

KRITIESE BESKOUIING VAN VOERDERBEVEILIGING MET  
INAGNAME VAN LYNPARAMETERS

R. KLEINHANS

**KRITIESE BESKOUIING VAN VOERDERBEVEILIGING**

**MET INAGNAME VAN**

**LYNPARAMETERS**

**R. KLEINHANS**

**KRITIESE BESKOUIING VAN VOERDERBEVEILIGING**

**MET INAGNAME VAN**

**LYNPARAMETERS**

deur **RUDI KLEINHANS**

Skripsie voorgelê ter gedeeltelike

nakoming van die vereistes vir

die **MEESTERSDIPLOMA IN TEGNOLOGIE**

in die Departement Elektriese Ingenieurswese,

Fakulteit Ingenieurswese

aan die Technikon OVS

Studieleier: **Mr. L.W. van de Merwe**

**BLOEMFONTEIN  
OKTOBER 1990**

## ERKENNINGS

Die volgende persone en instansies het die voltooiing van hierdie projek moontlik gemaak:

Mnr. L.W. van de Merwe, wat as studieleier opgetree het, vir sy morele ondersteuning en tegniese leiding. Dit word opreg waardeur dat hy steeds die tyd kon vind in sy besige skedule.

Eskom, O.V.S. Streek, vir die finansiële ondersteuning en die gebruik van rekenaartoerusting.

Mnr. J. Pieterse, vir sy leiding met die gebruik van rekenaartoerusting.

Beveiligingontwerp-afdeling, vir hulle ondersteuning gedurende my afwesigheid.

Mnr. H.F. Coetzer, wat my leiding gegee het met die administrasie van die verhandeling.

My ouers, vir die motivering, en geleentheid wat hulle vir my met die jare geskep het.

Mej. A. Rautenbach, wat verantwoordelik was vir die finale prosesseerwerk.

## ABSTRACT

The first part of this study consists of a discussion of transmission line parameters and the dynamic factors that influence them. Different types of impedance relay and their respective philosophies of operation are subsequently mentioned. The calculated line parameters are applied theoretically to impedance relays and the results verified by computer simulation. Finally, conclusions are reached and suggestions made to improve the setting and application of impedance relays on feeders.

## INHOUD

## BLADSY

<b>1.</b>	<b>INLEIDING</b>	
1.1	Agtergrond tot die studie	1
1.2	Uiteensetting	4
<b>2.</b>	<b>LYNINDUKTANSIE</b>	
2.1	Inleiding	6
2.2	Interne inductansie van 'n bogronde geleier	7
2.3	Eksterne inductansie van 'n bogronde geleier	10
2.4	Die gemiddelde geometriese radius	12
2.5	Die gemiddelde geometriese afstand tussen geleiers (GMD)	13
2.6	Positiewe- en negatiewevolgorde- impedansies	14
2.7	Nulvolgorde-impedansie sonder aardgeleier	16
2.8	Nulvolgorde-impedansie met 'n aardgeleier	19
2.9	Resultate van veranderlikes volgens teorie en voorbeelde in byvoegsel C	21

<b>3.</b>	<b>GELEIERWEERSTAND</b>	
3.1	Inleiding	22
3.2	Die berekening van geleierweerstand	23
3.3	Die uitwerking van temperatuur op die stroomdravermoë van geleiers	26
3.4	Resultate van veranderlikes	28
<b>4.</b>	<b>LYNKAPASITANSIE</b>	
4.1	Inleiding	30
4.2	Kapasitansie van 'n enkelfasige boggrondse lyn	31
4.3	Positiewe- en negatiewevolgorde- kapasitansie in 'n driefasige, driedraad - stelsel	
	4.3.1 Simmetriese gespaseerde geleiers	33
	4.3.2 Asimmetriese gespaseerde geleiers	34
4.4	Admittansie	36
4.5	Nulvolgorde-kapasitansie na neutraal in 'n driefasige, driedraadstelsel sonder aardgeleier	37
4.6	Nulvolgorde-kapasitansie in 'n driefasige stelsel met 'n aardgeleier	38

## BLADSY

4.7	Die effek van lang transmissielyne	40
	4.7.1 Nominale $\pi$ -metode	40
	4.7.2 Nominale T-metode	41
4.8	Eienskappe van veranderlikes	42
<b>5.</b>	<b>DIE TEORIE VAN DIE IMPEDANSIERELÊ OP VOERDERS</b>	
5.1	Inleiding	43
5.2	Basiese beginsels van impedansierelê	44
	5.2.1 Die afstand/tyd impedansierelê	46
	5.2.2 Die skakeltipe mho impedansierelê	46
5.3	Wat word bedoel met sones van 'n lyn ?	47
5.4	Die eenvoudige impedansierelê	49
	5.4.1 Nadele van die gewone impedansie- karakteristiek	51
5.5	Die selfgepolariseerde mho-sirkel	52
	5.5.1 Die uitwerking van die boogweerstand	53
5.6	Die reaktansierelê	56
5.7	Die eksentriese mho en lensagtige relê	58

5.8	Kruisgepolariseerde relê en gesinchroniseerde gepolariseerde relê	59
5.9	Ten volle kruisgepolariseerde relê	60
5.10	Gedeeltelike kruisgepolariseerde relê	61
5.11	Meet van fase- en aardfoute	62
	5.11.1 Fase- tot- fasefout	63
	5.11.2 Fase- tot- aardfoute	64
<b>6.</b>	<b>WISKUNDIGE ONDERSOEK NA DIE GEDRAG VAN IMPEDANSIERELÊS EN DIE PRAKTIESE SIMULASIES DAARVAN</b>	
6.1	Inleiding	67
6.2	Aardfout voor 'n T-voerder	68
6.3	Aardfout met 'n boogweerstand voor die T-voerder	70
6.4	Aardfout met en sonder boogweerstand tussen T-voerder en ontvangstasie	74
6.5	Fase- tot- fasefout	77
6.6	Die invloed van twee invoere na dieselfde fout sonder 'n boogweerstand	78
6.7	Twee invoere na dieselfde boogweerstand- fout	79

**7. GEVOLGTREKKINGS EN AANBEVELINGS**

7.1	Lynparameters	81
7.2	Impedansierelê	83
7.3	Berekeninge en toepassings	84
7.4	Aanbevelings vir verdere navorsing	85

**BYVOEGSELS**

Byvoegsel A	- Verhouding van werklike tot lae frekwensie induktansie ten opsigte van diepte penetrasie	86
Byvoegsel B	- Tabelle 2.1 tot 2.3 - geleierkonfigurasies	87
Byvoegsel C	- Berekening van lynparameters	88
Byvoegsel D	- Resultate van grond-resistiwiteitstoetse	93
Byvoegsel E	- Resultate van geleier-resistiwiteitstoetse	94
Byvoegsel F	- Effek van geleierweerstand t.o.v. stroomdravermoë	95
Byvoegsel G1-	Berekening van impedansie vir aardfout tussen bron en T-voerder	96

## BLADSY

Byvoegsel G2-	Simulasie van aardfout tussen bron en T-voerder	96
Byvoegsel H1-	Berekening van impedansie vir boogweerstandsfout tussen bron en T-voerder	101
Byvoegsel H2-	Simulasie van boogweerstandsfout tussen bron en T-voerder	102
Byvoegsel I1-	Berekening van impedansie vir aardfout tussen T-voerder en ontvangstasie	107
Byvoegsel I2-	Simulasie van aardfout tussen T-voerder en ontvangstasie	108
Byvoegsel I3-	Berekening van impedansie vir boogweerstandsfout tussen T-voerder en ontvangstasie	113
Byvoegsel I4-	Simulasie van boogweerstandsfout tussen T-voerder en ontvangstasie	114
Byvoegsel J1-	Berekening van impedansie vir fase- tot- fasefout	119
Byvoegsel J2-	Simulasie van fase- tot- fasefout	120

## BLADSY

Byvoegsel K1-	Berekening van impedansie vir aardfout tussen twee invoere	124
Byvoegsel K2-	Simulasie van aardfout tussen twee invoere	124
Byvoegsel L1-	Berekening van impedansie vir boogweerstandsfout tussen twee invoere	129
Byvoegsel L2-	Simulasie van boogweerstandsfout tussen twee invoere	130
Byvoegsel M -	Berekening van K-faktor vir aardfout tussen T-voerders en ontvangstasie	135
<b>VERWYSINGS</b>		137

## HOOFSTUK 1

### INLEIDING

#### 1.1 Agtergrond tot die studie

Bogronse transmissielyste word gebou om aan die elektrisiteitsbehoefes van die land te voldoen. In sekere gebiede word van hierdie lyste tot naby hulle termiese beperkings in die stelsel bedryf en in ander gebiede kan die toevoeging van lyste 'n meer stabiele toevoer tot gevolg hê. Uitbreiding is die vernaamste rede vir die vermeerdering van bogronse transmissielyste (Gross, 1979: 82). Vir die oordrag van energie word daar van verskeie metodes gebruik gemaak, waarvan die bogronse transmissielyste die mees algemeen is. Soos enige ander apparaat, is hierdie bogronse transmissielyste nie ideaal nie en moet daardie faktore wat die ideaal teenstaan, intensief beskou word.

Volgens Gross (1979: 82), kan die faktore wat die geleier self affekteer, in drie groepe verdeel word naamlik:

- die serie spanning wat deur die magneetveld opgewek word.
- die parallelling van strome en die uitwerking daarvan as gevolg van die elektriese veld tussen die geleiers.
- die ohmiese weerstandwaarde van die geleiers.

Dus, die parameters van 'n lyn waarna gekyk gaan word is weerstand(R), induktansie(L), konduktansie(G), en kapasitansie(C). Van hierdie parameters kan verander word deur die ontwerper, terwyl ander eienskappe van die materiaal self is. So hang die kapasitansie en induktansie af van die plasing van geleiers. Die waarde van die weerstand hang af van die tipe of dikte geleier.

'n Verdere veranderlike is die frekwensie. Soos die frekwensie toeneem, sal die strome eerder op die oppervlak van die geleiers begin vloei en dus verander dit die induktansie en induktiewe reaktansiewaardes. Die verhoogde frekwensie sal die weerstandwaarde verhoog en die induktansiewaarde verminder (Edwin & Anderson, 1985: 289). Dit word ook die skileffek genoem.

Eienskappe wat belangrik is tydens die keuse van geleiers en torings is die lynkapasiteit, die toevoerspanning, die spasiëring van die geleiers en die hoeveelheid geleiers per fase. Die elektriese kriteria hier is die lynimpedansie en korona (Gross, 1979: 83).

Vir die keuse van die torings word die weersomstandighede, die minimum vrye ruimte, die besoedeling en die deursakking van die lyn beskou.

Met die grootskaalse uitbreiding van Eskom-ringnetwerke, het dit van kardinale belang geword om foutstrome so vinnig en veilig as moontlik, van die netwerk te ontkoppel met die minste spanningsvariasie. Om aan bostaande behoeftes te voldoen, moet van baie hoëspoed beveiligingrelê's met die nodige hersluitbane gebruik gemaak word. Hoe meer gesofistikeerd hierdie moderne relê's is, hoe meer akkuraat moet die data wees wat na hierdie relê's ingevoer word om hulle sofistikasie te kan benut.

Impedansie-voerderbeveiligingrelê's kan as eenheids- of nie-eenheidsbeveiliging gebruik word, afhangende van of daar 'n interverbinde kommunikasiekanaal is, al dan nie. Hierdie relê's is van die mees ekonomiese en hoëspoed tipe, en bied die meeste toepassingsmoontlikhede met die nodige gerugsteunde beveiliging (GEC Measurement, 1987: 183). Indien die data wat gebruik word vir die spesifieke stelsel akkuraat is, en die relê word in die regte konfigurasie gebruik, kan impedansie-voerderbeveiliging die stabiliteit van die netwerk verhoog.

Die vraag is dus watter faktore hierdie lynparameters beïnvloed en hoe die veranderlike waardes die verskillende toepassings van impedansie-voerderbeveiliging affekteer?

## 1.2 Uiteensetting

In hoofstuk 2 word die faktore wat lyninduktansie beïnvloed behandel. Hier sal die konfigurasie van die geleiers ondersoek word met inagnames van simmetriese, asimmetriese en horisontale of vertikale plasing. Die invloed van die vloed rondom die geleier ten opsigte van positief-, negatief- en nulvolgordestrome in die getransponeerde vorm van saamgestelde of enkelgeleiers, sal o.a. ondersoek word.

In hoofstuk 3 word die weerstand van die tipe geleiers en die invloed van temperatuur op die stroomdravermoë ondersoek. Die uitwerking van skileffek op wisselstroom-weerstande sal ook beskou word.

Hoofstuk 4 handel oor die invloed van kapasitansie op baie lang transmissielinies. Hoe word die kapasitansie beïnvloed deur die konfigurasie van die geleiers met inagnames van simmetriese, asimmetriese en horisontale of vertikale plasing? Die invloed van die afstande tussen twee of meer geleiers en die uitwerking van die aardeienskappe asook die invloed van transponering en aarding op kapasitansie word ook bespreek.

Hoofstuk 5 lewer 'n teoretiese beskouing van die filosofie en praktyk van impedansiereël met verwysing na die verhouding van bronimpedansie teenoor lynimpedansie, die verskillende karakteristieke van reël-, sirkel- of reghoekvorm, lynlengtes en boogweerstande.

In hoofstuk ses word die gedrag van impedansierelê tydens enkelfasige en meerfasige foute op die transmissielyn ondersoek. Daar word van rekenaarsimulasies gebruik gemaak om die praktiese effek van die relê te demonstreer. Hierdie ondersoek sal die variasies van wiskundige formules en toepasbaarheid daarvan demonstreer om sodoende 'n gewenste gevolgtrekking te bepaal.

In hoofstuk sewe word die gevolgtrekking van die ondersoek uiteengesit. Nuwe voorgestelde toepassings van impedansie-voerderbeveiliging word aanbeveel wat spruit uit die ondersoek.

## HOOFSTUK 2

### LYNINDUKTANSIE

#### 2.1 Inleiding

Sodra veranderende magnetiese vloed op 'n elektriese geleier aangê word, sal 'n emk opgewek word, wat eweredig is aan die tempo van verandering van vloedkoppelings. Om die oombliklike induktiewe vloed te bepaal wat gekoppel word met 'n element, kan die vloeddigtheid geïntegreer word oor die oppervlakte van so 'n element (Guile & Paterson, 1981: 72).

In sommige gevalle is dit egter nie so maklik om die waarde van die vloed te bepaal nie, aangesien 'n deel van die vloed koppel met die geleier self. Dit is dus makliker om die stroomvloei te verdeel in interne en eksterne induktansie elemente en dan die vloede te sommeer.

So vind ons dat as die frekwensie verhoog word, dan sal die stroom gedwing word om aan die buitekant van die geleier te vloei. Die gevolg is dat die interne vloed en induktansie verminder word. Die totale vloed is dan die som van die interne en eksterne vloed. Dit is dus duidelik dat die frekwensie 'n belangrike rol speel t.o.v. die induktansiewaarde.

Vir die interne induktiewe vloed sal die relatiewe permeabiliteit<sup>1</sup> van die

1 Relatiewe permeabiliteit staan bekend as die verhouding van die vloeddigtheid van 'n materiaal tot die vloeddigtheid van 'n vakuum wat veroorsaak word deur dieselfde magnetiese veldsterkte. Die simbool is  $\mu_r$  (Hughes, 1982: 63).

geleier 'n invloed hê. Die eksterne induktansiewaarde hang af van die afstand tussen geleiers en die dikte van die geleiers.

## 2.2 Interne induktansie van 'n boggrondse geleier

Vir die interne induktansie gaan die geleier beskou word by 'n baie lae frekwensie, dus gaan die skileffek weglaatbaar wees. Met 'n lae frekwensie beteken dit dat die stroomdigtheid eweredig deur die geleier versprei word, en sodoende geen konsentrasie van stroom op die oppervlak veroorsaak nie.

Die algemene formule vir interne induktansie vir enkelfase by lae frekwensies kan dan gedefinieer word as (Elgerd, 1971: 160):

$$L_{i0} = (\mu_c \mu_0) / (4\pi) \text{ H/m} \quad 2.1$$

waar  $L_{i0}$  = lae frekwensie interne induktansie

$\mu_c$  = permeabiliteit van geleier - (Cu & Al = 1)

(Roepel, 1988: 157)

$\mu_0$  = permeabiliteit van lug - ( $4 \times \pi \times 10^{-7}$ )

Johnson (1950: 84) verwys na die interne induktansie as  $[(\mu_c/\mu_0) \times 10^{-7}]$ , wat misleidend kan wees as  $(\mu_c/\mu_0)$  nie as 1 beskou word nie.

Indien die frekwensie verhoog word, sal die diepte van penetrasie afneem en kan die diepte as volg bepaal word (Johnson, 1950: 58):

$$\delta = [\rho / (\pi \times f \times \mu_c)]^{1/2} \quad 2.2$$

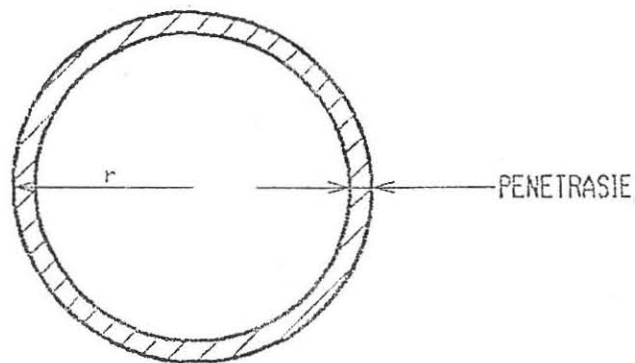
waar  $\delta$  = diepte van penetrasie in meter

$\rho$  = resistiwiteit van geleier

$f$  = frekwensie

$\mu_c$  = permeabiliteit van geleier

Die diepte van penetrasie word in figuur 2.1 gedemonstreer (Anderson, 1985: 311).



Figuur 2.1 - Diepte van penetrasie

Uit vergelyking 2.2 kan gesien word dat hoe groter die frekwensie, hoe kleiner die diepte van penetrasie.

Die verhouding van werklike induktansie tot lae frekwensie induktansie teenoor geleieradius tot diepte penetrasie word weergegee in grafiek A.1, van byvoegsel A (Johnson, 1950: 80).

Volgens die grafiek kan gesien word dat soos die frekwensie toeneem, die verhouding van werklike induktansie tot lae frekwensie induktansie daal en neig na nul.

Interne induktansie word dan gegee deur (Elgerd, 1971: 160; Johnson, 1950: 84):

$$L_{int} = (L_i/L_{i0}) \times (\mu_c \mu_o) / (4\pi) \text{ H/m} \quad 2.3$$

waar  $L_i$  = induktansie by oomblikfrekwensie

$L_{i0}$  = lae frekwensie interne induktansie

$\mu_c$  = permeabiliteit van geleier

$\mu_o$  = permeabiliteit van lug

As  $L_i/L_{i0}$  neig na een, dan is die interne induktansie:

$$\text{Vir enkelfase } L_{int} = (\mu_c \mu_o) / (4\pi) \text{ H/m}$$

(volg.vgl. 2.3 en as  $\mu_c = 1$ )

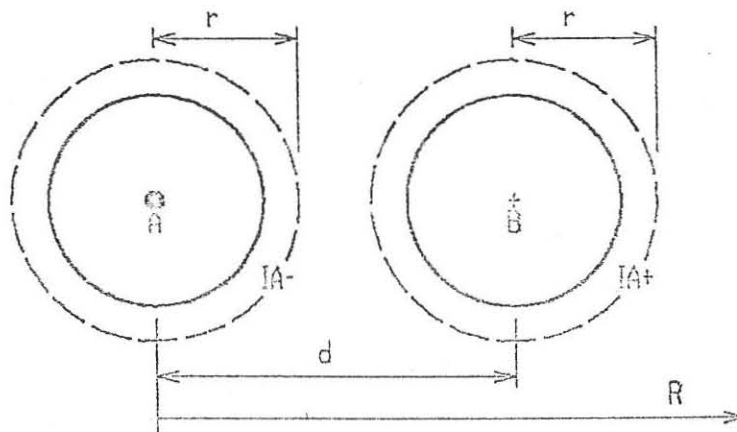
$$\text{Vir driefase } L_{int} = (\mu_c \mu_o) / (8\pi) \text{ H/m}$$

(Elgerd, 1971: 162)

Uit grafiek A.1 blyk dit dat die interne induktansie neig na nul soos die frekwensie verhoog word.

### 2.3 Eksterne inductansie van 'n boggrondse geleier

Beskou twee parallelle geleiers in figuur 2.2



Figuur 2.2 - Twee stroomdraende parallelle geleiers

Aanvaar dat die afstand tussen die geleiers groter is as die radius van die geleiers om die nabyheidseffek<sup>2</sup> uit te skakel. Beskou alleenlik die vloed wat gekoppel word met geleier B. Uit die skets is dit duidelik dat die vloed van geleier A nie bloot saam met die vloed van B getel moet word nie, maar dat die magneetvloed versterk tussen die geleiers en verswak aan die buitekant.

2. nabyheidseffek - veroorsaak groter strome in geleiers wat baie naby mekaar parallel loop.

Die eksterne inductansie kan geformuleer word volgens Gungor (1988: 114/117) as:

$$L_{eks} = 4 \times 10^{-7} \times \ln(d/r) \text{ H/m} \quad 2.4$$

(enkelfase vir 2 geleiers)

$$L_{eks} = 2 \times 10^{-7} \times \ln(\text{GMD}/r) \text{ H/m per fase} \quad 2.5$$

(driefase)

waar  $d$  = afstand tussen geleiers

$r$  = geleierradius

GMD = Geometriese gemiddelde afstand (sien afdeling 2.5)

Hieruit blyk dit dat 'n groter afstand tussen die geleiers die eksterne inductansie sal verhoog en 'n groter geleierradius die waarde sal verminder.

Westinghouse Electric Corporation (1964: 35) konstateer 'n ander vergelyking vir  $L_{eks}$ , maar die tendens daarvan t.o.v. geleierradius en afstand kom ooreen met bostaande.

Noudat die interne en eksterne inductansies berekenbaar is, kan die inductansies gesommeer word om die totale vloed te bepaal. Dus totale inductansie vir enkelfase is:

$$L_{tot} = L_{eks} + L_{int}$$

$$L_{tot} = [4 \times 10^{-7} \times \ln(d/r)] + [(L_i/L_{i0}) \times (\mu_c \mu_o) / (4\pi)] \text{ H/m} \quad 2.6$$

maar,  $(L_i/L_{i0})$  neig na 1 by laer frekwensies. Dus kan vgl. 2.6 herskryf word vir enkelfase en driefase onderskeidelik:

$$L_{tot} = [4 \times 10^{-7} \ln(d/r)] + [(\mu_c \mu_o)/(4\pi)] \quad 2.7$$

$$L_{tot} = [2 \times 10^{-7} \ln(GMD/r)] + [(\mu_c \mu_o)/(8\pi)] \quad 2.8$$

#### 2.4 Die gemiddelde geometriese radius

Dit kan beskou word as die radius van 'n geleier waarby die interne induktansie weglaatbaar is. Vir soliede geleiers kan die gemiddelde geometriese radius beskou word as (Guile & Paterson, 1981: 89):

$$GMR = r.e^{-\frac{1}{4}} \quad 2.9$$

waar  $r$  = geleierradius

Vir bondelgeleiers verskil die waarde van materiaal tot materiaal en is dit beter om die verskaffer te raadpleeg vir inligting.

Met inagnome van die gemiddelde geometriese radius kan die simbool  $r$  in vergelyking 2.8 vervang word met die simbool GMR.

$$L_{tot} = 2 \times 10^{-7} \ln(GMD/GMR) \quad 2.10$$

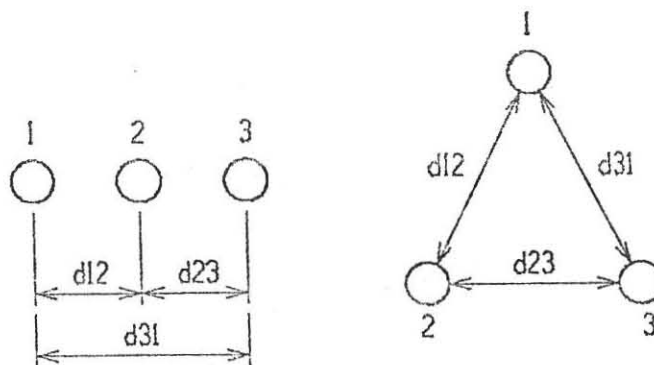
(skileffek weggelaat)

Interne inductansie kan weggelaat word, omdat die GMR nou gebruik word. Dit is dus duidelik dat die konfigurasie van die geleiers en die dikte van saamgestelde geleiers, van belang is (Invloed van GMD en GMR).

By gestringde of gevlegte geleiers is die waarde van die GMR anders as in die geval van vgl. 2.9, wat gegeld het vir 'n soliede geleier. Daar kan ook onderskeid getref word tussen gestringde geleiers met of sonder 'n staalkern. In byvoegsel B tabel 2.1, word 'n paar voorbeelde gegee van die GMR van koper en aluminiumgeleiers met staalkerns. Vir verdere tabelle kan verwys word na Lackey (1951: 263).

## 2.5. Die gemiddelde geometriese afstand tussen geleiers (GMD)

Beskou figuur 2.3 (Anderson, 1985: 327)



Figuur 2.3 - Die horisontale en driehoekige konfigurasies van geleiers

Die gemiddelde geometriese afstand tussen geleiers in 'n driefasige stelsel, word bereken omdat die waarde direk 'n invloed het op die positiewe- en negatiewevolgorde-impedansies.

Volgens Anderson, (1985: 327) kan die GMD as volg bepaal word:

$$\text{GMD} = (d_{ab} \times d_{bc} \times d_{ca})^{1/3} \quad 2.11$$

## 2.6 Positiewe- en negatiewevolgorde-impedansies

Vir metode een gaan voorafgaande teorie gebruik word om positiewe- en negatiewevolgorde-impedansies te bepaal. Uit afdeling 2.4 kan vergelyking 2.10 aangepas word in 'n driefasige stelsel om die positiewevolgorde-impedansie te bepaal:

$$Z_1 = R_c + j(2\pi f)[2 \times 10^{-4} \ln(\text{GMD}/\text{GMR})] \text{ ohm/km} \quad 2.12$$

waar  $R_c$  = wisselstroom-weerstand van geleier is.

Aangesien die hoëspanningsgeleiers getransponeer word, sal die wedersydse-induktansie van 'n tweede stel geleiers op dieselfde torings, 'n minimale uitwerking hê (Lackey, 1951: 149). In 'n driefasige stelsel is die positiewe- en negatiewevolgorde-impedansies gelyk aanmekaar.

'n Tweede, meer akkurate metode wat skileffek inagneem, kan ook gebruik word om die positiewe- en negatiewevolgorde-reaktansie te benader (Information System Department (1977: 8).

In dié geval word die totale radius gebruik en moet die interne induktansie dus ook in berekening gebring word. Die resultaat van hierdie metode en metode een kan gesien word in byvoegsel C (1 & 2). Beide die metodes is dus aanvaarbaar vir algemene gebruik, maar ter wille van volledigheid word die tweede metode kortliks bespreek.

Reaktansiewaarde word gegee deur die vgl:

$$X_1 = 2\pi f l \times [K + 2\ln(GMD/r)] \times 10^{-9} \text{ ohm/cm} \quad 2.13$$

waar  $r$  = nominale radius van totale geleier(cm)

$GMD$  = Gemiddelde spasiëring tussen geleiers(cm)

$f$  = frekwensie in Hz

$l$  = lengte van geleier in cm

$K$  = interne induktansie van geleier

Die nominale radius van geleier kan as volg bereken word:

$$D = Fd = 2r$$

waar  $F$  afhang van die geleierkonfigurasie soos gesien in byvoegsel B tabel 2.2.

Die interne induktansie van 'n staalkern-aluminiumgeleier, is 'n funksie van die permeabiliteit van die staalkern. Die waarde van  $K$  in vergelyking 2.13, is dus afhanklik van die relatiewe permeabiliteit van staal.

Die waardes van  $K$  kan volgens byvoegsel B tabel 2.3 bereken word.

Uit die resultate blyk dit dat metode een en twee vir presies dieselfde geleiers en torings, antwoorde van dieselfde orde het.

