter bevat, word gekompenseer. Die eienskappe van die lynstrome wat vanuit die kragbron getrek word, is as volg (figuur 2):

- Fundamentele frekwensie reaktiewe drywing: verstelbaar tussen 0 en 21 kVAr induktief.
- Harmoniese stroom gegenereer: 5de (maks. 20%), 7de (maks. 10%), 11de (maks. 5%) en 13de (maks. 5%) met verwysing na die fundamentele komponent.

Die bovermelde kompensators is almal van die parallel tipe wat die niegewenste (nie-aktiewe) stroomkomponente absorbeer. In 'n algemene geval bestaan die lasstroom i_L uit 'n aktiewe komponent i_p , 'n grondfrekwensie reaktiewe komponent i_q (normaalweg van 'n induktiewe aard), 5de, 7de, 11de en 13de harmonieke i_5, i_7, i_{11}, i_{13} , asook 'n komponent i_d wat die oorblywende harmonieke en vervormings bevat. Die nie-aktiewe stroomkomponente beskryf alle tipes vervorming en word as $i_L - i_p$ gedefinieer.

In die kompensatorhibried voer die ingestemde LC-filters 'n dubbele taak uit:

- a) Die individuele filterbanke lewer 'n vaste hoeveelheid reaktiewe drywing by grondfrekwensie (van 'n kapasitiewe aard).
- b) In die teenwoordigheid van 'n genoegsame serienetwerk-impedansie ($Z_s = \pm 5\%$) absorbeer die filterbanke 'n hoë persentasie (85%) van die harmoniese strome. Die TGR van die FB-TGR produseer 'n beheerde hoeveelheid grondfrekwensie reaktiewe drywing (van 'n induktiewe aard) en laat sodoende 'n akkurate beheer van die reaktiewe stroomkomponent i_q toe. Die tiristorbeheer van die reaktors veroorsaak die generasie van addisionele harmonieke¹⁸ wat saam met dié wat in die lyn teenwoordig is, deur die LC-filters verwyder word. Die doel van die stroomgevoede omsetter is om die hoë-orde-harmonieke, ander vervorming, asook harmonieke wat nie volledig deur die LC-filters verwyder is nie, te elimineer.

Die bovermelde kompensators is in ooreenkomstig met die eksperimentele proefinstallasies gemodelleer. Beide die TGR en STGK bevat stabiele laevlak-beheerders wat die korrekte bedryf van die afsonderlike omsetters verseker. Die hele stelsel, saam met die laevlakomsetters, is deur middel van EMTP ("Electromagnetic Transients Program") gesimuleer om die intelligente beheerder se bedryf te verifieer.

3. DIE NEURALENETWERK-GEBA-SEERDE BEHEERDER

Die beheerder wat gebruik word is 'n opgeleide, kunsmatige neurale netwerk. Die beheerder ontleed die lastoestande, die operasionele verliese, asook die beperkings van die verskillende kompensatorstrukture, waarna 'n koste-optimale kompensasiestrategie vir die kompensatorhibried voorgestel word. Hierdie strategie bevat die in- of uitskakeling van die gepaste kompensatorstrukture (filterbanke, TGR, STGK) wat vir die effektiewe kompensasie van die las nodig is sonder om oormatige operasionele verliese te veroorsaak.

Daar bestaan die moontlikheid dat 'n verbruiker, wat 'n nie-lineêre las aan die kragnetwerk koppel, in die toekoms gepenaliseer sal word vir die vervorming wat sy las veroorsaak. Dit is duidelik uit die internasionale groei van standarde vir die maksimum vervorming in kragnetwerke. Terselfdertyd word nuwe kostestrukture wêreldwyd ingestel.^{4,5,8} Die doel van die kompensator-hibried is om hierdie koste tot 'n minimum te beperk deur die vervorming aan die verbruiker se kant te verminder.^{10,11,12}

Die omsetterstrukture bestaan egter uit nie-ideale komponente, soos induktors, transformators en halfgeleierelemente. Die ontoepaslike gebruik van kompensatorstrukture kan 'n aansienlike operasionele kostestying veroorsaak, wat die finansiële voordele van die hele kompensasieproses kan teëwerk. Die neurale netwerk-topologie is gekies vanweë sy vermoë om sy interne verbindingstruktuur na die gewenste responspatroon aan te pas. Die parallelverwerkingsvermoë van hierdie netwerke maak hulle 'n uitstekende keuse vir beheerders wat op 'n inherente manier terselfdertyd fout- en ruistolerant is.^{14,15,19-21}

