

MASTER

Het testen van enige snelle beveiligingsalgoritmen voor hoogspanningslijnen

von Berg, E.M.L.

Award date:
1987

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

FACULTEIT ELEKTROTECHNIEK

Vakgroep Elektrische Energiesystemen

Het testen van enige snelle beveiligings-
algoritmen voor hoogspanningslijnen.

E.M.L. von Berg

EO.87.A.47

De Faculteit Elektrotechniek van de
Technische Universiteit Eindhoven
aansvaardt geen verantwoordelijkheid
voor de inhoud van stage- en afstu-
deerverslagen.

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:

Ir. W.F.J. Kersten/ ir. M.H.J. Bollen

Verantwoordelijk docent:

prof.ir. M. Antal

oktober 1987

Samenvatting.

In dit afstudeerwerk is studie verricht naar enige algoritmen om snel uit te maken of er in een hoogspanningslijn een sluiting is opgetreden en wel met gesimuleerde signalen van sluitingen in de 380 kV dubbelcircuitverbinding Krimpen-Diemen.

Daarvoor zijn een aantal simulaties uitgevoerd zowel digitaal als analoog. De digitale simulatie van sluitingen in het traject Krimpen-Diemen is uitgevoerd met het Electro-Magnetic Transients Program (EMTP), terwijl voor de analoge simulatie de in de vakgroep EG-2 aanwezige Transiënt Network Analyzer (TNA) is benut. Met de TNA zijn een drietal modellen van het 380 kV net opgezet. Van de gesimuleerde sluitingen nemen we aan dat de resultaten verkregen met het EMTP programma het beste overeenkomen met wat we in het nabootste Nederlandse 380 kV net kunnen verwachten bij sluitingen in het traject Krimpen-Diemen. De resultaten van de TNA-simulatie II komen in het gebied tot een milliseconde redelijk goed overeen met de EMTP-resultaten; juist voldoende voor het testen van snelle beveiligingsalgoritmen. De overige TNA-simulaties zijn niet bruikbaar om snelle beveiligingsalgoritmen te testen.

Vier snelle beveiligingsalgoritmen zijn getest met twee sluitingen gesimuleerd met de TNA-simulatie II.

Wanneer we eisen dat een beveiligingsalgoritme betrouwbaar moet detecteren of er een sluiting in ~~een~~ circuit van een dubbelcircuitverbinding is opgetreden, zullen echter alle vier algoritmen moeten worden aangepast.

Testing of some high-speed protection-algorithms for high-voltage lines.

Summary.

In this work some high-speed protection-algorithms for high-voltage lines have been tested by means of simulated signals of faults in the 380 kV double circuitline Krimpen-Diemen.

Therefor a number of simulations have been carried out, digital as well as analog. The digital simulation has been carried out by means of the Electromagnetic Transient Program (EMTP), while the analog one has been carried out by means of the Transient Network Analyzer (TNA), present in the division EG-2. The EMTP-results have been compared with three TNA-simulations. We assume that the results with EMTP agree with the results in practice. The results of TNA-simulation II agree in the range up to one millisecond very well with the EMTP-results; we used this one to test the high-speed protection-algorithms. The other TNA-simulations have not been used for testing the high-speed protection-algorithms.

Four high-speed protection-algorithms have been tested by means of two faults simulated on TNA.

None of the algorithms was capable of discriminating between a faulted and a non-faulted circuit.

Inhoudsopgave.

	pag
Samenvatting.	0.1
Summary.	0.2
Inhoudsopgave.	0.3
Gebruikte symbolen.	0.5
1. Inleiding.	1.1
2. Nederlandse 380 kV net.	2.1
2.1 Configuratie.	2.1
2.2 Invoedingen.	2.2
2.2.1 Homopolaire impedantie.	2.2
2.2.2 Bedrijfsimpedantie.	2.3
2.3 Transmissielijnen.	2.4
3. Simulatie sluitingen.	3.1
3.1 Berekenen spanningen en stromen in een station als gevolg van de eerste reflectie van lopende golven afkomstig van een fout op een dubbelcir- cuitlijn.	3.1
3.2 EMTP.	3.9
3.2.1 Principe.	3.9
3.2.2 Simulatie.	3.9
3.3 TNA.	3.17
3.3.1 Principe.	3.17
3.3.2 Simulatie.	3.20
3.3.2.1 Simulatie I.	3.20
3.3.2.2 Simulatie II.	3.35
3.3.2.3 Simulatie III.	3.46
4. Enige snelle beveiligingsalgoritmen.	4.1
4.1 Bergeronvergelijkingen verliesvrije lijn.	4.1
4.2 Beveiliging, gebaseerd op directe detectie van lopende golven.	4.4
4.2.1 Principe.	4.4
4.2.2 Test.	4.11

4.3 Lopende golfdifferentiaalbeveiliging.	4.23
4.3.1 Principe.	4.23
4.3.2 Test.	4.25
4.4 Lopende golfdiscriminantbeveiliging.	4.32
4.4.1 Principe.	4.32
4.4.2 Test.	4.34
5. Conclusies.	5.1
Literatuur	6.1

Gebruikte symbolen.

A	Fasebenaming/stationsbenaming.
ADC	16-kanaals differentieele Analooq/Digitaal Converter.
AB1RST	Absolute Achterwaartse golf berekend met component $B_1=1/3F_a-1/3F_b$ voor beveiliging circuit R-S-T.
AB2RST	Absolute Achterwaartse golf berekend met component $B_2=1/3F_a-1/3F_c$ voor beveiliging circuit R-S-T.
AHRST	Absolute Achterwaartse golf berekend met component $H=1/3F_a+1/3F_b+1/3F_c$ voor beveiliging circuit R-S-T.
AB1UVW	Absolute Achterwaartse golf berekend met component $B_1=1/3F_a-1/3F_b$ voor beveiliging circuit U-V-W.
AB2UVW	Absolute Achterwaartse golf berekend met component $B_2=1/3F_a-1/3F_c$ voor beveiliging circuit U-V-W.
AHUVW	Absolute Achterwaartse golf berekend met component $H=1/3F_a+1/3F_b+1/3F_c$ voor beveiliging circuit U-V-W.
B	Fasebenaming/componentbenaming/stationsbenaming.
C	Fasebenaming/capaciteit.
Crst	Crayestein.
d	Componentbenaming.
Dm	Diemen.
D_A	Achterwaartse golfdiscriminant.
D_V	Voorwaartse golfdiscriminant.
E	Nominale spanning/fictieve stapvormige spanning, welke op het moment van de sluiting wordt ingeschakeld.
EMTP	ElectroMagnetic Transients Program.
F	Golf/fasebenaming.
F(t)	Bronfunctie EMTP-invoeding.

f	Frequentie.
f_{TNA}	Frequentie Transiënt Network Analyzer.
f_0	Frequentie net.
G	Conductiviteit.
Grt	Geertruidenberg.
H	Componentbenaming.
I	Stroom.
IF	Fasestroom.
I_{FA}	Transiënte stroom op foutplaats richting station A.
I_{FB}	Transiënte stroom op foutplaats richting station B.
I_F	Transiënte stroom op foutplaats.
Kr	Krimpen.
L	Inductiviteit.
l	Lengte lijn.
R	Fasebenaming/weerstand.
R_0	Resistieve deel van de homopolaire impedantie.
R_1	Resistieve deel van de bedrijfsimpedantie.
R-S-T	Circuitbenaming.
r	Reflectiefactor.
S	Fasebenaming.
S_n	Nominaal vermogen.
T	Fasebenaming.
TNA	Transiënt Network Analyzer.
U	Fasebenaming.
U-V-W	Circuitbenaming.
V	Fasebenaming/spanning.
VF	Fasespanning.
V_F	Transiënte spanning op foutplaats.
VRLS	Spanning R-fase op foutplaats.
VRK	Spanning R-fase in station Krimpen.
VSLK	Spanning S-fase in station Krimpen.
VTLK	Spanning T-fase in station Krimpen.
VRLD	Spanning R-fase in station Diemen.
VSLD	Spanning S-fase in station Diemen.
VTLD	Spanning T-fase in station Diemen.

VB1RST	Absolute Voorwaartse golf berekend met component $B_1=1/3F_a - 1/3F_b$ voor beveiliging circuit R-S-T.
VB2RST	Absolute Voorwaartse golf berekend met component $B_2=1/3F_a - 1/3F_c$ voor beveiliging circuit R-S-T.
VHRST	Absolute Voorwaartse golf berekend met component $H=1/3F_a + 1/3F_b + 1/3F_c$ voor beveiliging circuit R-S-T.
VB1UVW	Absolute Voorwaartse golf berekend met component $B_1=1/3F_a - 1/3F_b$ voor beveiliging circuit U-V-W.
VB2UVW	Absolute Voorwaartse golf berekend met component $B_2=1/3F_a - 1/3F_c$ voor beveiliging circuit U-V-W.
VHUVW	Absolute Voorwaartse golf berekend met component $H=1/3F_a + 1/3F_b + 1/3F_c$ voor beveiliging circuit U-V-W.
v	Voortplantingssnelheid.
W	Fasebenaming.
X_0	Reactieve deel van de homopolaire impedantie.
X_1	Reactieve deel van de bedrijfsimpedantie.
x	Som van de in het station invoedende stationaire kortsluitstromen (kA).
Z_0	Homopolaire impedantie.
Z_1	Bedrijfsimpedantie.
Z_d	Dubbeltcircuitgolfimpedantie.
Z_0^*	Homopolaire impedantie van een deelnet.
Z_1^*	Bedrijfsimpedantie van een deelnet.
Z_A	Impedantie van het bedrijfsnetwerk in Théveninnetwerk.
Z_B	Impedantie van het homopolaire netwerk in Théveninnetwerk.
Z_n	Nullastimpedantie van transformator per fase.
Z_k	Kortsluitimpedantie van transformator per fase.
Z_g	Karakteristieke impedantie.
z	Plaatscoördinaat langs de lijn.