In die geval van twee stelsels op dieselfde toring word vergelyking 2.12 soos volg aangepas (Roepers, 1985: 154):

$$Z_1 = R_c + j2\pi f 2 \times 10^{-4} \ln[(GMD_1 \times GMD_2) / (GMR \times GMD_{1,2})] \quad \Omega/\text{km/geleier/stelsel} \quad 2.14$$

waar  $GMD_{1,2} = (d_{11} \cdot d_{22} \cdot d_{33})^{1/3}$

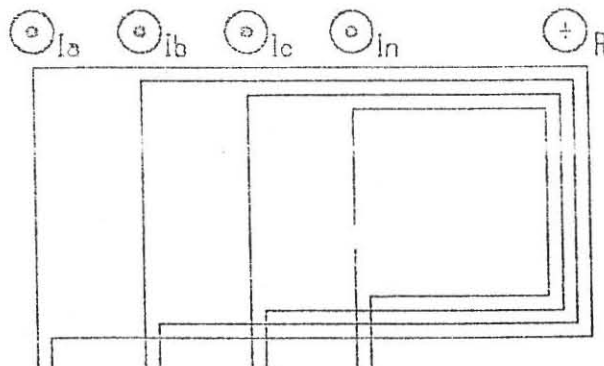
$GMD_1$  = Gemiddelde spasiëring groep 1

$GMD_2$  = Gemiddelde spasiëring groep 2

## 2.7 Nulvolgorde-impedansie sonder aardgeleier

Beskou figuur 2.4 (Guile & Paterson, 1981: 79)

Vir nulvolgorde is  $I_a = I_b = I_c = I_o$



Figuur 2.4 - Terugvloei van nulvolgordestroom na bron

Skrywers het in die verlede die aanname gemaak dat die nulvolgordestroom, by 'n diepte wat denkbeeldig gelyk is aan die hoogte van die geleiers bo grondvlak, ondergronds terugvloei na die bron. Hierdie baan word in figuur 2.4 deur "R" voorgestel. Aangesien hierdie aanname afhang van die resistiwiteit van die grond, kan die werklike waarde aansienlik verskil.

Die invloed en diepte van hierdie stroom kan met die volgende vergelyking bepaal word (Roepel, 1985: 155):

$$D_e = 1650 \times [\rho / (2\pi f)]^{1/2} \quad 2.15$$

waar  $D_e$  = die diepte van stroom onder die  
grondoppervlakte

$\rho$  = die resistiwiteit van die grond

Tipiese waardes vir  $\rho$  word deur H.H.K. Earthing & Lightning Protection System in byvoegsel D gegee.

Vir berekeningsdoeleindes is dit beter om die drie geleiers met 'n enkele geleier te vervang, met 'n ekwivalente radius. Die GMR per geleier het ons alreeds in afdeling 2.4 bespreek, asook die spasiëring tussen die geleiers in afdeling 2.5. Hierdie ekwivalente radius sal as  $GMR_x$  aangedui word en die voorheen gedefinieerde GMR as  $GMR_c$ . Volgens Lackey (1951: 152) is:

$$GMR_x = (GMR_c^3 \times d_{ab}^2 \times d_{bc}^2 \times d_{ca}^2)^{1/9} \quad 2.16$$

Die nulvolgorde induktiewe reaktansie formule kan as volg afgelei word (Lackey, 1951: 258):

$$X_o = 2\pi f \times [6 \times 10^{-4} \times \ln(D_e/GMR_x)] \quad \Omega/\text{km} \quad 2.17$$

Daar moet egter daarop gelet word dat hierdie vergelyking slegs geldig is as daar geen aardgeleier is nie.

Maar vir nulvolgorde-impedansie moet die selfimpedansie ( $Z_x$ ) van 'n geleier met die aarde as terugkerende geleier, en die wedersydse impedansie ( $Z_w$ ) wat tussen twee parallelle geleiers en aarde bestaan, eers gedefinieer word (GEC Measurements, 1987: 47):

$$Z_x = R_c + 0,988f10^{-3} + j2,9f10^{-3} \log_{10} (D_e/GMR_x)$$

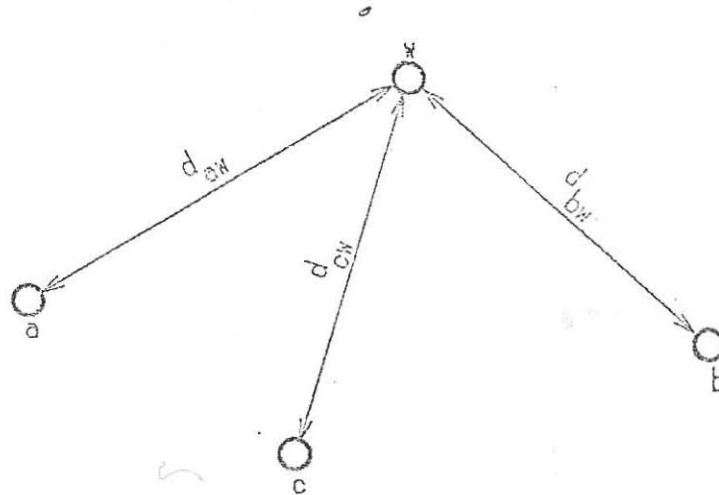
$$Z_w = 0,988f10^{-3} + j2,9f10^{-3} \log_{10} (D_e/GMD)$$

waar  $Z_0 = Z_x + 2Z_w$

$$\text{Dus } Z_0 = [R_c + 2,96f10^{-3}] + j[(2\pi f)2 \times 10^{-4} \ln(GMD/GMR_x)] \quad \Omega/\text{km} \quad 2.18$$

## 2.8 Nulvolgorde-impedansie met 'n aardgeleier.

Beskou figuur 2.5 met driefasige toevoer en aardgeleier (Lackey, 1951: 157)



Figuur 2.5 - Driefases met een aardgeleier

Vir die berekening van die nulvolgorde-impedansie, is dit noodsaaklik dat die driefasige geleiers as 'n groep beskou word ( $GMR_x$ ), soos alreeds in vgl. 2.16 gedoen is. 'n Nuwe groep word nou gevorm wat die aardgeleier ook in ag neem en dit word die ekwivalente afstand tussen die fasegeleiers en die aardgeleier genoem. Dit word voorgestel as  $GMR_{xw}$ . Met die aardgeleier teenwoordig, is dit nou nodig om die wedersydse- en selfimpedansie in berekening te bring. Die selfimpedansie sal as  $Z_x$  voorgestel word, terwyl die wedersydse-impedansie tussen die groep geleiers en die aardgeleier as  $Z_{xw}$  voorgestel word.

Vir die wedersydse-impedansie moet die  $GMR_{xw}$ -waarde gebruik word.  
Die vergelykings lyk as volg (Lackey, 1951: 158):

$$Z_x = (R_c/3) + (0,987f10^{-3}) + j(4\pi f10^{-4} \times \ln(De/GMR_x)) \quad \Omega/\text{km}/\text{fase} \quad 2.19$$

waar  $Z_x$  = selfimpedansie van groep geleiers

$R_c$  = geleier ws-weerstand in ohm/km

$De$  = ekwivalente diepte van aardpad

$GMR_x$  = geometriese gemiddelde radius van fasegeleiers

$$Z_{xw} = 0,9875f10^{-3} + j(4\pi f10^{-4} \times \ln(De/GMD_{xw})) \quad \Omega/\text{km} \quad 2.20$$

waar  $Z_{xw}$  = wedersydse-impedansie

$$GMD_{xw} = (d_{aw} \times d_{bw} \times d_{cw})^{1/3} \quad 2.21$$

$GMD_{xw}$  = ekwivalente afstand tussen die driefasige geleiers en  
aardgeleier

$d_{aw}$  = afstand tussen fase en aardgeleier

$$Z_w = R_w + 0,9875f10^{-3} + j(4\pi f10^{-4} \times \ln(De/GMR_w)) \quad \Omega/\text{km} \quad 2.22$$

waar  $Z_w$  = selfimpedansie van aardgeleier

$GMR_w$  = ekwivalente radius van aardgeleier

$R_w$  = ws-weerstand in ohm/km van aardgeleier

$$\text{Verder is } Z_o = 3[Z_x - (Z_{xw}^2/Z_w)] \quad \Omega/\text{km} \quad (\text{Lackey, 1951: 159}) \quad 2.23$$

waar  $Z_o$  = nulvolgorde-impedansie met 'n aardgeleier

## 2.9 Resultate van veranderlikes volgens teorie en voorbeelde in byvoegsel C

- (a) 'n Horisontale stel, platgemonteerde geleiers, sal 'n hoër positiewevolgorde-induktansiewaarde hê as 'n ekwivalente driehoekige spasiëring met dieselfde afstand.
- (b) By horisontale plasing van geleiers sal die nulvolgorde-induktansie 'n laer waarde hê as by 'n driehoekige tipe toring, byvoorbeeld "Kite".
- (c) Groter diameter geleiers sal die positiewe- en nulvolgorde-induktansiewaardes verlaag.
- (d) 'n Hoër waarde resistiwiteit sal die nulvolgorde-induktansie verhoog.
- (e) Vir 'n aardgeleier sal die verhouding tussen nul- en positiewevolgorde-reaktansie, tipies 2 tot 1 wees en waar daar nie 'n aardgeleier is nie sal die verhouding tipies 3,5 tot 1 wees (Lackey, 1951: 171).

## HOOFSTUK 3

### GELEIERWEERSTAND

#### 3.1 Inleiding

Soos alle geleiers het bogrondse geleiers ook 'n sekere weerstandswaarde. Geleierweerstand word deur drie elemente beïnvloed, nl. temperatuur, frekwensie en grootte van die stroom, (Westinghouse Electric Corporation, 1964: 33/34). In die verlede was daar baie gebruik gemaak van kopergeleiers wat gestring was, maar vandag is dit meer die tendens om van aluminiumgeleiers met 'n staalkern gebruik te maak.

Aluminiumgeleiers word in vier groepe verdeel nl. (Gross, 1979: 100):

- AAC-alles aluminiumgeleier.
- AAAC-alles aluminium allooigeleier
- ACSR-aluminiumgeleier met staalvertserking
- ACAR-aluminiumgeleier met allooiversterking

Aluminiumgeleiers se kenmerkende eienskappe is dat hulle baie ekonomies en baie lig in gewig is. Hulle geleidingsvermoë is swakker as die van koper, maar het 'n groter diameter in vergelyking met koper. Vir berekening doeleindes word die wisselstroom-weerstand van die geleier benodig. In die praktyk word die gelykstroom-weerstand van die geleiers gemeet, en dan afhangende by watter frekwensie die geleier toegepas gaan word, moet die skileffek ook in berekening gebring word.

Standaard tabelle gee gewoonlik die weerstandwaarde by twintig grade Celsius, wat dan verwerk moet word na die verlangde temperatuur soos verder bespreek sal word. Gestringde geleiers se weerstandwaarde verskil van soliede geleiers, aangesien die geleiers langer is en die skileffek anders bereken word.

Die geleierweerstand is nie alleenlik die elektriese bepalende faktor nie, maar dit is omgekeerd eweredig aan die kwadraat van die stroomdravermoë van die geleier. (Vergelyking 3.4). In hierdie hoofstuk sal daar dus ook na die stroomdravermoë van geleiers gekyk word.

### **3.2 Die berekening van geleierweerstand**

Dit is standaard praktyk dat die vervaardiger van geleiers die nodige toetsresultate moet kan lewer op versoek. Uit die toetsresultate van Hulett Aluminium Profiles, soos gesien kan word in byvoegsel E, kan die resistiwiteit van die toetsstuk presies bepaal word. In diè geval was 'n gemiddelde resultaat van  $2,801 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  vir aluminium, "Mink" geleier geregistreer.

Om die gelykstroom-weerstand te bepaal word die volgende vergelyking gebruik (Gungor, 1988: 106):

$$R_{gs} = (\rho l/A) \quad 3.1$$

waar  $R_{gs}$  = gelykstroom weerstand in ohms

$A$  = geleieroppervlakte in  $m^2$

$l$  = geleierlengte in meter

$\rho$  = geleierresistiwiteit in ohm-meter

Die resistiwiteit van geleiers word in standaard tabelle by 20 grade Celsius aangegee. Die temperatuur wat dan bereken word moet verder verwerk word na die werklike temperatuur (Westinghouse Electric Corporation, 1964: 33):

$$R_2 = R_1 \times [(T+t_2)/(T+t_1)] \quad 3.2$$

waar  $R_1$  = gs-weerstand by temp  $t_1$

$R_2$  = gs-weerstand by temp  $t_2$

$T$  = temperatuurkoeffisiënt ( $\alpha = 228$ )

'n Interessante waarneming is dat Gungor (1988: 107) eers die gelykstroom-weerstand na wisselstroom verwerk en dan die weerstandwaarde by die nuwe temperatuur bepaal.

Vir berekening van wisselstroom-weerstand moet die gelykstrom-  
weerstand met die skileffek-faktor vermenigvuldig word (Gungor,  
1988: 109)

$$R_{ws} = kR_{gs}$$

waar "k" die skileffek-faktor is

Die wisselstroom-weerstand van gestringde geleiers, (sonder 'n staalkern),  
hang af van die aantal enkelgeleiers per string. Die wisselstroomweerstand  
van "n" aantal geleiers kan bepaal word deur (Gungor, 1988: 107):

$$R_{ws\ tot} = 1/n R_{ws} / \text{geleier}$$

Waar daar 'n geleier is met 'n staalkern, sal die totale wisselstroom-  
weerstand vir die geleier 'n parallelle kombinasie wees van al die lae kerns  
om die staalkern. Die weerstand per laag kan as volg geskryf word  
(Gungor, 1988: 108):

$$R_L = (\rho/A) \times [1 + ((2\pi fr_1)/L)^2]^{1/2}, \Omega/m \quad 3.3$$

waar  $R_L$  = ws weerstand van die laag

$r_1$  = radius van die laag

L = laaglengte

$\rho$  = resistiwiteit van geleier

A = nominale oppervlakte van Aluminium

Die totale geleierweerstand is dan die parallelle kombinasie van al die lae weerstande en word beskryf as  $R_C$ . Vir bondelgeleiers word dieselfde beginsel toegepas deurdat die totale weerstand dan gegee word as:

$$R_{\text{tot}} = 1/n R_C$$

waar  $n$  = aantal geleiers per bondel.

Die bepaling van gelykstroom- tot wisselstroomverhouding kan verder nog ondersoek word. Vir meer inligting kan verwys word na Anderson (1985: 315).

### **3.3 Die uitwerking van temperatuur op die stroomdravermoë van geleiers (Eskom, 1974: Afdeling 3 klosule 3.2)**

Hierdie eienskap van die geleier is samehangend met die geleierweerstand, een van die belangrikstes. Die waardes van stroom en weerstand bepaal die geleier se vermoë om energie oor te dra. Aangesien die bogrondse torings so ver as moontlik uitmekaar geplaas word vir die mees ekonomiese stelsel, is dit duidelik dat die maksimum trekkrag binne perke, op die geleiers voorkom. As gevolg hiervan mag die geleiers nie hulle termiese perke oorskry nie en moet die stroom so beperk word dat die geleiers hulle elasticiteit sal behou, al voorsien hulle volle vrag.

Tydens fouttoestande is dit noodsaaklik dat die foutstroom so spoedig as moontlik ontkoppel moet word om te voorkom dat die geleier sy eienskappe verloor. Tyd speel dus 'n belangrike faktor in die termiese eienskappe van 'n geleier.

Vergelykings om die stroomdravermoë van standaardgeleiers te bepaal, kan as volg gedefinieer word vir aluminium:

Stroomdravermoë by 75 grade Celsius

$$I^2(75) = [0,2655d^{0,448} - 0,0212d] / [R_{20} \times 1,22165 \times 10^{-5}] \quad 3.4$$

Stroomdravermoë by 90 grade Celsius

$$I^2(90) = [0,379d^{0,448} + 0,0273d] / [R_{20} \times 1,2821 \times 10^{-5}] \quad 3.5$$

waar  $d$  = die nominale diameter van geleier in meter

$R_{20}$  = maks weerstand by 20 grade Celsius  
gemeet in  $\Omega/\text{km}$ .

Ter illustrasie kan verwys word na byvoegsel F.

### 3.4 Resultate van veranderlikes:

- (a) Die geleierresistiwiteit is eweredig aan die weerstandwaarde per kilometer. Dus sal die geleiermateriaal wat 'n hoër resistiewe waarde het, m.a.w. minder elektries geleidend is, 'n hoër waarde ohm per kilometer hê.
- (b) Die geleieroppervlakte is omgekeerd eweredig aan die weerstandwaarde per kilometer. In die geval van ACSR - geleiers sal die geleier met die grootste Aluminium-oppervlakte, die laagste ohm per kilometer waarde hê.
- (c) In die geval waar twee geleiers per fase gebruik word, sal die weerstandwaarde homself halveer. Die geleiers is dan in parallel gekoppel bv. Bear en Twin Bear.
- (d) By baie dun geleiers en normale frekwensies, het die skileffek 'n weglaatbare uitwerking. In hierdie gevalle kan die gelykstroomwaardes vir weerstand gebruik word.
- (e) Standaard tabelle gee die geleierweerstandwaardes in ohm per kilometer by 'n temperatuur van twintig grade Celsius. Hierdie syfers moet aangepas word by werkstemperature aangesien dit die impedansiewaardes affekteer.

- (f) Die stroomdravermoë van geleiers is van die toelaatbare werkstemperatuur en nominale geleierdiameter afhanklik. 'n Groter nominale diameter en 'n hoër werkstemperatuur, sal die kontinue stroom se waarde verhoog. Die spesifieke geleiermateriaal se temperatuurkoeffisiënt kan ook die waarde beïnvloed.

## HOOFTUK 4

### LYNKAPASITANSIE

#### 4.1 Inleiding

Die serie-impedansie van 'n lyn bepaal die limiet van die stroom wat deur die lyn oorgedra kan word. Die faktore waaruit serie-impedansie bestaan is weerstand en induktansie. Netso word die parallelle admittansie verkry wat die grootte lekpad van die lyn bepaal. Die kapasitansie tesame met die konduktansie, vorm die parallelle admittansie (Elgerd, 1971: 170).

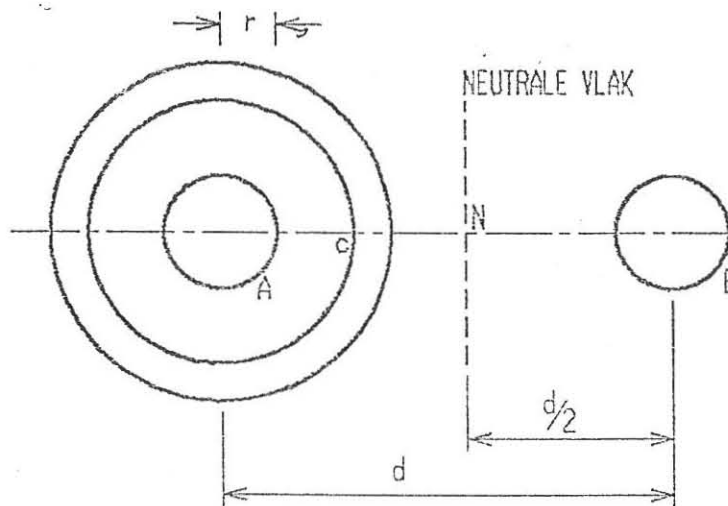
Tussen oorhoofse geleiers waar nie gelykstroom, maar wisselstroom vloei, sal daar kapasitiewe lading en ontlading voorkom. Hierdie lading sal groter wees by die bron as by die ontvangskant (Guile & Paterson, 1981: 99). Die kapasitansie sal as 'n voorlopende arbeidsfaktor-las op die lyn voorkom. Soos die bepaling van induktansie in hoofstuk 2, is die bepaling van kapasitansie ook 'n komplekse berekening tussen die geleiers self, en die lading tussen die geleiers en aardgeleier of -geleiers.

Kapasitansie speel nie net 'n rol tydens normale lading nie, maar ook tydens die effekte van transiënte, soos weerlig en skakeling op lang lyne wat 'n lae vraag het. Kapasitansie in 'n wisselstroomstelsel, kan gedefinieer word as daardie eienskappe van geleiers en diëlektrikum wat die storing van verskillende ladings moontlik maak, wanneer daar potensiaalverskil tussen die geleiers ontstaan (Fink & Beaty, 1987: 1-9).

Die doel van die berekening van kapasitansie, is (a) om die effek van stuwings op 'n lyn waar te neem en (b) om die regte keuse van die tipe torings en geleiers te maak. Hierdie keuse affekteer die effektiwiteit, arbeidsfaktor en die spanningregulering van stelsels.

#### 4.2 Kapasitansie van 'n enkelfasige bogrondse lyn

Beskou die onderstaande figuur (Lackey, 1985: 179):



Figuur 4.1 - Twee parallelle geleiers

Die skets stel twee parallelle geleiers voor wat elk 'n radius van  $r$  meters het, en wat  $d$  meters uit mekaar gespasieer is. Op die skets sal die vloeddigtheid by punt C die som van die vloeddigtheid van geleier A en B voorstel.

Die kapasitansie tussen die geleiers, A en B, word dan gegee deur die basiese vergelyking van kapasitansie nl. :

$$C = Q / V_{ab} \quad \text{F/m}$$

waar  $Q = Q$ -lading tussen geleiers A en B.

$V_{ab}$  = som van die potensiaalverskil wat deur lading,  $Q_a$  en  $Q_b$  veroorsaak word

Uit die afleiding van Lackey (1985: 180) vir kapasitansie tussen geleiers A en B in figuur 4.1, kan die vergelyking as volg geskryf word:

$$C = (\pi\epsilon_0) / \ln [(d-r) / r] \quad \text{F/m} \quad 4.1$$

waar  $d =$  Afstand tussen geleiers in meter

$r =$  Radius van geleiers in meter

$\epsilon_0 = 1 / (36\pi 10^9)$  - kapasitiewe konduktiwiteit van lug

Vir die kapasitansie na die neutraalgeleier sal die kapasitiewewaarde verdubbel, aangesien slegs die helfte van die spanning, as wat in vgl. 4.1 gegeld het, teenwoordig is. (Sien Afdeling 4.3)

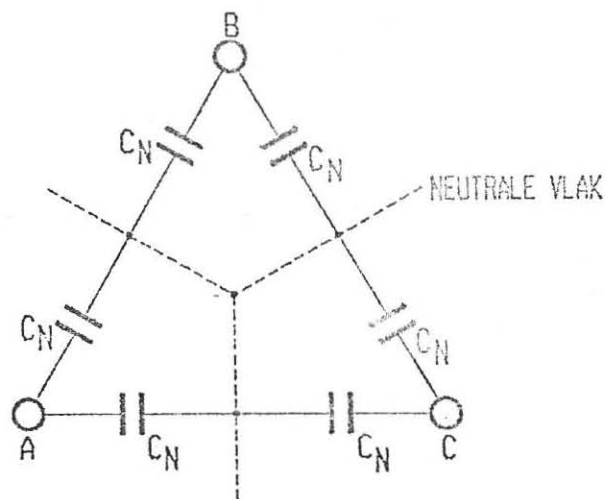
$$C_N = 2C = (2\pi\epsilon_0) / \ln [(d-r) / r] \quad \text{F/m} \quad \text{lyn na neutrale vlak} \quad 4.2$$

Volgens Guile & Paterson (1981: 115) is die waarde van die kapasitansie tussen geleiers en aarde ( $C_e$ ) so klein, dat dit meestal geïgnoreer kan word.

### 4.3 Positiewe- en negatiewevolgorde-kapasitansie in 'n driefasige, driedraadstelsel

#### 4.3.1 Simmetriese gespasieerde geleiers (Lackey, 1951: 181/182)

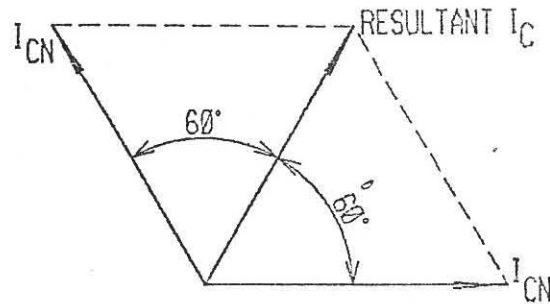
Beskou simmetriese gespasieerde geleiers in figuur 4.2:



Figuur 4.2 - Simmetriese gespasieerde geleiers

Volgens figuur 4.2 kan gesien word dat daar twee kapasitore in parallel gekoppel word tussen die geleier en die neutrale vlak. Die waarde van hierdie totale kapasitiewe stroom moet egter as 'n fasor gesommeer word aangesien die neutrale vlakke 120 grade uit fase met mekaar is.

Sien figuur 4.3:



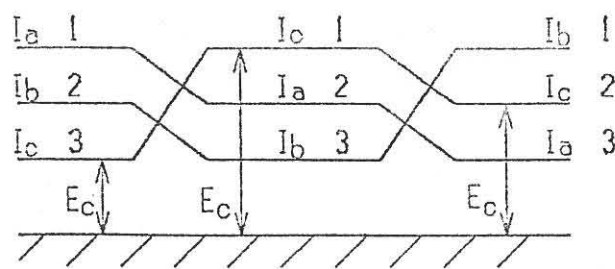
Figuur 4.3 - Sommering van kapasitiewe strome

Dus is die totale kapasitansie tussen enige geleier en die neutrale vlak:

$$C_N = (2\pi\epsilon_0) / [\ln (d-r) / r] \quad \text{F/m} \quad 4.3$$

#### 4.3.2 Asimmetriese gespaseerde geleiers

Vir die doel sal die lyn in die getransponeerde vorm beskou word. Sien figuur 4.4 (Central Station Engineers, 1964: 38)



Figuur 4.4 - Getransponeerde lyn

As gevolg van asimmetriese spasiëring van geleiers, waar daar nie transponering voorkom nie, sal die spanningsval van elke geleier na die neutrale vlak verskil en sal die netto magnetiese vloed oor die lengte van die lyn nie gelyk wees aan nul nie. Laasgenoemde is dan ook die rede hoekom die fases nie balanseer nie (Fink & Beaty, 1987: 14-80).

Om hierdie probleem te minimeer, word van die getransponeerde konfigurasie gebruik gemaak. Dit sal veroorsaak dat elke geleier dieselfde eienskappe het en dus sal die spanningsval identies wees in al drie die geleiers. Die gevolg is dat indien enige geleier parallel aan die getransponeerde geleiers geplaas word, daar geen addisionele lading in die geleier opgewek sal word nie.

Vir berekeningsdoeleindes word die spanning na die neutrale vlak, van byvoorbeeld geleier A, in al drie die seksies bepaal, en die gemiddeld daarvan in berekening gebring. Die kapasitansie van geleier A word dan in seksies een, twee en drie van die getransponeerde geleiers beskou ten opsigte van die neutrale laag, om die gemiddelde waarde te bepaal. Die vergelyking van die positiewe- en negatiewevolgorde-kapasitansie per fase word dan gegee deur (Guile & Paterson, 1981: 115):

$$C_1 = (2\pi\epsilon_0) / [\ln (GMD / r \times X)] \text{ F/m} \quad 4.4$$

waar GMD = effektiewe spasiëring

$r$  = geleierradius

$$X = [2 (h_1 h_2 h_3)^{1/3}] / (d_{12}, d_{13}, d_{23})^{1/3}$$

$d_{12}$  = geleier 1 tot denkbeeldige geleier 2

$h_1$  = hoogte van geleier 1

#### 4.4 Admittansie

Susseptansie kan gedefinieer word as die imaginêre gedeelte van admittansie (Gungor, 1988: 130).

As die kapasitiewe reaktansie gelyk is aan:

$$X_c = 1 / (2\pi f C_1) \quad \Omega/m \quad 4.5$$

dan is die kapasitiewe susseptansie gelyk aan:

$$B_c = 1 / X_c \quad \text{mho}/m/\text{fase} \quad 4.6$$

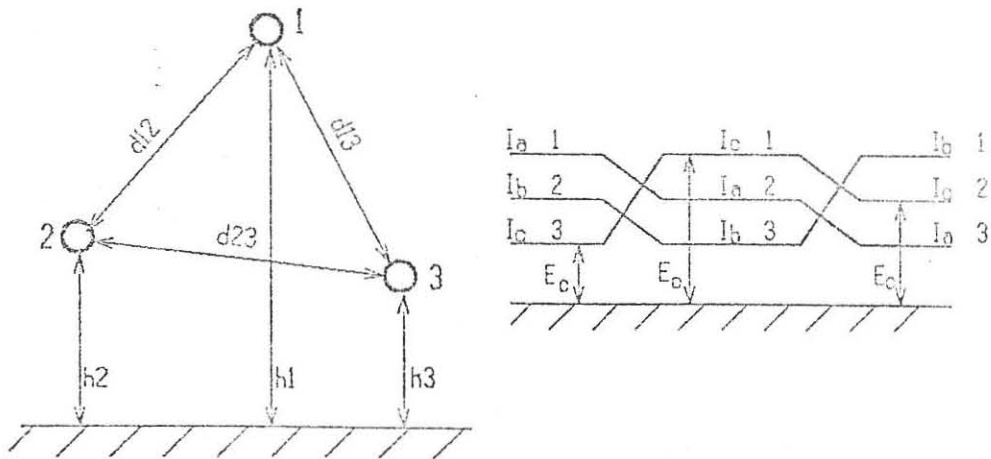
Die konduktansie(G) vorm saam met die susseptansie die admittansie.