Die voorgestelde beheerbenadering word in figuur 3 getoon. Eerstens word 'n meting van die heersende lastoestande uitgevoer, dit wil sê, die lasstroom i_l word gemeet. Tweedens word vanuit hierdie meting die volgende stroomkomponente bereken: die amplitudes van die aktiewe en reaktiewe komponente (I_p , I_q) by die grondfrekwensie, asook die amplitudes van die harmoniese

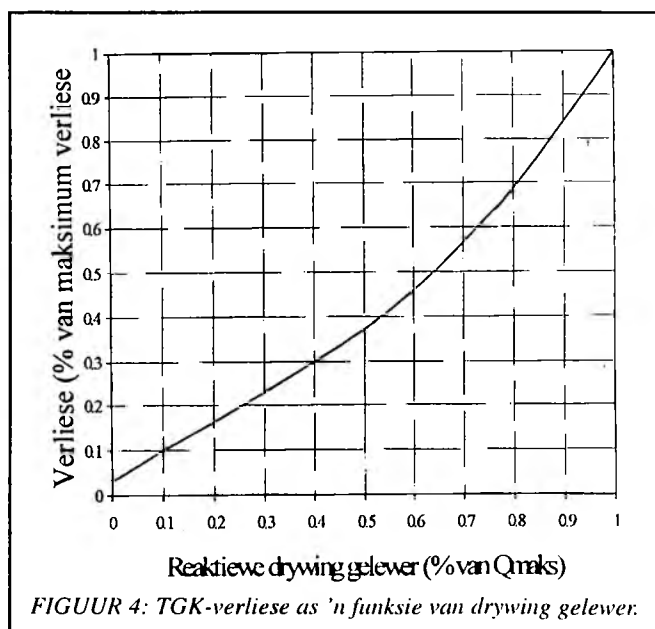
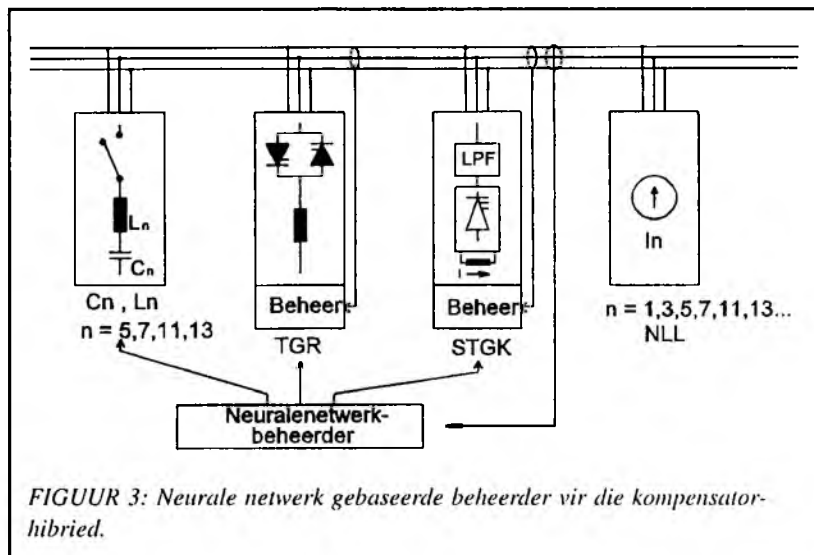
komponente by die 5de, 7de, 11de en 13de Fourier-komponente (I_5 , I_7 , I_{11} , I_{13}). Hierdie inligting dien as 'n inset vir die neurale netwerk, wat 'n "toesighoudende" beheerfunksie vir die stelsel as 'n geheel uitoefen. Op basis van die kennis wat gedurende die opleidingsfase versamel is, sal die neurale netwerk 'n besluit neem oor die geskikste beheerstrategie, dit wil sê, die beste kombinasie van kompensators vir die gegewe lastoestande. Elke omsetter (LC5, LC7, LC11, LC13, TGR, STGK) kan afsonderlik in- of uitgeskakel word, dus bestaan daar $2^6 = 64$ verskillende skakelkombinasies, waarvan die korrekte een vir elke lastoestand gekies moet word. Om die neurale netwerk suksesvol op te lei, is 'n deeglike kennis van die operasionele eienskappe en beperkings, asook verliese van elke substelsel van die kompensatorhibried, onontbeerlik. Die volgende afdeling bespreek die modellering van verskillende kompensatorhibriedstrukture (filterbanke, TGR, STGK) met verwysing na hul eienskappe en beperkings, asook operasionele verliese.

