

Oordrag van energie in nielineêre elektriese netwerke – 'n moderne beskouing van drywing

A. S. de Beer en J. D. van Wyk
Laboratorium vir Energie, Fakulteit Ingenieurswese,
RAU, Posbus 524, Johannesburg 2000

Ontvang 2 Januarie 1991; aanvaar 2 Mei 1991

UITTREKSEL

Netwerke vir elektriese energiever spreiding bevat baie nielineêre netwerkelemente in omsettingstoerusting, belasting en drywingselektroniese mutators. Dit veroorsaak vervorming van spannings en strome. Verskillende hydraes ten opsigte van 'n algemene drywingsteorie vir nielineêre netwerke word vir die bepaling van drywingskomponente geëvalueer. 'n Nuwe teoretiese voorstel vir die bepaling van drywingskomponente, wat ook komponente soos verstrooide stroom insluit, word uiteengesit. Die toepassing van hierdie teorie in die stuur van vervormingskompensators in kragnetwerke word in beginsel aangedui.

ABSTRACT

Energy transfer in nonlinear electrical networks – a modern perception of electrical power

Networks for electric power distribution contain many nonlinear elements in conversion equipment, loads and power electronic converters. This leads to distorted currents and voltages in the network. Several contributions regarding a general power theory for nonlinear networks are evaluated for determining the different power components. A new theoretical proposal for determining these components, including the concept of scattered current is discussed. The application of this theory to the control of distortion compensators in power networks is discussed in principle.

SIMBOLELYS

D_B = vervormingsdrywing volgens Budeanu²
 D_E = deaktiewe drywing volgens Enslin¹
 D_g = nieharmoniese drywingskomponent
 D_s = verstrooide drywingskomponent
 G_c = ekwivalente konduktansie
 $i(t)$ = stroomfunksie
 $i_a(t)$ = aktiewe stroomkomponent
 $i_d(t)$ = deaktiewe stroomkomponent
 $i_f(t)$ = fiktiewe stroomkomponent
 $i_g(t)$ = nieharmoniese of gegengereerde stroomkomponent
 $i_r(t)$ = reaktiewe stroomkomponent
 $i_s(t)$ = verstrooide stroomkomponent
 I = effektiwe stroomwaarde
 I_a = effektiwe waarde van $i_a(t)$
 I_g = effektiwe waarde van $i_g(t)$
 I_m = effektiwe reële of komplekse harmoniese stroomwaarde

I_o = gemiddelde stroomwaarde (gelykstromkomponent)
 I_r = effektiwe waarde van $i_r(t)$
 \bar{I}^* = komplekse toegevoegde stroomfasor
 j = $\sqrt{-1}$ of indeksgetal
 k = indeksgetal
 m = indeksgetal (harmonieke in stroom)
 n = indeksgetal (harmonieke in spanning)
 P = aktiewe drywing
 q = lading
 Q = reaktiewe drywing
 Q_B = reaktiewe drywing volgens Budeanu²
 Q_E = reaktiewe drywing volgens Enslin¹
 Q_r = reaktiewe drywingskomponent (volgens Czarnecki⁷)
 $R_{ii}(\tau)$ = kruiskorrelasie tussen stroom en spanning
 $\hat{R}_{ii}(\tau)$ = piekwaarde van $R_{ii}(\tau)$
 \bar{S} = skyn- of beladingsdrywing
 $\overline{\bar{S}}$ = skyn- of beladingsdrywing (fasor)

*Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word.

t	= tyd
T	= periode
$u(t)$	= spanningsfunksie
U	= effektiewe spanningswaarde
U_n	= effektiewe reële of komplekse harmoniese spanningswaarde
U_o	= gemiddelde spanningswaarde
\bar{U}	= spanningsfasor
w	= energie
α_n	= harmoniese fasehoek in spanning
β_m	= harmoniese fasehoek in stroom
β_n	= harmoniese susseptansie
γ_n	= harmoniese konduktansie
λ	= arbeidsfaktor
Λ_n	= komplekse harmoniese lasadmittansie
ω	= hoekfrekwensie