Die konduktansie is die lekstroom na aarde wat gewoonlik voorkom by paalisolators. Faktore wat konduktansie beïnvloed is bv. vogtigheid en die soutgehalte van die lug. Die vergelyking van admittansie kan gegee word as (Hughes, 1982: 346):

$$Y = G + jB_c$$

#### 4.5 Nulvolgorde-kapasitansie na neutraal in 'n driefasige, driedraadstelsel sonder aardgeleier

In figuur 4.5 word die getransponeerde lyn geskets met die spannings van elke fase na aarde (Guile & Paterson, 1981: 113):



Figuur 4.5 - Getransponeerde lyn

Indien nulvolgordespanning alleenlik voorkom, in die geleiers soos in figuur, dan sal:

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}$$

en die ladings:

$$Q_a = Q_b = Q_c = Q$$

In die praktyk, is die hoogtes bo grondvlak 'n baie groter afstand as die afstande tussen geleiers. Met die bostaande aanname, kan die nulvolgorde-kapasitansie na neutraal verkry word as (Guile & Paterson, 1981: 117):

$$C_o = 2\pi\epsilon_0 \times 1 / \ln[(8h_1h_2h_3) / (rGMD^2)] \text{ F/m} \quad 4.7$$

waar  $h$  = hoogtes vanaf grond na geleiers in meter

$r$  = geleierradius

$$GMD = (d_{12}d_{13}d_{23})^{1/3}$$

Hierdie vergelyking kom ooreen met dië van Roeper (1985: 155).

$$C_E = 55,6 / \ln [(2H / r) ((4H^2 / A^2) + 1)]$$

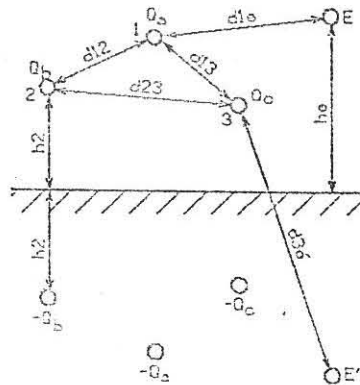
waar  $H = (h_1h_2h_3)^{1/3}$

$A = GMD$

#### 4.6 Nulvolgorde-kapasitansie in 'n driefasige stelsel met 'n aardgeleier.

Vir die bepaling van positiewevolgorde-impedansie, sal die teenwoordigheid van die aardgeleier op 'n 132 KV stelsel, die kapasitiewewaarde met een persent laat daal. Hierdie persentasieverskil is dus weglaatbaar. Anders as in die geval hierbo genoem, sal die aardgeleier met die berekening van nulvolgorde-kapasitansies, die waarde met omtrent tien persent laat toeneem (Guile & Paterson, 1981: 117):

Om die vergelyking beter te verstaan beskou die volgende figuur 4.6:



Figuur 4.6 - Driefasige stelsel met aardgeleier en spieëlbeeld

Volgens Guile & Paterson (1981: 118) word die lading eerstens tussen die aardgeleier en fasegeleiers bepaal. Daarna word soos voorheen die spannings van elke geleier bepaal en daaruit volg die vergelyking:

$$C_0 = (2\pi\epsilon_0) / [A - B] \text{ F/m} \quad 4.8$$

waar  $A = \ln[(8h_1h_2h_3) / (rGMD^2)]$

$$B = [1 / (3 \times \ln(2h_e/r_e))] \times [\ln[(d_{1e}, d_{2e}, d_{3e}) / (d_{1e}d_{2e}d_{3e})]]^2$$

$r_e$  = aardgeleierradius

$h_e$  = hoogte van aardgeleier bo grond

$d_{1e}$  = afstand tussen geleier en aardgeleier

$d_{1e}'$  = afstand tussen geleier en imaginêre aardgeleier

#### 4.7 Die effek van lang transmissielyne (Freeman, 1984: 185)

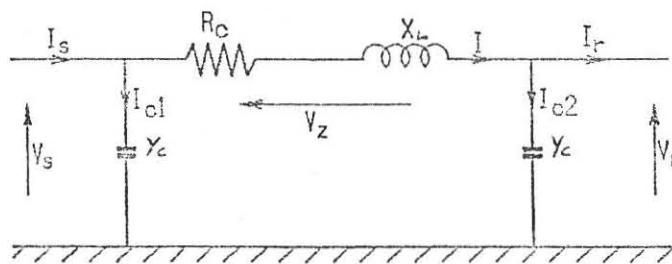
Tot op hede is die formules gebaseer op 'n per kilometer basis. Indien die formules toegepas word vir baie lang afstande tree daar ander faktore in. 'n Kort lyn word deur Freeman (1984: 184) beskou as 16 km. In diè geval word die kapasitiewe effek weggelaat.

Indien die afstand langer as 16 km is, kan daar kortliks twee metodes gebruik word om die lynparameters op die versend- en ontvangspanning te bepaal.

Die twee metodes is die nominale  $\pi$  - metode en die nominale T - metode.

##### 4.7.1 Nominale $\pi$ - metode

Sien figuur 4.7

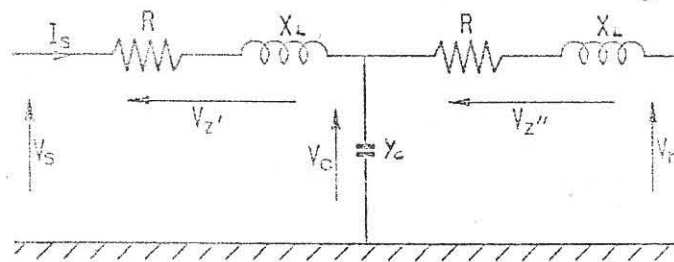


Figuur 4.7 - Ekwivalente kring van lyn met  $\pi$  - metode

$$\dot{V}_S = \dot{V}_r + \dot{V}_Z$$

#### 4.7.2 Nominale T - metode

Sien figuur 4.8:



Figuur 4.8 - Ekwivalente kring met T - metode

$$V_S = \dot{V}_C + \dot{V}_Z$$

In beide die gevalle kan die stroom in die netwerke bepaal word en dan volgens die versendspanning en ontvangspanning kan die lynparameters bereken word of anders om, afhangende wat die onbekende is. Vir meer inligting kan verwys word na Elgerd (1971: 183).

#### 4.8 Eienskappe van veranderlikes

- (a) Die waardes van kapasitansies verminder met 'n paar persent vir twee stel geleiers per toring, aangesien die grootte van kapasitiewe koppeling, in berekening gebring moet word (Roepers, 1985: 154).
- (b) In die geval van nulvolgorde-kapasitansie by twee geleierstelsels per toring, speel die koppeling 'n groot rol en kan die waarde per geleier, tot sestig persent toeneem (Roepers, 1985: 150).
- (c) Vir positiewe- en negatiewevolgorde-kapasitansies, speel die aardgeleier byna geen rol nie. Trouens, op 'n 132 KV stelsel verminder dit die kapasitansiewaarde met omtrent een persent (Guile & Paterson, 1981: 113).
- (d) Waar daar 'n aardgeleier teenwoordig is en die nulvolgorde-kapasitansiewaarde word bepaal, sal die waarde met omtrent tien persent toeneem a.g.v. die aardgeleier (Guile & Paterson, 1981: 117).

## HOOFSTUK 5

### DIE TEORIE VAN DIE IMPEDANSIERELÊ OP VOERDERS

#### 5.1 Inleiding

In die U.S.S.R. het die Mosenergo stelsel reeds in 1930 stroomafsnynrelê met tydvertraging ten volle gebruik (Atabekov, 1960: 229). Tydens fouttoestande op ringnetwerke, is dit noodsaaklik om die gradering van klynke, so akkuraat as moontlik toe te pas. Dit kan die kontinuïteit van toevoer verbeter en sodoende minder ongerief veroorsaak.

In 'n moderne substasie van 132 kV en kleiner, sal die gewone tyd/stroomkurwe-relê as reserwebeveiliging gebruik word, terwyl die impedansie-voerderbeveiliging as die hoofbeveiliging, toegepas word. In 'n ringnetwerk, waar die foutvlak redelik hoog is, is dit noodsaaklik om van eenheidsbeveiliging gebruik te maak, om sodoende die moontlike tydsvertraging te minimeer. Impedansie-voerderbeveiliging word dus toegepas waar hoë akkuraatheid en spoed, op 'n voerder noodsaaklik is.

Impedansie-voerderbeveiliging, word ook afstandbeveiliging genoem. Hierdie relê word so ontwerp om slegs foute te sien binne die berekende waardes van impedansie, wat as instellings op die relê voorkom. Hulle word hoofsaaklik in medium- en hoogspanningstelsels gebruik.

Die totale lynlengte word in drie sones, volgens persentasiewaardes van die lyn, verdeel. Die relê s kan toegepas word vir beveiliging teen tussenfase-, driefasefoute en

- in stelsels waarvan die neutrale geaard is (enkelfase en veelfasige aardfoute)
- in stelsels waarvan die neutrale geïsoleer is (slegs foute tussen fases).

## 5.2 Basiese beginsels van impedansierelê s

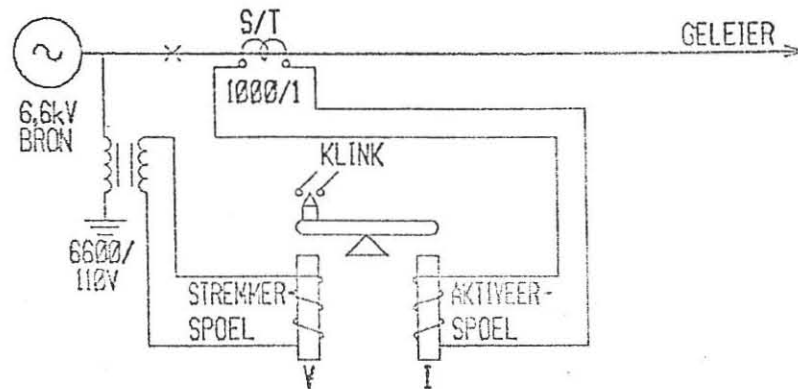
Die impedansies van hoogspanningsgeleiers, is eweredig aan die lengte van die geleiers. Die relê moet in staat wees om tussen verskillende impedansiewaardes te diskrimineer.

Impedansie in die algemeen, is die komplekse verhouding van die gemete waarde spanning en stroom op 'n spesifieke tydstip. Die beginsel van hierdie relê, is daarop gerig.

$$Z = V/I$$

5.1

In eenvoudige terme kan gesê word dat die waarde van die verhouding van die impedansie, sal bepaal of die relê geaktiveer sal word of nie. Beskou figuur 5.1. om die werking te demonstreer (GEC Measurements, 1987: 184):



Figuur 5.1 - Eenvoudige impedansierelê

Volgens figuur 5.1 kan gesien word dat die beginsel van werking toegespits word op die verhouding van die aktiveer- en stremmerspoele, wat 'n weerspieëling van die impedansiewaarde is.

Die grenswaarde van die relê, is wanneer die aktiveer- en die stremmerspoele se waardes gelyk is. Die effek wat verkry word is dat vir 'n naby fout die impedansieverhouding kleiner is, as vir 'n fout aan die einde van die lyn en dus sal die aktiveerspoel sterker wees. Die lynparameters soos geskets in hoofstuk 2, 3 en 4 het dus 'n direkte invloed in die berekenings van lynimpedansie, en sal dus die afsnytyd van die foutstroom beïnvloed.

### 5.2.1 Die afstand/tyd impedansierelê:

Een van die aanvanklike impedansierelê's is die afstand/tyd-relê wat gegrond is op die beginsel van vergelyking 5.1. Die relê's bestaan uit 'n skyf met 'n veer. Die klinktyd van die relê's was ongeveer eweredig aan verhouding van  $V/I$ . Vir 'n fout ver van die bron af, sou die spanningwaarde hoër wees en die stroomwaarde laer. Die relê sou dus stadiger geklink het as die relê wat nader aan die fout is (Warrington, 1968: 193).

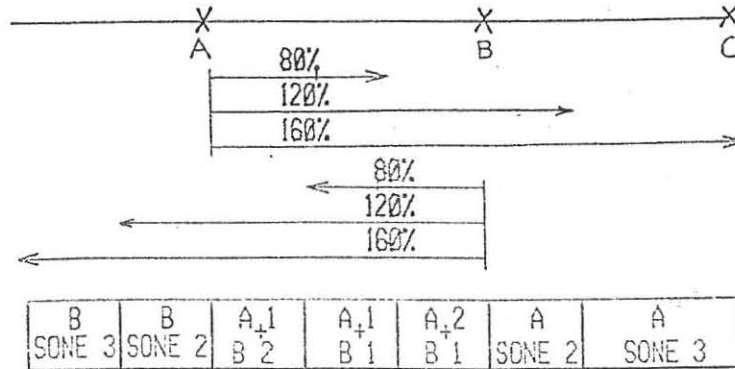
### 5.2.2 Die skakeltipe MHO impedansierelê:

Hierdie relê maak gebruik van oombliklike oorstroomrelê's wat as aansitters bekend staan. Die aansitters het verskeie funksies nl:

- (a) koppel die spanningtransformators aan die polarisering- en stremmerspoele.
- (b) stroomtransformators word aan die aktiveerspoel gekoppel
- (c) die tydrelê's word geaktiveer wat die verskillende weerstande in serie met die stremmerspoel koppel om sodoende die regte sone te bepaal (Freeman, 1984: 272).

### 5.3 Wat word bedoel met sones van 'n lyn?

Sien figuur 5.2



Figuur 5.2 - Die verskillende sones van 'n lyn

Om maksimum resultate van impedansierelêse in 'n netwerk te verkry, is dit noodsaaklik dat die relêse se beveiligingsones mekaar oorvleuel. Dit word bewerkstellig deur die korrekte instellings van meeteenhede en klinktye.

In die praktyk word aanvaar dat die instelling vir sone een, tagtig persent van die lynimpedansie moet wees (GEC Measurements, 1987: 186). Hierdie instelling gee 'n oombliklike klinkpuls sonder 'n tydsvertraging. Die rede vir die oorblywende twintig persent van die lynimpedansiewaarde, word toegeskryf aan die veiligheidsfaktor.

Hierdie faktor is nodig aangesien daar 'n klein persentasiefout op die volgende aparate mag wees nl.:

- spanningtransformators
- stroomtransformators
- lynparameters a.g.v. verandering in grondresistiwiteit ens.
- relêmeeteenhede

Indien die instelling honderd persent van die lynimpedansiewaarde sou gewees het, bestaan daar 'n goeie moontlikheid dat die relê vir 'n fout in die volgende sone kon optel. Dit sou dan die gradering van die netwerk nadelig beïnvloed.

Waar nie eenheidsbeveiliging in 'n ring gebruik word nie, sal 'n fout in die laaste twintig persent van die lyn, in sone twee tyd, ontkoppel word. Om die fout te registreer, moet die aansitwaarde nà 'n bepaalde tydsvertraging verlaag word. In sommige gevalle kan elke sone hulle eie aansitinstelling hê.

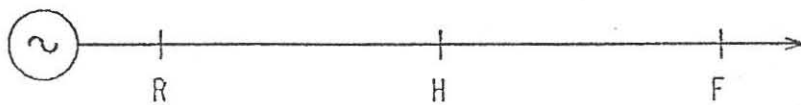
Die instelling van sone twee word voorgestel om die waarde van die aanvanklike lynlengte te dek, en ook nog vyftig persent van die daaropvolgende kortste lyn, of honderd en twintig persent van die totale lynlengte, afhangende watter waarde die grootste is (GEC Measurements, 1987: 186). Sone twee se tydinstelling moet van so 'n aard wees, dat daar genoegsame tydsvertraging is vir die volgende voerder, naaste aan die fout, om eerste te klink.

In die geval van veelvuldige invoere, sal die impedansiewaarde wat die relê waarneem, toeneem tydens fouttoestande (sien afdeling 5.6).

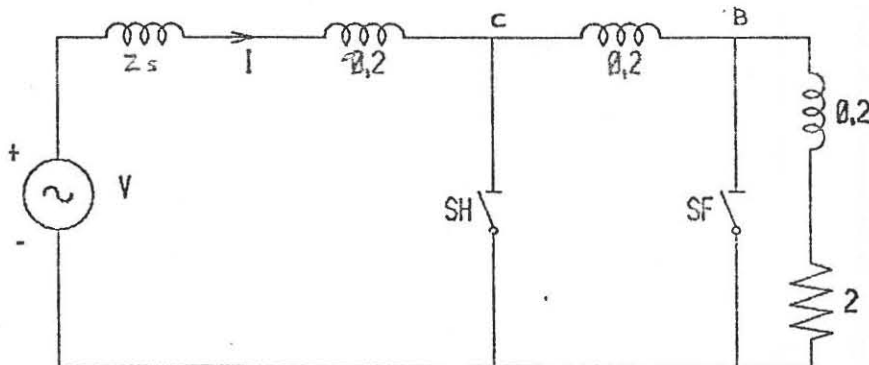
Vir die sone drie waarde, sal die relê ook vir twintig persent van die impedansiewaarde terugkyk na die lyn, om as reserwebeveiliging te dien vir stamfoute. Die relê kan ook so gekoppel word dat dit vir die oomblik wanneer die breker toegemaak word, sal klink vir 'n driefasefout wat moontlik deur 'n tydelike brugstam op die stasie veroorsaak kan word.

#### 5.4 Die eenvoudige impedansierelê

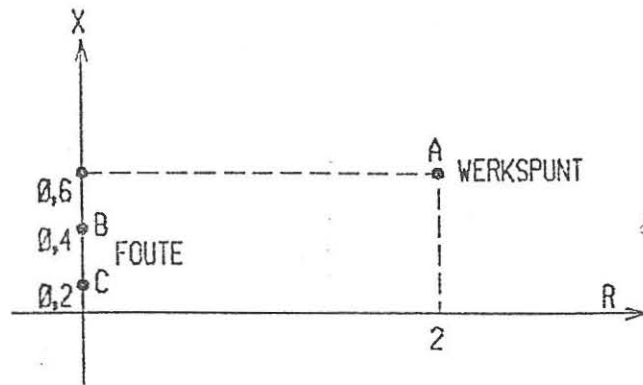
Beskou die volgende figuur met  $Z_L$  die aangelegde las by F en SH en SF skakelaars waarmee foute gesimuleer kan word (Gross, 1979: 392):



Figuur 5.3 (a) - Lynnetwerk



Figuur 5.3 (b) - Ekwivalente kring met skakelare vir simulاسie



Figuur 5.3 (c) - Simulering van foute in (b) op 'n X/R diagram

Volgens die vergelyking  $Z = R + jX$ , sal die vergelyking van impedansie vir figuur 5.3 (b) geskryf kan word as:

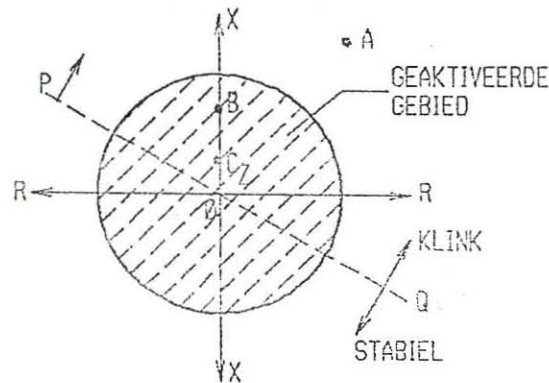
$$Z = 2 + j0,6 \text{ ohm}$$

Die vergelyking kom as punt A in die figuur 5.3 (c) voor. Veronderstel daar word 'n fout gesimuleer by punt B in figuur 5.3 (b), sal die vergelyking verander na:

$$Z = j0,4 \text{ ohm}$$

Hierdie punt word as B voorgestel in figuur 5.3 (c) en daar kan gesien word dat punt B 'n sterk induktiewe reaktansiewaarde het. So sal vir fout C die waarde ook op die vertikale as voorkom.

Die impedansie-karakteristiek se radius is afhanklik van die instelling in ohms, en alle punte binne die radius sal dus gesien word deur die relê, terwyl punte buite die radius geïgnoreer sal word. Sien figuur 5.4:



Figuur 5.4 - Eenvoudige impedansie-karakteristiek

#### 5.4.1 Nadele van die eenvoudige impedansie-karakteristiek

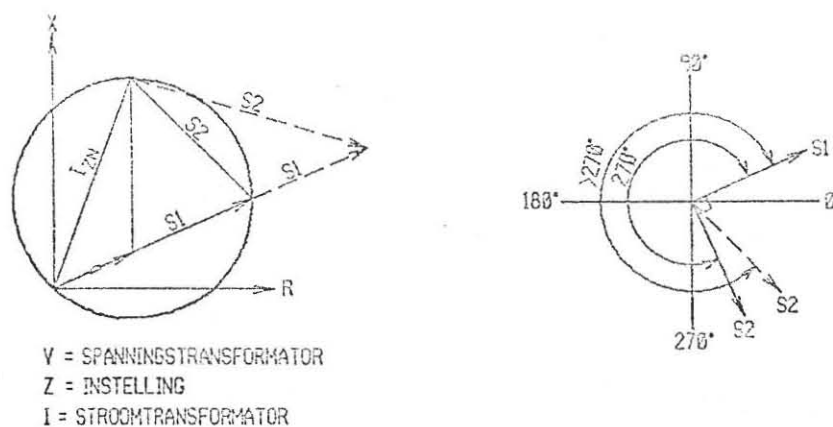
- (a) Die relê het 'n nie-gerigte beveiligingsone, m.a.w. foute sal beide kante van die relê gesien word en om die probleem uit te skakel sal 'n bykomende gerigte relê bygevoeg moet word.
- (b) Die stabiliteit van die relê word deur die hoogweerstand beïnvloed.
- (c) Die relê word maklik beïnvloed deur die omkering van drywing (wat 'n lokus deur die R/X vlak volg) omdat die relê se geaktiveerde gebied uit 'n groot sirkelarea bestaan.

Die gerigte relê waarvan in (a) gepraat word, sal as 'n reguit lyn op die impedansie-karakteristieke voorkom. Die lyn PQ in figuur 5.4 stel die afsnypunt voor. Die gearseerde gebied bo lyn PQ, is die geaktiveerde gebied.

### 5.5 Die selfgepolariseerde mho-sirkel

Hierdie relê word so genoem want dit bestaan uit 'n reguit lyn op 'n admittansiediagram waarvan die geaktiveerde gebied slegs in die voorwaartse rigting voorkom.

Om die polarisasie te verkry, word van 'n fasevergelyker gebruik gemaak wat twee insetseine met mekaar vergelyk. Sien figuur 5.5 (GEC Measurements, 1987: 190):

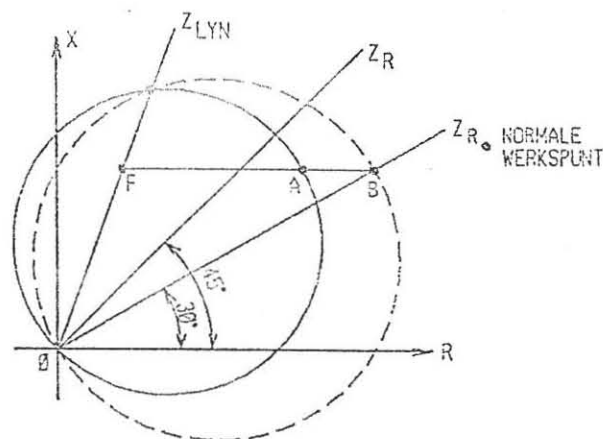


Figuur 5.5 - Die twee insetseine na die fasevergelyker

Aktivering sal plaasvind as die vektor  $S_2$  die vektor  $S_1$  tussen 90 en 270 grade naloop. Dus as die fout buite die sone val, sal die spanning toeneem en die hoek sal kleiner as 90 grade word, wat geen klinking veroorsaak nie.

### 5.5.1 Die uitwerking van die boogweerstand

In figuur 5.6 word die uitwerking van die boogweerstand gedemonstreer vir 30 en 45 grade karakteristieke (Freeman, 1984: 274).



Figuur 5.6 - Boogweerstand word voorgestel deur FA

Uit die figuur is dit duidelik dat vir 'n fout op die lyn by punt F en 'n boogweerstandswaarde van FA, sal die relê met die 45° lyn wel die fout sien. Indien die boogweerstandswaarde groter is, m.a.w. sê FB, dan sal die fout slegs gesien word deur die instelling van die 30° lyn (Instellingsverskil om dieselfde gebied van lyn OZ, te dek).

Die weerstandwaarde van die boogweerstand kan gegee word soos afgelei deur Warrington (1968: 198):

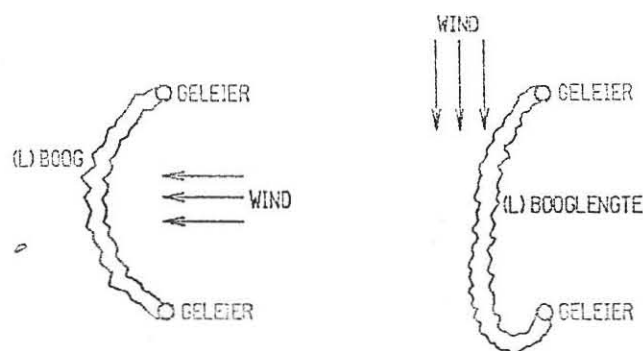
$$R_a = (28710 \times L) / (I^1,4) \text{ ohm} \quad 5.2$$

waar L = lengte van boog in meters

I = boogstroom in ampere

R<sub>a</sub> = boogweerstand in ohms

Die effek van boogweerstand tydens foute is dat daar 'n spanningsval bygevoeg moet word wat veroorsaak word deur die fout. Die gevolg is dat die relê korter op die lyn sal kyk, as waarvoor die relê ingestel is. Boogweerstande bestaan uit twee komponente nl. die weerstand van die boog en die weerstand van die grond. Die waarde van die booglengte (L) is afhanklik van die windsterkte. Sien figuur 5.7 (Warrington, 1968: 199):



Figuur 5.7 - Uitwerking van wind op die boogweerstand

Die vergelyking 5.2 kan verder gewysig word om voorsiening te maak vir die duur van die boog, die snelheid van die wind en die afkoeling effek van die wind op die boog. Om die bostaande faktore te akkommodeer kan die vergelyking gegee word as volg:

$$Ra = [28710 \times (S + 3ut)] / I^{1,4}$$

waar Ra = boogweerstand in ohms

S = geleierspasiëring in meters

u = windsnelheid in meter/sekonde

t = duur van boog in sekondes

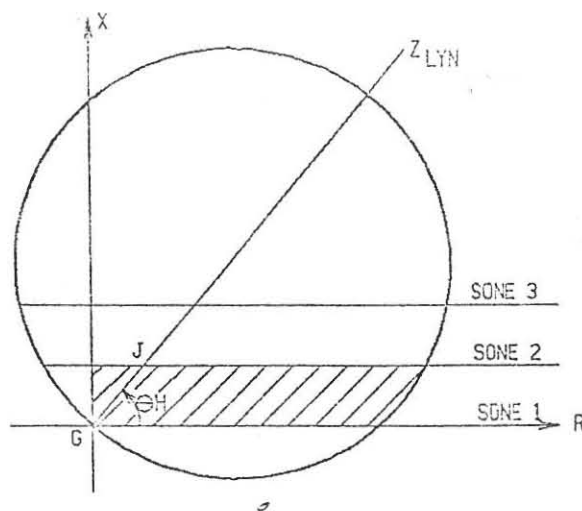
Vir meer inligting oor die vergelyking kan verwys word na Warrington (1968: 200).

Die boogweerstand het die grootste invloed op baie kort lyne waar die foutstroom minder as 2000A is. Op lang lyne waar daar metaaltorings gebruik word en aardgeleiers teenwoordig is, het die boogweerstand byna geen effek nie (GEC Measurements, 1987: 190). Indien houttorings gebruik word sonder aardgeleiers, sal die boogweerstand 'n groot invloed hê in die meet van die aardfout. Dit sal beteken dat die sone een bereik nou aansienlik nader is en dat die fout eers in sone twee tyd gesien sal word.

Om hierdie probleem vir aardfoute op te los, moet van reaktansie, vierhoekige of ten volle kruis-gepolariseerde karakteristieke relê's gebruik word soos bespreek gaan word. Na aanleiding van die eienskappe van 'n spesifieke lyn, kan die mees doeltreffende keuse van relê gemaak word.

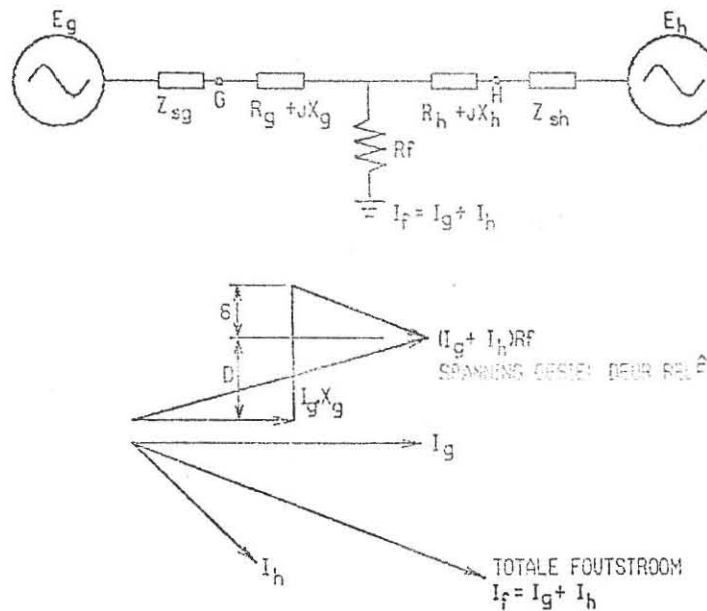
## 5.6 Die reaktansierelê (GEC Measurements, 1987: 191)

Hierdie tipe relê was so ontwerp dat die effek van boogweerstand, geen invloed op die akkuraatheid van die relê het nie. Dit word verkry deurdat die relê slegs die reaktiewe komponent meet. Sien figuur 5.8:



Figuur 5.8 - Karakteristiek van 'n reaktansierelê

Hierdie relê is dus meer geskik vir boogfoute, maar in die geval waar die boogweerstand so 'n groot waarde het dat dit in dieselfde orde as die las en foutstroom is, kan oor-of onderbereik steeds voorkom. Nog 'n rede vir oor- en onderbereik word in figuur 5.9 geïllustreer.