4.1 Operasionele verliese

Die operasionele verliese van die kompensatorhibried wat in hierdie afdeling gemodelleer word, verteenwoordig 'n eerste-ordebenadering tot die ware omsetterverliese. Met ander woorde, aandag sal slegs aan die hoofverlieskomponente van elke omsetter geskenk word.

Die operasionele verliese van die volledige kompensator kan in twee hoofkategorieë verdeel word: vaste-filter tiristorbeheerde reaktor (FB-TGR)-verwante en stroomgevoede kompensator (STGK)-verwante verliese. Vir hierdie kategorieë kan die volgende verliesbronne geïdentifiseer word:^{11,18}

- FB-TGR-kompensator
 - Tiristorbeheerde reaktor (TGR) van die FB-TGR
 - Filterbankinduktors
 - Filterbankkapasitors
- Stroomgevoede kompensator
 - Skakelverliese
 - Geleidingsverliese
 - Stroombronverliese
 - Uitsetfilters



a) FB-TGR-kompensatorverliese

Die tiristorbeheerde reaktor

Die verliese van die TGR bestaan uit tiristorgeleidingsverliese, gaperverliese en verliese in die TGR se reaktors. Die beduidendste verliese is dié wat met die reaktors geassosieer is, naamlik koperverliese (geleiers) en kernverliese. Die verliese wat met die reaktors verbind is, toon 'n sterk frekwensieafhanklikheid te danke aan faktore soos die hudeffek, die nabyheidseffek, en 'n nie-sinusvormige opwekking van die reaktorkerne. Volgens resultate is 'n drywingsafhanklike verliesmodel afgelei vir die prototipestelsel wat ondersoek word. Figuur 4 toon die operasionele verliese as 'n funksie van die reaktiewe drywing wat verskaf word.

Die filterbankinduktors

Die verliese van die filterbankinduktors is gemodelleer om die gekombineerde verliese te verteenwoordig wat deur die grondfrekwensie reaktiewe drywing en die absorpsie van die huidige lynstroomharmonieke daargestel word. Hierdie verliesmodeleringsproses betrek weer die gebruikmaking van 'n frekwensieafhanklike induktormodel wat geleidingsverliese (I^2R), huid-

effek, nabyheidseffek en werwelstrome, geassosieer met die opwekking van die reaktorkern, in ag neem. 'n Tipiese verlieskurwe vir 'n filterbankinduktor word in figuur 5 getoon.