0	Componentbenaming/impedantiebenaming.
1	Componentbenaming/impedantiebenaming.
2	Componentbenaming.
3	Componentbenaming.
4	Componentbenaming.
5	Componentbenaming.
6	Componentbenaming.
*	Stationsbenaming.
α	Reëel deel van de voortplantingsexponent per lengte-eenheid.
β	Imaginaire deel van de voortplantingsexponent per lengte-eenheid.
ϵ	Relatieve kortsluitspanning/ $\{V_A(t) - Z_g I_A(t)\} - \{V_B(t-\tau) + Z_g I_B(t-\tau)\}$.
λ	Voortplantingsexponent per lengte-eenheid.
ξ	$\{V_A(t) + Z_g I_A(t)\} - \{V_B(t+\tau) - Z_g I_B(t+\tau)\}$.
τ	Looptijd.
τ_0	Looptijd van de homopolaire golf.
τ_1	Looptijd van de bedrijfsgolf.
τ_d	Looptijd van de dubbelcircuitgolf.
τ_A	Looptijd tussen de foutplaats en station A.
τ_B	Looptijd tussen de foutplaats en station B.
φ	Fasehoek.
w	Hoeksnelheid.
w_0	$2\pi f_0$.

1. Inleiding.

Door de hoogspanningslijnen te beveiligen zorgen we ervoor dat in het geval van een sluiting ergens in de lijnen er zo weinig mogelijk verbruikers nadelige gevolgen ondervinden en de schade aan de onderdelen van het net beperkt blijft of zelfs wordt voorkomen. Hier toe moet dan de gestoorde lijn aan beide kanten zo snel mogelijk worden afgeschakeld. In de klassieke beveiligingsinrichtingen wordt slechts de 50 Hz component van foutspanningen en -stromen benut om de sluitingen te detecteren. De signalen in de stations worden dan gefilterd. Dit alles heeft tot gevolg dat de beslissingsprocedure of er afgeschakeld moet worden langzaam is. Echter sinds 1978 zijn er een aantal algoritmen voorgesteld om snel te kunnen bepalen of een hoogspanningslijn een sluiting bevat. Deze algoritmen maken gebruik van de hoogfrequente componenten in de signalen afkomstig van een sluiting (lopende golven) en kunnen daarom sneller een beslissing nemen.

Dit afstudeerwerk betreft het testen van enige van deze snelle beveiligingsalgoritmen, en wel met behulp van gesimuleerde signalen van sluitingen in de 380 kV dubbelcircuitverbinding Krimpen-Diemen.

De configuratie van het Nederlandse 380 kV net (en wel ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979) zal in hoofdstuk 2 uit de doeken gedaan worden. Hierbij zal vooral aandacht besteed worden aan de invoedingen op elk station van het 380 kV net.

Hoofdstuk 3 bevat de simulaties van sluitingen in de dubbelcircuitverbinding Krimpen-Diemen in de 380 kV netconfiguratie zoals gegeven in hoofdstuk 2. Deze simulaties zijn zowel digitaal als analoog uitgevoerd.

De digitale nabootsing is uitgevoerd met het ElectroMagnetic Transients Program (EMTP), terwijl analoog is nabootst met de in de vakgroep EG-2 aanwezige Transiënt Network Analyzer (TNA). Er zijn drie verschillende analoge simulaties

uitgevoerd en vergeleken met de EMTP-simulatie. De analoge simulatie waarvan de resultaten de meeste overeenkomst vertonen met de EMTP-resultaten is gebruikt voor het verdere werk.

Drie principes van snelle beveiligingsalgoritmen worden in hoofdstuk 4 beschreven. Verder vindt men in dit hoofdstuk de resultaten van enige algoritmen, gebaseerd op deze principes, op twee analoog gesimuleerde sluitingen.

Tenslotte zijn in hoofdstuk 5 de conclusies ondergebracht.

2. Nederlandse 380 kV net.2.1 Configuratie.

Fig.2.1 toont de configuratie van het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979. De verbinding Geertruidenberg-Borssele was niet in bedrijf en komt dan ook niet voor.

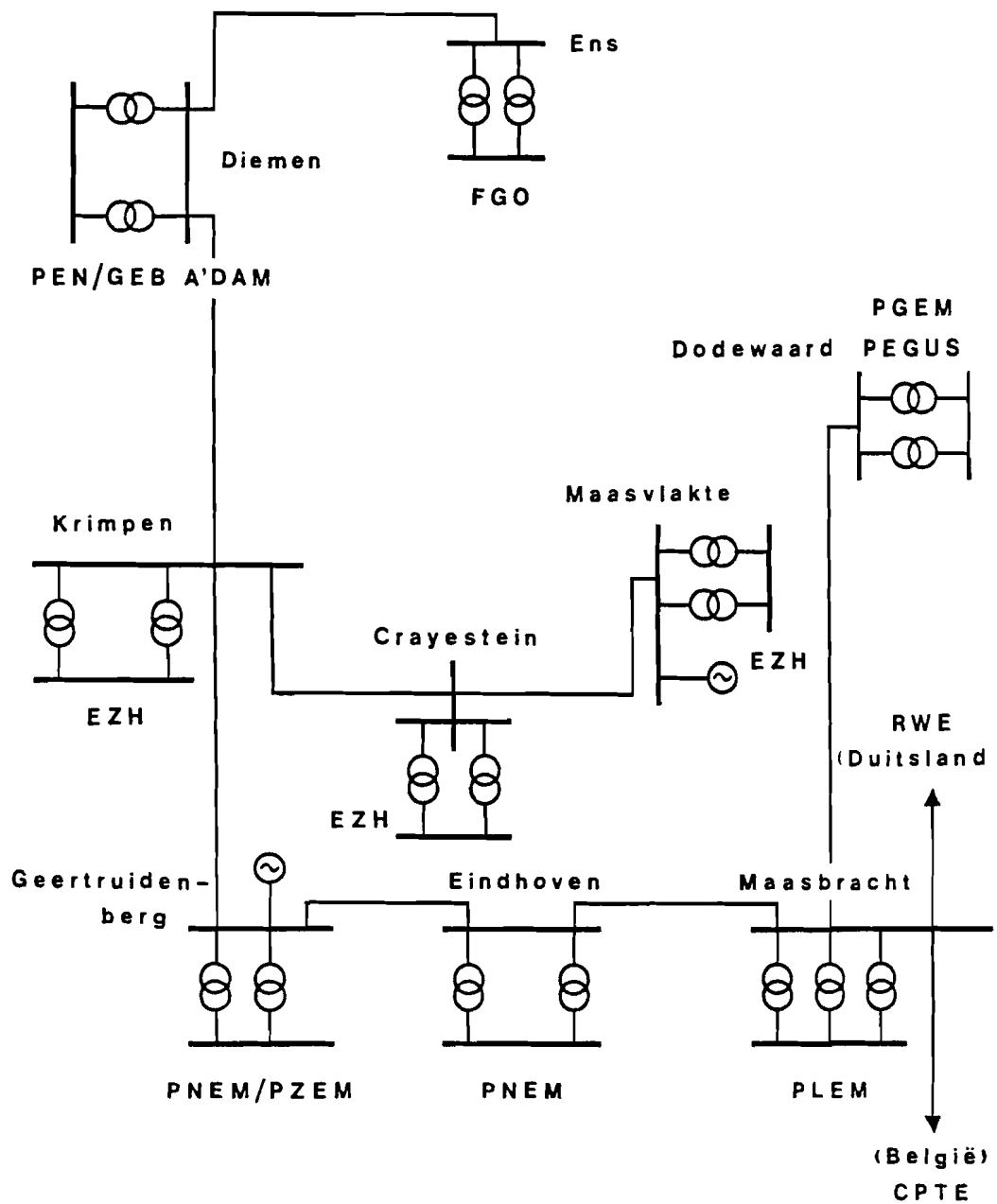


Fig.2.1 Configuratie Nederlandse 380 kV net.

2.2 Invoedingen.

Op elk station is een invoeding aanwezig. Deze kan zijn opgebouwd uit een drietal mogelijkheden, te weten:

- het 150 kV net via koppeltransformatoren,
- generatoren via een step-up transformator (Geertruidenberg en Maasvlakte), en
- het buitenlandse 380 kV net (Maasbracht) en het 220 kV net (Ens).