Figuur 5.9 - Uitwerking van twee invoere op 'n boogweerstandfout

In die netwerk wat getoon word sal die hoë-weerstandfout deur  $R_f$  voorgestel word. Twee generators voer dus in op dieselfde fout. Aanvaar dat die spanning  $E_g$  die spanning  $E_h$  voorloop. Tydens die fouttoestand sal die som van die twee foutstrome ( $I_g + I_h$ ) gegee word deur die vektor  $I_f$ . Die relê  $G$  en  $H$  sal die weerstandfout  $R_f$  as 'n komplekse impedansie sien aangesien die totale foutstroom  $I_f$ , nie in fase is met  $I_g$  of met  $I_h$  nie.

Uit die vektordiagram kan gesien word dat die reaktansiewaarde  $D$  minder is as die ware reaktansie van die lyn na die fout ( $X_g$ ), en dus sal die relê ( $G$ ) oorbereik. Netso sal die relê  $H$  wat 'n nalopende bronhoek het, weer onderbereik. Daar word weer in hoofstuk 6 na die verskynsel verwys.

### 5.7 Die eksentriese en lensagtige relê

Tydens foute wat naby die stamme ontstaan, word daar soms weens 'n tekort aan spanning, 'n foutiewe klink verkry. Daar is verskeie metodes om die probleem op te los waarvan die eksentriese en lensagtige relê's een metode is.

In die geval van die eksentriese relê, word die mho-sirkel so verskuif dat foute in die vorentoe en tru-rigting gesien kan word. Die drie hoofvoordele wat verkry kan word van die eksentriese mho-sirkel is (GEC Measurements, 1987: 192):

- (a) derde sone dien as reserwebeveiliging
- (b) dragolffasiliteit met dragolffblokking
- (c) drywingomkeerblokking

Vir die eksentriese relê, kan die relê moontlik vir 'n groot las verkeerd klink. 'n Beter relê vir so 'n geval, is dus die lensagtige tipe, waar die vorm van die sirkel ( $a/b$ ) verstel kan word om hom meer of minder lensagtig te kan maak. Hoe meer lensagtig, hoe minder is die kans dat die relê vir die las kan klink. Hierdie twee tipe relê's is dus buigbaar om by omstandighede aan te pas.

## 5.8 Kruisgepolariseerde relê en gesinchroniseerde gepolariseerde relê (GEC Measurements, 1987: 192)

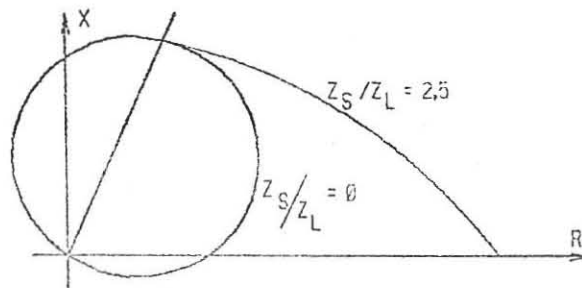
Soos in afdeling 5.7 verduidelik is, bied die eksentriese mho of die lensagtige karakteristieke relê's wel die eienskap om kortsluitfoute naby die stam te ontkoppel. Nog 'n relê met ander eienskappe is die kruis gepolariseerde relê.

Die beginsel waarop die relê werk is dat 'n persentasie spanning van die gesonde fase by die gepolariseerde spanning bygetel word tydens die fouttoestand. Dit verseker steeds 'n gerigte relê met sy mho- sirkel karakteristieke. Die relê bied egter steeds nie 'n oplossing vir driefasige kortsluitfoute naby die stam nie, aangesien al die fases se spanning na nul afgeklem is. Om die probleem op te los is daar toe van 'n geheue gebruik gemaak wat die spanning voor die fout memoriseer en wat dan vir die polarisasie gebruik was.

Kruisgepolariseerde- en gesinchroniseerde gepolariseerde relê's is ideaal waar naby foute voorkom en die spannings byna of heeltemal nul volt op al die fases is. Hier word gedink aan 'n gebied wat gereeld geteister word deur swaar weer. Hierdie relê's bied dus vinnige klinking vir foute aan die lynkant, maar is stabiel vir foute in die tru-rigting.

## 5.9 Ten volle kruisgepolariseerde relê

Beskou figuur 5.10



Figuur 5.10 - Verlenging van die R-as tydens aardfoute

Die ten volle kruisgepolariseerde relê se ohmiese sirkel kan oopmaak tydens ongebalanseerde foute en sy weerstanddekking verhoog. Sien figuur 5.10.

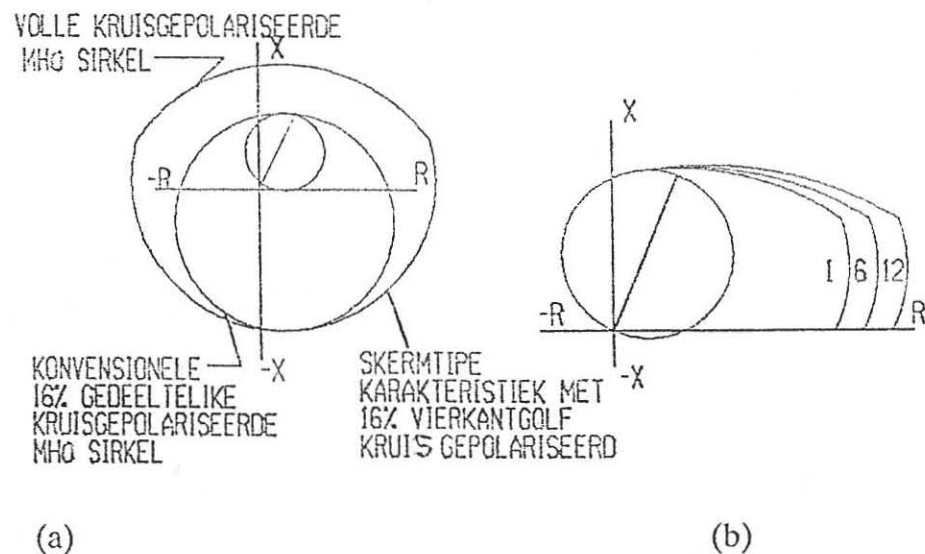
Die relê werk op die beginsel van 'n fasevergelyker en uit die berekenings kan gesien word dat die relê nie vir induktiewe foute in die tru-rigting sal klink nie. Daar bestaan wel 'n moontlikheid dat die relê vir kapasitiewe foute binne die sirkel in die tru-rigting sal klink. Vir meer inligting aangaande die berekenings kan verwys word na GEC Measurements (1987: 194).

## 5.10 Gedeeltelike kruisgepolariseerde relê

Die volle kruisgepolariseerde relê het 'n faseleksie probleem. Die relê is geneig om gesonde fases te klink vir swaar foute op een van die ander fases. Hierdie relê is dus nie geskik vir enkelpoolklinking nie en daarom is die gedeeltelike kruisgepolariseerde relê ontwikkel.

Gedeeltelike kruisgepolariseerde mho relê is 'n kombinasie van die volle kruisgepolariseerde en die selfgepolariseerde mho relê. Die gepolariseerde insetsein van die gedeeltelike kruisgepolariseerde mho vergelyker, bestaan uit 'n mengsel van die vergelyker se eie spanning vir die spesifieke fase, plus 'n gedeelte van die kruisgepolariseerde spanning (GEC Measurements, 1987: 195):

Sien figuur 5.11



Figuur 5.11 - Kombinasie van kruisgepolariseerde en selfgepolariseerde mho relê.

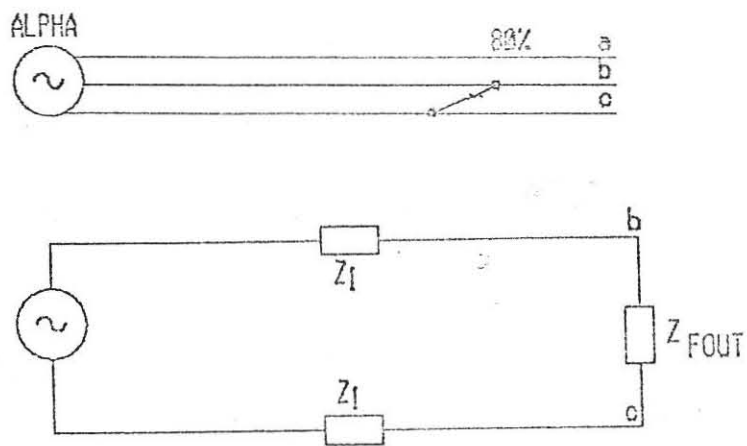
'n Verbeterde gedeeltelike mho karakteristiek kan nou verkry word deur die kruisgepolariseerde spanning eers na 'n vierkantgolf te verander, voordat 'n persentasie daarvan gemeng word met die sinusvormige selfgepolariseerde spanning. Dit beteken dat die karakteristiek van die X/R diagram so sal verander dat die weerstandwaarde verleng word in die eerste en tweede kwadrante.

### **5.11 MEET VAN FASE- EN AARDFOUTE**

Om die beginsel van die meeteenhede goed te verstaan, sal eers na die basiese teorie van simmetriese komponente verwys moet word (Roepel, 1985: 49 ; Freeman, 1984: 289 - 291):

### 5.11.1 Fase- tot- fasefout

Beskou die volgende netwerk vir die ontleding van 'n tipiese fase- tot- fasefout.



Figuur 5.12 - 'n Tipiese fase- tot- fasefout

Uit figuur 5.12:  $I_b = -I_c$  en  $I_a = 0$

$$\begin{aligned}
 V_b &= V_{b_1} + V_{b_2} + V_{b_0} \\
 &= I_{b_1}Z_1 + I_{b_2}Z_2 + V_{bfout} \\
 &= (I_{b_1} + I_{b_2})Z_1 + V_{bfout} \\
 &= I_bZ_1 + V_{bfout}
 \end{aligned}$$

Net so is:

$$V_c = I_c Z_1 + V_{cfout}$$

Neem aan  $Z_{fout} = 0$ , dan is  $V_{bfout} = V_{cfout}$ ,

$$\text{d.w.s } V_b - V_c = I_b Z_1 - I_c Z_1$$

$$V_{bc} = (I_b - I_c) Z_1$$

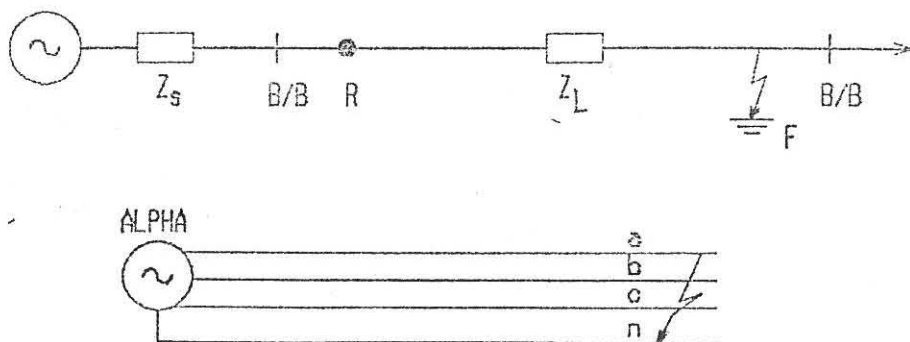
$$Z\text{-waarde gemeet} = V_{bc} / (I_b - I_c)$$

5.3

Indien die fout 'n sekere  $Z$ -waarde het, kan die waarde verdeel word tussen  $Z_{b1}$  en  $Z_{c1}$  fase.

### 5.11.2 Fase- tot- aardfoute

Beskou die volgende stelsel om die fase- tot- aardfout te ontleed:



Figuur 5.13 - Aardfout op die A - fase

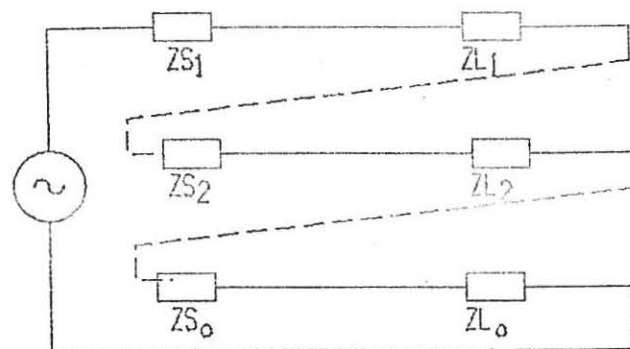
Spanning oor die relê:  $V_{ae}$

Stroom na die relê :  $I_a + KI_N$  residueel

waar  $K = (Z_{L0} - Z_{L1}) / (3Z_{L1})$  (Royle, 1988: 7)

5.4

Die volgorde netwerk kan as volg voorgestel word:



$$Z_{S1} = Z_{S2} ; Z_{L1} = Z_{L2} ; I_1 = I_2 = I_0$$

Figuur 5.14 - Ekwivalente kring vir fase- tot- aardfout

Spanning na relê tydens fout  $V_{ae}$ :

$$\begin{aligned} V_{ae} &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ &= I_{a1}Z_{L1} + I_{a2}Z_{L2} + I_{a0}Z_{L0} \\ &= 2I_{a1}Z_{L1} + I_{a0}Z_{L0} \end{aligned}$$

5.5

Stroom na relê:

$$\begin{aligned}
 &= I_a + KI_N \text{ residueel} \\
 &= (I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}) + K(3I_{a0}) \\
 &= 2I_{a1} + I_{a0} + 3KI_{a0} \\
 &= 2I_{a1} + I_{a0} (1 + 3K) \\
 &= 2I_{a1} + I_{a0} [1 + 3((Z_{L0} - Z_{L1}) / 3Z_{L1})]; \quad K = (Z_{L0} - Z_{L1}) / 3Z_{L1} \\
 &= 2I_{a1} + I_{a0} [1 + (3Z_{L0} - 3Z_{L1}) / 3Z_{L1}] \\
 &= 2I_{a1} + I_{a0} \times (Z_{L0} / Z_{L1}) \qquad \qquad \qquad 5.6
 \end{aligned}$$

Z-waarde gemeet:

$$\begin{aligned}
 &= V/I \\
 &= (2I_{a1}Z_{L1} + I_{a0}Z_{L0}) / (2I_{a1} + I_{a0} \times (Z_{L0} / Z_{L1})) \times [Z_{L1} / Z_{L1}] \\
 &= Z_{L1} \qquad \qquad \qquad 5.7
 \end{aligned}$$

## HOOFSTUK 6

### WISKUNDIGE ONDERSOEK NA DIE GEDRAG VAN IMPEDANSIERELÊS EN DIE PRAKTIESE SIMULASIES DAARVAN

#### 6.1 Inleiding

In hoofstuk twee, drie en vier, was lynparameters intensief beskou. Hoofstuk vyf het die basiese teorie van impedansierelê s met agtergrond kennis verskaf. Die vraag wat nou ontstaan is hoe word die twee faktore verbind en hoe kan die ingenieur in die kantoor maklik bepaal of die relê s wel unieke fouttoestande sal sien of nie?

In hierdie hoofstuk sal die gedrag van die impedansierelê s, met sekere lynparameters as voorbeeld, op verskillende netwerke toegepas word. Wiskundige afleidings sal gemaak word na aanleiding van spesifieke netwerke, om die gedrag van die relê te bepaal.

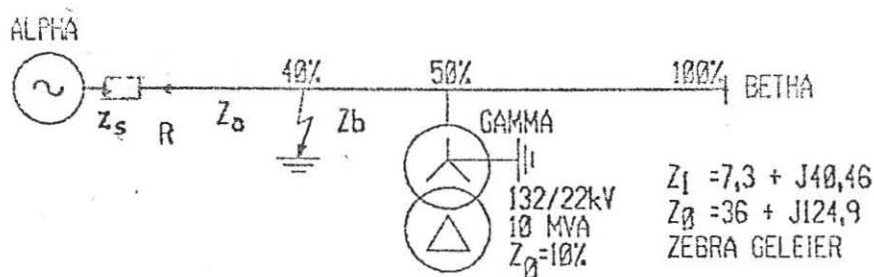
Daarna sal dieselfde netwerke met tipiese invoere, op die rekenaar voorgestel word. Fouttoestande sal gesimuleer word met spesifieke strome en spannings, soos wat in die praktyk verkry word. Die PSS/E program word gebruik. Die resultate is in die byvoegsels. Hierdie resultate sal dan met die wiskundige afleidings vergelyk word.

Vir alle berekeninge sal die geleier Zebra op 132 kV en toring 244 gebruik word. Die transformator sal 'n 132/22 kV, 10 MVA tipe wees, waarvan die positiewe- en nulvolgorde-impedansie as tien persent geneem sal word. In al die gevalle van aardfoute, moet die aardfoutdetektors 'n fout kan sien, voordat die relê sal klink.

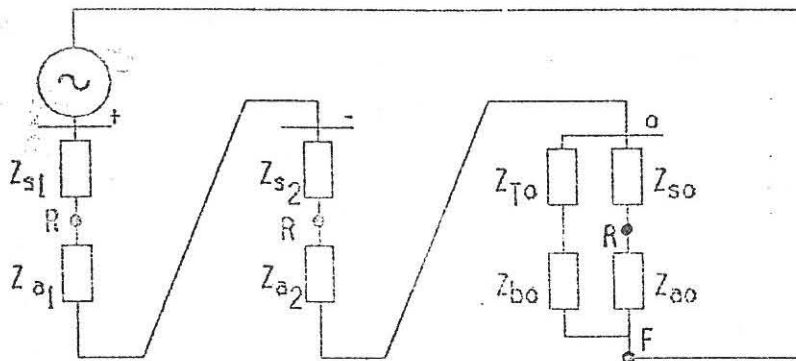
## 6.2 Aardfout voor 'n T-voerder

In die verlede was dit standaard praktyk om alle 88kV transformators wat 'n ster-delta verbinding gehad het, nie die sterpunt solied te aard nie. Vandag is dit die neiging om alle transformators wat geskik is vir soliede aarding, wel solied te aard.

Om die invloed van 'n aardfout op die A-fase van 'n netwerk te ondersoek, sien figuur 6.1. In die geval sal die fout voor die T-voerder gesimuleer word. Die vraag wat mag ontstaan is, sal die relê die fout in sone een sien, of sal die stroom so deur die transformator sirkuleer, dat die relê dalk die fout as 'n sone drie fout sien?



Figuur 6.1 (a) - 132 kV netwerk met aardfout op die A-fase



Figuur 6.1 (b) - Ekwivalente kring van netwerk in (a)

In figuur 6.1(b) is:

$Z_{s1}$  = Positiewevolgorde -bronimpedansie

$Z_{a1}$  = Positiewevolgorde impedansie van lynlengte a

$Z_{T0}$  = Nulvolgorde impedansie van transformator

By die fout is  $V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = V_a = 0$

Spanning wat die relê sien  $V_{ae}$ :

$$= I_{a1}Z_1 + I_{a2}Z_2 + I_{a0}Z_{a0} \quad (\text{uit vgl. 5.5})$$

Stroom wat die relê sien:

$$= I_a + KI_{res}$$

$$= 2I_{a1} + (I_{a0}Z_{a0} / Z_{a1}) \quad (\text{uit vgl. 5.6})$$

Impedansie gemeet Z:

$$= [2I_{a1}Z_{a1}^2 + (I_{a0}Z_{a0}Z_{a1})] / [(2I_{a1}Z_{a1}) + (I_{a0}Z_{a0})]$$

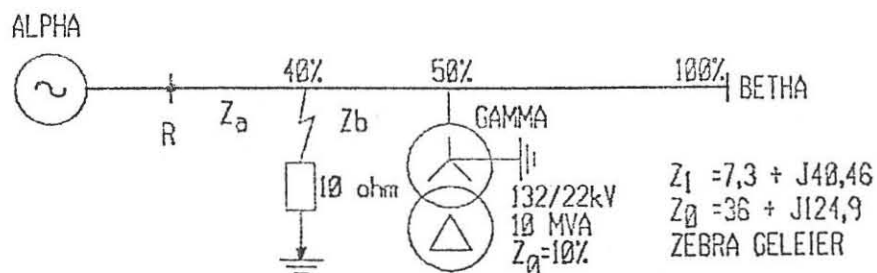
$$= Z_{a1} \quad (\text{uit vgl.5.7})$$

Volgens byvoegsel G1 en G2, kan daar gesien word dat die resultate ooreenstem. 'n Interessante opmerking volgens figuur 6.1 (b), is dat duidelik gesien kan word dat die effek van die transformator byna weglaatbaar is. Die rede hoekom so gesê kan word, is omdat die spanning en stroom wat die relê sien, presies oor dieselfde impedansie strek. Die enigste effek wat die transformator wel kan hê, is wanneer sy impedansie so laag is, dat die grootste persentasie foutstroom deur die transformator vloei, en nie deur die relê se aardfoutdetektors gesien kan word nie. Hierdie relê sal dus die fout binne sone een klinktyd sien.

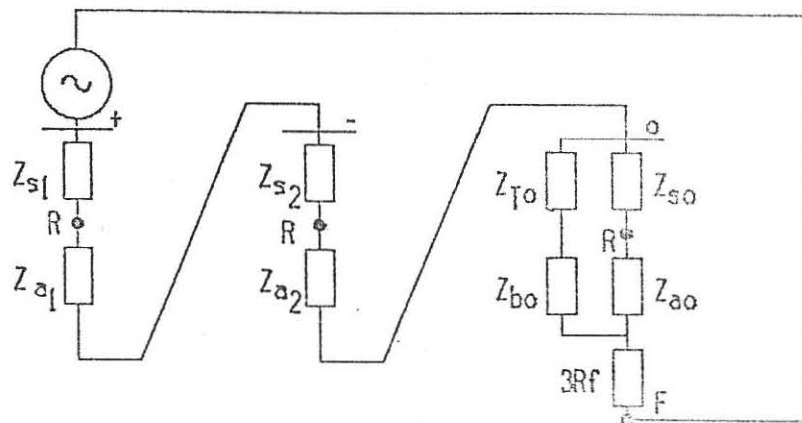
Die effek van boogweerstand verander die argument en is 'n spasiale geval soos gesien kan word in afdeling 6.3.

### 6.3 Aardfout met 'n boogweerstand voor die T-voerder

Beskou die lynnetwerk en die ekwivalente diagram in figuur 6.2.



Figuur 6.2 (a) Lynnetwerk van boogweerstandsfout op A-fase



Figuur 6.2 (b) - Ekwivalente kring van (a)

Volgens die ekwivalente kring kan die probleem wat nou ontstaan, redelik maklik waargeneem word. In afdeling 6.2, is die opmerking gemaak dat die relê se spanning- en stroomspoele dieselfde impedansiewaarde waarneem. In die geval is dit nie meer waar nie, aangesien die relê nie net die spanning oor  $Z_{a0}$  sien nie, maar ook die spanning oor die boogweerstand. Die probleem is dat die relê se stroomwaarde nie die gedeelte stroom wat vanaf die transformator gevoer word, in ag neem nie.

Om die persentasie fout waar te neem, kan die volgende wiskundige afleiding gemaak word.

Volgens figuur 6.2 (b):

$$\text{By die fout is } V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = V_a = 0$$

Spanning by relê Vae

$$\begin{aligned}
 &= I_{a_1} Z_{a_1} + I_{a_2} Z_{a_2} + I_{r_0} Z_{a_0} + I_{a_0} 3R_f \\
 &= 2I_{a_1} Z_{a_1} + I_{r_0} Z_{a_0} + I_{a_0} 3R_f \text{ -----6.1}
 \end{aligned}$$

stel X

$$\begin{aligned}
 &= (I_{r_0} / I_{a_0}) \\
 &= (Z_{T_0} + Z_{b_0}) / (Z_{T_0} + Z_{b_0} + Z_{s_0} + Z_{a_0}) \text{ -----6.2}
 \end{aligned}$$

stel vergelyking 6.2 in 6.1

$$V_{ae} = 2I_{a_1} Z_{a_1} + I_{r_0} Z_{a_0} + (I_{r_0} / X) 3R_f$$

Stroom wat relê sien

$$\begin{aligned}
 &= I_a + K I_{res} \\
 &= 2I_{a_1} + I_{r_0} + 3K (I_{r_0}) \\
 &= 2I_{a_1} + (1 + 3K) I_{r_0} \text{ -----6.3}
 \end{aligned}$$

$$\text{maar } K = 1/3 [(Z_{a_0} / Z_{a_1}) - 1] \text{ -----(uit vgl. 5.4)-----6.4}$$

Stel vergelyking 6.4 in 6.3

$$\begin{aligned}
 \text{Stroom} &= 2I_{a_1} + [1 + (Z_{a_0} / Z_{a_1}) - 1] I_{r_0} \\
 &= 2I_{a_1} + (Z_{a_0} / Z_{a_1} \times I_{r_0})
 \end{aligned}$$

Impedansie gesien deur relê

= (spanning / stroom)

$$= [2I_{a1}Z_{a1} + I_{r0}Z_{a0} + (I_{r0} / X) 3Rf] / [2I_{a1} + (Z_{a0} / Z_{a1}) I_{r0}] \text{---6.5}$$

Vermenigvuldig vergelyking 6.5 met  $(Z_{a1} / Z_{a1})$

Impedansie

$$= [Z_{a1} (2I_{a1}Z_{a1} + I_{r0}Z_{a0} + (I_{r0} / X) 3Rf)] / (2I_{a1}Z_{a1} + I_{r0}Z_{a0})$$

$$= Z_{a1} (1 + b) \text{-----6.6}$$

waar  $Z_{a1}b$

$$= [(I_{r0}3Rf) / X] / [2I_{a1} + (Z_{a0}I_{r0} / Z_{a1})]$$

$$= (I_{a0}3Rf) / [2I_{a1} + (Z_{a0}XI_{a0} / Z_{a1})]$$

$$= (Z_{a1}I_{a0}3Rf) / [(2I_{a1}Z_{a1}) + (Z_{a0}XI_{a0})] \quad (\text{uit vgl. 6.2})$$

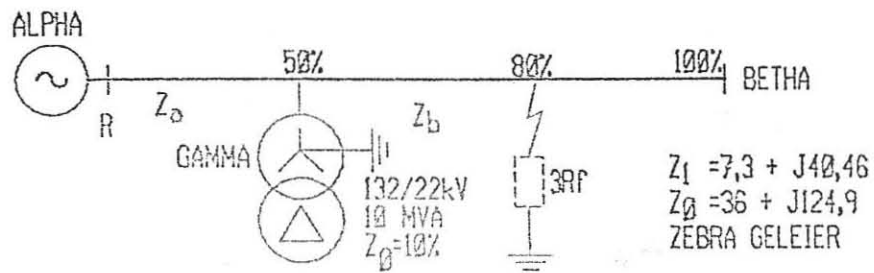
$$= Z_{a1}[3Rf / [(2Z_{a1}) + (XZ_{a0})]] \text{-----6.7}$$

Die formule is so afgelei, indien daar geen transformator op die voerder bestaan nie, kan die X-waarde as een geneem word en die effek van boogweerstand waargeneem word. Uit die formule is dit ook duidelik dat indien daar geen boogweerstand bestaan nie, die b-faktor weggelaat kan word, en die impedansie net  $Z_{a1}$  is.

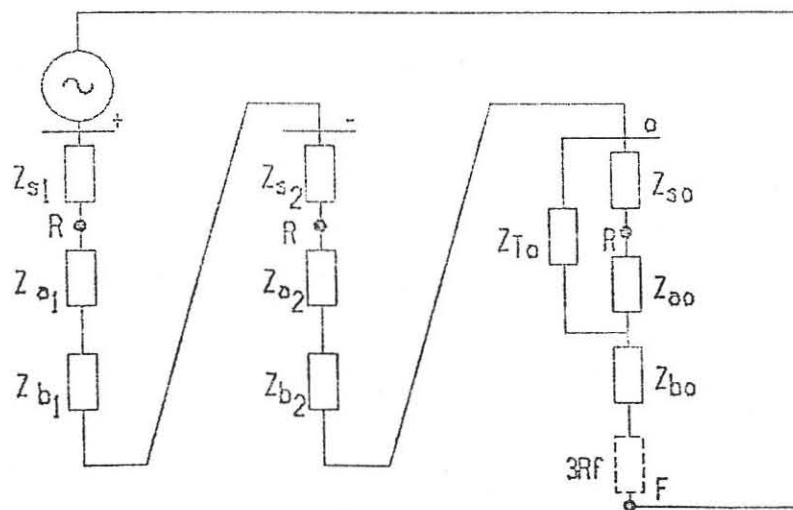
Byvoegsel H (1 & 2), toon die waardes wat die relê sal sien, vir 'n boogfout van 10 ohm op die A-fase. Hierdie fout verhoog slegs die ohm waarde vanaf 16,44 ohm na 19,15 ohm, maar dit is die hoek wat in hierdie geval kritiek is. Afhangende wat die sone een instelling is, sal nou duidelik gesien kan word of die fout wel in sone een- of eers in sone twee klinktyd ontkoppel sal word. Vir meer akkurate waardes i.v.m. die boogweerstand, kan weer verwys word na afdeling 5.5.1.