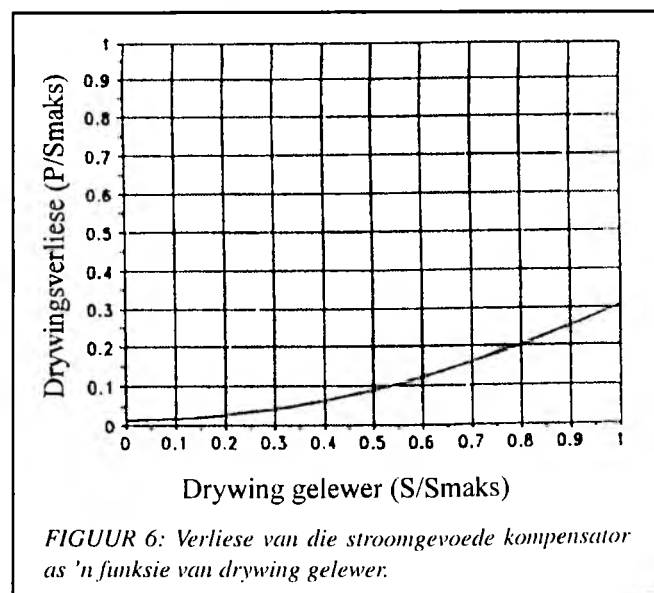
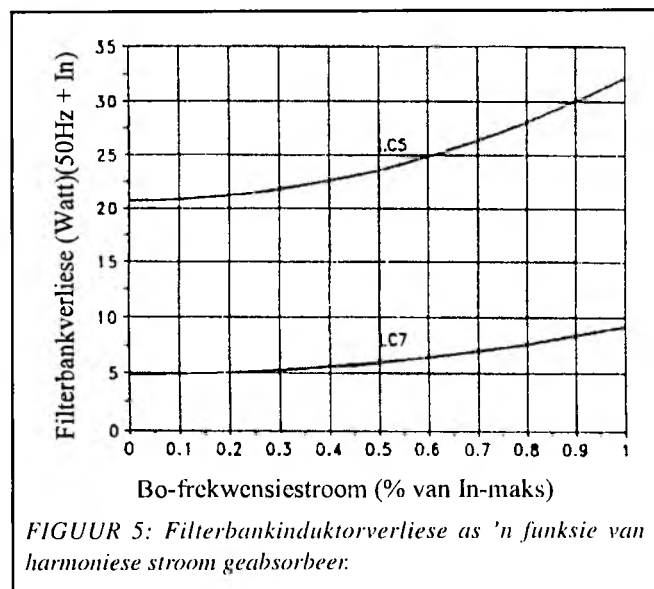
Die filterbankkapasitors

Die verliese van die filterbankkapasitors is verwant aan die nie-ideale diëlektrikum en geleiers wat in die praktyk gebruik word. Daar is dus 'n sekere verlies geassosieer met die drywingskapasitors wat 'n fasehoek tussen spanning en stroom, kleiner as die verwagte 90 grade, sal veroorsaak. In geval van drywingskapasitors is hierdie verliese verwaarloosbaar klein¹⁸ in vergelyking met die ander verliese wat teenwoordig is, dus sal hulle in hierdie werk geïgnoreer word.

Die operasionele verliese van die hele FB-TGR-kompensator is die algebraïese som van die bovermelde komponenteverliese. Na 'n deeglike bestudering van figure 4 en 5 kan die gevolgtrekking gemaak word dat die operasionele verliese van die FB-TGR-kompensator sterk afhanklik is van:

- die hoeveelheid reaktiewe drywing verskaf deur die TGR, en
- die hoeveelheid harmoniese stroom wat deur die filterbank geabsorbeer word.

Die FB-TGR-reaktorverliese in hierdie stelsel is 'n grootte-orde hoër as dié van die filterbankinduktors, te danke aan die groot hoeveelheid reaktiewe drywing wat verskaf word.



b) Stroomgevoede kompensatorverliese

Die stroomgevoede kompensator bevat 'n induktor as stroombron, 'n pulswydte-beheerde brugmutator vir driefase (20kHz) en 'n onderlaat-uitsetfilter. Hierdie uitsetfilter word gevorm deur die lekinduktansie van die isolasietransformator en 'n filterkapasitor. Die isolasietransformator verbind die stroomgevoede kompensator aan die kragnetwerk.

Geleidingsverliese

Die geleidingsverliese geassosieer met die skakelaars van die mutator verteenwoordig 'n groter deel van die STGK se totale operasionele verliese, dus verg hulle 'n breedvoeriger modelering.²² In die modelleringsproses van geleidingsverliese moet aandag geskenk word aan die differensiële aan-toestandswaardes, asook die aan-toestandspanning van die halfgeleier-skakelement. As gevolg hiervan is die verliese sterk afhanklik van die stroom wat deur die halfgeleierelement vloei.²²

Stroombroninduktor

Die verliese geassosieer met die stroombroninduktor is hoofsaaklik geleidingsverliese en word as I^2R -verliese gemodelleer, waar R die ohmse weerstand van die induktor verteenwoordig.

Die uitsetfilter

Die verliese geassosieer met die uitsetfilter bestaan uit dié van die filterkapasitor en die isolasietransformator. In ooreenstemming met die voorafgaande stellings is die filterkapasitor se verliese verwaarloosbaar. Die isolasietransformator se 'n is egter beduidend en 'n verliesmodel wat die kern- en geleidingsverliese respektiewelik in ag neem, is gebruik.²² Hierdie parameters word verkry vanuit oopbaan- en kortsluittoetse op die fisiese transformator.