1. INLEIDING

Drywingsoordrag in elektriese kragnetwerke is bykans nooit volledig effektief nie, weens vervorming en ossillasies in stelsels en laste. Hierdie verskynsel is te wyte aan die reaktiewe eienskappe van byvoorbeeld elektriese masjiene en transformators of nielineêre eienskappe van byvoorbeeld drywingselektroniese mutators. Om effektiewe drywingsoordrag te verseker, moet hierdie negatiewe effekte teengewerk word deur kompensasië van die vervorming met behulp van passiewe en aktiewe toerusting. Hierdie artikel handel oor sekere van die verskillende teoretiese strominge in die bepaling van drywing en drywingskomponente, asook die effek van hierdie analise op die doeltreffendheid van kompensasië.

Die klassieke benadering, die benadering van Budeanu² en Nowomiejski,³ asook die tydvlakvoorstellings van Fryze⁵ en Enslin¹ word bespreek. Die beperkinge van hierdie teorieë om met behulp van 'n reaktiewe kompensator (dit wil sê wat bestaan uit kapasitore, induktore, filters of geskakelde energiestoorelemente) die maksimum energie-oordrag of arbeidsfaktor te behaal, word ook aangetoon.

'n Nuwe teorie volgens Czarnecki⁷ word bespreek. Hierdie teorie werp meer lig op die bepaling van die maksimum hoeveelheid drywing wat met reaktiewe kompensators gekompenseer kan word, terwyl dit ook meer spesifiek na die verskillende oorsake van drywingskomponente verwys wat negatief op netto energie-oordrag inwerk.

2. KLASSIEKE TEORIE

Elektriese drywingsteorie is klassiek slegs vir stelsels gedefinieer waar sowel die stroom as spanning sinusvormig en van 'n enkele frekwensie is. In so 'n stelsel word die skyndrywing (\bar{S}) gedefinieer as:

$$\bar{S} = \bar{U} \cdot \bar{I}^* \quad (1)$$

waar \bar{U} die spanningsfasor en \bar{I}^* die komplekse toegevoegde van die stroomfasor verteenwoordig. Hierdie produk gee aanleiding tot 'n komplekse drywingshoeveelheid:

$$\bar{S} = P + jQ. \quad (2)$$

Klassiek bestaan skyndrywing dus uit 'n reële gedeelte, naamlik die aktiewe drywing (P), en 'n imaginêre of

reaktiewe gedeelte (Q). P word geassosieer met die netto energie-oordrag vanaf die bron na die las, terwyl Q na die ossillerende gedeelte van die drywing verwys. Die klassieke teorie is besonder beperk en ongeskik vir algemene drywingsanalise, aangesien die fasorvoorstelling nie vir bofrekwensiespanning- of stroomharmonieke voorsiening maak nie. Dit is slegs geldig vir stelsels waarin sowel die spanning en die stroom enkelvoudigharmoniese funksies van tyd is.

3. AKTIEWE EN BELADINGSDRYWING

In die vakgebied van drywingsanalise is daar twee hoeveelhede wat algemeen en per definisie aanvaar word, naamlik: aktiewe drywing (P) en beladings- of skyndrywing (S). Hoewel dit hier in die tyddomeinvorm weergegee word, is dit ekwivalent aan al die ander definisies of vorme soos omvat in die verskillende teoretiese strominge.

3.1 Aktiewe drywing

Aktiewe drywing word vir periodiese golfvorms (met periode T) soos volg gedefinieer:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{T+1} u(t) \cdot i(t) dt, \quad (3)$$

waar $u(t)$ die spanning- en $i(t)$ die stroomtydfunksies voorstel. Vergelyking (3) impliseer dat P 'n tydgemiddeld van netto energie-oordrag na die las verteenwoordig en kan afgelei word uit vergelyking (4), waar $u(t)$ die energie per eenheidslading $\frac{dw}{dq}$ en $i(t)$ die lading per eenheidstyd $\frac{dq}{dt}$ is.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{T+1} \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_0^{T+1} dw \quad (4)$$

P is dus daardie hoeveelheid energie per tydseenheid wat aan die las oorgedra word en verteenwoordig die enigste gedeelte van die beladingsdrywing S wat as nuttig vir drywingsoordrag beskou kan word.