## 6.4 Aardfout met en sonder boogweerstand tussen T-voerder en ontvangstasie

Beskou figuur 6.3



Figuur 6.3 (a) - Lynnetwerk vir aardfout tussen T-voerder en ontvangstasie.



Figuur 6.3 (b) - Ekvivalente kring vir (b)

Uit figuur 6.3 (b) kan gesien word dat dieselfde probleem as wat in afdeling 6.3 voorgekom het, hier ook van toepassing is. Al verskil is dat die stroom wat deur die transformator gelewer word, in dieselfde rigting as die van die bron vloei. Weereens kan die relê nie die die regte stroom bepaal nie, en word 'n mate van onderbereik verkry.

Die effek van die boogweerstand word sommer in dieselfde afleiding geïnkorporeer. Indien daar geen transformator teenwoordig is nie, kan  $X$  weer as 1 aanvaar word, terwyl geen boogweerstand,  $R_f$  as 0 aanvaar moet word. Die afleiding maak voorsiening vir die keuse. Met figuur 6.3 as agtergrond, kan die vergelyking as volg afgelei word:

$$\text{By die fout is } V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0} = 0$$

Spanning by relê  $V_{ae}$

$$\begin{aligned} &= V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0} \\ &= 2I_{a_1}(Z_{a_1} + Z_{b_1}) + I_{r_0}Z_{a_0} + I_{a_0}(Z_{b_0} + 3R_f) \text{ -----6.8} \end{aligned}$$

Stroom wat relê sien

$$\begin{aligned} &= I_a + KI_{res} \\ &= 2I_{a_1} + I_{a_0}X + K3I_{a_0}X \text{ -----6.9} \end{aligned}$$

$$\text{stel } X = (I_{r_0} / I_{a_0})$$

$$= Z_{T_0} / (Z_{T_0} + Z_{s_0} + Z_{a_0}) \text{ -----6.10}$$

Z gemeet deur relê

$$\begin{aligned}
 &= [2Ia_1(Za_1 + Zb_1) + Ia_0XZa_0 + Ia_0 (Zb_0 + 3Rf)] / \\
 &\quad (2Ia_1 + Ia_0X + 3KIa_0X) \\
 &= [2Ia_1(Za_1 + Zb_1) + Ia_0XZa_0 + Ia_0 (Zb_0 + 3Rf)] / \\
 &\quad (2Ia_1 + XIa_0(Z_0 / Z_1)) \\
 &= [2(Za_1 + Zb_1) + XZa_0 + (Zb_0 + 3Rf)] / [2 + X(Za_0 + Zb_0) / \\
 &\quad (Za_1 + Zb_1)] \\
 &= (2Z_1 + XZa_0 + Zb_0 + 3Rf) / [2 + X (Z_0 / Z_1)] \\
 &= Z_1 [2Z_1 + XZa_0 + Zb_0 + 3Rf] / (2Z_1 + XZ_0) \\
 &= Z_1 [2Z_1 + X(Za_0 + Zb_0) + (1 - X) Zb_0 + 3Rf] / (2Z_1 + XZ_0) \\
 &= Z_1 [2Z_1 + XZ_0 + (1 - X) Zb_0 + 3Rf] / (2Z_1 + XZ_0) \\
 &= Z_1 [1 + ((1 - X) Zb_0 + 3Rf) / (2Z_1 + XZ_0)] \\
 &= Z_1 (1 + b) \text{ -----6.11}
 \end{aligned}$$

$$\text{waar } b = [(1 - X) Zb_0 + 3Rf] / (2Z_1 + XZ_0) \text{ -----6.12}$$

Volgens byvoegsel I(1 & 2), kan gesien word dat die waarde van sone een oorskry is, en dat die relê soos vir 'n sone twee fout sal klink. Dit is dus belangrik dat daar nie net moet aanvaar word dat die relê wel tagtig persent van die lyn sal sien nie, maar dat 'n volledige studie van die betrokke netwerk gedoen moet word. 'n Voorstel om die K instelling vir diè geval te bereken, sal in hoofstuk sewe gegee word.

Volgens byvoegsel I(3 & 4), kan die effek van die boogweerstand gesien word. Hierdie weerstand van 10 ohm, het nie 'n noemenswaardige effek op die grootte van die vektor nie, maar weereens het die hoek baie kleiner geraak, wat die fout definitief buite die bereik van sone een sou stel vir 'n gewone mho-sirkel. Die waardes van die rekenaar en die wiskundige afleiding is in dieselfde orde gevind.

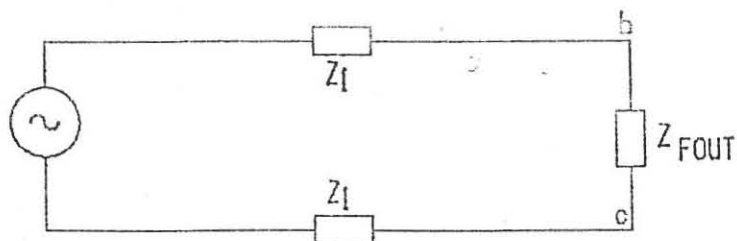
## 6.5 Fase- tot- fasefout

Hierdie afdeling handel slegs oor 'n fase- tot- fasefout, wat op tagtig persent van die lynwaarde gesimuleer is. In die geval van 'n boogweerstand kan die waarde van die boog verdeel word tussen die twee fases se impedansiewaardes. Vir boogweerstand moet 'n  $R_f/3$  faktor by die impedansiewaarde getel word. Vir die afdeling is slegs die fase- tot- fasefout afleiding, wiskundig gemaak.

Sien figuur 6.4



Figuur 6.4 (a) - Lynnetwerk vir fase- tot- fasefout



Figuur 6.4 (b) - Ekwivalente kring van B na C fasefout

Die wiskundige afleiding is reeds in afdeling 5.11.1 gedoen en die waarde wat die impedansierelê sien kan gegee word as:

$$Z_r = (V_{bc}) / (I_b - I_c) \quad (\text{uit vgl. 5.3})$$

Die resultate van die berekening kan gesien word in byvoegsel J(1 & 2).

## **6.6 Die invloed van twee invoere na dieselfde fout sonder 'n boogweerstand**

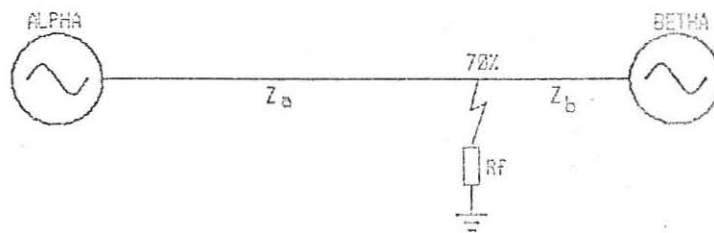
In hierdie afdeling word gekyk na die effek waar twee bronne invoer na dieselfde fout. Die verskynsel van onderberek a.g.v. verskil in fasehoeke is alreeds in afdeling 5.6 bespreek.

Vir diè geval blyk dit of die relê nie 'n probleem sal hê nie, omdat die ware spanning en stroom wel deur die relê gesien sal word. In die spesifieke geval wat as voorbeeld gebruik is, wil dit voorkom of die fasehoek nie 'n groot invloed op die resultate gemaak het nie, maar die probleem moet op 'n individuele basis beskou word.

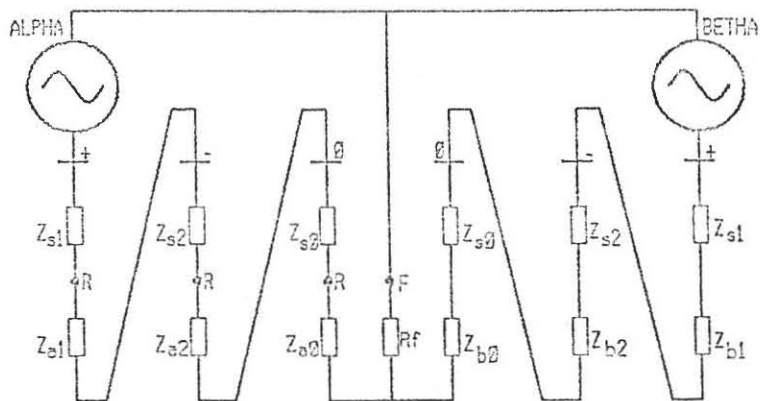
Wat wel in die probleem nie uitgesluit moet word nie, is die belangrikheid dat die relê genoeg stroom moet kan sien om te klink. Dit moet deur berekenings bepaal word of soos in die voorbeeld m.b.v. 'n rekenaar. 'n Voorbeeld van die probleem kan gesien word in byvoegsel K(1 & 2).

## 6.7 Twee invoere na dieselfde boogweerstandsfout

In die geval waar 'n boogweerstand ter sprake is, kom die tipiese probleem van afdeling 6.3 voor. Verder om die probleem nog meer ingewikkeld te maak, voer twee verskillende grote bronne in op die fout. Sien figuur 6.5.



Figuur 6.5 (a) - Lynnetwerk van twee invoere na 'n boogweerstandsfout



Figuur 6.5 (b) - Ekwivalente kring van (a)

Soos gesien kan word in figuur 6.5 (b), kom die probleem voor waar beide die strome deur die boogweerstand vloei. Die relê by Alpha sien dan die totale spanning, wat die boogspanning insluit. Om te bereken wat die relê sal sien kan ons die volgende afleiding maak:

$$\text{By die fout is } V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0} = 0$$

Spanning wat relê sien  $V_{ae}$ :

$$= 2I_{a_1}Z_{a_1} + I_{a_0}Z_{a_0} + (I_{a_0} + I_{b_0}) 3R_f$$

Stroom wat relê sien

$$= 2I_{a_1} + (Z_{a_0} / Z_{a_1} \times I_{a_0}) \quad (\text{uit vgl. 5.6})$$

Impedansie gesien deur relê  $Z_r$ :

$$\begin{aligned} &= [2I_{a_1}Z_{a_1} + I_{a_0}Z_{a_0} + (I_{a_0} + I_{b_0})3R_f] / [2I_{a_1} + (Z_{a_0} / Z_{a_1} \times I_{a_0})] \\ &= Z_{a_1}(1 + b) \text{ -----6.13} \end{aligned}$$

$$\text{waar } b = [(I_{a_0} + I_{b_0}) 3R_f] / [(2I_{a_1}Z_{a_1}) + (Z_{a_0}I_{a_0})] \text{ -----6.14}$$

Uit die resultate blyk dit dat die afleiding dieselfde waarde gee. Die enigste nadeel van die afleiding, is dat die werklike stroomwaardes benodig word om die berekening te kan doen. Die rede daarvoor is omdat die bronne verskil. Die resultate kan gesien word in byvoegsel L(1 & 2).

## HOOFSTUK 7

### GEVOLGTREKKINGS EN AANBEVELINGS

In hoofstukke twee, drie en vier is daar gekyk na die faktore wat die lynparameters beïnvloed. Hoofstuk vyf het die teorie van verskillende impedansierelêse verduidelik. In hoofstuk ses is die lynparameters toegepas op die impedansierelêse en wiskundige afleidings het daaruit gevolg. Praktiese simulاسies van tipiese lynparameters en toevoere het probleemassekte uitgewys, wat bevestig was deur die wiskundige afleidings. In hierdie hoofstuk sal van die belangrikste faktore wat korrekte toepassings van impedansierelêse beïnvloed, saamgevat word. Aanbevelings vir beter toepassings en ook 'n verdere studie sal gemaak word.

#### 7.1 Lynparameters

Na aanleiding van die ondersoek wil dit voorkom asof die waarde van lynparameters redelik dinamies is. Hiermee wil nie gesê word dat die waarde van lynparameters nie bepaal kan word nie, maar dat daar sekere faktore is wat bepalend, en ander wat weer eie aan verskillende gebiede is. Die standaard tabelle van lynparameters kan oor die algemeen aanvaar word, maar waar uitsonderlike faktore bekend is, moet die nuwe waardes bereken word. Hier kan byvoorbeeld gedink word aan 'n lyn wat oor 'n gebied loop waarvan die grondresistiwiteit baie hoog is (woestyn of klipperige berg).

Van die faktore wat 'n effek het op die parameters van 'n lyn kan as volg saamgevat word:

1. 'n Verhoging in frekwensie, beteken 'n verkleining in diepte penetrasie, wat weer 'n verlaging in interne induktansie beteken. P 8
2. Groter afstande tussen geleiers en kleiner geleierradiuse, verhoog die eksterne induktansiewaarde. P14
3. By die nulvolgorde-impedansie speel die grondresistiwiteit 'n groot rol. 'n Verhoging in resistiwiteit, verhoog beide die self- en wedersydse-impedansie. P18
4. 'n Aardgeleier verlaag die waarde van die nulvolgorde-impedansie. P20
5. Temperature beïnvloed die weerstandwaardes van geleiers. P24
6. Gestringde geleiers se weerstandwaardes is nie net die geleiers in parallel nie, maar word as 'n eenheid beskou en verwerk na die verlangde frekwensie. P25
7. Die belangrikste faktore wat die parameters van 'n lyn beïnvloed is die weerstand en die induktansie. P30
8. Kapasitansie speel 'n belangriker rol by versend- en ontvangspannings asook by spanningsregulering. P40
9. Hoe hoër die geleiers vanaf die grond is, hoe groter is die positiewevolgorde-kapasitansiewaarde en kleiner die nulvolgorde-kapasitansiewaarde. P35, 38
10. Aardgeleiers verhoog die nulvolgorde-kapasitansiewaarde van 'n lyn. P38

Deur bogenoemde faktore in ag te neem, sal prestasie van impedansierelêrs verbeter word.

## 7.2 Impedansierelê

In hoofstuk vyf is redelik bondig die verskillende tipe relê bespreek, met die praktiese toepasbaarheid daarvan. In die praktyk word gevind dat indien 'n sekere relê homself anders gedra as wat beplan was, daardie relê met hoë kostes vervang moet word om die stabiliteit van die toevoer te verseker.

In die ondersoek is sterk klem gelê op die toepassing van impedansierelê waar T-voeders gebruik word (byvoegsel I1). Hierdie toepassings kom redelik algemeen in die praktyk voor, en skep redelik baie probleme soos gesien kon word in hoofstuk ses.

Met die nuwe tegnologie van vandag is die tendens van die vervaardigers om 'n relê te bemark wat aan al die behoeftes van die kliënt voldoen. 'n Goeie voorbeeld van so 'n relê is die Optimho wat deur GEC vervaardig word. Hierdie relê is in staat om nege verskillende kurwes of karakteristieke weer te gee. Die relê is programmeerbaar, wat die wye verskeidenheid van instellings moontlik maak. Die tipe relê vergroot die buigbaarheid van toepassing, wat die kontinuïteit van die stelsel verbeter.

### 7.3 Berekeninge en toepassings

Met die hoofstukke oor lynparameters as agtergrond word dit aanbeveel dat wanneer instellings van 'n lynnetwerk gedoen word, die faktore wat die lynparameters beïnvloed in ag geneem word.

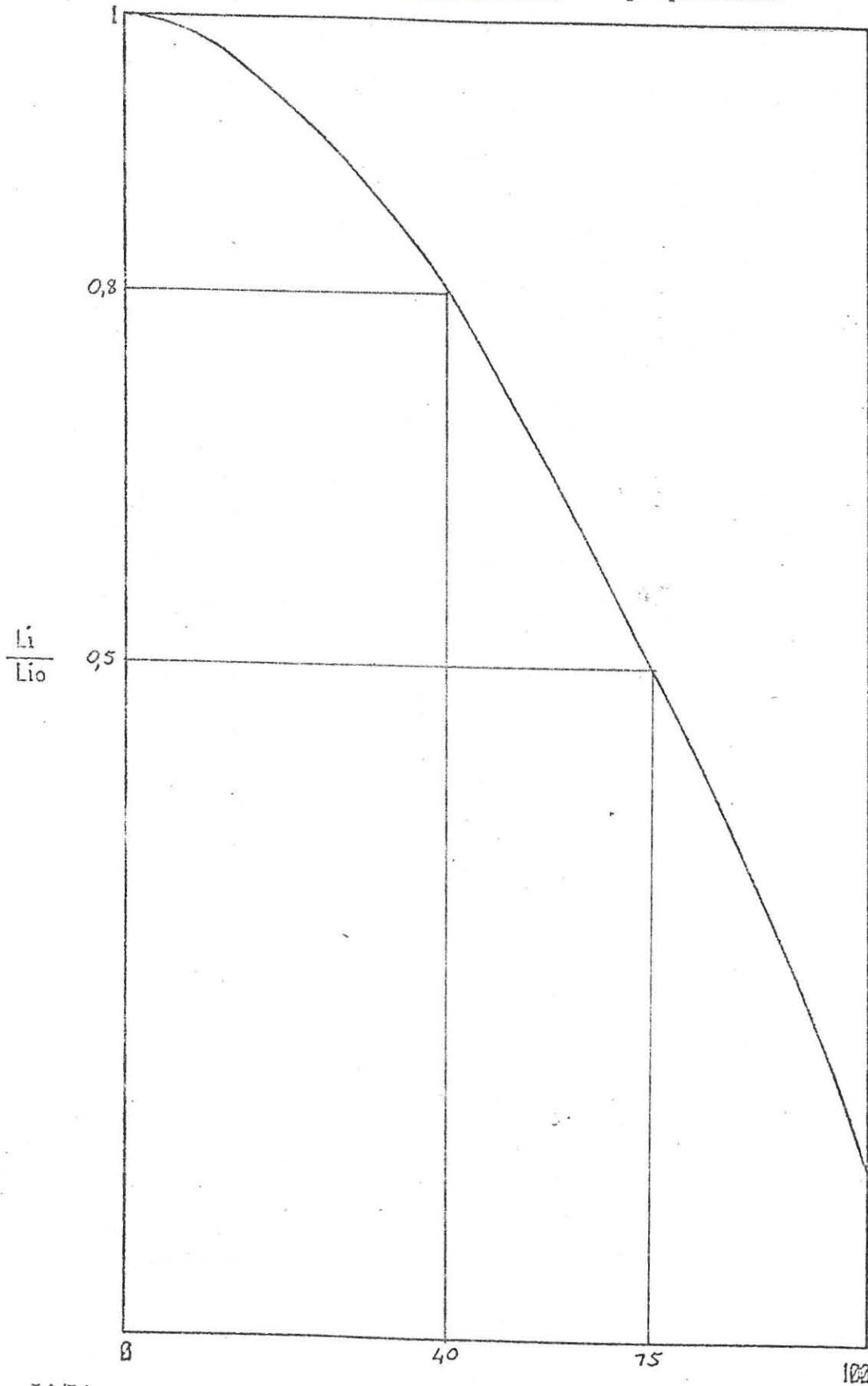
In hoofstuk ses is die verskillende toepassings van impedansierelê's ondersoek en die volgende waarnemings is gemaak:

1. Vir 'n aardfout tussen die bron en die T-voerder, sal die impedansierelê die werklike positiewevolgorde-impedansie meet. In diè geval het die transformator geen invloed op die impedansie wat die relê meet nie, alhoewel daar seker gemaak moet word dat die aardfoutdetektors steeds die fout sal sien. P68
2. Vir 'n boogweerstandsfout tussen die bron en die T-voerder word 'n mate van onderbereik verkry. In diè geval het die transformatorimpedansie wel 'n invloed. Afhangende wat die boogweerstandswaarde is, kan die nuwe waarde wat die relê sal sien bereken word. Vir die spesifieke geval kan die waarde van sone een en die werklike waarde wat die relê sien op 'n karakteristiek vergelyk word om die bereik van die relê vas te stel. P70

3. Waar gewone of boogweerstandsfoute tussen die T-voerder en die ontvangstasie voorkom, is die moontlikheid goed dat die relê sal onderbereik met die gewone K-faktor instelling.  
Waar veelvuldige aardpunte op 'n lyn met 'n gewone aardfout voorkom, kan die verstelling van die K-faktor so bereken word, dat die aardfout wel in die korrekte sone gesien sal word (sien byvoegsel M). P74
4. Vir die fase-tot-fasefout sien die relê die ware impedansie.  
In die geval van boogweerstandsfoute, sal daar weer onderbereik word. P77
5. Vir die geval waar twee bronne invoer na dieselfde fout, sal beide die relê's die ware impedansie sien, mits altwee die detektors geaktiveer is. P78
6. Waar twee invoere dieselfde boogweerstand voer, sal wel onderbereik word afhangende wat die verhouding van die stroomwaardes is. P79  
Daar kan dus vir gewone aardfoute gekompenseer word ongeag waar die fout is.

#### 7.4 Aanbevelings vir verdere navorsing

Met die ondersoek as agtergrond kan daar intensief na die moderne relê se toepassingsmoontlikhede gekyk word. Die effek op die impedansierelê as gevolg van spanningstuwings en harmonieke op transmissielyne, moet nog ondersoek word. Daar kan ook navorsing gedoen word om die moontlike toepassing van "Super conductors" op die impedansierelê waar te neem.



$L_i/L_{i0}$  = Verhouding van induktansie by oomblikse frekwensie tot lae frekwensie interne induktansie

$r/s$  = Die verhouding van geleierweerstand tot die diepte penetrasie

### Byvoegsel B - Geleierkonfigurasies

Tabel 2.1 - Die GMR van koper- en aluminiumgeleiers met staal kerns (Lackey, 1951: 263)

Aantal aluminium gestringdes	GMR
6	0,5 r
12	0,75 r
26	0,809 r
30	0,826 r
54	0,810 r

waar r = geleierradius

Tabel 2.2 - Geleierkonfigurasie met ooreenstemende F waarde (Information System Department, 1977 : 8)

Geleierkonfigurasie	Waarde van F
6/1	3
30/7	7
54/7	9

Tabel 2.3 - Berekening van K (Information System Department, 1977 : 8)

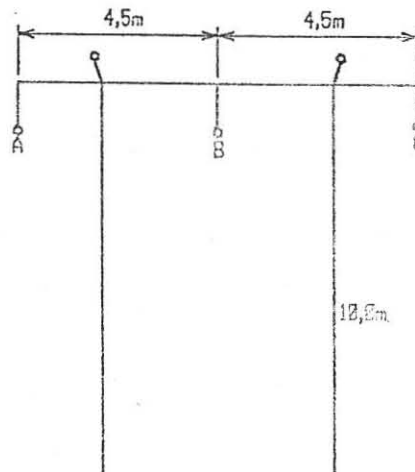
Geleierkonfigurasie	K
6/1	0,5453 + 0,00683 U
30/7	0,4011 + 0,00099 U
54/7	0,4350 + 0,00119 U

Waar U die waarde van die stroomdigtheid is in ampere/dm<sup>2</sup>. Vir die geleier Mink sal die waarde van U gelyk wees aan 152.

## BYVOEGSEL C - Berekening van lynparameters

### Voorbeeld 1

Beskou 'n 88kV toring soos in figuur C.1



Figuur C.1 - "Lattice Portal" toring

Gemiddelde geometriese afstand tussen geleiers:

$$\begin{aligned} \text{GMD} &= (d_{ab} \times d_{bc} \times d_{ca})^{1/3} \\ &= 5,6696 \text{ meter} \end{aligned}$$

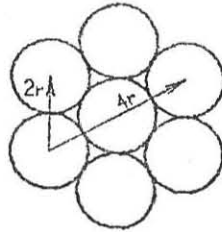
Gemiddelde geometriese radius per geleier:

$$\text{GMR vir solied} = 0,7788r$$

Vir 7 kern waarvan een staal en ses aluminium is:

$$\text{GMR} = 0,5 r \quad \text{Sien tabel 2.1 in byvoegsel B}$$

Neem as voorbeeld geleier "Mink" in figuur C.2:



Figuur C.2 - Deursnit van geleier "Mink"

$$\text{Totale geleieroppervlakte} = 63\text{mm}^2 + 10,51\text{mm}^2$$

$$\text{Geleierradius} = [73,51/\pi]^{1/2}$$

$$= 4,837\text{mm}$$

$$\text{GMR} = 0,5 \times 0,004837$$

$$= 0,002418\text{m}$$

Vir positiewevolgorde induktansie is volgens vgl. 2.10:

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln(\text{GMD}/\text{GMR}) \quad \text{H/m}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \ln(5,6696/0,002418)$$

$$= 1,5519 \times 10^{-6} \quad \text{H/m}$$

$$= 0,00155 \quad \text{H/km}$$

Positiewe induktiewe reaktansie

$$X_1 = 2\pi f L_1$$

$$= 2 \times \pi \times 50 \times 0,00155$$

$$= 0,4876 \Omega/\text{km}$$

By basis 100 MVA en spanning 88kV:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,4876 \times 100/88^2 \\ &= 0,00629 \text{ pe/km} \end{aligned}$$

$$Z_1 = R_c + jX_1$$

Vir Nulvolgorde inductansie

Bepaal De

$$\begin{aligned} De &= 1650 \times [\rho/(2\pi f)]^{1/2} && \text{Diepte van stroom onder} \\ De &= 1650 \times [100/(2\pi 50)]^{1/2} && \text{grondoppervlakte} \\ &= 930,9 \text{ meters} \end{aligned}$$

$GMR_x$  = Gemiddelde Geometriese radius tussen geleiers sonder 'n aardgeleier.

$$\begin{aligned} &= (GMR_c^3 \times d_{ab}^2 \times d_{bc}^2 \times d_{ca}^2)^{1/9} \\ &= (0,002418^3 \times 4,5^2 \times 4,5^2 \times 9^2)^{1/9} \\ &= 0,4267 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_o &= 6 \times 10^{-7} \times \ln (De/GMR_x) \\ &= 4,612 \times 10^{-3} \quad \text{H/km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_o &= 2\pi f L_o \\ &= 1,4489 \text{ } \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Basis 100 MVA} &= 1,4489 \times (100 / 88^2) \\ &= 0,019 \text{ pe/km} \end{aligned}$$

## Voorbeeld 2

Positiewevolgorde-impedansie (Information System Department,  
1977: 8)

Verwys na byvoegsel C figuur C.2 vir "Mink"-geleier

$$X_1 = 2\pi f l (K + 2 \ln (s/r)) \times 10^{-4}$$

$r$  = Nominale radius

$s$  = Spasiëring

$K$  = Interne Induktansie

$l$  = Afstand in kilometer

$$D = Fd = 2r \quad (6/1 F = 3)$$

$$2r = 3 \times 0,00368\text{m}$$

$$= 10,98\text{mm}$$

$$r = 0,549\text{cm}$$

$$= 0,00549\text{m}$$

$$s = 566,96\text{cm}$$

$$= 5,6696\text{m}$$

$$(6/1)K = 0,5453 + 0,00683 U$$

Enkele geleier dia = 0,366cm/2,54cm

$$U = 152$$

$$K = 0,5453 + (0,00683 \times 152)$$

$$= 1,583$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 2\pi 501 (1,583 + 2\ln (566,96/0,549)) \times 10^{-4} \\ &= 0,4857 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

By basis 100MVA en spanning van 88kV:

$$\begin{aligned} &= 0,4857 \times 100 / 88^2 \\ &= 0,00627 \text{ pe/km} \end{aligned}$$



H. H. K. EARTHING & LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS

Listed Member of the SABS 0157 (ii)  
Quality Management Systems : Tvl Area

BLOEMFONTEIN  
P.O. Box 2659  
Bloemfontein 9300  
Tel.: (051) 30-4807  
Fax : (051) 30-5017

CLIENT : DREWITT HUBBLE & POKORNY

SITE : VEGKOP MILITARY BASE - KROONSTAD

EQUIPMENT BEING EARTHED : PROPOSED MINI SUB

DATE : 11 OCTOBER 1989

Interval "a" (metres)	Depth "D" (metres)	Instrument Reading (ohms) "r"	Resistivity Coefficient "K"	Resistivity "P" (ohm Metres) col 3 x 4	Resistivity Coefficient "K1"	Calculated Resistant "R" col 3 x 6
1	2	3	4	5	6	7
2	1,5	2,72	12,58	34,22	7,49	20,37
4	3	1,09	25,16	27,42	8,44	9,20
6	4,5	0,98	37,75	37,00	8,98	9,80
8	6	0,68	50,20	34,63	9,36	6,50
10	7,5	0,67	62,90	42,14	9,65	6,46
12	9		75,40		9,89	
14	10,5		88,00		10,10	
16	12		100,60		10,30	
18	13,5		113,50		10,45	
20	15		125,66		10,57	
22	16,5		138,23		10,70	
24	18		150,80		10,80	
26	19,5		163,50		10,90	
28	21		176,00		11,00	
30	22,5		188,50		11,10	
32	24		201,00		11,20	
34	25,5		213,90		11,30	
36	27		226,00		11,35	
38	28,5		239,00		11,40	
40	30		251,80		11,50	
42	31,5		263,90		11,60	
44	33		276,80		11,65	
46	34,5		289,00		11,70	
48	36		301,40		11,75	
50	37,5		314,10		11,80	
52	39		326,60		11,84	
54	40,5		339,10		11,90	
56	42		351,70		12,00	