Die model van die stroomgevoede omsetter se totale verliese is die kombinasie van die verskillende komponenteverliese. Hierdie verliesmodel toon 'n sterk afhanklikheid van die drywing gelewer deur die kompensator, soos in figuur 6, wat die operasionele verliese van die STGK as 'n funksie van gelewerde drywing toon. Die verliese is genormaliseer met betrekking tot die geïnstalleerde drywing van die STGK.

4.2 Operasionele eienskappe

Figuur 7 gee die operasionele verliese van die FB-TGR en STGK van die gemodelleerde proefinstallasie, met betrekking tot die drywingsvlak wat gelewer word. Die x-as toon die bedryfsdrywing genormaliseer ten opsigte van die geïnstalleerde drywing vir elke afsonderlike omsetter (21 kVAr vir die FB-TGR en 6 kVAr vir die STGK). Die y-as verteenwoordig die operasionele verliese, as persentasie van die 21 kVAr van die FB-TGR. Op basis van die kurwes kan geredeneer word dat die mikpunt om die operasionele verliese van die totale kompensatorhibried te minimiseer, gerealiseer kan word deur

- die minimisering van die drywing gelewer deur die STGK, en
- die maksimisering van die reaktiewe drywing gelewer deur die FB-TGR.

Die eerste vereiste kan nagekom word deur die sinvolle toepassing van die STGK, met ander woorde, met die inskakeling van die STGK slegs as dit *werklik* vereis word. Die tweede vereiste verg die intelligente skakeling van die FB-TGR se filterbanke om te verseker dat die reaktiewe drywing (kapasitief) wat gelewer kan word, goed aangepas is by die reaktiewe drywing (induktief) wat deur die las geabsorbeer word; dus word die reaktiewe drywingsvlak wat deur die TGR van die FB-TGR-element gelewer word, geminimiseer.

basis van die kompensasie van 'n spesifieke lastoestand, wat die voorgestelde uitsetpatroon gebruik. In die bepaling van die voorgestelde uitsetpatroon vir die neurale netwerk is die beheervereistes, vermeld in die voorafgaande afdeling, ook in ag geneem. Daar is ses verskillende gebiede wat vanuit die grafiek geïdentifiseer kan word. Hierdie gebiede korreleer met veranderinge in die skakelpatroon van die kompensatorhibried se omsetterstrukture, as gevolg van lasveranderinge.

Die struktuur van die kunsmatige neurale netwerk wat met die bovermelde opleidingsdata suksesvol opgelei is, bestaan uit drie lae: een inset-, een verborge en een uitsetlaag, met 5, 150 en 6 neurone in elk respektiewelik.

6. RESULTATE

'n Kunsmatige neurale netwerk, opgelei soos bo beskryf, se operasionele verliese is getoets deur die evaluering van die volledige kompensator, beheer deur 'n opgeleide neurale netwerk. Hierdie resultate is vergelyk met 'n soortgelyke kompensator, beheer deur 'n konvensionele beheerder, waar al die omset-

terstrukture aangeskakel gebly het. Die vergelyking is uitgevoer deur die gebruik van die EMTP-simulasieprogram. Die EMTP-simulasies is gekalibreer teen eksperimentele metings om die geldigheid te bepaal.^{23,24} Die las wat deur die kompensatorhibried gekompenseer is, was 'n induktief-belaste tiristorbeheerde gelykrichter, waarvan die vuurhoek θ - sien figuur 2 - verstel is om agtien verskillende lastoestande te verkry.