3.2 Beladingsdrywing

Die term *beladingsdrywing* (pleks van *skyndrywing*) is die eerste keer deur Enslin¹ voorgestel. Dit dui meer toepaslik op die hoeveelheid drywing waarmee 'n stelsel "belas" of "belaa" word. S kan ook gesien word as die potensiële vermoë van 'n stelsel of as die totale hoeveelheid drywing (hetsy aktief, reaktief ens.) wat in 'n stelsel teenwoordig is.

Beladingsdrywing word gedefinieer as die produk van die effektiewe waardes (U en I) van die stroom en spanning of:

$$S = U \cdot I \quad (5)$$

waar $U = \left[\frac{1}{T} \int_0^{T+1} u^2(t) dt \right]^{1/2}$ en $I = \left[\frac{1}{T} \int_0^{T+1} i^2(t) dt \right]^{1/2}$.

Beladingsdrywing kan dus beskou word as daardie hoeveelheid drywing wat aan die las oorgedra sou word, indien die las heeltemal resistief sou wees. Dit omvat dus die totale potensiële drywing in 'n stelsel teenwoordig, maar die potensiële drywing kan gewoonlik ontbind word in verskillende tipes drywing, waarvan slegs die aktiewe drywing (P) bruikbare energie-oordrag lewer.

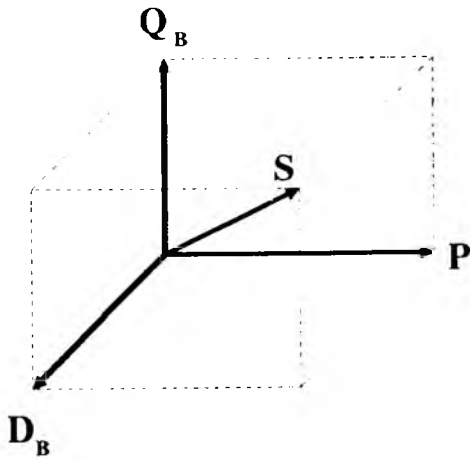
4. BUDEANU-DRYWINGSTEORIE

Budeanu² was die eerste om in 1927 'n algemene teorie van elektriese drywing vir nielineêre stelsels voor te stel. Sy teorie berus op 'n harmoniese analise van die stroom en spanning waaruit die verskillende ortogonale drywingskomponente bereken kan word. Gestel die stroom en spanning is periodies (met $T = \frac{2\pi}{\omega}$) en:

$$u(t) = \sqrt{2} \sum_n U_n \cos(n\omega t + \alpha_n) + U_0$$

$$i(t) = \sqrt{2} \sum_m I_m \cos(m\omega t + \beta_m) + I_0 \quad (6)$$

waar n die versameling spanningsharmonieke, m die stroomharmonieke, U_n die effektiewe reële harmoniese spanningswaardes, I_m die effektiewe harmoniese stroomwaardes en U_0 en I_0 die onderskeie gemiddelde waardes is. Dan is:



FIGUUR 1: Ortogonale drywingskomponente volgens Budeanu.

$$S = \left[\sum_n U_n^2 \cdot \sum_m I_m^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\text{en } P = \sum_{j \in (m \cap n)} U_j I_j \cos(\alpha_j - \beta_j) + U_0 I_0 \quad (8)$$

Budeanu ontbind S in drie ortogonale komponente (figuur 1) sodat:

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (9)$$

Reaktiewe drywing (Q_B) en vervormingsdrywing (D_B) word verder voorgestel as:

$$Q_B = \sum_{j \in (m \cap n)} U_j I_j \sin(\alpha_j - \beta_j) \quad (10)$$

$$\text{en } D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2 \quad (11)$$

Vergelyking (7) en (8) vir S en P is ekwivalent aan die algemene definisies (5) en (3), terwyl Q_B die somtotaal van die sinusgedeeltes van die binneprodukte tussen

spanning- en stroomharmonieke is. D_B is die vektorverskil tussen S , P en Q_B en verteenwoordig die drywing as gevolg van die stroomharmonieke by frekwensies wat nie in die spanning teenwoordig is nie.

Nowomiejski³ toon in 1981 hoe Budeanu se drywingsmodel uitgebrei kan word na 'n kontinue of spektrale frekwensievlak. Hy gebruik die Hilberttransform om aan te toon dat aktiewe drywing verteenwoordig word deur die integraal van die reële of kwadraat van die kruisspektraaldigtheidsfunksie (dit wil sê die produk tussen die Fouriertransforms van die spanning en stroom) en dat die reaktiewe drywing verkry kan word as die integraal van die imaginêre of kwadraatspektrum van hierdie kruisspektraaldigtheidsfunksie.

Hoewel Budeanu se model, en later ook Nowomiejski se veralgemening hiervan, algemeen aanvaar is, blyk die definisie van die reaktiewe drywing (Q_B) slegs 'n wiskundige formulering te wees. Czarnecki toon aan⁴ dat die somtotaal Q_B nie 'n praktiese waarde is nie, aangesien die kompensasie van Q_B nie noodwendig tot die maksimum arbeidsfaktor in 'n stelsel lei nie.

Dit blyk verder dat D_B gekies is om die vektorsom na S toe vol te maak en dat dit geen besondere kennis oor die vervorming in die stelsel (as gevolg van byvoorbeeld nielineariteit) verskaf nie.

5. ELEKTRIESE DRYWING IN DIE TYDVLAK

Om drywingsanalise effektief te kan benut, is dit nodig om die verskillende drywingskomponente vinnig en akkuraat te kan bepaal. Harmoniese en spektraalanalise behels gewoonlik 'n frekwensietransform wat langer berekeningstyd impliseer. Dit is om hierdie rede dat 'n skool ontstaan het wat die tyddomeinanalise voorstaan, waaronder Fryze⁵ (1932) en later ook Enslin¹ (1988).

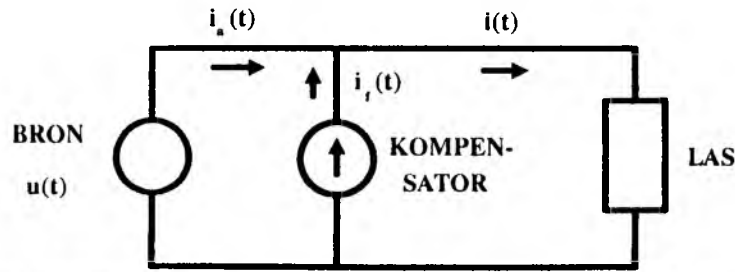
Fryze⁵ ontbind die lasstroom in twee ortogonale komponente, naamlik 'n aktiewe komponent $i_a(t)$ (wat netto energieoordrag lewer) en 'n fiktiewe komponent $i_f(t)$ wat geen bydrae tot energie-oordrag lewer nie.