2.2.1 Homopolaire impedantie.

Bij de koppeling van het 380 kV net met het 150 kV net wordt de homopolaire impedantie van het 150 kV net door het gebluste karakter hiervan niet overgedragen. De homopolaire impedantie die men vanuit het 380 kV net ziet als men de koppeltransformator inkijkt wordt dan ook alleen bepaald door de in de koppeltransformator aanwezige derde wikkeling (50 kV) die als driehoekswikkeling is geschakeld. Het reactieve deel van de homopolaire impedantie van een 380/150 kV koppeltransformator bedraagt bij 50 Hz 122 ohm per fase. Verder ziet men in fig. 2.1 dat op elk station twee van dergelijke koppeltransformatoren staan opgesteld met uitzondering van Maasbracht waar een drietal transformatoren staan opgesteld.

Ook bij de invoeding van een generator wordt de homopolaire impedantie gezien vanuit het 380 kV net alleen bepaald door de laagspanningswikkeling van de machinetransformator die in driehoek is geschakeld. De hiermee verbonden in ster geschakelde generator draagt niet bij tot het homopolaire gedrag. De grootte van het reactieve deel van de homopolaire impedantie bij 50 Hz laat zich berekenen met:

$$X_0 = \frac{\epsilon E^2}{100 S_n} \quad (2.1)$$

met ϵ =relatieve kortsluitspanning,

E =nominale spanning,

S_n =nominaal vermogen.

Als we nu weten dat voor Geertruidenberg geldt:

$\epsilon =12.93 \%$,

E =409.7 kV,

$S_n =500 \text{ MVA}$

dan volgt hieruit: $X_0 =43.4 \Omega$.

Evenzo voor de Maasvlakte:

$\epsilon =12 \%$,

E =412 kV,

$S_n =625 \text{ MVA}$

dan wordt $X_0 =36.6 \Omega$.

Het homopolaire gedrag van de invoeding vanuit het Nederlandse 220 kV net bij Ens en de directe koppeling met de Duitse en Belgische 380 kV netten is afhankelijk van de bedrijfstoestand van deze netten.

2.2.2 Bedrijfsimpedantie.

De bepaling van de bedrijfsimpedantie is gebaseerd op de grootte van de stationaire korsluitstroom zoals berekend door de KEMA voor de situatie ten tijde van de eerder genoemde veldmetingen. Als we zoals gebruikelijk rekening houden met 110 % spanningsniveau dan wordt de bedrijfsimpedantie als volgt bepaald:

$$X_1 = \frac{1.1 \cdot 380 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot x \text{ kA}} \quad (2.2)$$

met x de som van de in het station invoedende stationaire kortsluitstromen in kA.

2.3 Transmissielijnen.

De transmissielijnen in het Nederlandse 380 kV net zijn te verdelen in een aantal typen. De meeste verbindingen zijn van het type dubbelcircuitlijn; hierin wordt weer onderscheid gemaakt tussen een dubbelcircuitlijn in het binnenland (Ens-Diemen, Diemen-Krimpen, Krimpen-Geertruidenberg, Eindhoven-Maasbracht) en een aan de kust (Krimpen-Crayestein, Crayestein-Maasvlakte). Er is ook een verbinding die bestaat uit drie parallelle circuits (Geertruidenberg-Eindhoven).

Voor een beschrijving van de mastbeelden van de verschillende lijnen zij verwezen naar " Inschakeloverspanningen in het 380 kV net: Implementatie en ervaringen met het EMTP programma ", geschreven door W.A.M. Sinx [1].

3. Simulatie sluitingen.3.1 Berekenen spanningen en stromen in een station als gevolg van de eerste reflectie van lopende golven afkomstig van een fout op een dubbelcircuitlijn.

Het optreden van een sluiting in een net kan worden opgevat als het plotseling inschakelen van een spanningsbron op de foutplaats die de oorspronkelijk bestaande spanning op de foutplaats opheft (superpositiebeginsel). Het is deze stapvormige spanning die verantwoordelijk is voor het transient verschijnsel. We noemen daarom de spanningen en stromen veroorzaakt door deze stapvormige bron transiënte signalen, terwijl de spanningen en stromen ten gevolg van de overige bronnen stationair worden genoemd. De spanningen en stromen na de sluiting kunnen dus gezien worden als een superpositie van de stationaire spanningen en stromen (d.w.z. zonder sluiting) en de transiënte spanningen en stromen (d.w.z. veroorzaakt door de stapvormige bron). Zie fig.3.1.

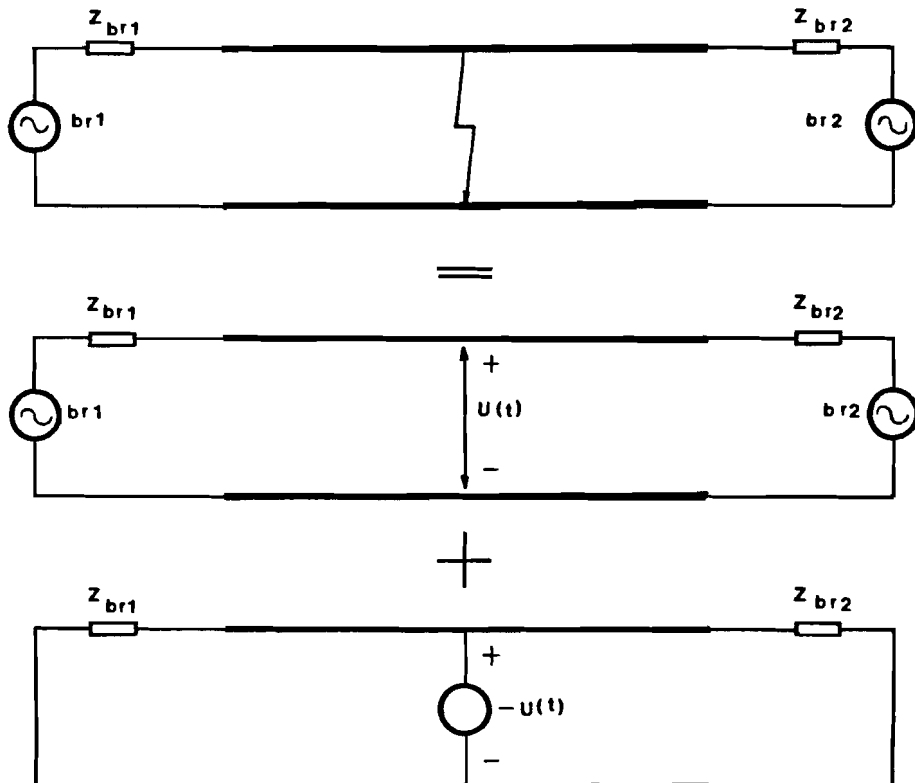


Fig.3.1 Superpositie bij een sluiting.

Hieronder zal een methode worden behandeld om transiënte spanningen en stromen in een station als gevolg van de eerste reflectie van lopende golven afkomstig van een fout op een dubbelcircuitlijn te berekenen.

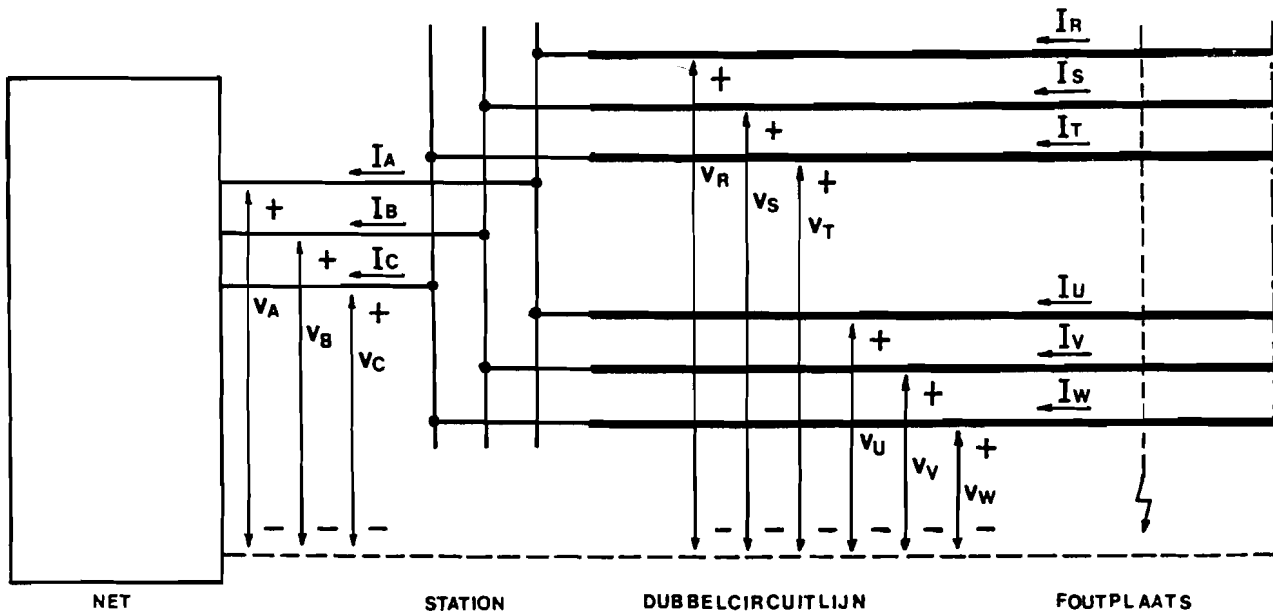


Fig.3.2 Sluiting dubbelcircuitverbinding.