Proprietor: H.H. Kanwischer (German)



H. H. K. EARTHING & LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS

Listed Member of the SABS 0157 (ii)  
Quality Management Systems : Tvl Area

BLOEMFONTEIN  
P.O. Box 2659  
Bloemfontein 9300  
Tel.: (051) 30-4807  
Fax : (051) 30-5017

CLIENT : DREWITT HUBBLE & POKORNY

SITE : VEGKOP MILITARY BASE - KROONSTAD

EQUIPMENT BEING EARTHED : PROPOSED MINI SUB

DATE : 11 OCTOBER 1989

Interval "a" (metres)	Depth "D" (metres)	Instrument Reading (ohms) "r"	Resistivity Coefficient "K"	Resistivity "P" (ohm Metres) col 3 x 4	Resistivity Coefficient "K1"	Calculated Resistant "R" col 3 x 6
1	2	3	4	5	6	7
2	1,5	2,72	12,58	34,22	7,49	20,37
4	3	1,09	25,16	27,42	8,44	9,20
6	4,5	0,98	37,75	37,00	8,98	9,80
8	6	0,68	50,20	34,63	9,36	6,50
10	7,5	0,67	62,90	42,14	9,65	6,46
12	9		75,40		9,89	
14	10,5		88,00		10,10	
16	12		100,60		10,30	
18	13,5		113,50		10,45	
20	15		125,66		10,57	
22	16,5		138,23		10,70	
24	18		150,80		10,80	
26	19,5		163,50		10,90	
28	21		176,00		11,00	
30	22,5		188,50		11,10	
32	24		201,00		11,20	
34	25,5		213,90		11,30	
36	27		226,00		11,35	
38	28,5		239,00		11,40	
40	30		251,80		11,50	
42	31,5		263,90		11,60	
44	33		276,80		11,65	
46	34,5		289,00		11,70	
48	36		301,40		11,75	
50	37,5		314,10		11,80	
52	39		326,60		11,84	
54	40,5		339,10		11,90	
56	42		351,70		12,00	

Proprietor: H.H. Kanwischer (German)



H. H. K. EARTHING & LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS

Listed Member of the SABS 0157 (ii)  
Quality Management Systems : Tvl Area

BLOEMFONTEIN  
P.O. Box 2659  
Bloemfontein 9300  
Tel.: (051) 30-4807  
Fax : (051) 30-5017

CLIENT : DREWITT HUBBLE & POKORNY

SITE : VEGKOP MILITARY BASE - KROONSTAD

EQUIPMENT BEING EARTHED : PROPOSED MINI SUB

DATE : 11 OCTOBER 1989

Interval "a" (metres)	Depth "D" (metres)	Instrument Reading (ohms) "r"	Resistivity Coefficient "K"	Resistivity "P" (ohm Metres) col 3 x 4	Resistivity Coefficient "K1"	Calculated Resistant "R" col 3 x 6
1	2	3	4	5	6	7
2	1,5	2,72	12,58	34,22	7,49	20,37
4	3	1,09	25,16	27,42	8,44	9,20
6	4,5	0,98	37,75	37,00	8,98	9,80
8	6	0,68	50,20	34,63	9,36	6,50
10	7,5	0,67	62,90	42,14	9,65	6,46
12	9		75,40		9,89	
14	10,5		88,00		10,10	
16	12		100,60		10,30	
18	13,5		113,50		10,45	
20	15		125,66		10,57	
22	16,5		138,23		10,70	
24	18		150,80		10,80	
26	19,5		163,50		10,90	
28	21		176,00		11,00	
30	22,5		188,50		11,10	
32	24		201,00		11,20	
34	25,5		213,90		11,30	
36	27		226,00		11,35	
38	28,5		239,00		11,40	
40	30		251,80		11,50	
42	31,5		263,90		11,60	
44	33		276,80		11,65	
46	34,5		289,00		11,70	
48	36		301,40		11,75	
50	37,5		314,10		11,80	
52	39		326,60		11,84	
54	40,5		339,10		11,90	
56	42		351,70		12,00	

Proprietor: H.H. Kanwischer (German)



OLIFANTSFONTEIN - WIRE				HULETT ALUMINIUM PROFILES (Pty) LIMITED							
Sample No.	Alloy	Dia.(MM)	length (l)	Resistance (R)	Temp	Temp Correction (T)	Resistivity (microhm-cm) Res=(RA/L)xT	Conductivity c/o I.A.C.S 1,724/Res	Wrapping Test Good/Fair/Bad	Remarks	
MINK											
9002A33/04	1350 H 19	3,65	75 cm	2,005	20	1,00	0,002797	61,6			
9001C33/03	1350 H 19	3,65	75 cm	2,007	20,9	0,9064	0,00279	61,8			
8366A32/02	1350 H 19	3,65	75 cm	1,991	20	1,00	0,002778	62,1			
8366A32/06	1350 H 19	3,65	75 cm	1,999	20	1,00	0,002789	61,8			
9025A33/1	1350 H 19	3,64	75 cm	2,040	21,9	0,9924	0,002809	61,4			
9024C32/9	1350 H 19	3,64	75 cm	2,047	22,2	0,9912	0,002815	61,2			
9030B32/06	1350 H 19	3,66	75 cm	2,018	21,8	0,9928	0,00281	61,3			
9018C33/06	1350 H 19	3,65	75 cm	2,032	21,4	0,9944	0,002819	61,2			
HARE			75 cm								
9002A33/07	1350 H 19	4,72	75 cm	1,212	21,0	0,9960	0,002816	61,2			
9012B32/9	1350 H 19	4,72	75 cm	1,216	22,0	0,9920	0,002814	61,3			
9021B32/01	1350 H 19	4,71	75 cm	1,208	21,0	0,9960	0,002795	61,7			
9016A32/05	1350 H 19	4,72	75 cm	1,212	21,0	0,9960	0,002816	61,2			
9020A32/1	1350 H 19	4,72	75 cm	1,207	21,0	0,9960	0,002805	61,5			
9016B33/03	1350 H 19	4,71	75 cm	1,209	20,9	0,9964	0,002799	61,6			
9019C32/4	1350 H 19	4,72	75 cm	1,208	20,5	0,9980	0,002813	61,3			
9020B32/03	1350 H 19	4,71	75 cm	1,210	21,0	0,9960	0,0028	61,6			

## BYVOEGSEL F - Effek van geleierweerstand ten opsigte van stroomdravermoë

Beskou die geleier Mink:

Nominale diameter = 10,98 mm

Weerstand = 0,454  $\Omega$ /km

Volgens vergelyking 3.4:

$$I^2(75) = [0,2655 \times 1,098^{0,448} - 0,0212 \times 1,098] /$$
$$[0,454 \times 1,22165 \times 10^{-5}]$$

$$I^2(75) = 45720,406$$

$$\text{Dus } I(75) = 213,82 \text{ A}$$

By 75 grade Celsius kan die geleier dus 214 ampere dra.

Volgens vergelyking 3.5:

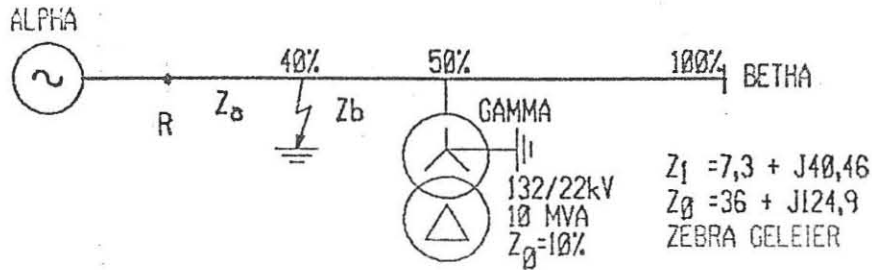
$$I^2(90) = [0,379 \times 1,098^{0,448} + 0,0273 \times 1,098] /$$
$$[0,454 \times 1,2821 \times 10^{-5}]$$

$$I^2(90) = 73046,875$$

$$\text{Dus } I(90) = 270 \text{ A}$$

By 90 grade Celsius kan die geleier dus 270 ampere dra.

## BYVOEGSEL G1 - Berekening van impedansie vir aardfout tussen bron en T-voerder



Figuur G.1 - Aardfout tussen bron en T-voerder

$Z_r$  = volgens formule  $Z_a$

$$= (2Z_{a_1} + Z_{a_0}) / 3(1 + K)$$

$$= Z_{a_1}$$

(reeds bewys in vgl. 5.7)

$$= 16,44 \quad \underline{79,77 \ \Omega}$$

## BYVOEGSEL G2 - Simulasie van aardfout tussen bron en T-voerder

$Z_r$  gemeet volgens PSS/E

$$= V_{ae} / (I_a + 3KI_0)$$

$$= (27410 \quad \underline{-23,58}) / [1095,9 \quad \underline{-101,4} +$$

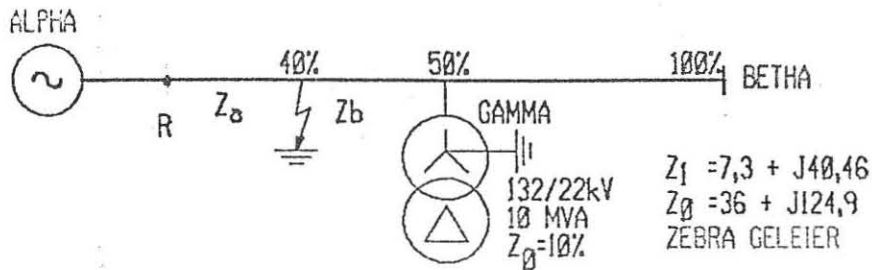
$$(3 \times 0,722 \quad \underline{-8,4} \times 266,3 \quad \underline{-89,4}] \quad (\text{K uit vgl. 5.4})$$

$$= 27410 \quad \underline{-23,58} / 1635,96 \quad \underline{-100,13}$$

$$= 16,75 \quad \underline{76,55 \ \Omega}$$

(Stroom- en spanningwaardes verkry vanaf PSS/E wat volg)

## BYVOEGSEL G1 - Berekening van impedansie vir aardfout tussen bron en T-voerder



Figuur G.1 - Aardfout tussen bron en T-voerder

$Z_r$  = volgens formule  $Z_a$

$$= (2Z_{a1} + Z_{a0}) / 3(1 + K)$$

$$= Z_{a1} \quad (\text{reeds bewys in vgl. 5.7})$$

$$= 16,44 \quad \underline{79,77 \ \Omega}$$

## BYVOEGSEL G2 - Simulasie van aardfout tussen bron en T-voerder

$Z_r$  gemeet volgens PSS/E

$$= V_{ae} / (I_a + 3KI_0)$$

$$= (27410 \quad \underline{-23,58}) / [1095,9 \quad \underline{-101,4} +$$

$$(3 \times 0,722 \quad \underline{-8,4} \times 266,3 \quad \underline{-89,4}] \quad (\text{K uit vgl. 5.4})$$

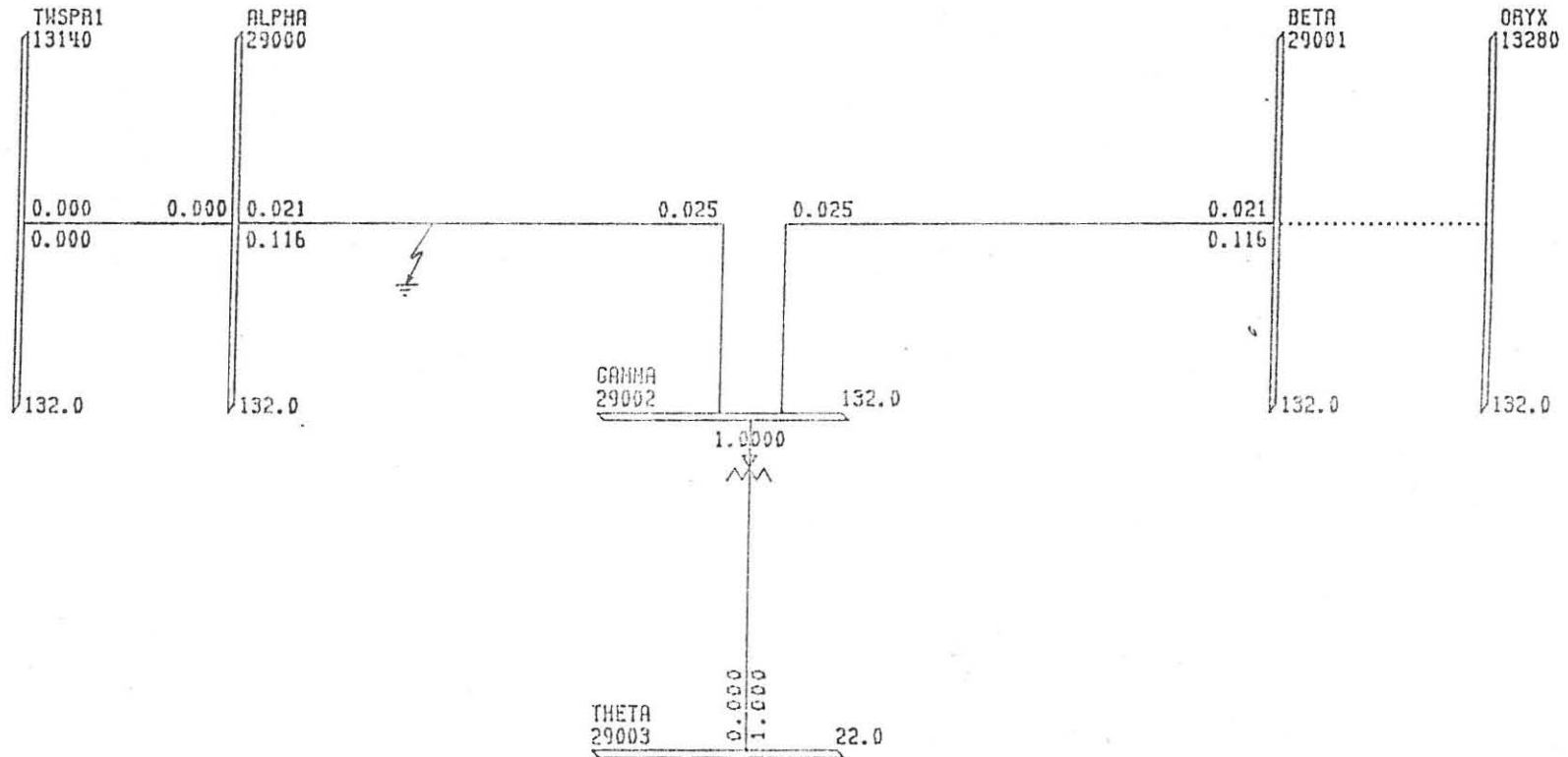
$$= 27410 \quad \underline{-23,58} / 1635,96 \quad \underline{-100,13}$$

$$= 16,75 \quad \underline{76,55 \ \Omega}$$

(Stroom- en spanningwaardes verkry vanaf PSS/E wat volg)



Central University of  
Technology, Free State



VERHANDELING DEUR R. KLEINHANS  
ESKOM OVS STREEK

FRI AUG 31, 1990 11:33



=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

IBALANCES APPLIED:

LINE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132] PHASE 1  
L-G Z = 0.0000 0.0000  
DUMMY BUS IS 80.0% FROM BUS 29000 [ALPHA 132] TO BUS 29002 [GAMMA 132]

SEQUENCE THEVENIN IMPEDANCES AT FAULTED BUSES:

BUS	NAME	BSKV	ZERO		POSITIVE		NEGATIVE	
99999	DUMMYBUS	132	0.05727	0.40003	0.11641	0.35088	0.11659	0.350

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E

=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

LINE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
PHASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
99999 (KV L-G)	29.443	159.41	56.166	-25.47	26.947	149.19
DUMMYBUS 132	0.000	0.00	88.621	-146.88	79.934	96.08

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
PHASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
FROM 29000 1	266.3	-98.36	406.4	-102.05	423.7	-102.69
ALPHA 132	1095.9	-101.40	149.3	64.63	153.4	76.24
FROM 29002 1	153.7	-109.51	12.1	-115.49	5.8	59.17
GAMMA 132	160.0	-109.55	149.3	-115.37	153.4	-103.76

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

99999	418.2	-102.44	418.2	-102.44	418.2	-102.44
DUMMYBUS 132	1254.5	-102.44	0.0	0.00	0.0	0.00

CONTRIBUTIONS EQUIVALENT POSITIVE SEQUENCE ADMITTANCE 0.2926 -1.2638

FAULT CURRENT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

99999	418.2	-102.44	418.2	-102.44	418.2	-102.44
DUMMYBUS 132	1254.5	-102.44	0.0	0.00	0.0	0.00

POSITIVE SEQUENCE EQUIVALENT FAULT ADMITTANCE 0.2926 -1.2638

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
PHASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
29000 (KV L-G)	15.742	162.88	62.841	-25.13	20.069	146.45
PHASE 132	27.410	-23.58	85.069	-142.90	76.226	91.81
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
PHASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
FROM 13140 1	267.1	-98.39	402.0	-101.91	425.0	-102.75
ISPR1 132	1093.6	-101.38	146.8	62.54	152.3	78.21
FROM 99999 1	267.1	81.61	402.0	78.09	425.0	77.25
IMMYBUS 132	1093.6	78.62	146.8	-117.46	152.3	-101.79

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29000 [ALPHA 132]:

29000	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
PHASE 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
PHASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
29001 (KV L-G)	27.620	160.44	56.297	-25.50	27.009	149.16
ETA 132	1.963	-35.52	88.130	-145.71	78.831	94.99
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
PHASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
FROM 29002 1	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
AMMA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29001 [BETA 132]:

29001	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
ETA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00



SEQUENCE PHASE	/V0/ /VA/	AN(V0) AN(VA)	/V+/ /VB/	AN(V+) AN(VB)	/V-/ /VC/	AN(V-) AN(VC)
29002 (KV L-G) GAMMA 132	27.531 2.012	160.49 -35.63	56.215 87.988	-25.48 -145.67	26.970 78.680	149.18 94.98

SEQUENCE PHASE	/I0/ /IA/	AN(I0) AN(IA)	/I+/ /IB/	AN(I+) AN(IB)	/I-/ /IC/	AN(I-) AN(IC)
FROM 29001 1 ETA 132	2.9 1.4	70.46 -112.86	8.0 12.0	-115.49 128.48	3.9 10.9	59.17 -0.20
FROM 29003 1 THETA 22.0	158.0 158.0	-109.51 -109.51	0.0 158.0	0.00 -109.51	0.0 158.0	0.00 -109.51
FROM 99999 1 JIMMYBUS 132	155.1 159.4	70.49 70.46	8.0 152.0	64.51 66.66	3.9 154.8	-120.83 74.29

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29002 [GAMMA 132]:

29002 GAMMA 132	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00
--------------------	------------	--------------	------------	--------------	------------	--------------

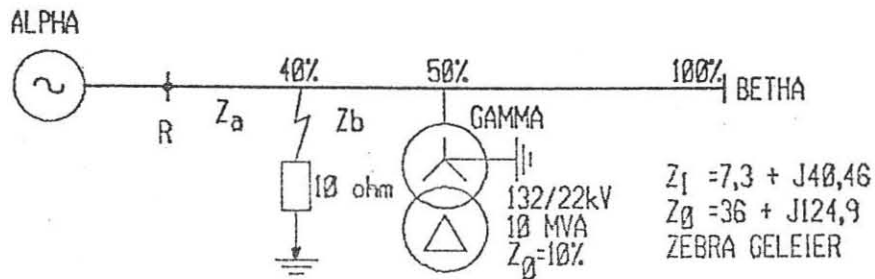
SEQUENCE PHASE	/V0/ /VA/	AN(V0) AN(VA)	/V+/ /VB/	AN(V+) AN(VB)	/V-/ /VC/	AN(V-) AN(VC)
29003 (KV L-G) THETA 22.0	0.000 4.912	0.00 -20.60	9.369 12.518	-25.48 -128.45	4.495 11.964	149.18 74.55

SEQUENCE PHASE	/I0/ /IA/	AN(I0) AN(IA)	/I+/ /IB/	AN(I+) AN(IB)	/I-/ /IC/	AN(I-) AN(IC)
FROM 29002 1 GAMMA 132	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29003 [THETA 22.0]:

29003 THETA 22.0	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00
---------------------	------------	--------------	------------	--------------	------------	--------------

## BYVOEGSEL H1 - Berekening van impedansie vir boogweerstandsfout tussen bron en T-voerder



Figuur H.1 - Boogweerstandsfout tussen bron en T - voerder

$Z_r$  Volgens formule =  $Z_{a1} (1 + b)$  (uit vgl. 6.6)

waar  $b = (3R_f) / (2Z_{a1} + XZ_{a0})$  (uit vgl. 6.7)

waar  $X = (Z_{T0} + Z_{b0}) / (Z_{T0} + Z_{b0} + Z_{s0} + Z_{a0})$

(Aanvaar  $Z_{s0} = 0$ )

$$\begin{aligned}
 Z_r &= 16,44 \sqrt{79,77} + [(16,44 \sqrt{79,77} \times 3 \times 10) / \\
 &\quad ((2 \times 16,44 \sqrt{79,77}) + (0,66 \sqrt{4,99} \times 52 \sqrt{74}))] \\
 &= 16,44 \sqrt{79,77} + 7,34 \sqrt{0} \\
 &= 19,16 \sqrt{57,62} \Omega
 \end{aligned}$$

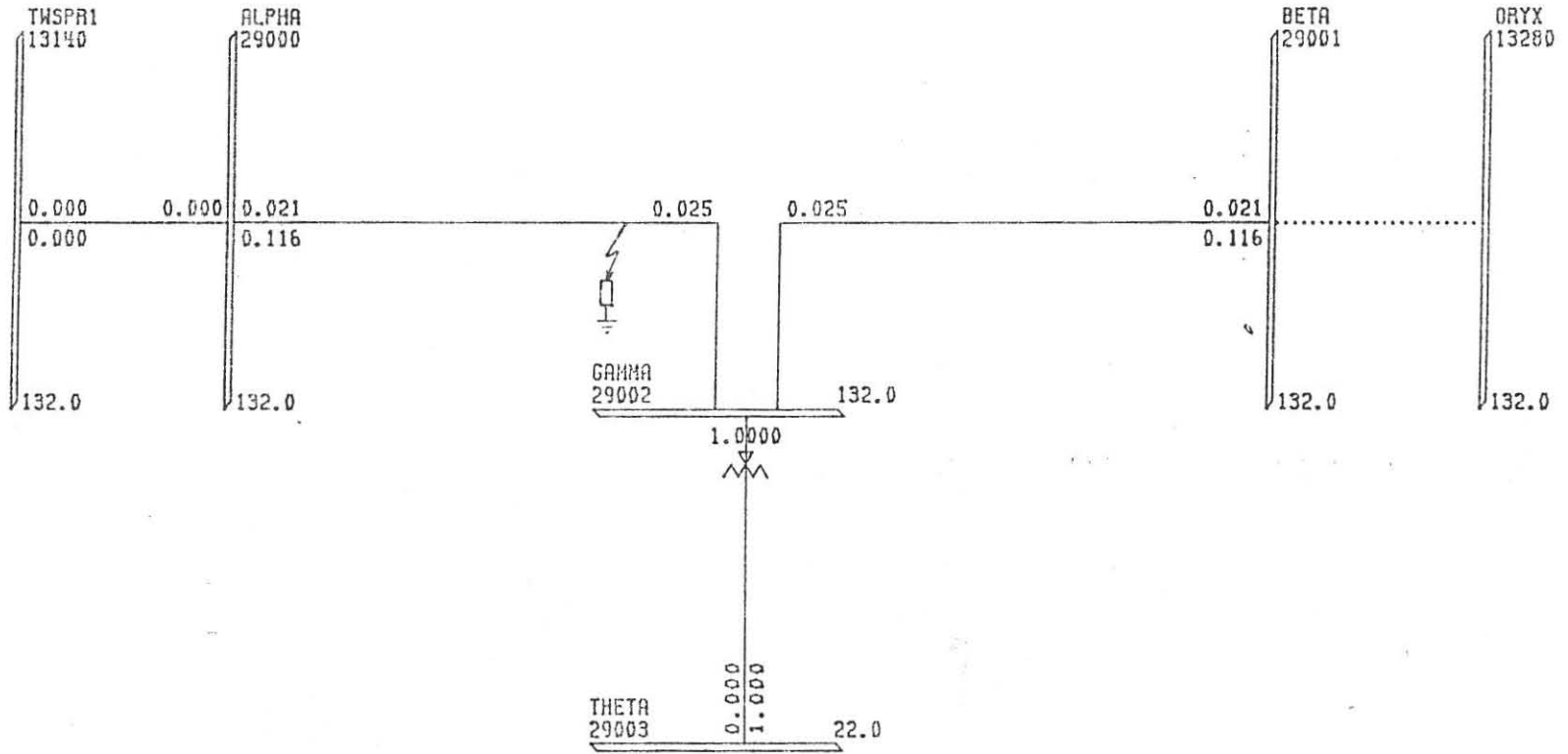
## BYVOEGSEL H2 - Simulasie van boogweerstandsfout tussen bron en T-voerder

Sien figuur H.1

Zr gemeet volgens PSS/E:

$$\begin{aligned}
 &= V_{ae} / (I_a + 3KI_0) \\
 &= 30758 \begin{matrix} \underline{-37,92} \\ \underline{253,9} \end{matrix} / [1045 \begin{matrix} \underline{-93,25} \\ \underline{-90,14} \end{matrix} + (3 \times 0,722 \begin{matrix} \underline{-8,4} \\ \underline{-8,4} \end{matrix} \times \\
 & \hspace{15em} (K \text{ uit vgl. 5.4}) \\
 &= 19,31 \begin{matrix} \underline{57,24} \\ \underline{57,24} \end{matrix} \Omega
 \end{aligned}$$

(Stroom- en spanningwaardes verkry vanaf PSS/E wat volg)



VERHANDELING DEUR R. KLEINHANS  
ESKOM OVS STREEK

FRI AUG 31, 1990 11:33



ALANCES APPLIED:

E TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132] PHASE 1  
 -G Z = 0.5740E-01 0.0000  
 JMMY BUS IS 80.0% FROM BUS 29000 [ALPHA 132] TO BUS 29002 [GAMMA 132]

SEQUENCE THEVENIN IMPEDANCES AT FAULTED BUSES:

JS	NAME	BSKV	ZERO		POSITIVE		NEGATIVE	
99	DUMMYBUS	132	0.05727	0.40003	0.11641	0.35088	0.11659	0.35095

E TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

SEQUENCE	/V0/ /VA/	AN(V0) AN(VA)	/V+/ /VB/	AN(V+) AN(VB)	/V-/ /VC/	AN(V-) AN(VC)
99 (KV L-G) MYBUS 132	28.075 11.964	167.42 -94.43	57.450 88.250	-29.17 -146.41	25.695 79.471	157.20 95.61
SEQUENCE	/I0/ /IA/	AN(I0) AN(IA)	/I+/ /IB/	AN(I+) AN(IB)	/I-/ /IC/	AN(I-) AN(IC)
M 29000 1 HA 132	253.9 1045.0	-90.36 -93.25	387.6 139.9	-93.67 72.95	404.0 148.5	-94.68 84.77
M 29002 1 MA 132	146.6 152.9	-101.50 -102.50	12.3 139.9	-119.18 -107.05	5.5 148.5	67.18 -95.23

OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

99	398.7	-94.43	398.7	-94.43	398.7	-94.43
MYBUS 132	1196.2	-94.43	0.0	0.00	0.0	0.00

TRIBUTIONS EQUIVALENT POSITIVE SEQUENCE ADMITTANCE 0.5061 -1.0983

LT CURRENT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

99	398.7	-94.43	398.7	-94.43	398.7	-94.43
MYBUS 132	1196.2	-94.43	0.0	0.00	0.0	0.00

ITIVE SEQUENCE EQUIVALENT FAULT ADMITTANCE 0.5061 -1.0983



=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
202 (KV L-G)	26.252	168.50	57.500	-29.18	25.717	157.19
GAMMA 132	12.851	-86.55	87.418	-145.32	78.505	94.43
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
29001 1	2.7	78.47	8.2	-119.19	3.7	67.18
GAMMA 132	2.3	-151.34	11.8	128.26	11.0	-0.72
29003 1	150.7	-101.50	0.0	0.00	0.0	0.00
THETA 22.0	150.7	-101.50	150.7	-101.50	150.7	-101.50
99999 1	147.9	78.50	8.2	60.83	3.7	-112.83
MYBUS 132	152.2	77.83	143.3	74.89	149.0	82.66