Indien die fiktiewe stroom ideaal deur 'n kompensator voorsien word (figuur 2), sal die bron slegs aktiewe stroom teen 'n eenheidsarbeidsfaktor lewer. Die aktiewe stroomkomponent moet dieselfde golfvorm as die spanning of dryffunksie $u(t)$ hê sodat:

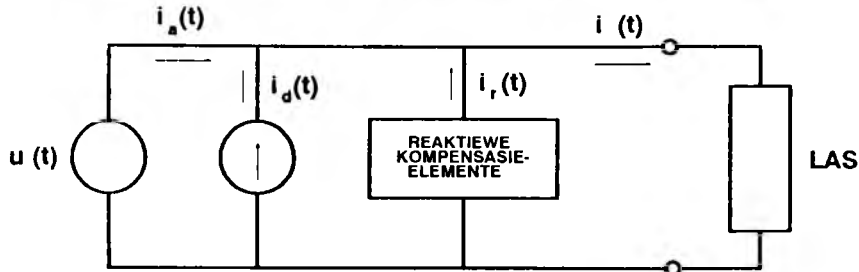
$$i_a(t) = G_c \cdot u(t) \quad (12)$$

$$\text{waar } G_c = \frac{P}{U^2} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^{T+T} u(t) \cdot i(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^{T+T} u^2(t) dt} \quad (13)$$

Die fiktiewe stroomkompensator (soos in figuur 2 getoon) is 'n aktiewe stelsel wat $i_f(t)$ dinamies kan genereer. So 'n kompensator is duurder as passiewe elemente (bv. 'n kapasitorbank) en word gewoonlik slegs vir die kompensasie van vinnig variërende stroomverskynsels gebruik. Indien die fiktiewe stroom onder andere in 'n reaktiewe stroomkomponent verdeel sou word, sou hierdie reaktiewe drywing (en dus reaktiewe stroom), ideaal deur passiewe energiestoorelemente (bv. 'n kapasitorbank) voorsien kan word. So 'n konfigurasie word in figuur 3 getoon.



FIGUUR 2: Stroomkomponente en kompensasie volgens Fryze.



FIGUUR 3: Kompensasieskema volgens Enslin.¹

Enslin¹ het gepoog om drywing en stroomkomponente op hierdie manier in die tyddomein te ontbind. 'n Aktiewe ($i_a(t)$), reaktiewe ($i_r(t)$) en deaktiewe ($i_d(t)$) stroomkomponent word gedefinieer met behulp van die onderlinge drywingskomponente:

$$P = R_{ui}(0) \tag{14}$$

$$Q_B = [\hat{R}_{ui}^2(\tau) - R_{ui}^2(0)]^{\frac{1}{2}} \tag{15}$$

$$D_E^2 = S^2 - P^2 - Q_E^2 \tag{16}$$

waar $R_{ui}(\tau)$ die kruiskorrelasie tussen die stroom en spanning is met

$$R_{ui}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T-\tau} u(t) \cdot i(t - \tau) dt \tag{17}$$

Aktiewe drywing volgens vergelyking (14) is dieselfde as die algemene definisie van vergelyking (3).

Q_E kan volgens Enslin bepaal word deur die aktiewe drywing van die maksimum gekorreleerde waarde $\hat{R}_{ui}(\tau)$ af te trek, waar $\hat{R}_{ui}(\tau)$ daardie hoeveelheid gekorreleerde drywing sou wees as gevolg van die faseverskil tussen stroom en spanning, terwyl D_E die residuele drywing as gevolg van nielineariteite blyk te wees. Vir Q_E om die maksimum hoeveelheid drywing te wees, wat na kompensasie met lineêre energiestoorelemente die maksimum arbeidsfaktor sal lewer, moet daar 'n Q_E gevind word wat afhanglik is van al die frekwensies wat in die dryffunksie $u(t)$ voorkom.

Daar is egter getoon⁶ dat die drywing Q_E arbitrêr en onafhanklik is van die frekwensies wat in die dryffunksie voorkom, sodat Q_E nie noodwendig maksimum kompensasie tot gevolg sal hê nie. Hoewel die vergelyking vir Q_E wel die optimum kompensasie by 'n enkelharmoniese $u(t)$ sal lewer, is daar verder aangetoon⁶ dat in so 'n geval die korrelasiefunksies van (14) en (15) deur twee integrale vervang kan word (ongeveer die harmonieke in $i(t)$ teenwoordig) wat moontlik 'n vermindering in berekeningstyd tot gevolg kan hê.