Ergens op een dubbelcircuitverbinding treedt een fout op (zie fig.3.2). Door deze plotselinge toestandsverandering gaan er lopende golven lopen, welke na enige tijd bij een station aankomen. Hier zijn de beide circuits op een railsysteem geschakeld van waaruit de lopende golven verder het net ingaan. Er treden hier reflecties op. Allereerst als gevolg van de dubbelcircuitlijn naar het enkelcircuit. Vervolgens als gevolg van de overgang van het railsysteem naar het net.

We zullen de dubbelcircuitlijn verliesvrij en frequentie-onafhankelijk beschouwen en verwaarlozen de looptijdeffecten binnen het railsysteem zodat de spanningen in beide circuits van de lijn ter plaatse van het station gelijk zijn.

Er kunnen drie soorten golven optreden, te weten:

de homopolaire golf met looptijd τ_0 en golfimpedantie Z_0 ,
de dubbelcircuitgolf met looptijd $\tau_d < \tau_0$ en golfimpedantie
 Z_d en,

de bedrijfs-golf met looptijd $\tau_1 \leq \tau_d$ en golfimpedantie Z_1 .

Teneinde de verschillende golven te onderscheiden zullen we gebruik maken van de Karrenbauertransformaties. Ter plaatse van de lijn (fig.3.2) passen we om de koppeling tussen de beide circuits mee te nemen een zesfase Karrenbauertransformatie voor zowel spanning als stroom toe. Het verband tussen de fasegrootheden en componentgrootheden wordt als volgt genomen:

$$V_R = V_0 + V_d + V_1 + V_2 \quad (3.1)$$

$$V_S = V_0 + V_d - 2V_1 + V_2 \quad (3.2)$$

$$V_T = V_0 + V_d + V_1 - 2V_2 \quad (3.3)$$

$$V_U = V_0 - V_d + V_3 + V_4 \quad (3.4)$$

$$V_V = V_0 - V_d - 2V_3 + V_4 \quad (3.5)$$

$$V_W = V_0 - V_d + V_3 - 2V_4 \quad (3.6)$$

$$I_R = I_0 + I_d + I_1 + I_2 \quad (3.7)$$

$$I_S = I_0 + I_d - 2I_1 + I_2 \quad (3.8)$$

$$I_T = I_0 + I_d + I_1 - 2I_2 \quad (3.9)$$

$$I_U = I_0 - I_d + I_3 + I_4 \quad (3.10)$$

$$I_V = I_0 - I_d - 2I_3 + I_4 \quad (3.11)$$

$$I_W = I_0 - I_d + I_3 - 2I_4 \quad (3.12)$$

met V_0 resp. I_0 de homopolaire component,

V_d resp. I_d de dubbelcircuitcomponent,

V_{1-4} resp. I_{1-4} de bedrijfscomponenten.

Ter plaatse van het net (fig.3.2) passen we voor zowel de spanning als stroom een driefase Karrenbauertransformatie toe, en wel als volgt:

$$V_A = V_0^* + V_1^* + V_2^* \quad (3.13)$$

$$V_B = V_0^* - 2V_1^* + V_2^* \quad (3.14)$$

$$V_C = V_0^* + V_1^* - 2V_2^* \quad (3.15)$$

$$I_A = I_0^* + I_1^* + I_2^* \quad (3.16)$$

$$I_B = I_0^* - 2I_1^* + I_2^* \quad (3.17)$$

$$I_C = I_0^* + I_1^* - 2I_2^* \quad (3.18)$$

met V_0^* resp. I_0^* de homopolaire component,

V_{1-2}^* resp. I_{1-2}^* de bedrijfscomponenten.

We zullen de spanningen en stromen in het station berekenen na aankomst van de homopolaire golf. Dus alle golven zijn dan voor de eerste keer gereflecteerd. Er zijn dan een zes-tal golven vanuit de lijn aangekomen, te weten:

$$F_0 = V_0 + Z_0 I_0 \quad (3.19)$$

$$F_d = V_d + Z_d I_d \quad (3.20)$$

$$F_1 = V_1 + Z_1 I_1 \quad (3.21)$$

$$F_2 = V_2 + Z_1 I_2 \quad (3.22)$$

$$F_3 = V_3 + Z_1 I_3 \quad (3.23)$$

$$F_4 = V_4 + Z_1 I_4 \quad (3.24)$$

met Z_0 de homopolaire golfimpedantie van de lijn,

Z_d de dubbelcircuitgolfimpedantie van de lijn,

Z_1 de bedrijfsgolfimpedantie van de lijn.

Ter plaatse van het station gelden de volgende randvoorwaarden:

$$V_A = V_R = V_U \quad (3.25)$$

$$V_B = V_S = V_V \quad (3.26)$$

$$V_C = V_T = V_W \quad (3.27)$$

$$I_A = I_R + I_U \quad (3.28)$$

$$I_B = I_S + I_V \quad (3.29)$$

$$I_C = I_T + I_W \quad (3.30)$$

Verder geldt als gevolg van de aanwezigheid van het net:

$$V_0^* = Z_0^* I_0^* \quad (3.31)$$

$$V_1^* = Z_1^* I_1^* \quad (3.32)$$

$$V_2^* = Z_1^* I_2^* \quad (3.33)$$

met Z_0^* de homopolaire impedantie van het net,

met Z_1^* de bedrijfsimpedantie van het net.

Transformatie van (3.25) t/m (3.30) naar het componentdomein leidt tot de volgende formules:

$$V_0 = V_0^* \quad (3.34)$$

$$V_d = 0 \quad (3.35)$$

$$V_1 = V_3 = V_1^* \quad (3.36)$$

$$V_2 = V_4 = V_2^* \quad (3.37)$$

$$2I_0 = I_0^* \quad (3.38)$$

$$I_1 + I_3 = I_1^* \quad (3.39)$$

$$I_2 + I_4 = I_2^* \quad (3.40)$$

Combinatie van bovenstaande formules geeft de volgende uitdrukkingen voor de componentspanningen en -stromen, ter plaatse van het station, als functie van de binnenkomende golven:

$$V_0^* = \frac{2Z_0^*}{Z_0 + 2Z_0^*} F_0 \quad (3.41)$$

$$V_1^* = \frac{Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} (F_1 + F_3) \quad (3.42)$$

$$V_2^* = \frac{Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} (F_2 + F_4) \quad (3.43)$$

$$I_0 = \frac{F_0}{Z_0 + 2Z_0^*} \quad (3.44)$$

$$I_d = \frac{F_d}{Z_d} \quad (3.45)$$

$$I_1 = \frac{Z_1 + Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_1 - \frac{Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_3 \quad (3.46)$$

$$I_2 = \frac{Z_1 + Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_2 - \frac{Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_4 \quad (3.47)$$

$$I_3 = -\frac{Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_1 + \frac{Z_1 + Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_3 \quad (3.48)$$

$$I_4 = -\frac{Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_2 + \frac{Z_1 + Z_1^*}{Z_1 (Z_1 + 2Z_1^*)} F_4 \quad (3.49)$$

Het bovenstaande zullen we gaan toepassen op de sluiting tussen R-fase en aarde.

Op de foutplaats van deze sluiting gelden de volgende vergelijkingen:

$$V_R = V_0 + V_d + V_1 + V_2 = E \quad (3.50)$$

$$I_S = I_0 + I_d - 2I_1 + I_2 = 0 \quad (3.51)$$

$$I_T = I_0 + I_d + I_1 - 2I_2 = 0 \quad (3.52)$$

$$I_U = I_0 - I_d + I_3 + I_4 = 0 \quad (3.53)$$

$$I_V = I_0 - I_d - 2I_3 + I_4 = 0 \quad (3.54)$$

$$I_W = I_0 - I_d + I_3 - 2I_4 = 0 \quad (3.55)$$

met E de fictieve stapvormige spanning, welke op het moment van de sluiting wordt ingeschakeld.