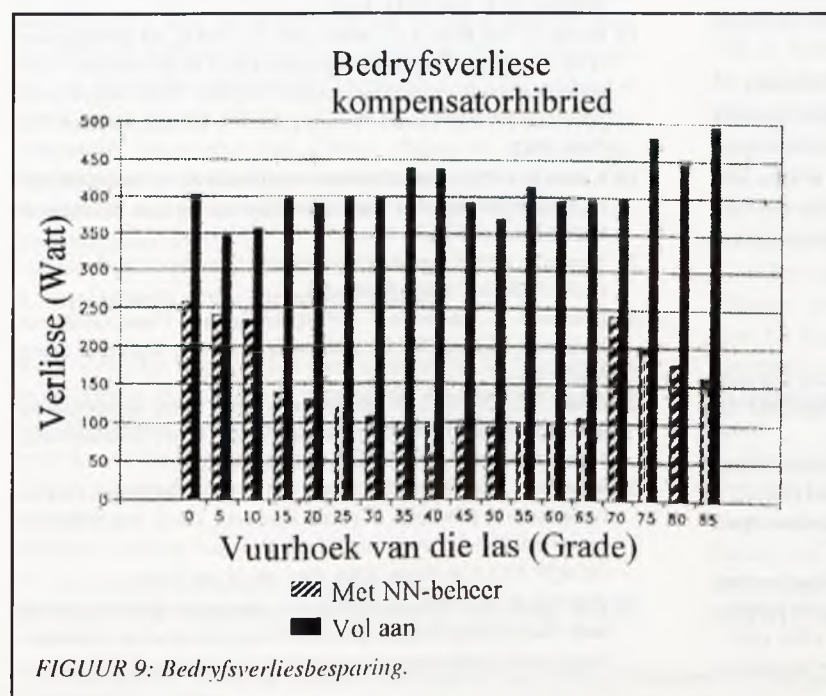
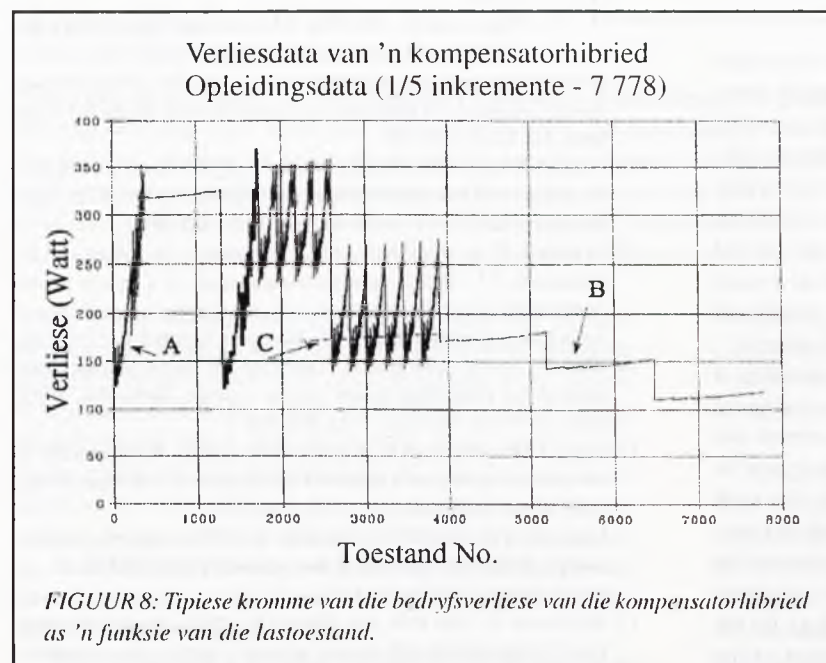
Figure 9 en 10 toon respektiewelik die vergelykende verlieswaardes en die relatiewe besparings van operasionele verliese wat deur die voorafgaande prosedure verkry is. In figuur 9 is dit duidelik dat die neuralenetwerkbeheerde kompensator konstant beter gepresteer het as die konvensioneel beheerde kompensator. Die besparing van operasionele koste het tussen 30% en 70% gelê.