Alhoewel aktiewe en beladingsdrywing in die tyddomein bereken kan word (vergelings (3) en (5)), is totale reaktiewe drywing wat vir passief kompenseerbare

drywingsossillasies verantwoordelik is, in die algemeen frekwensie-afhanklik, sodat 'n volledige lasinterpretasie van Q nie in die tyddomein bereken kan word nie⁶ en daar kan dus gesien word dat, behalwe vir P en S , dit nie noodwendig sinvol is om drywing vir optimum kompensasie volledig in die tyddomein te karakteriseer nie.

6. 'N NUWE DRYWINGSTEORIE (VOLGENS CZARNECKI)

Czarnecki se teorie⁷ behels die ontbinding van die lasstroom in 'n aantal stroomkomponente en hulle verwante drywingskomponente (figuur 4). Hierdie teorie is 'n verbetering op vorige teorieë, omdat daar nie net méér gesê word oor die oorsake van die verskillende komponente nie, maar daar ook beter insig verkry word in optimale kompensasie en verwante arbeidsfaktore.

Gestel die stroom en spanning is periodies (met $T = \frac{2\pi}{\omega}$ en n die versameling spanningsharmonieke en m die versameling stroomharmonieke), dan is:

$$u(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_n U_n e^{jn\omega t}$$

$$\text{en } i(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_m I_m e^{jm\omega t} \tag{18}$$

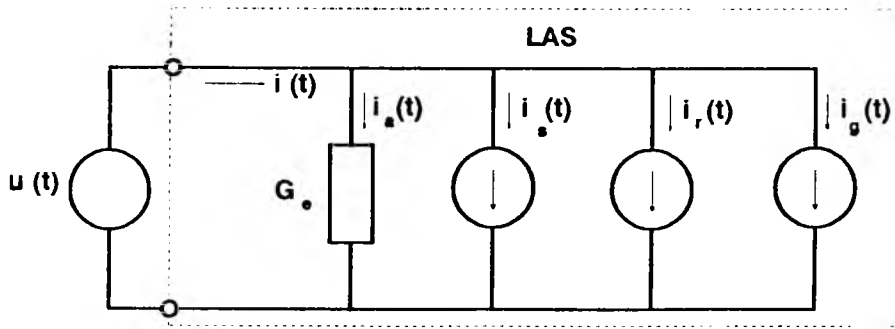
waar U_n en I_m die komplekse harmoniese effektiewe spanning en stroomwaardes is.

Die komplekse admittansiefunksie word by die harmonieke van die spanning gedefinieer as:

$$\Lambda_n = \frac{I_n}{U_n} = \gamma_n + j\beta_n \tag{19}$$

Aktiewe stroom het dieselfde betekenis as by ander teorieë (sien ook vergelyking (12)) sodat:

$$i_a(t) = G_c \cdot u(t) = \frac{P}{U^2} \cdot u(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_n G_c U_n e^{jn\omega t} \tag{20}$$



FIGUUR 4: Lasstroomkomponente volgens Czarnecki.⁷

- $i_a(t)$ – aktiewe stroom
- $i_s(t)$ – verstrooide stroom
- $i_r(t)$ – reaktiewe stroom
- $i_g(t)$ – nieharmoniese of gegenerende stroom.

Die aktiewe drywing P kan ook bereken word as:

$$P = U I_a \tag{21}$$

waar I_a die effektiwe waarde van die stroomkomponent $i_a(t)$ is, net soos wat I as die effektiwe waarde van $i(t)$ in (5) bereken is.

Reaktiewe stroom word geassosieer met die komplekse gedeeltes van die lasadmittansie (β_n in Λ_n) en is die totale stroom wat verantwoordelik is vir drywings-ossillasies by die harmonieke van $u(t)$. Reaktiewe stroom kan in totaal deur passiewe reaktiewe elemente (dit wil sê induktore, kapasitore of samestellings hiervan) gekompenseer word, sodat:

$$i_r(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_n j\beta_n U_n e^{jn\omega t} \tag{22}$$

Die reaktiewe drywingskomponent word bereken as:

$$Q_r = UI_r \tag{23}$$

waar I_r die effektiwe waarde van $i_r(t)$ is.