Zolang er geen reflecties arriveren op de foutplaats vinden we met behulp van:

$$V_0 = Z_0 I_0 \quad (3.56)$$

$$V_d = Z_d I_d \quad (3.57)$$

$$V_1 = Z_1 I_1 \quad (3.58)$$

$$V_2 = Z_1 I_2 \quad (3.59)$$

$$V_3 = Z_1 I_3 \quad (3.60)$$

$$V_4 = Z_1 I_4 \quad (3.61)$$

voor de verschillende golven van deze sluiting:

$$F_0 = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} E \quad (3.62)$$

$$F_d = \frac{2Z_d}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} E \quad (3.63)$$

$$F_1 = \frac{4Z_1}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} E \quad (3.64)$$

$$F_2 = F_1 \quad (3.65)$$

$$F_3 = 0 \quad (3.66)$$

$$F_4 = F_3 \quad (3.67)$$

Met de formules (3.41) t/m (3.49) vinden we de component-grootheden behorende bij deze sluiting, welke we met de formules (3.7) t/m (3.15) omzetten in fasegrootheden. We krijgen dan de volgende uitdrukkingen voor de transiënte signalen in het station:

$$V_A = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{4Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} + \frac{2Z_0 Z_0^*}{Z_0 + 2Z_0^*} \right] \quad (3.68)$$

$$V_B = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-2Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} + \frac{2Z_0 Z_0^*}{Z_0 + 2Z_0^*} \right] \quad (3.69)$$

$$V_C = V_B \quad (3.70)$$

$$I_R = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{5Z_1 + 6Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_0^*} \right] \quad (3.71)$$

$$I_S = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-Z_1}{Z_1 + 2Z_1^*} + \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_0^*} \right] \quad (3.72)$$

$$I_T = I_S \quad (3.73)$$

$$I_U = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-Z_1 - 6Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_0^*} \right] \quad (3.74)$$

$$I_V = I_S \quad (3.75)$$

$$I_W = I_S \quad (3.76)$$

Uit deze bovenstaande uitdrukkingen blijkt dat na aankomst van de homopolaire golf de transiënte spanningen in het station op de klemmen B en C aan elkaar gelijk zijn. Evenzo zijn dan de transiënte stromen in de S-fase, T-fase, V-fase en W-fase aan elkaar gelijk. In de komende paragrafen zullen deze uitdrukkingen worden gebruikt om de waargenomen verschijnselen te verklaren.

3.2 EMTP.

3.2.1 Principe.

Het Electromagnetic Transients Program (EMTP) is een computerprogramma dat gespecialiseerd is in het berekenen van transiënte verschijnselen in hoogspanningsnetten. De gebruiker moet daartoe aan EMTP duidelijk maken hoe de configuratie van zijn te onderzoeken net is. Hij geeft daartoe alle in zijn net voorkomende knooppunten een naam en specificeert vervolgens alle takken in het netwerk door de namen van begin- en eindpunt te vermelden en op te geven welke type tak het betreft. Nadat de gebruiker alle takken heeft gespecificeerd zal EMTP in staat zijn het gewenste netwerk te construeren en kan de simulatie aanvangen.

Meer informatie over EMTP staat in literatuur [1].

3.2.2 Simulatie.

Met EMTP is het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979 (fig.2.1) nagebootst.

Uitgezonderd de verbinding Maasbracht-Dodewaard is elke transmissielijn als lijn gemodelleerd. Daarbij is gebruikt gemaakt van de JMARTI SETUP voor volledig getransponeerde lijnen, met uitzondering van de lijn Krimpen-Diemen waar de lijn per circuit is getransponeerd. De transmissielijn Maasbracht-Dodewaard is gesimuleerd als een invoeding in Maasbracht.

De invoeding op elk station is gerepresenteerd door een vervangend netwerk met homopolaire- en bedrijfsimpedanties die afgestemd zijn op de aldaar geldende combinatie van invoedingen (fig.3.3).

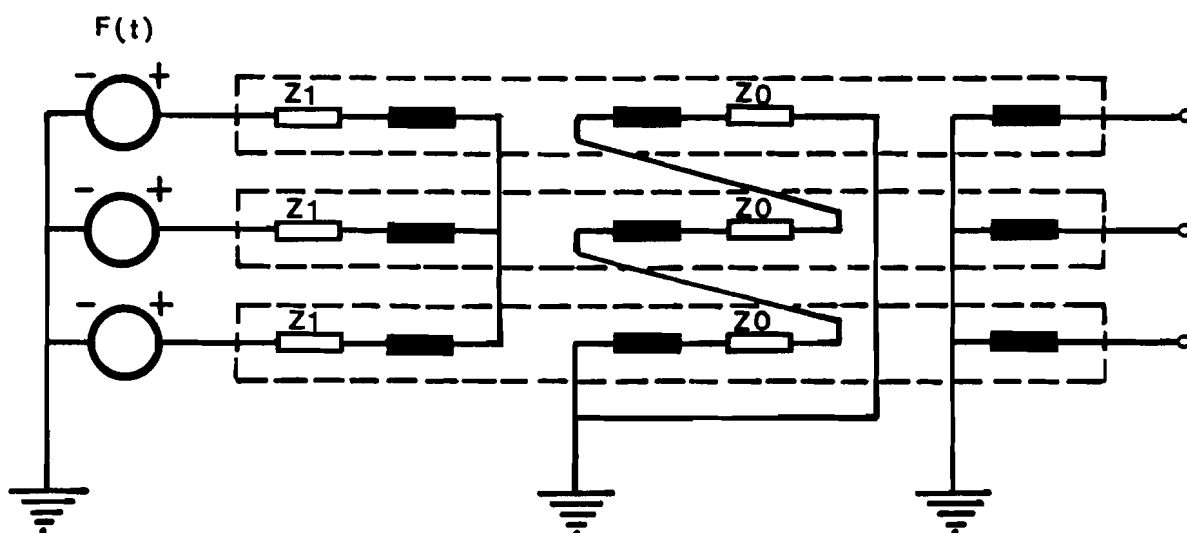


Fig.3.3 EMTP-model voor invoeding.

De symmetrische fasebron in fig.3.3 heeft de eenfasige bronfunctie (type-14 element):

$$F(t) = 319 \text{ kV} \cos(100\pi t + \varphi) \quad (3.77)$$

met achtereenvolgens φ gelijk aan 0° , -120° , -240°

De homopolaire impedantie en de bedrijfsimpedantie zijn beiden als geconcentreerde R-L serieschakeling uitgevoerd. De waarden van deze impedanties bij 50 Hz, voor de verschillende invoedingen zijn te vinden in tabel 1.

Invoedingen	Homopolair		Bedrijf	
	$R_0 (\Omega)$	$X_0 (\Omega)$	$R_1 (\Omega)$	$X_1 (\Omega)$
Ens (220 kV)	6.75	67.50	5.63	56.30
Diemen (150 kV)	6.10	61.00	6.72	67.20
Krimpen (150 kV)	6.10	61.00	8.34	83.40
Crayestein (150 kV)	6.10	61.00	121.00	1210.00
Maasvl. (150 kV en gen.)	2.12	21.20	8.07	80.70
Geertr. (150 kV en gen.)	2.54	25.40	5.15	51.50
Eindhoven (150 kV)	6.10	61.00	16.13	161.30
Maasbracht (150 kV)	4.07	40.70	8.62	86.20
Maasbracht (Dodewaard) *	383.18	0.00	131.29	0.00
Maasbracht (Belgie) *	383.18	0.00	131.29	0.00
Maasbracht (Duitsland) *	383.18	0.00	131.29	0.00

*:modulus homopolaire golfimpedantie resp. bedrijfsimpedantie lijn

Tabel 1 Bronimpedanties invoedingen EMTP.

Op dit EMTP-netmodel zijn een aantal simulaties uitgevoerd van sluitingen op de dubbelcircuitlijn Krimpen-Diemen.

Achtereenvolgens zijn uitgevoerd:

- 1)sluiting halverwege Krimpen-Diemen,tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase,
- 2)sluiting halverwege Krimpen-Diemen,tussen R-fase en T-fase op 30° na spanningsmaximum R-fase,
- 3)sluiting halverwege Krimpen-Diemen,tussen R-fase,T-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase,
- 4)sluiting halverwege Krimpen-Diemen,tussen R-fase en W-fase op 30° na spanningsmaximum R-fase,
- 5)sluiting op twee derde Krimpen-Diemen,tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase,
- 6)sluiting op twee derde Krimpen-Diemen,tussen R-fase en T-fase op 30° na spanningsmaximum R-fase,

- 7)sluiting op twee derde Krimpen-Diemen, tussen R-fase, T-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase,
 8)sluiting op twee derde Krimpen-Diemen, tussen R-fase en W-fase op 30° na spanningsmaximum R-fase.

De sluitingen op spanningsmaximum R-fase resp. 30° na spanningsmaximum R-fase worden gesimuleerd door de sluitingen te laten plaatsvinden op het moment dat de fasehoek van de R-fase-bronnen 0° resp. 30° bedraagt. Van elke sluiting zijn twee runs uitgevoerd: een snelle run met een tijdstap van één microseconde gedurende twee milliseconde en een langzame run met een tijdstap van vijf microseconde gedurende twintig milliseconde. Van elke run zijn de volgende grootheden beschikbaar:

- a)spanningen op foutplaats,
- b)spanningen in station Krimpen,
- c)spanningen in station Diemen,
- d)spanningen in station Ens,
- e)spanningen in station Geertruidenberg,
- f)spanningen in station Crayestein,
- g)stromen op foutplaats,
- h)stromen in station Krimpen richting Diemen,
- i)stromen in station Diemen richting Krimpen.