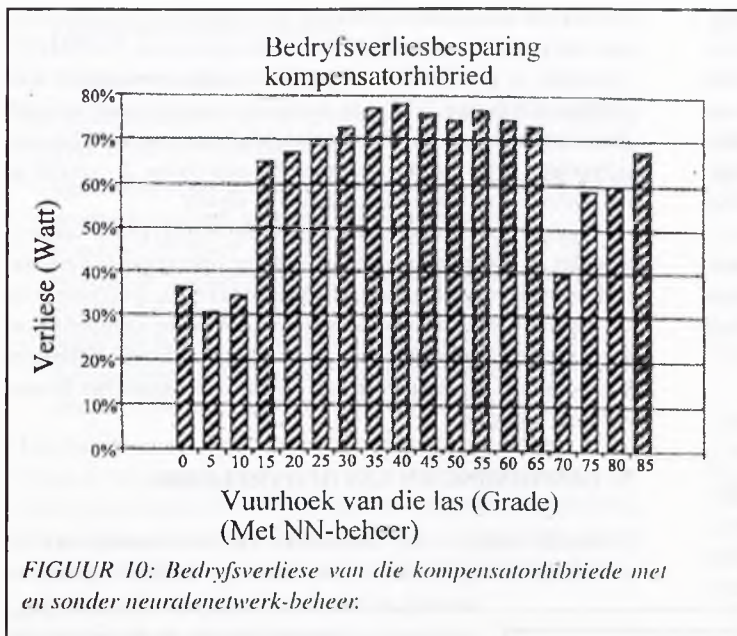
7. OPSOMMING EN GEVOLGTREKKING

In hierdie studie is die hooftrekke van die ontwerp van 'n neuralenetwerk-gebaseerde beheerder bespreek, soos: probleemstelling, stelselidentifikasie, stelselmodellering, bepaling van beheerdoelwitte, en die generering van 'n opleidingsdatastel vir die neurale netwerk. Aandag is geskenk aan die modellering van die operasionele verliese van die verskillende kompensatorstrukture en aan die operasionele eienskappe van omsetters in verband met die verliese. Die prosedure waardeur 'n geskikte datastel geskep kan word om 'n neuralenetwerk-gebaseerde beheerder vir die optimale koste-effektiewe beheer van 'n kompensatorhibried op te lei, is gedemonstreer, met een tipe las. Hier was die beheerder suksesvol, maar daar is nog baie werk te doen om die beginsels vir willekeurige lastipes te ondersoek.

SUMMARY

The increased use of non-linear equipment - such as power electronic converters, arc furnaces etc. in power networks - prompted the development of various compensator topologies to compensate for the introduced distortion. These compensators employ different types of converters for the compensation of different non-active power components. They are either designed to eliminate a specific non-active power component, or a combination of them is used to compensate simultaneously for several different distortion components. The choice of compensator depends largely on the type of the load, the distortion levels in the power network, the effectiveness of the compensator and very importantly, the cost implications for the user. Under constant load conditions one specific type of compensator would normally suffice. However, when the load and the accompanying distortion varies with time, which is the case with present non-linear, dynamic high-power loads, another compensation strategy is needed. It would be advantageous to construct a single compensator consisting of various converters - the hybrid compensator - to enable the user to compensate effectively at all times for the distortion caused by the load.





In order to operate such a hybrid compensator cost-effectively, an intelligent control system capable of constantly monitoring the load and updating the compensation strategy is needed. Keeping in mind that with the technology available today, compensators can effectively operate for periods in excess of twenty years, it makes sound economic sense to operate the compensators as cost-optimally as possible. The operating costs referred to reflect the cost of power absorbed and dissipated as a result of losses incurred by the hybrid compensator itself, which will partially offset the costs saved by the compensation process.

A neural network is a device with a learning capability. It can be trained with known input-output patterns to recognize patterns of input signals even previously not encountered and produce appropriate outputs to actuators to take the action required. The neural network based controller used in this work consists of a backpropagation-trained neural network that continually analyzes the load conditions, taking into account the operational characteristics and losses of the hybrid compensator, and proposes a cost-optimal compensation strategy for the hybrid compensator whereby one or more converters of the hybrid compensator is connected to the power network.

The modelling of the hybrid compensator's operational losses and characteristics to enable a cost-effective operation is discussed in detail. Special attention is given to the modelling of the cost-effective control strategy in selecting the training data of the neural network controller. The training and evaluation of the neural network controller is also discussed in detail. The feasibility of this approach has been successfully demonstrated for one specific type of load, but remains to be proven for a generic load.

LITERATUURVERWYSINGS

1. Van Wyk, J.D. (1993). Power quality, power electronics and control, *Conf. Proc. 5th Eur. Conf. on Power Electr. and Appl. (EPE)*, Brighton, U.K. 17-32.
2. Van Wyk, J.D. (1989). Electronic power conditioning: some limitations, development and applications, *Trans. SAIEE*, 80 (1), 2-13.
3. Bose, B.K. (1992). Power electronics - a technology review, *Proc. IEEE*, (8), 1303-1334.
4. Emmanuel, A.E., Yang, M., Pileggi, D.J. (1991). The engineering economics of power systems harmonics in subdistribution feeders: a preliminary study, *Trans. IEEE on Power Sys*, 6 (3), 1092-1098.
5. Wagner, V.E., Emmanuel, A.E. et al. (1993). Effects of harmonics