Die gegenerende of nieharmoniese stroom ($i_g(t)$) kom slegs voor in nie-lineêre stelsels en is dié komponent wat in die las ontstaan by harmonieke wat nie in die dryffunksie $u(t)$ voorkom nie, sodat:

$$i_g(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{k \neq n} I_k e^{jk\omega t} \tag{24}$$

Weereens kan die nieharmoniese drywingskomponent bereken word deur eers die effektiwe waarde I_g van die nieharmoniese stroom $I_g(t)$ te bereken en dit met die effektiwe spanning U te vermenigvuldig of:

$$D_g = UI_g \tag{25}$$

Alhoewel $i_g(t)$ ook vir drywingsossillasies verantwoordelik kan wees, kom dit nie voor by dieselfde frekwensies as dié in $u(t)$ nie, sodat dit nie deur passiewe reaktiewe komponente gekompenseer kan word nie.

Die effek van die laaste komponent, naamlik verstrooide stroom $i_s(t)$, word eers deur 'n voorbeeld getoon: in figuur 5 word 'n lineêre stroombaan getoon waar $u(t)$ uit twee harmonieke $U_1 = IV$ en $U_3 = \frac{1}{3}V$ (by $\omega_1 = 1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ en $\omega_3 = 3 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) bestaan. Verder is:

$$\begin{aligned} S &= U \cdot I = \sqrt{\sum_n \bar{U}_n^2} \cdot \sqrt{\sum_n \bar{I}_n^2} \\ &= \sqrt{\sum_n \bar{U}_n^2} \cdot \sqrt{\sum_n \bar{\Lambda}_n^2 \cdot \bar{U}_n^2} = \sqrt{\frac{884}{900}} \text{ VA} \tag{A} \end{aligned}$$

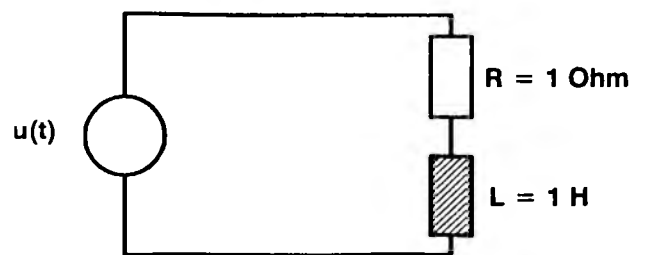
$$\text{met } \bar{\Lambda}_n = \frac{R - j\omega_n L}{R^2 + \omega_n^2 L^2}$$

Terwyl:

$$\begin{aligned} \sqrt{P^2 + Q_r^2} &= \sqrt{\left(\sum_n \gamma_n \bar{U}_n^2\right)^2 + \left(U \cdot \sum_n \beta_n^2 \bar{U}_n^2\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{884}{900}} \text{ VA} \tag{B} \end{aligned}$$

Die verskil in waardes tussen (A) en (B) is die gevolg van verstrooide stroom. Dit kom voor as gevolg van die onbalans van die harmoniese admittansies om die ekwivalente konduktansie G_c . Die feit dat by elke n -de harmoniek, γ_n afwyk van G_c , gee aanleiding tot 'n stroomkomponent wat nie netto energie-oordrag lewer nie, aangesien energie-oordrag slegs plaasvind in 'n konduktansie G_c (wat konstant is vir alle frekwensies; figuur 4). Hierdie komponent is die verstrooide stroom $i_s(t)$ en kan uitgedruk word as:

$$i_s(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_n (\gamma_n - G_c) U_n e^{jn\omega t} \tag{26}$$



FIGUUR 5: Lineêre stroombaan waar die spanning uit twee harmonieke bestaan.