Enige plots van de sluiting halverwege Krimpen-Diemen, tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase zijn gegeven in de figuren 3.4 t/m 3.6. Verklaring van de in deze figuren gebruikte afkortingen:

VRLSEMTP=spanning R-fase op foutplaats, EMTP-simulatie,
 VRSKEMTP=spanning R-fase in station Krimpen, EMTP-simulatie,
 VSSKEMTP=spanning S-fase in station Krimpen, EMTP-simulatie,
 VTSKEMTP=spanning T-fase in station Krimpen, EMTP-simulatie,
 VRSDEMTP=spanning R-fase in station Diemen, EMTP-simulatie,
 enz.

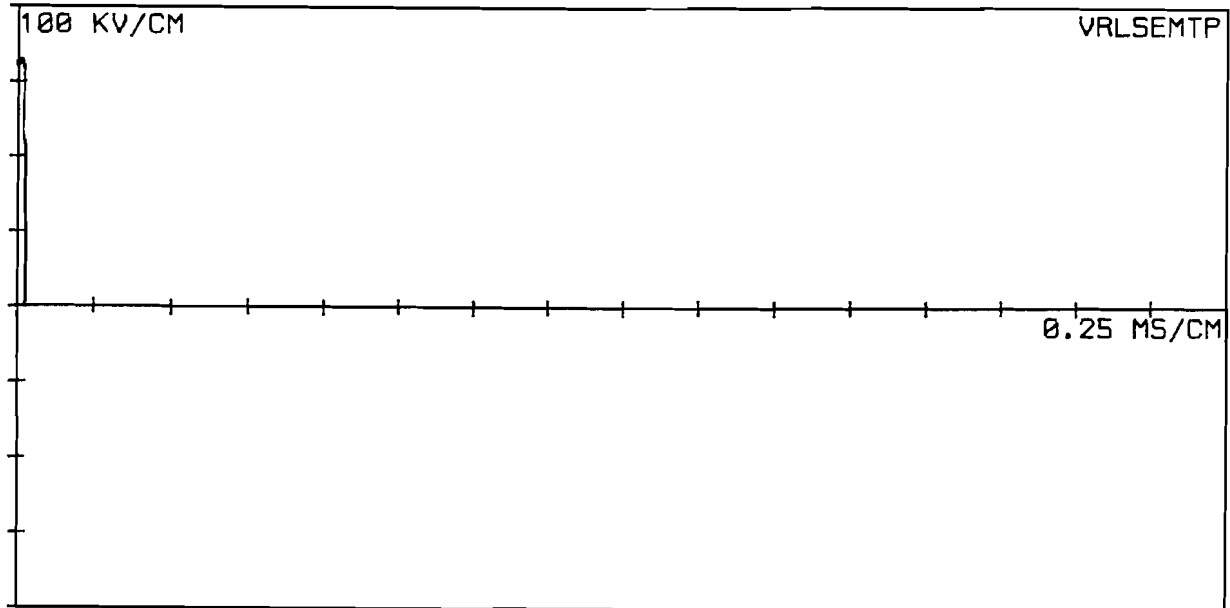
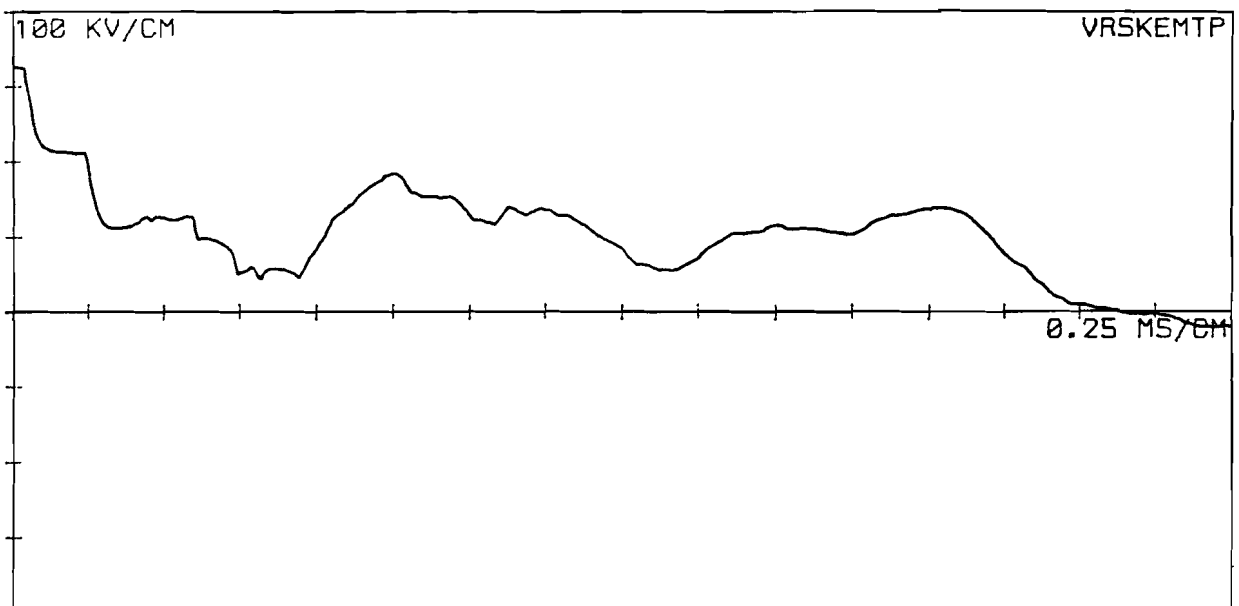


Fig.3.4 Spanning R-fase op foutplaats, EMTF-simulatie sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase.