1 OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29002 [GAMMA 132]:

202	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
GAMMA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
203 (KV L-G)	0.000	0.00	9.583	-29.18	4.286	157.19
THETA 22.0	5.345	-34.28	11.964	-130.02	12.606	74.93
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
29002 1	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
MMA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

0 OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29003 [THETA 22.0]:

203	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
THETA 22.0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00



PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:00  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SOURCE	/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
SE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
00 (KV L-G)	15.010	170.89	63.620	-27.66	19.136	154.46
HA 132	30.758	-37.92	84.109	-142.90	76.790	91.23
SOURCE	/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
SE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
M 13140 1	254.7	-90.38	383.4	-93.39	405.3	-94.74
PR1 132	1042.9	-93.18	136.7	70.92	148.2	86.87
M 99999 1	254.7	89.62	383.4	86.61	405.3	85.26
MYBUS 132	1042.9	86.82	136.7	-109.08	148.2	-93.13

OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29000 [ALPHA 132]:

00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
HA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

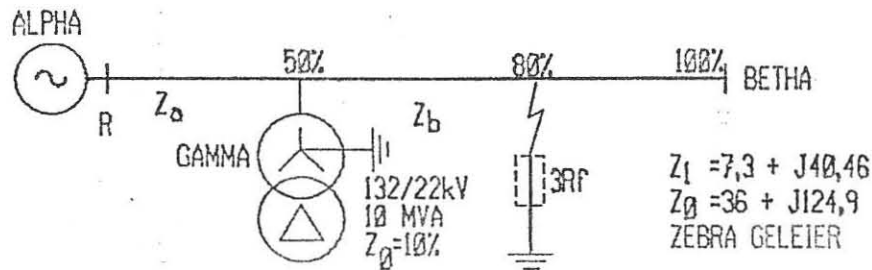
PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:00  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SOURCE	/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
SE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
001 (KV L-G)	26.336	168.45	57.583	-29.19	25.755	157.17
TA 132	12.840	-86.75	87.565	-145.36	78.649	94.44
SOURCE	/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
SE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
0M 29002 1	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
0MA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29001 [BETA 132]:

001	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
TA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

## BYVOEGSEL I1 - Berekening van impedansie vir aardfout tussen T-voerder en ontvangstasie



Figuur I.1 - Fout tussen T-voerder en ontvangstasie

$Z_r$  volgens formule soos afgelei:

$$Z_r = Z_1 (1 + b) \quad (\text{uit vgl 6.11})$$

$$\text{waar } b = [(1 - X) Z_{b0}] / (2Z_{a1} + XZ_{a0}) \quad (\text{uit vgl 6.12})$$

$$\text{waar } X = Z_{T0} / (Z_{T0} + Z_{s0} + Z_{a0}) \quad (\text{uit vgl. 6.10})$$

$$(\text{Aanvaar } Z_{s0} = 0)$$

$$\begin{aligned} Z_r &= 32,89 \left[ 79,76 + 32,89 \left[ 79,76 \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left[ \left( (1 - 0,73) \left[ 4,34 \right] \right) \times 39,02 \left[ 74 \right] / \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. \left( (2 \times 20,55 \left[ 79,77 \right] \right) + (0,73 \left[ 4,34 \right] \times 65 \left[ 74 \right] \right) \right] \right] \right] \\ &= 36,72 \left[ 77,98 \right] \Omega \end{aligned}$$

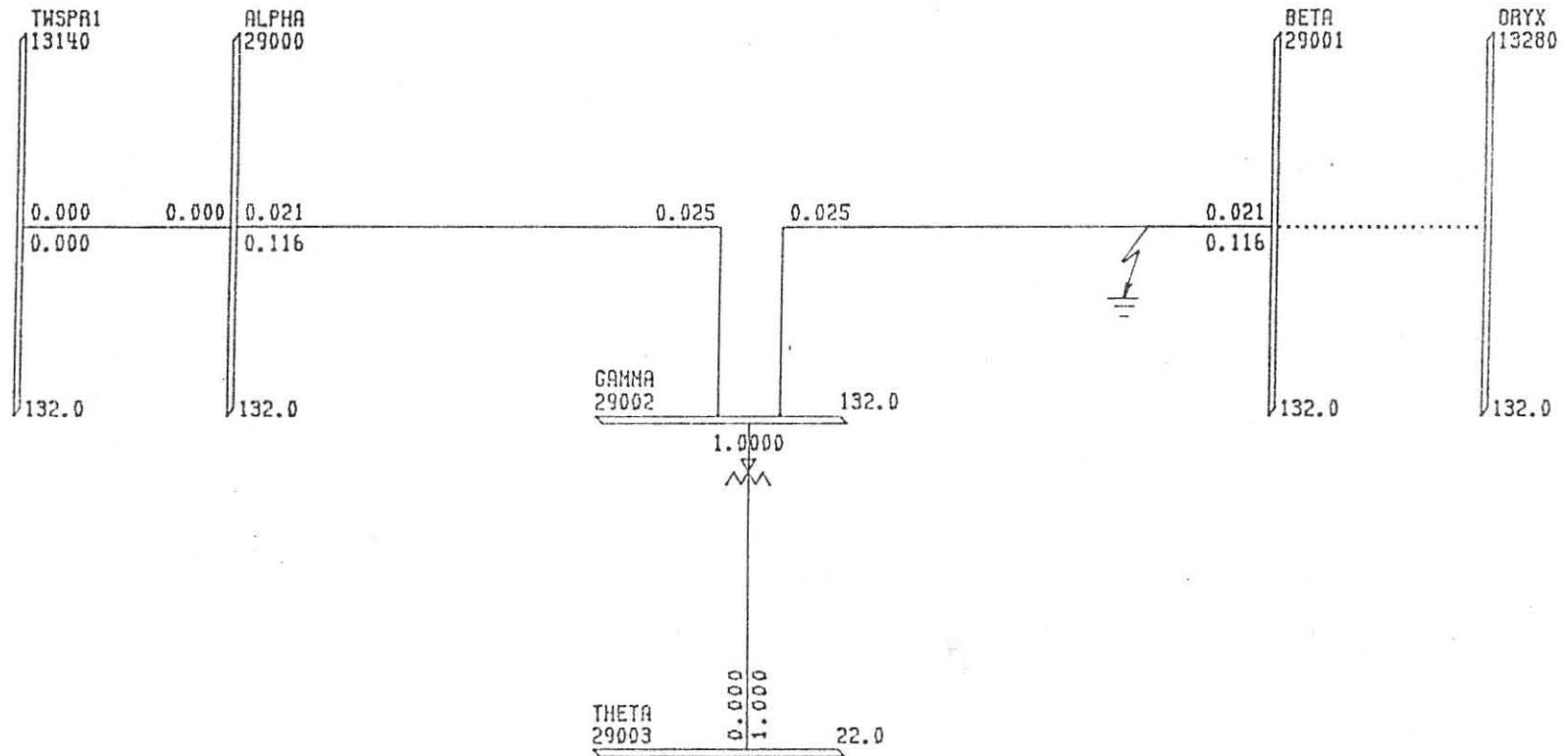
## BYVOEGSEL I2 - Simulasie van aardfout tussen T-voerder en ontvangstasie

Sien figuur I.1

Zr volgens PSS/E:

$$\begin{aligned}
 &= V_{ae} / (I_a + 3KI_0) \\
 &= 43267 \begin{array}{|c} -25,06 \\ \hline \end{array} / [781,3 \begin{array}{|c} -101,74 \\ \hline \end{array} + \\
 &\quad (3 \times 0,722 \begin{array}{|c} -8,4 \\ \hline \end{array} \times 180 \begin{array}{|c} -97,81 \\ \hline \end{array}) \\
 &= 43267 \begin{array}{|c} -25,06 \\ \hline \end{array} / 1170,39 \begin{array}{|c} -103,22 \\ \hline \end{array} \\
 &= 36,96 \begin{array}{|c} 78,16 \\ \hline \end{array} \Omega
 \end{aligned}$$

(Stroom- en spanningwaardes verkry vanaf PSS/E wat volg)



109



VERHANDELING DEUR R. KLEINHANS  
ESKOM OVS STREEK

FRI AUG 31, 1990 11:33



=====  
===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

BALANCES APPLIED:

NE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132] PHASE 1  
L-G Z = 0.0000 0.0000  
DUMMY BUS IS 40.0% FROM BUS 29001 [BETA 132] TO BUS 29002 [GAMMA 132]

SEQUENCE THEVENIN IMPEDANCES AT FAULTED BUSES:

BUS	NAME	BSKV	ZERO	POSITIVE		NEGATIVE	
999	DUMMYBUS	132	0.11790	0.63393	0.13385	0.44502	0.13403 0.445

=====  
===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

LINE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
PHASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
9999 (KV L-G)	34.110	156.45	58.618	-26.15	24.592	150.23
DUMMYBUS 132	0.000	0.00	90.989	-151.36	85.640	99.38

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
PHASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
FROM 29001 1	1.8	66.43	4.2	-116.16	1.8	60.22
ETA 132	0.7	-113.51	6.1	123.56	5.8	3.83
FROM 29002 1	305.4	-103.07	299.5	-102.83	305.3	-103.11
GAMMA 132	910.2	-103.00	6.1	-56.44	5.8	-176.17

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

9999	303.6	-103.01	303.6	-103.01	303.6	-103.01
DUMMYBUS 132	910.8	-103.01	0.0	0.00	0.0	0.00

CONTRIBUTIONS EQUIVALENT POSITIVE SEQUENCE ADMITTANCE 0.2052 -0.8788

FAULT CURRENT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

9999	303.6	-103.01	303.6	-103.01	303.6	-103.01
DUMMYBUS 132	910.8	-103.01	0.0	0.00	0.0	0.00

POSITIVE SEQUENCE EQUIVALENT FAULT ADMITTANCE 0.2052 -0.8788

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE		/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
BASE		/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
000 (KV L-G)		10.708	163.35	68.277	-25.68	14.597	145.86
PHA	132	43.267	-25.06	84.156	-143.56	77.551	91.68

SEQUENCE		/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
BASE		/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
OM 13140 1		181.7	-97.92	286.1	-102.21	309.1	-103.34
SPR1	132	776.4	-101.66	116.9	59.59	121.8	79.31
OM 29002 1		181.7	82.08	286.1	77.79	309.1	76.66
MMA	132	776.4	78.34	116.9	-120.41	121.8	-100.69

AMOUNT OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29000 [ALPHA 132]:

000		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
PHA	132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE		/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
BASE		/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
9001 (KV L-G)		34.154	156.43	58.652	-26.16	24.606	150.23
ETA	132	0.026	135.63	91.049	-151.38	85.710	99.38

SEQUENCE		/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
BASE		/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
ROM 99999 1		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
UMMYBUS 132		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

AMOUNT OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29001 [BETA 132]:

9001		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
ETA	132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00



=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/ /VB/	AN(V+)	/V-/ /VC/	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)		AN(VB)		AN(VC)
9002 (KV L-G)	22.363	159.47	62.307	-25.97	20.855	149.07
AMMA 132	19.271	-26.92	87.231	-146.71	80.443	95.06

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/ /IB/	AN(I+)	/I-/ /IC/	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)		AN(IB)		AN(IC)
ROM 29000 1	180.0	-97.81	295.2	-102.63	306.7	-103.19
_PHA 132	781.3	-101.74	121.9	64.77	124.4	74.30
ROM 29003 1	128.3	-110.53	0.0	0.00	0.0	0.00
HETA 22.0	128.3	-110.53	128.3	-110.53	128.3	-110.53
ROM 99999 1	306.5	76.90	295.2	77.37	306.7	76.81
JMMYBUS 132	908.4	77.02	12.1	125.10	11.4	2.44

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29002 [GAMMA 132]:

9002	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
AMMA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

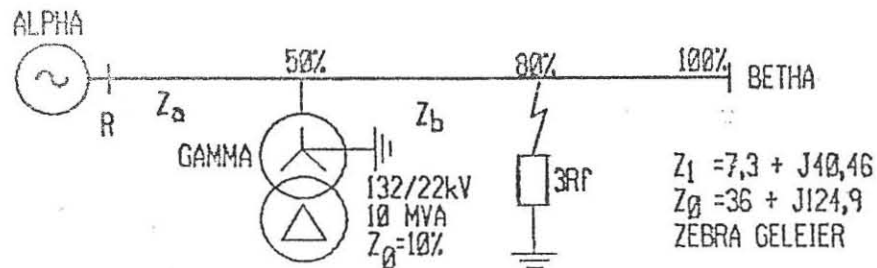
SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/ /VB/	AN(V+)	/V-/ /VC/	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)		AN(VB)		AN(VC)
9003 (KV L-G)	0.000	0.00	10.385	-25.97	3.476	149.07
HETA 22.0	6.928	-23.48	12.700	-133.01	12.267	79.16

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/ /IB/	AN(I+)	/I-/ /IC/	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)		AN(IB)		AN(IC)
ROM 29002 1	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
AMMA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29003 [THETA 22.0]:

9003	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
HETA 22.0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

### BYVOEGSEL I3.- Berekening van impedansie vir boogweerstandsfout tussen T-voerder en ontvangstasie



Figuur I.3 - Boogweerstandsfout tussen T - voerder en ontvangstasie

Zr volgens formule:

$$Z_r = Z_1(1 + b) \quad (\text{uit vgl. 6.11})$$

$$\text{waar } b = [(1 - X) Z_{b0} + 3R_f] / (2Z_{a1} + XZ_{a0}) \quad (\text{uit vgl. 6.12})$$

$$\text{waar } X = Z_{T0} / (Z_{T0} + Z_{s0} + Z_{a0}) \quad (\text{uit vgl. 6.10})$$

$$(\text{Aanvaar } Z_{s0} = 0)$$

$$\begin{aligned} z_r &= 32,89 \sqrt{79,76} + 32,89 \sqrt{79,76} \times \\ & \left[ \left( (1 \sqrt{0} - 0,73 \sqrt{4,34}) \times 39,02 \sqrt{74} + (3 \times 10) \right) / \right. \\ & \left. \left( (2 \times 20,55 \sqrt{79,77}) + (0,73 \sqrt{4,34} \times 65 \sqrt{74}) \right) \right] \\ &= 40,64 \sqrt{62,52} \Omega \end{aligned}$$

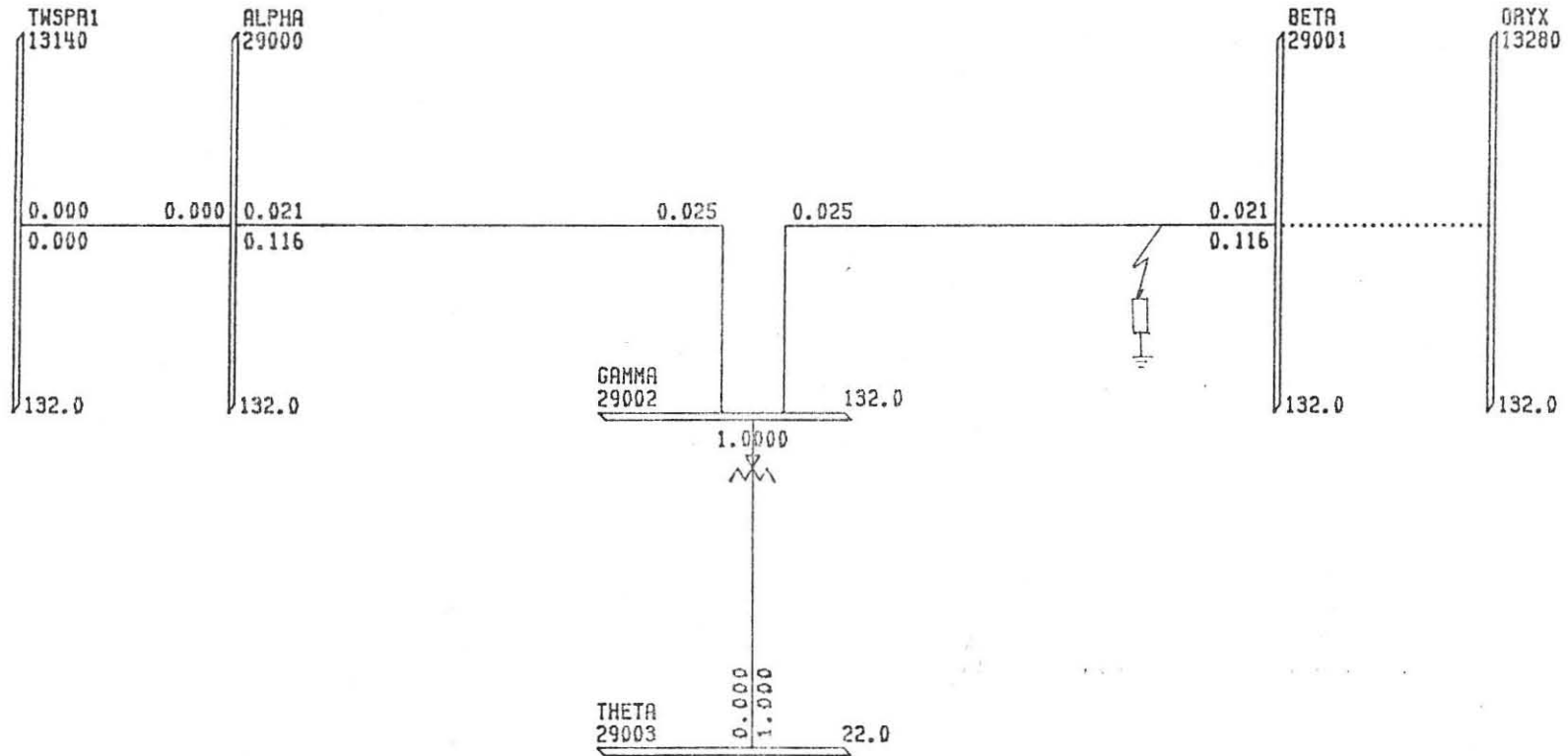
## BYVOEGSEL I4 - Simulasie van boogweerstandsfout tussen T-voerder en ontvangstasie

Sien figuur I.3

Zr volgens PSS/E:

$$\begin{aligned}
 &= V_{ae} / (I_a + 3KI_0) \\
 &= 44686 \left[ \begin{array}{c} -30,26 \\ \hline \end{array} \right] / \left[ \begin{array}{c} 752,1 \\ \hline \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} -95,56 \\ \hline \end{array} \right] + \\
 &\quad (3 \times 0,722 \left[ \begin{array}{c} -8,4 \\ \hline \end{array} \right] \times 176 \left[ \begin{array}{c} -92,01 \\ \hline \end{array} \right]) \\
 &= 44586 \left[ \begin{array}{c} -30,26 \\ \hline \end{array} \right] / 1132,41 \left[ \begin{array}{c} -97,19 \\ \hline \end{array} \right] \\
 &= 39,37 \left[ \begin{array}{c} 66,93 \\ \hline \end{array} \right] \Omega
 \end{aligned}$$

(Stroom- en spanningwaardes verkry vanaf PSS/E wat volg)



VERHANDELING DEUR R. KLEINHANS  
ESKOM OVS STREEK

FRI AUG 31, 1990 11:33



PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:  
===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

BALANCES APPLIED:

NE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132] PHASE 1  
--G Z = 0.5740E-01 0.0000  
DUMMY BUS IS 40.0% FROM BUS 29001 [BETA 132] TO BUS 29002 [GAMMA 132]

SEQUENCE THEVENIN IMPEDANCES AT FAULTED BUSES:

BUS	NAME	BSKV	ZERO	POSITIVE		NEGATIVE	
999	DUMMYBUS	132	0.11790	0.63393	0.13385	0.44503	0.13403 0.4451

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:  
===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

NE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
999 (KV L-G)	33.042	162.36	59.413	-28.56	23.822	156.14
DUMMYBUS 132	8.824	-97.11	91.301	-150.72	84.579	99.35

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
FROM 29001 1	1.7	72.34	4.3	-118.57	1.7	66.14
TA 132	1.0	-146.85	6.1	123.70	5.8	3.64
FROM 29002 1	295.8	-97.17	290.1	-96.80	295.7	-97.20
GAMMA 132	881.7	-97.06	6.1	-56.30	5.8	-176.36

IM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	294.1	-97.11	294.1	-97.11	294.1	-97.11
DUMMYBUS 132	882.3	-97.11	0.0	0.00	0.0	0.00

CONTRIBUTIONS EQUIVALENT POSITIVE SEQUENCE ADMITTANCE 0.3155 -0.8027

FAULT CURRENT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	294.1	-97.11	294.1	-97.11	294.1	-97.11
DUMMYBUS 132	882.3	-97.11	0.0	0.00	0.0	0.00

POSITIVE SEQUENCE EQUIVALENT FAULT ADMITTANCE 0.3155 -0.8027



=====  
===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/ /VB/	AN(V+)	/V-/ /VC/	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)		AN(VB)		AN(VC)
2002 (KV L-G)	21.663	165.38	62.923	-27.91	20.201	154.98
MMMA 132	22.480	-43.39	87.010	-146.45	80.211	94.79
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/ /IB/	AN(I+)	/I-/ /IC/	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)		AN(IB)		AN(IC)
OM 29000 1	174.4	-91.91	286.0	-96.48	297.1	-97.29
PHA 132	756.9	-95.74	116.9	70.86	121.5	80.53
OM 29003 1	124.3	-104.62	0.0	0.00	0.0	0.00
ETA 22.0	124.3	-104.62	124.3	-104.62	124.3	-104.62
OM 99999 1	296.9	82.80	286.0	83.53	297.1	82.71
MMYBUS 132	879.9	83.01	12.1	125.12	11.4	2.20

AMOUNT OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29002 [GAMMA 132]:

2002	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
MMMA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

=====  
===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/ /VB/	AN(V+)	/V-/ /VC/	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)		AN(VB)		AN(VC)
29003 (KV L-G)	0.000	0.00	10.487	-27.91	3.367	154.98
THETA 22.0	7.127	-29.28	12.389	-133.91	12.636	79.16
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/ /IB/	AN(I+)	/I-/ /IC/	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)		AN(IB)		AN(IC)
OM 29002 1	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
MMMA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

AMOUNT OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29003 [THETA 22.0]:

29003	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
THETA 22.0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00



## PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM

===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====

===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
3000 (KV L-G)	10.372	169.25	68.608	-26.94	14.139	151.77
PHASE 132	44.586	-30.26	83.581	-143.58	77.909	91.34
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
COM 13140 1	176.0	-92.01	277.2	-95.78	299.4	-97.44
SPR1 132	752.1	-95.56	110.8	65.78	120.2	85.77
COM 29002 1	176.0	87.99	277.2	84.22	299.4	82.56
1MA 132	752.1	84.44	110.8	-114.22	120.2	-94.23

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29000 [ALPHA 132]:

3000	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
PHASE 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

## PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E

===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====

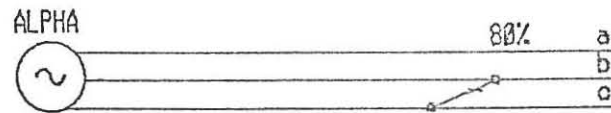
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+/	AN(V+)	/V-/	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
3001 (KV L-G)	33.084	162.34	59.447	-28.57	23.836	156.13
TA 132	8.816	-97.25	91.363	-150.74	84.647	99.35
SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+/	AN(I+)	/I-/	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
COM 99999 1	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
IMMYBUS 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

SUM OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29001 [BETA 132]:

3001	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
TA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

## BYVOEGSEL J1 - Berekening van impedansie vir fase- tot- fasefout



Figuur J.1 - B- na C-fase fout

Zr gemeet volgens formule

$$= V_{bc} / (I_b - I_c) \quad (\text{uit vgl. 5.3})$$

Spanning gemeet deur relê:

$$\begin{aligned} &= [V_{bf} + (I_{b1}Z_1 + I_{b2}Z_2)] - [V_{cf} + (I_{c1}Z_1 + I_{c2}Z_2)] \\ &= I_{b1}Z_1 + I_{b2}Z_2 - I_{c1}Z_1 - I_{c2}Z_2 \\ &= Z_1 (I_{b1} + I_{b2} - I_{c1} - I_{c2}) \\ &= Z_1 (I_b - I_c) \quad (I_{b1} + I_{b2} = I_b) \end{aligned}$$

Stroom gemeet deur relê:

$$= I_b - I_c$$

Impedansie gesien deur relê:

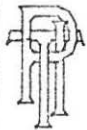
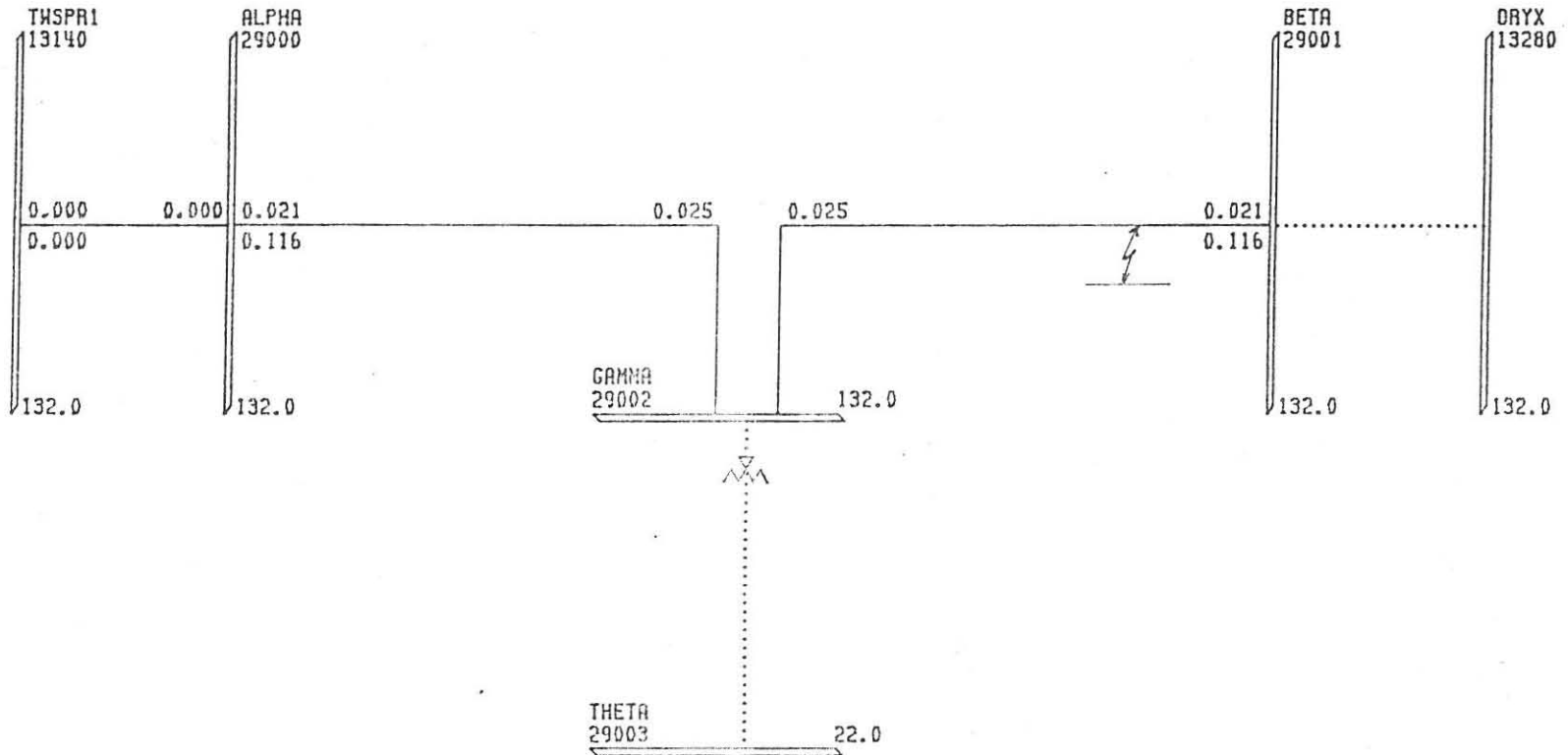
$$\begin{aligned} &= (Z_1 (I_b - I_c)) / (I_b - I_c) \\ &= Z_1 \\ &= 32,88 \quad \underline{79,76} \quad \Omega \end{aligned}$$

## BYVOEGSEL J2 - Simulasie van fase- tot- fasefout

Sien figuur J.1

Zr gemeet volgens PSS/E:

$$\begin{aligned}
 &= V_{bc} / (I_b - I_c) \\
 &= (47902 \begin{array}{|c} \hline -169,82 \\ \hline \end{array} - 53291 \begin{array}{|c} \hline 119,78 \\ \hline \end{array}) / \\
 &\quad (891 \begin{array}{|c} \hline 169,9 \\ \hline \end{array} - 887,6 \begin{array}{|c} \hline -10,84 \\ \hline \end{array}) \\
 &= 32,89 \begin{array}{|c} \hline 79,77 \\ \hline \end{array} \Omega
 \end{aligned}$$