Indien al die reële gedeeltes van Λ_n dieselfde waarde sou gehad het, sou $i_s(t) = 0$ gewees het. (Verstrooide stroom en drywing kom ook tipies by frekwensie-afhanklike weerstande voor.) Hierdie stroomkomponent is nie kompenseerbaar met reaktiewe elemente nie en verminder die maksimum reaktiefkompenseerbare arbeidsfaktor in 'n lineêre stelsel na:

$$\gamma_{\text{maks}} = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{I_s}{I_a}\right]^2}} \tag{27}$$

waar I_s en I_a die effektiwe waardes van onderskeidelik die verstrooide en aktiewe stroom is.

Indien I_r en I_g verder die effektiwe waardes van die

reaktiewe en gegengereerde stroom sou voorstel, word die totale beladingsdrywing gedefinieer as:

$$S^2 = U^2 (I_a^2 + I_s^2 + I_r^2 + I_g^2) \quad (28)$$

$$\text{of } S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_r^2 + D_g^2 \quad (29)$$

met P die aktiewe, D_s die verstrooide, Q_r die reaktiewe en D_g die nieharmoniese drywingskomponente.

Q_r is ten volle met reaktiewe komponente kompenseerbaar en verskil van Q_B (soos deur Budeanu voorgestel) deurdat dit 'n vektoriële effektiwewaardeproduk $U \cdot I_r$ is, terwyl Q_B die skalaarsom van al die onderling harmoniese reaktiewe drywings aandui en geen besondere fisiese betekenis het nie.

Die ortogonale drywingskomponente van vergelyking (29) besit dus almal betekenis wat herlei kan word na relevante arbeidsfaktore (soos byvoorbeeld dié van vergelyking (27)) of spesifieke oorsake (dit wil sê nielineariteit of harmoniese wanbalans) en is 'n definitiewe verbetering op die gebied van algemene drywings-teorie en drywingsanalise.

7. SAMEVATTING

Die strominge in drywingsteorie vanaf die klassieke, dié van Budeanu, dié in die tyddomein en dié van Czarnecki, is getoon.

Daar is getoon dat deur die teorieë van Budeanu en Nowomiejski daar nie 'n praktiese bydrae tot die teg-

nologie van korrekte kompensasië van vervorming gemaak is nie.

Die tekortkominge van die tydvlakbeskouing en in besonder dié van Enslin is bespreek, terwyl daar laastens na die teorie van Czarnecki verwys is wat drywingskomponente in so 'n mate ontbind dat dit onder andere sinvolle hoeveelhede vir reaktiewe kompensasië voorstel en bydra tot die begrip van die oorsprong van die verskillende tipes drywing.

LITERATUURVERWYSINGS

1. Enslin, J. H. R. (1988). Determination and Dynamic Compensation of Fictitious Power in Electric Power Systems, *D.Ing. Verhandeling*, Randse Afrikaanse Universiteit.
2. Budeanu, C. I. (1927). Puissances reactives et fictives, *Instytut Român de l'Energie*, Bucharest, Romënië.
3. Nowomiejski, Z. (1981). Generalized theory of electrical power, *Arch. f. Elektrotech.*, vol. 63, 177-182.
4. Czarnecki, L. S. (1987). What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and Why it Should be Abandoned, *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, vol. IM-36 no. 3, 834-837.
5. Fryze, S. (1932). Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrische Stromkreisen mit nichtsinusoidalformigen Verlauf von Strom, und Spannung, *ETZ*, vol. 53, no. 25, 596-599, 625-627, 700-702.
6. De Beer, A. S. (1990). Determination of Power Components in Nonlinear Electrical Networks, *M.Ing. Verhandeling*, Randse Afrikaanse Universiteit.
7. Czarnecki, L. S. (1983). An orthogonal decomposition of the current of non-sinusoidal voltage source applied to nonlinear loads, *Int. J. Circuit Theory Appl.*, Vol. II, 235-239.