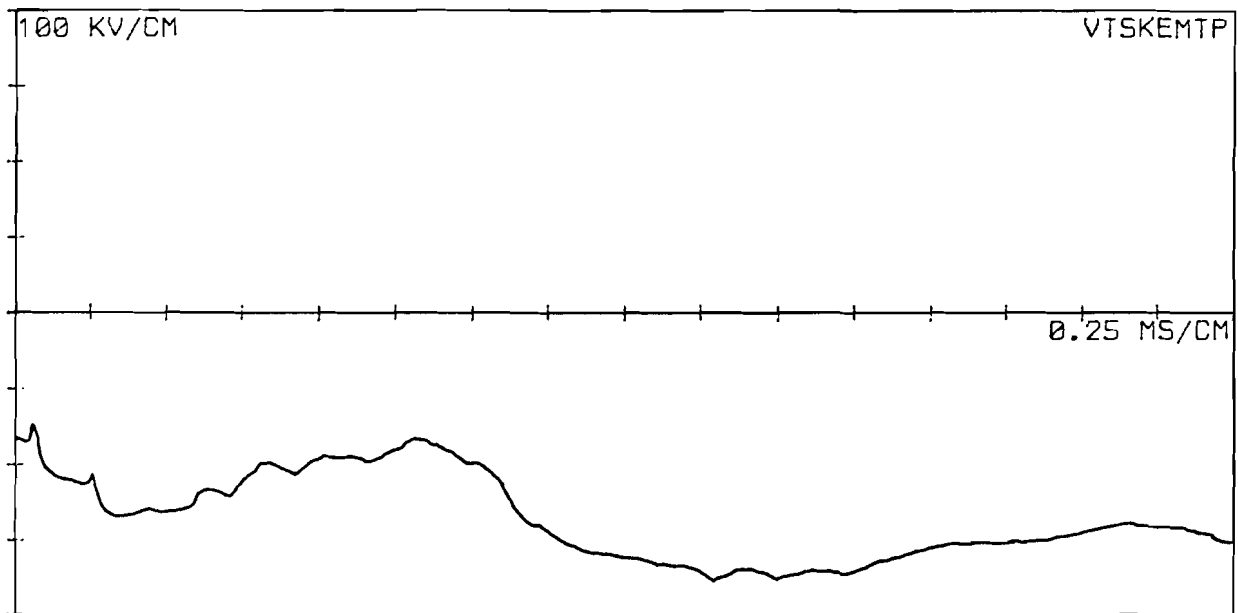
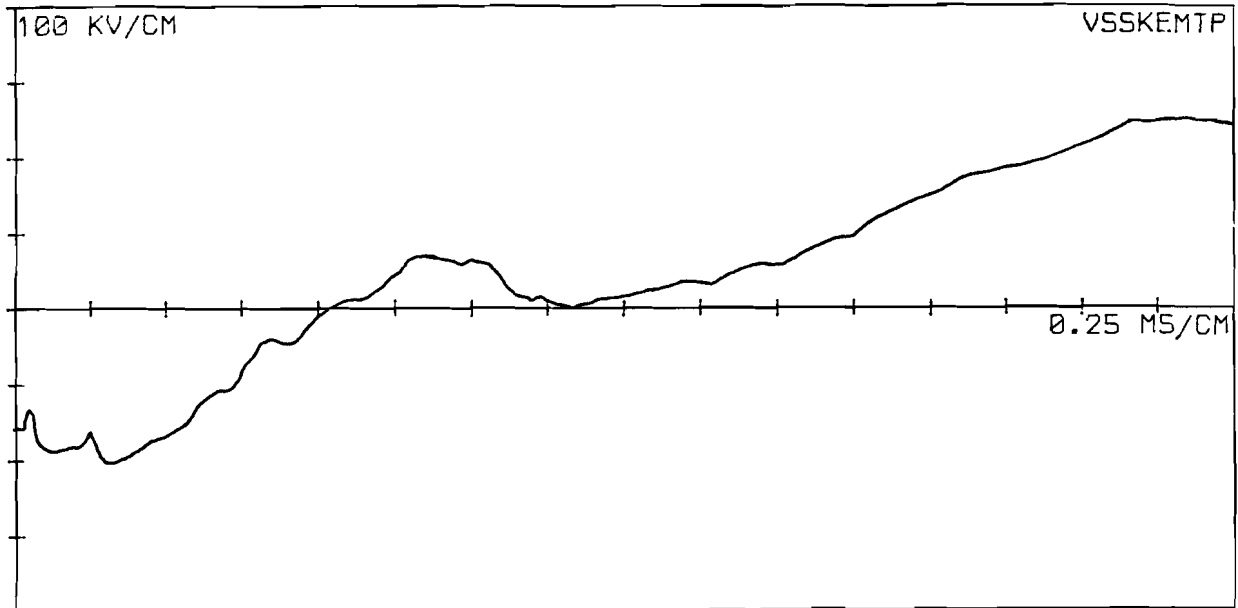
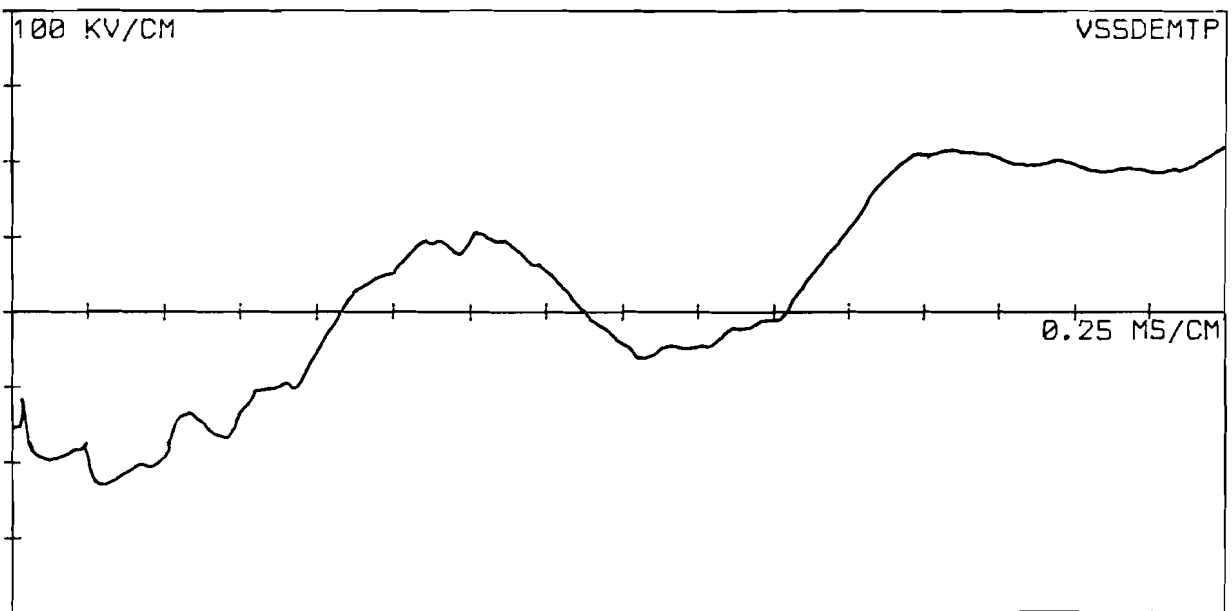
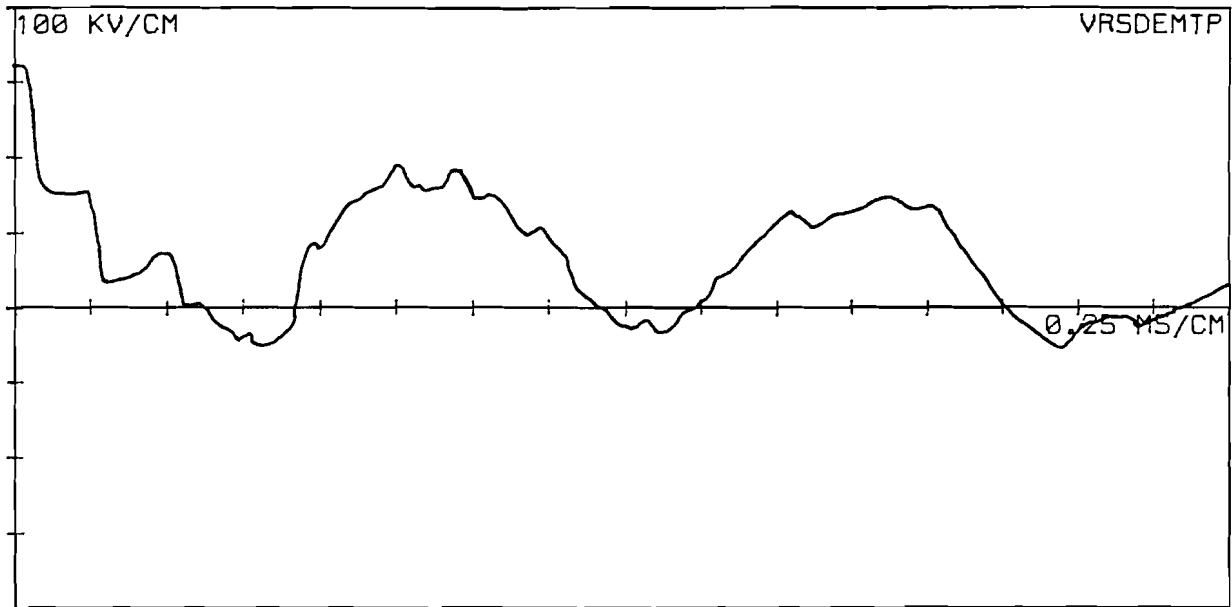


Fig.3.5 Spanningen in station Krimpen,EMTP-simulatie sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase.



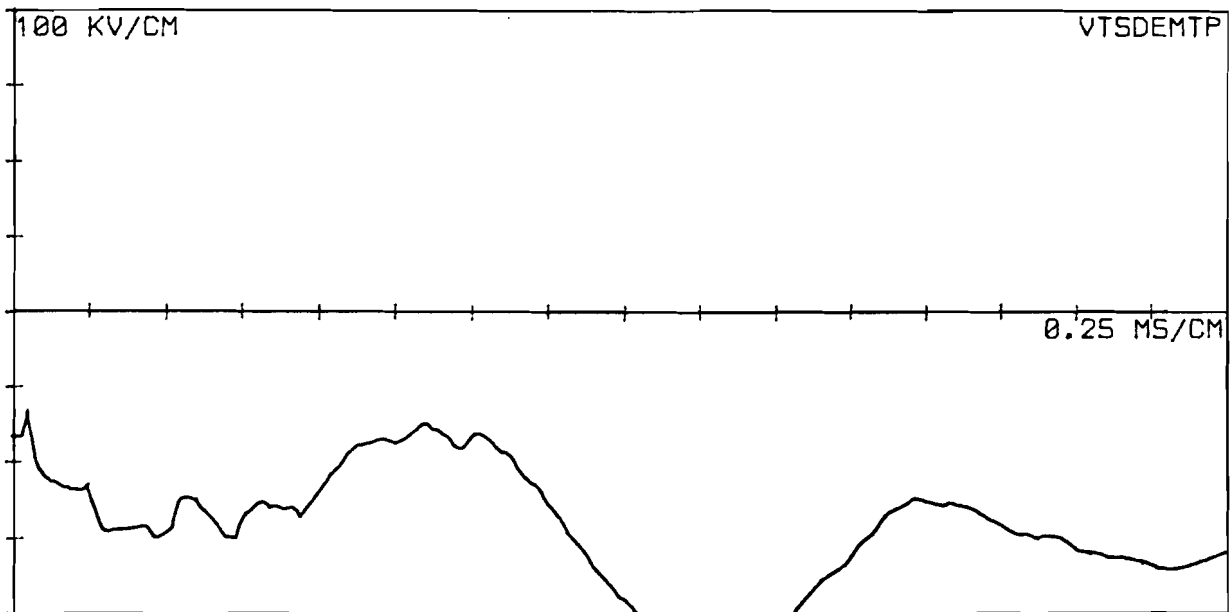


Fig.3.6 Spanningen in station Diemen,EMTP-simulatie sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase.