VERHANDELING DEUR R. KLEINHANS  
ESKOM OVS STREEK

FRI AUG 31, 1990 11:33

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI JUL 20, 1990 16:0  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

ALANCES APPLIED:

E TO LINE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132] EXCLUDED PHASE 1  
 -L Z = 0.0000 0.0000 L-G Z = 0.1000E+09 0.1000E+09  
 DUMMY BUS IS 80.0% FROM BUS 29000 [ALPHA 132] TO BUS 29001 [BETA 132]

SEQUENCE THEVENIN IMPEDANCES AT FAULTED BUSES:

US	NAME	BSKV	ZERO		POSITIVE		NEGATIVE	
99	DUMMYBUS	132	0.22467	0.92031	0.13371	0.44484	0.13389	0.4449

===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

E TO LINE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
PHASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
999 (KV L-G)	0.000	0.00	41.567	-27.22	41.567	-27.22
DUMMYBUS 132	83.133	-27.22	41.567	152.73	41.567	152.73

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
PHASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
999 29000 1	0.0	0.00	507.7	-100.28	519.1	79.34
PHASE 132	11.9	62.77	891.0	169.90	887.6	-10.84
999 29001 1	0.0	0.00	6.0	-117.23	6.0	-117.23
PHASE 132	11.9	-117.23	6.0	62.77	6.0	62.77

4 OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	0.0	0.00	513.4	-100.47	513.4	79.53
DUMMYBUS 132	0.0	0.00	889.3	169.53	889.3	-10.47

CONTRIBUTIONS EQUIVALENT POSITIVE SEQUENCE ADMITTANCE 0.6202 -2.0608

DLT CURRENT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	0.0	0.00	513.4	-100.47	513.4	79.53
DUMMYBUS 132	0.0	0.00	889.3	169.53	889.3	-10.47

POSITIVE SEQUENCE EQUIVALENT FAULT ADMITTANCE 0.6202 -2.0609



===== OFS REGION - SYSTEM  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLU KEONE =====

SEQUENCE	/V0/ /VA/	AN(V0) AN(VA)	/V+/ /VB/	AN(V+) AN(VB)	/V-/ /VC/	AN(V-) AN(VC)
01 (KV L-G) A 132	0.000 83.230	0.00 -27.23	41.615 41.615	-27.23 152.77	41.615 41.615	-27.23 152.77
SEQUENCE	/I0/ /IA/	AN(I0) AN(IA)	/I+/ /IB/	AN(I+) AN(IB)	/I-/ /IC/	AN(I-) AN(IC)
M 99999 1 MYBUS 132	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00

OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29001 [BETA 132]:

01 A 132	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00
-------------	------------	--------------	------------	--------------	------------	--------------

===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

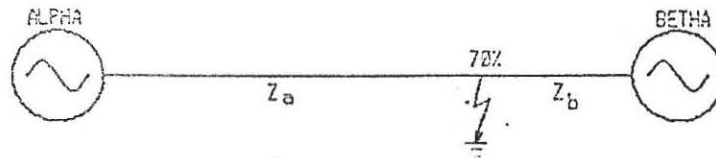
PTI INT

SEQUENCE	/V0/ /VA/	AN(V0) AN(VA)	/V+/ /VB/	AN(V+) AN(VB)	/V-/ /VC/	AN(V-) AN(VC)
000 (KV L-G) PHA 132	0.000 82.748	0.00 -27.17	58.184 47.902	-25.30 -169.82	24.669 53.291	-31.59 119.78
SEQUENCE	/I0/ /IA/	AN(I0) AN(IA)	/I+/ /IB/	AN(I+) AN(IB)	/I-/ /IC/	AN(I-) AN(IC)
M 13140 1 MPR1 132	0.0 23.7	0.00 62.80	499.7 888.6	-100.03 170.31	522.4 881.8	79.20 -11.16
M 99999 1 MYBUS 132	0.0 23.7	0.00 -117.20	499.7 888.6	79.97 -9.69	522.4 881.8	-100.80 168.84

OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29000 [ALPHA 132]:

00 HA 132	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00	0.0 0.0	0.00 0.00
--------------	------------	--------------	------------	--------------	------------	--------------

**BYVOEGSEL K1 - Berekening van impedansie vir aardfout tussen twee invoere**



Figuur K.1 - Aardfout tussen twee invoere

Impedansie gesien deur relê:

$$Z_r = Z_1 \quad (\text{reeds bewys in vgl. 5.7})$$

$$= 28,78 \quad \underline{79,77} \quad \Omega$$

**BYVOEGSEL K2 - Simulasie van aardfout tussen twee invoere**

Sien figuur K.1

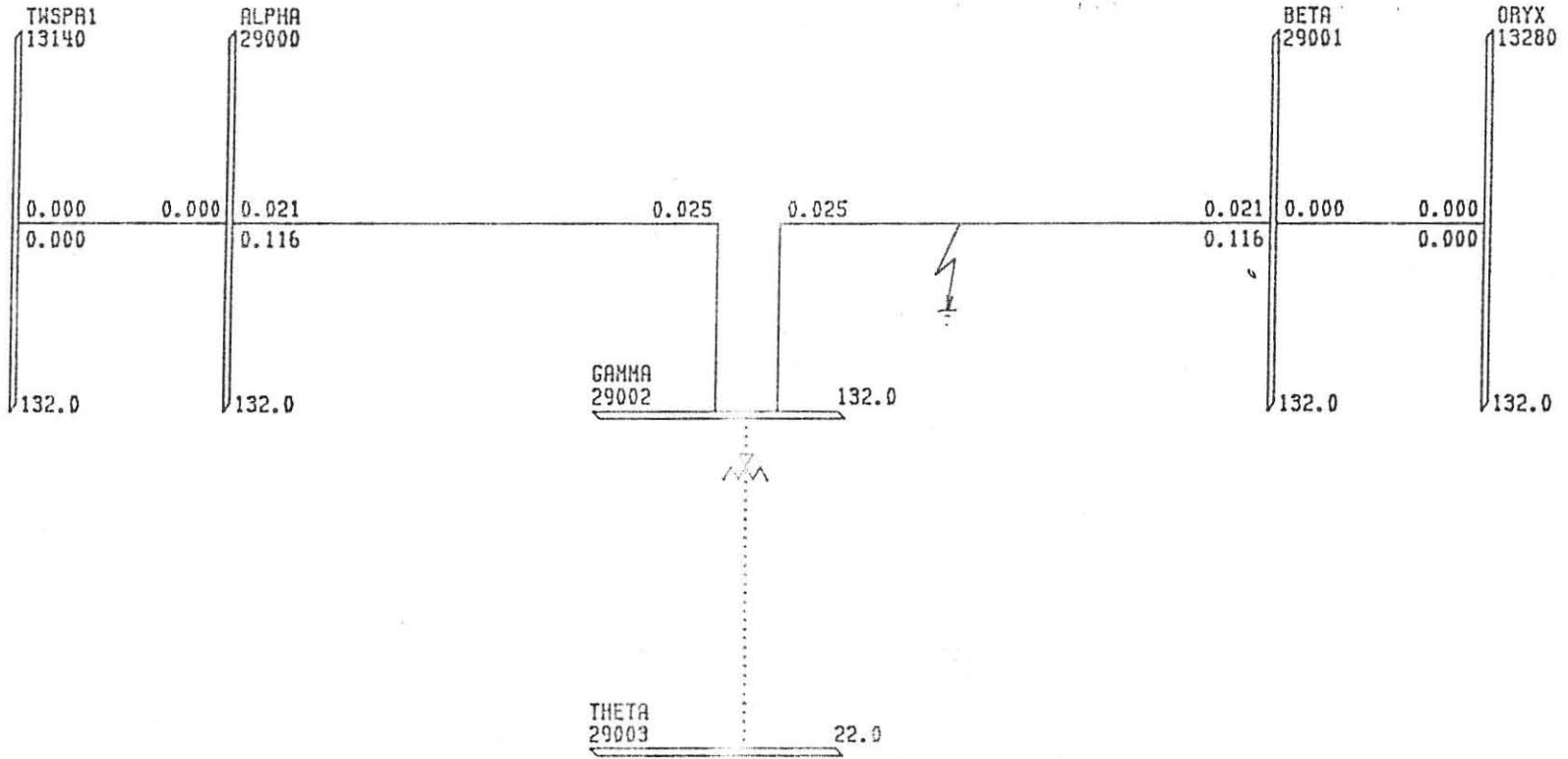
$Z_r$  volgens PSS/E:

$$= V_{ae} / (I_a + 3KIa_0)$$

$$= 41125 \quad \underline{-25,2} \quad / \quad [764,1 \quad \underline{-104,77}$$

$$+ (3 \times 0,722 \quad \underline{-8,4} \quad \times \quad 309,2 \quad \underline{-96,51})] \quad (\text{K uit vgl.5.4})$$

$$= 28,68 \quad \underline{79,64} \quad \Omega$$



125



VERHANDELING DEUR R. KLEINHANS  
ESKOM OVS STREEK

FRI AUG 31, 1990 11:33



=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

ALANCES APPLIED:

IE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132] PHASE 1

.-G Z = 0.0000 0.0000

DUMMY BUS IS 60.0% FROM BUS 29001 [BETA 132] TO BUS 29002 [GAMMA 13

SEQUENCE THEVENIN IMPEDANCES AT FAULTED BUSES:

BUS	NAME	BSKV	ZERO	POSITIVE	NEGATIVE
999	DUMMYBUS	132	0.09104 0.25050	0.02225 0.09288	0.02232 0.0929

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E

=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

NE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
ASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
999 (KV L-G)	45.825	160.28	62.187	-18.01	16.440	166.76
DUMMYBUS 132	0.000	0.00	94.418	-153.66	98.982	116.91

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
ASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
OM 29001 1	685.2	-86.83	774.5	-76.03	779.8	-91.05
TA 132	2225.4	-84.57	95.8	-104.58	266.0	105.88
OM 29002 1	304.5	-96.32	297.7	-127.83	207.9	-84.84
MMA 132	770.5	-104.84	95.8	75.42	266.0	-74.12

M OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	986.7	-89.74	986.7	-89.74	986.7	-89.74
DUMMYBUS 132	2960.2	-89.74	0.0	0.00	0.0	0.00

CONTRIBUTIONS EQUIVALENT POSITIVE SEQUENCE ADMITTANCE 0.8665 -2.6254

ULT CURRENT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	986.7	-89.74	986.7	-89.74	986.7	-89.74
DUMMYBUS 132	2960.2	-89.74	0.0	0.00	0.0	0.00

OSITIVE SEQUENCE EQUIVALENT FAULT ADMITTANCE 0.8665 -2.6254



=====  
OFS REGION - SYSTEM  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

SEQUENCE		/V0/	AN(V0)	/V+/ /VA/	AN(V+)	/V-/ /VB/	AN(V-)	AN(VC)
000 (KV L-G)		18.128	164.73	69.547	-21.51	10.509	162.17	
PHA 132		41.125	-25.20	85.084	-145.02	83.048	103.91	
SEQUENCE		/I0/	AN(I0)	/I+/ /IA/	AN(I+)	/I-/ /IB/	AN(I-)	AN(IC)
OM 13140 1		309.2	-96.51	284.2	-128.70	210.6	-85.11	
SPR1 132		764.1	-104.77	85.3	66.16	266.7	-78.04	
OM 29002 1		309.2	83.49	284.2	51.30	210.6	94.89	
MMA 132		764.1	75.23	85.3	-113.84	266.7	101.96	

AMOUNT OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29000 [ALPHA 132]:

000		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
PHA 132		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

SEQUENCE		/V0/	AN(V0)	/V+/ /VA/	AN(V+)	/V-/ /VB/	AN(V-)	AN(VC)
001 (KV L-G)		19.692	151.22	71.148	-15.16	6.836	163.99	
TA 132		45.423	-9.17	81.257	-144.38	88.452	110.22	
SEQUENCE		/I0/	AN(I0)	/I+/ /IA/	AN(I+)	/I-/ /IB/	AN(I-)	AN(IC)
OM 13280 1		686.0	-86.87	770.1	-75.85	780.3	-91.06	
YX 132		2221.9	-84.54	99.3	-101.95	265.8	107.18	
OM 99999 1		686.0	93.13	770.1	104.15	780.3	88.94	
IMMYBUS 132		2221.9	95.46	99.3	78.05	265.8	-72.82	

AMOUNT OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29001 [BETA 132]:

001		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
TA 132		0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00



===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====

===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

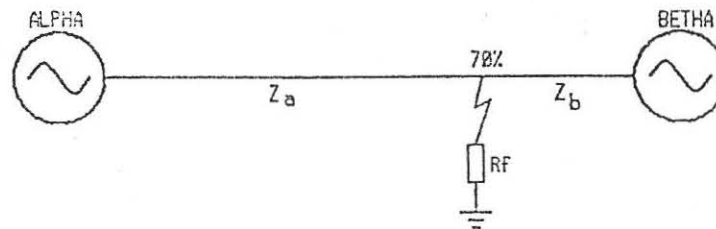
SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
PHASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
29002 (KV L-G)	37.968	160.86	64.318	-19.10	14.750	165.81
PHASE 132	11.720	-25.16	91.639	-151.41	94.088	113.65

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
PHASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
2900000 1	306.4	-96.40	293.3	-128.12	208.9	-84.94
PHASE 132	768.9	-104.83	91.9	72.58	266.3	-75.47
2900000 1	306.4	83.60	293.3	51.88	208.9	95.06
1MYBUS 132	768.9	75.17	91.9	-107.42	266.3	104.53

LIST OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29002 [GAMMA 132]:

29002	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
PHASE 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

## BYVOEGSEL L1 - Berekening van impedansie vir boogweerstandsfout tussen twee invoere



Figuur L.1 - Boogweerstandfout tussen twee invoere

Impedansie gesien deur relê:

$$Z_r = Z_{a1} (1 + b) \quad (\text{uit vgl. 6.13})$$

waar  $b = [(I_{a0} + I_{b0}) 3R_f] / (2I_{a1}Z_{a1} + I_{a0}Z_{a0})$  (uit vgl. 6.14)

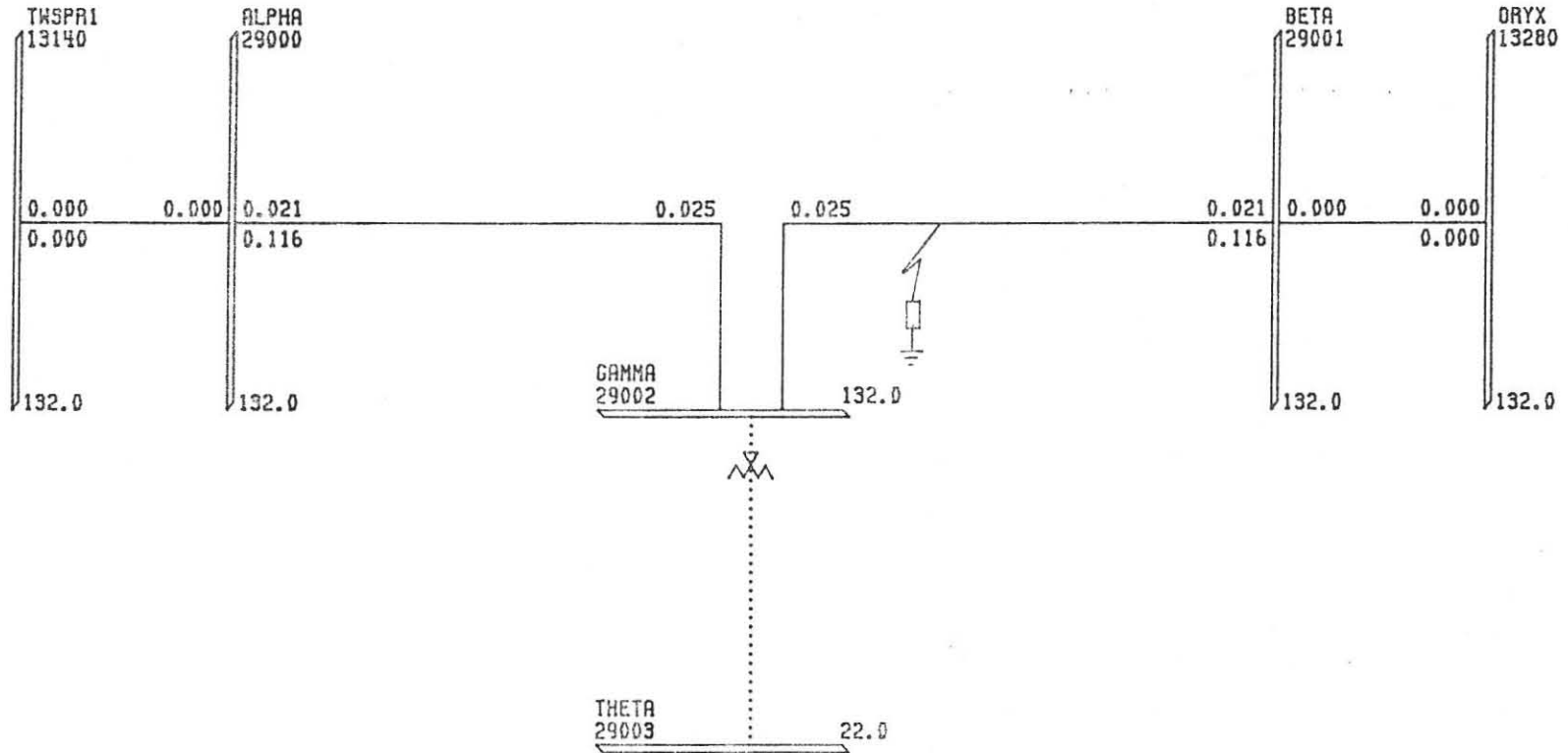
$$\begin{aligned} Z_r &= 28,77 \angle 79,77 + 28,77 \angle 79,77 \times [(264,6 \angle -87,57 + \\ & 587 \angle -68,94) \times 30] / [(2 \times 218 \angle -125,23 \times \\ & 28,77 \angle 79,77) + (91,03 \angle 73,93 \times 264,6 \angle -78,57)] \\ &= 28,77 \angle 79,77 + 28,77 \angle 79,77 \times 0,736 \angle -53,57 \\ &= 44,73 \angle 56,8 \Omega \end{aligned}$$

## BYVOEGSEL L2 - Simulasie van boogweerstandsfout tussen twee invoere

Sien figuur L.1

Zr gemeet volgens PSS/E:

$$\begin{aligned}
 &= V_{ae} / (I_a + 3KI_a_0) \\
 &= 50676 \begin{bmatrix} -35,56 \\ -90,33 \end{bmatrix} / \left[ 603,6 \begin{bmatrix} -90,33 \\ -78,57 \end{bmatrix} + \right. \\
 &\quad \left. (3 \times 0,722 \begin{bmatrix} -8,4 \\ -78,57 \end{bmatrix} \times 264,6 \begin{bmatrix} -78,57 \end{bmatrix}) \right] \\
 &= 44 \begin{bmatrix} 53,13 \\ \end{bmatrix} \Omega
 \end{aligned}$$



VERHANDELING DEUR R. KLEINHANS  
ESKOM OVS STREEK

FRI AUG 31, 1990 11:33



=====  
OFS REGION - SYSTEM  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

BALANCES APPLIED:

IE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132] PHASE 1

L-G Z = 0.5740E-01 0.0000

DUMMY BUS IS 60.0% FROM BUS 29001 [BETA 132] TO BUS 29002 [GAMMA 132]

SEQUENCE THEVENIN IMPEDANCES AT FAULTED BUSES:

BUS	NAME	BSKV	ZERO	POSITIVE	NEGATIVE
999	DUMMYBUS	132	0.09104 0.25050	0.02225 0.09288	0.02232 0.0929

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E

FRI AUG 31, 1990 10:

=====  
OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS  
=====  
DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE  
=====

IE TO GROUND FAULT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
999 (KV L-G)	39.212	178.22	65.716	-21.55	14.068	-175.31
DUMMYBUS 132	25.334	-71.81	97.231	-148.22	89.814	118.49

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
999 (KV L-G)	586.3	-68.89	727.1	-57.09	667.3	-73.11
DUMMYBUS 132	1966.0	-65.99	113.3	-121.37	273.8	113.15
999 (KV L-G)	260.5	-78.38	232.5	-124.43	177.9	-66.91
DUMMYBUS 132	610.6	-90.86	113.3	58.63	273.8	-66.85

AMOUNT OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	844.4	-71.81	844.4	-71.81	844.4	-71.81
DUMMYBUS 132	2533.1	-71.81	0.0	0.00	0.0	0.00

CONTRIBUTIONS EQUIVALENT POSITIVE SEQUENCE ADMITTANCE 1.4312 -1.7215

FAULT CURRENT AT BUS 99999 [DUMMYBUS 132]:

999	844.4	-71.81	844.4	-71.81	844.4	-71.81
DUMMYBUS 132	2533.1	-71.81	0.0	0.00	0.0	0.00

POSITIVE SEQUENCE EQUIVALENT FAULT ADMITTANCE 1.4312 -1.7215

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SOURCE	/V0/ /VA/	AN(V0) AN(VA)	/V+/ /VB/	AN(V+) AN(VB)	/V-/ /VC/	AN(V-) AN(VC)
000 (KV L-G) HA 132	15.512 50.676	-177.33 -35.56	71.721 85.608	-23.62 -143.40	8.993 80.618	-179.90 103.62
SOURCE	/I0/ /IA/	AN(I0) AN(IA)	/I+/ /IB/	AN(I+) AN(IB)	/I-/ /IC/	AN(I-) AN(IC)
000 13140 1 000 132	264.6 603.6	-78.57 -90.33	218.0 107.9	-125.23 49.58	180.2 272.3	-67.18 -70.53
000 29002 1 000 132	264.6 603.6	101.43 89.67	218.0 107.9	54.77 -130.42	180.2 272.3	112.82 109.47

LIST OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29000 [ALPHA 132]:

000	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
000 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E FRI AUG 31, 1990 10:  
 ===== OFS REGION - SYSTEM OPERATIONS =====  
 ===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SOURCE	/V0/ /VA/	AN(V0) AN(VA)	/V+/ /VB/	AN(V+) AN(VB)	/V-/ /VC/	AN(V-) AN(VC)
001 (KV L-G) TA 132	16.850 50.226	169.16 -20.64	72.413 83.799	-16.59 -142.03	5.849 84.501	-178.07 111.22
SOURCE	/I0/ /IA/	AN(I0) AN(IA)	/I+/ /IB/	AN(I+) AN(IB)	/I-/ /IC/	AN(I-) AN(IC)
001 13280 1 001 132	587.0 1963.2	-62.94 -65.91	723.8 115.2	-56.78 -118.64	667.7 274.3	-73.12 114.37
001 99999 1 001 132	587.0 1963.2	111.06 114.09	723.8 115.2	123.22 61.36	667.7 274.3	106.88 -65.63

LIST OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29001 [BETA 132]:

001	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
001 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00



PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM

===== OFS REGION - SYSTEM =====

===== DISTRIBUTION SYSTEM INCLUDING MTS BACKBONE =====

SEQUENCE	/V0/	AN(V0)	/V+ /	AN(V+)	/V- /	AN(V-)
BASE	/VA/	AN(VA)	/VB/	AN(VB)	/VC/	AN(VC)
202 (KV L-G)	32.489	178.80	67.478	-22.18	12.622	-176.25
1MA 132	30.975	-55.81	93.944	-146.99	86.715	114.58

SEQUENCE	/I0/	AN(I0)	/I+ /	AN(I+)	/I- /	AN(I-)
BASE	/IA/	AN(IA)	/IB/	AN(IB)	/IC/	AN(IC)
DM 29000 1	262.2	-78.46	227.7	-124.69	178.7	-67.01
PHA 132	608.7	-90.69	111.1	55.67	273.4	-68.09

DM 99999 1	262.2	101.54	227.7	55.31	178.7	112.99
1MYBUS 132	608.7	89.31	111.1	-124.33	273.4	111.91

1 OF CONTRIBUTIONS INTO BUS 29002 [GAMMA 132]:

202	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
1MA 132	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00

## BYVOEGSEL M - Berekening van K-faktor vir aardfout tussen

T-voerders en ontvangstasie (Van de Merwe, 1990: 5/6)

Sien figuur I.1

Spanning V<sub>ae</sub> gesien deur relê:

$$\begin{aligned}
 &= V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0} \\
 &= 2I_{a_1}ZL_1 + I_{a_0}Za_0 + (I_{a_0} + IT_0) Zb_0 \\
 &\quad (\text{waar } ZL = Z_a + Z_b) \\
 &= 2I_{a_1}ZL_1 + I_{a_0} [Za_0 + ((I_{a_0} + IT_0) / I_{a_0}) Zb_0] \qquad 7.1
 \end{aligned}$$

$$\text{stel } ZL_0' = Za_0 + [(I_{a_0} + IT_0) / I_{a_0}] Zb_0 \qquad 7.2$$

stel vergelyking 7.2 in 7.1.

$$V_{ae} = 2I_{a_1}ZL_1 + I_{a_0} (ZL_0')$$

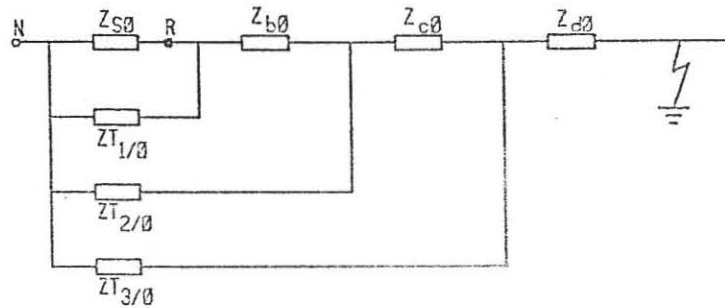
Stroom deur relê gesien:

$$\begin{aligned}
 &= 2I_{a_1} + (1 + 3K) I_{a_0} \qquad (K \text{ uit vgl. 5.4}) \\
 &= 2I_{a_1} + (ZL_0' / ZL_1) I_{a_0}
 \end{aligned}$$

Impedansie deur relê gesien:

$$\begin{aligned}
 &= ZL_1 [(2I_{a_1}ZL_1) + (I_{a_0}ZL_0')] / [(2I_{a_1}ZL_1) + (I_{a_0}ZL_0')] \\
 &= ZL_1
 \end{aligned}$$

Beskou onderstaande figuur vir meer as een transformator per lyn:



Figuur M.1 - Nulvolgorde impedansies van veelvuldige transformators

Vir meer as een transformator kan die volgende vergelyking toegepas word:

$$ZL_0' = Z_{a0} + [(I_{a0} + IT_0) / I_{a0}] Z_{b0} + [(I_{a0} + IT_0 + IT_{20}) / I_{a0}] Z_{c0} + [(I_{a0} + IT_0 + IT_{20} + IT_{30}) / I_{a0}] Z_{d0}$$

## VERWYSINGS

ANDERSON, E.M. 1985 : Electric Transmission Line Fundamentals.  
Virginia : Reston .

ATABEKOV, G.I. 1960: The Relay Protection of High Voltage Networks.  
New York : Pergamon.

CENTRAL STATION ENGINEERS. 1964: Electrical Transmission and  
Distribution. USA : East Pittsburg.

ELGERD, O.I. 1971: Electric Energy Systems Theory: An Introduction. New  
York : McGraw-Hill

ESKOM . 1974: Substation Layout Design Guide. Johannesburg : Eskom  
Transmission Dept.

FINK, D.G. & BEATY, H.W. 1987: Standard Handbook for Electrical  
Engineers. 12 th ed.New York: McGraw-Hill.

FREEMAN, P.J. 1984: Electric Power Transmission and Distribution, 2nd ed. Great Britain : Harrap.

GEC MEASUREMENTS. 1987: Protective Relays: Application Guide, 3rd ed. England : Balding & Mansell.

GROSS, C.A. 1979: Power System Analysis. New York : John Wiley & Sons.

GUILE, A.E. & PATERSON, W. 1981: Electrical Power Systems, vol. 1. Oxford : Wheaton.

GUNGOR, B.R. 1988: Power Systems. San Diego : Harcourt Brace Jovanovich.

HUGHES, E. 1982: Electrical Technology, 5th ed. New York : Longman.

INFORMATION SYSTEM DEPARTMENT. 1977: Conductor Parameter Program: User Manual 8A. Johannesburg : Eskom.

JOHNSON, W.C. 1950: Transmission Lines and Networks, New York : McGraw-Hill.

LACKEY, C.H.W. 1951: Fault Calculations. Great Britain : Robert Cunningham.

ROEPER, R. 1985: Short-circuit Currents in Three-phase Systems, 2 nd ed. Great Britain : The Bath Press.

ROYLE, J.B. 1988, Junie 6de: Fundamentals of Distance Protection Application. In Analysis and Protection of Power Systems Course held at Halfway House, Johannesburg : Eskom.

VAN DE MERWE, L.W. 1990, Oktober: Settings of Impedance Relays for Lines with Multiple Earths. In Proceedings of the Eskom Protection Conference held at Halfway House, Johannesburg : Eskom.

WARRINGTON, A.R. van C. 1968: Protective Relays: Their Theory and Practice, vol 1. 2nd ed. Stafford : Chapman & Hall.