- on equipment, *Trans. IEEE on Power Delivery*, 8 (2), 672-680.
6. Enjeti, P., Shireen, W. et al. (1992). Analysis and design of an active power filter to cancel harmonic currents in low voltage electric power distribution systems, *Proc. IEEE Industrial Electronics Conference (IECON)*, San Diego, Ca., USA, 368-372.
7. Marshall, D.A., Van Wyk, J.D. (1991). An evaluation of the real-time compensation of fictitious power in electric energy networks, *Trans. IEEE on Power Delivery*, 6 (4), 1774-1780.
8. Emmanuel, A.E., Yang, M. (1993). On the harmonic compensation in non-sinusoidal systems, *Trans. IEEE on Power Delivery*, 8 (1), 393-399.
9. Marshall, D.A., Venter, F.P., Van Wyk, J.D. (1991). An evaluation of the instantaneous calculation of load current components, *Proc. 1991 IEEE Intern. Workshop on Power Definitions and Meas. under Non-Sinus. Cond.*, Como, Italy, 95-112.
10. Marqott Power Projects (1993). Optimal control of reactive power to minimize electricity bills, *Vector Magazine*, 12-15.
11. Blaszczak, G., Van Wyk, J.D., Marshall, D.A. (1992). An evaluation of economical aspects of hybrid non-active power compensation in power networks, *Conf. Rec. IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems (ICHPS-V)*, Atlanta, Ga. USA, 172-176.
12. Enamul, Haque S.M., Hussian, Malik N. (1987). Analysis and performance of a fixed filter-thyristor controlled reactor (FF-TCR) compensator, *IEEE Trans. on Power Sys.*, 2 (2), 303-309.
13. Marshall, D.A., Van Wyk, J.D., Vermooten, D., Venter, F.P., Schoeman, J.J. (1990). An experimental study of a hybrid power compensator, *Conf. Rec. IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems (ICHPS-IV)*, Budapest, October 4-6, 134-140.
14. Mori, H., Itou, K., Uematsu, H. (1992). An artificial neural net based method for predicting power system voltage harmonics, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 7 (1), 402-409.
15. Peng, T.M., Hubele, N.F., Karady, G.G. (1992). Advancement in the application of neural networks for short-term load forecasting, *IEEE Trans. on Power Sys.*, 7 (1), 250-257.
16. Emanuel, A.E., Orr, J.A., Cyganski, D. (1993). A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 8 (1), 411-421.
17. Blaszczak, G., Van Wyk, J.D., Shaw, I.S. (1993). Smart non-active power compensator with neural network control - an evaluation, *Conf. Proc. 5th Europ. Conf. on Power Electr. and Appl. (EPE'93)*, Brighton, U.K. Sep 1993, 36-41.
18. Boake, I., Van Wyk, J.D., Blaszczak, G. (1993). An investigation of the reduction of harmonic dependent losses in the magnetic components of static var compensators, *Conf. Rec. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS'93)*, Toronto, October 2-8, 1176-1182.
19. Kosko, B. (1992). *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach in Machine Intelligence*, Internat. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs N.J.
20. Stanley, J. (1990). *Introduction to Neural Networks*, California Scientific Software, Sierra Madre Ca.
21. Lawrence, M., Lawrence, J. (1993). *Brainmaker: Users' Guide and Reference Manual*, 7th ed. California Scientific Software, Sierra Madre Ca.
22. Boake, I.G. (1993). Loss models for dynamic filters, compensating non-active power in electric networks, M.Eng.-thesis (Johannesburg, Rand Afrikaans University Engineering Faculty).
23. Kloppe, S., Van Wyk, J.D., Swart, P.H. (1996). Series and parallel compensation principles in power networks, *Conf. Rec. IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP-VII)*, Las Vegas, USA, Oct. 16-18, pp.33-39.
24. Pretorius, R.W. (1994). 'n Hibriede vervormingskompensator, beheer deur 'n kunsmatige neurale netwerk, M.Eng-verhandeling (Johannesburg, Randse Afrikaanse Universiteit, Fakulteit Ingenieurswese).