In de plot VRSKEMTP (fig.3.5) resp. plot VRSDEMTP (fig.3.6) herkennen we duidelijk de spanningssprong als gevolg van de eerste reflectie van de lopende golven afkomstig van de sluiting (zie paragraaf 3.1). Als we de 150 kV invoedingen en de stationsapparatuur in de beide stations verwaarlozen hebben Z_0^* en Z_1^* van elk station alleen betrekking op de lijnen die vanuit de stations verder gaan. Voor Krimpen zijn dit de lijn Krimpen-Geertruidenberg en de lijn Krimpen-Crayestein en voor Diemen de lijn Diemen-Ens. Als we dan voor Krimpen uitgaan van de volgende waarden:

$$Z_0 \text{ Kr-Gtr} = 323.00 \, \Omega,$$

$$Z_1 \text{ Kr-Gtr} = 130.70 \, \Omega$$

$$Z_0 \text{ Kr-Crst} = 318.90 \, \Omega$$

$$Z_1 \text{ Kr-Crst} = 117.10 \, \Omega$$

$$Z_{0 \text{ Kr-Dm}} = 632.70 \ \Omega$$

$$Z_{1 \text{ Kr-Dm}} = 260.30 \ \Omega$$

$$Z_{d \text{ Kr-Dm}} = 389.60 \ \Omega$$

$$E = -329 \text{ kV}$$

dan volgt uit de formule (3.68) voor de in Krimpen optredende spanningssprong op de R-fase -121 kV. Evenzo voor Diemen:

$$Z_{0 \text{ Dm-Ens}} = 323.00 \ \Omega,$$

$$Z_{1 \text{ Dm-Ens}} = 130.70 \ \Omega,$$

$$Z_{0 \text{ Kr-Dm}} = 632.70 \ \Omega,$$

$$Z_{1 \text{ Kr-Dm}} = 260.30 \ \Omega,$$

$$Z_{d \text{ Kr-Dm}} = 389.60 \ \Omega,$$

$$E = -329 \text{ kV}$$

wordt de spanningssprong -185 kV. Deze twee berekende waarden komen vrij redelijk overeen met middels EMTP verkregen waarden -118 kV en -170 kV (zie fig.3.5 en 3.6).

Een dergelijke analyse toegepast op de overige grootheden in beide stations bij deze sluiting laat eveneens een dergelijk overeenkomst zien.

3.3 TNA.

3.3.1 Principe.

Een Transiënt Network Analyzer (TNA) is een analoog, computergestuurd netwerk, waarmee allerlei hoogspanningsnet simulaties met registratie mogelijk zijn. In fig.3.7 is het blokdiagram van de in de vakgroep EG-2 aanwezige Transiënt Network Analyzer weergegeven.

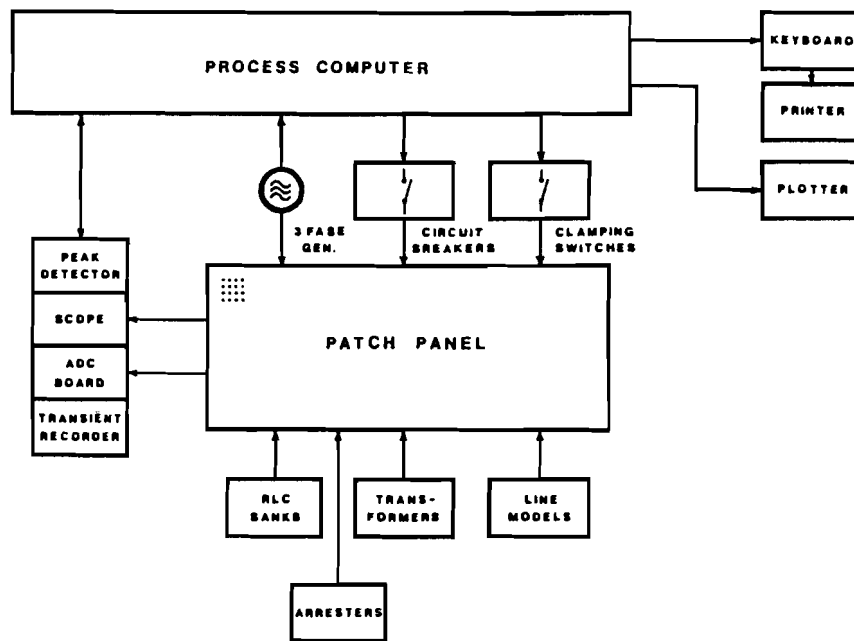


Fig.3.7 Blokdiagram Transiënt Network Analyzer (vakgroep EG-2).

Hoogspanningslijnen worden in deze TNA voorgesteld door z.g. π -secties. Een π -sectie is een samenstelling van diverse spoelen, condensatoren en weerstanden, waarmee tot een bepaalde frequentie (afhankelijk van de TNA-frequentie b.v. $f_{TNA} = 80 \text{ Hz}$ tot $\approx 11 \text{ kHz}$) dezelfde karakteristieke elektrische eigenschappen worden verkregen als de dubbelcircuitlijnen van het Nederlandse 380 kV net (fig.2.1). Er zijn twee verschillende π -secties beschikbaar n.l. enkelcircuit π -secties en dubbelcircuit π -secties.

Enkelcircuit π -secties gaan uit van een mastconfiguratie met twee driefasecircuits, waarvan een circuit geaard is en het andere circuit in bedrijf.

Dubbelcircuit π -secties gaan uit van twee circuits op een mast.

Zowel elke enkelcircuit π -sectie als elke dubbelcircuit π -sectie representeert een lijnstuk waarvan de lengte afhankelijk van f_{TNA} is (lengte evenredig met f_{TNA} , 1.50 km bij 50 Hz).

Van de in de fig.3.7 aangegeven circuitschakelaars zijn er drie met de hand te bedienen en drie met de computer te sturen. De computergestuurde circuitschakelaars bezitten uitgebreide functies om een zo getrouw mogelijke benadering van een vermogensschakelaar te kunnen realiseren.

De clampingschakelaars (fig.3.7) dienen er voor om aan het begin van een testcyclus de lijnen te laden of te ontladen (initialisering).

De computergestuurde circuitschakelaars en de clampingschakelaars worden via het programma TNA bestuurt.

De TNA beschikt over twee symmetrische driefasegeneratoren waarvan er een een zwevend sterpunt en de andere een geaard sterpunt heeft.

Verder beschikt de TNA over enige meetsystemen zoals een topspanningsmeetsysteem, een oscilloscoop, een 16-kanaals differentieel Analooq/Digitaal Converter (ADC) en een transiëntrecorder (TRM 4000).

Met eerst genoemde is het mogelijk om van 6 meetpunten 100 waarden van piekspanningen te registreren en in een geheugen op te slaan.

Met de 16-kanaals ADC en de transiëntrecorder kunnen TNA-signalen worden geregistreerd. Beiden worden bestuurd door het programma TRANST. De transiëntrecorder kan simultaan drie signalen opslaan, de 16-kanaals ADC slaat alleen het gevraagde kanaal op. Met het programma EPSON kunnen de geregistreerde signalen geplot worden op de EPSON HI 80 plotter.

Op het patch panel (matrixbord met 120*40 contactpunten) worden de verschillende componenten met elkaar verbonden tot de gewenste configuratie.

Voor een volledige beschrijving van de in de vakgroep EG-2 aanwezige Transiënt Network Analyzer en de wijze waarop men deze bedient, wordt verwezen naar " Handleiding voor de Transient Network Analyzer ", geschreven door J.W.C.C. Herps [2].

3.3.2 Simulatie.

Op de TNA is het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979 (fig.2.1) nagebootst. In tegenstelling tot de EMTP-simulatie (par.3.2.2) waar iedere lijn (uitgezonderd Maasbracht-Dodewaard) is gemodelleerd als lijn is nu enkel als lijn gemodelleerd de dubbelcircuitlijn Krimpen-Diemen. Deze verbinding is gerepresenteerd door een serieschakeling van 24 dubbelcircuit π -secties. Dat er maar één lijn is gemodelleerd heeft te maken met het beperkt aantal aanwezige dubbelcircuit π -secties. De rest van Nederlandse 380 kV net, zoals weergegeven in fig.2.1, is gesimuleerd door vervangende driefasenetwerken aan de klemmen van lijn Krimpen-Diemen. Deze netwerken dienen, over een zeker frequentiegebied, dezelfde elektrische eigenschappen te bezitten als het netdeel dat zij representeren. In het volgende zullen een drietal versies worden besproken en de resultaten van de foutsimulaties worden gepresenteerd. Dit alles met het doel tot een correcte modellering van het net te komen. Hiervoor zullen we de EMTP-resultaten zo goed mogelijk proberen te benaderen.

3.3.2.1 Simulatie I.

Om te komen tot vervangende driefasenetwerken aan de klemmen van de lijn Krimpen-Diemen moeten we allereerst het gedrag van de homopolaire impedantie en bedrijfsimpedantie van de beide deelnetten bepalen. Beschikbaar was het computerprogramma INGANGSIMPEDANTIE dat, naar het theorema van

Thévenin, de homopolaire impedantie en de bedrijfsimpedantie van een deelnet als functie van de frequentie berekent. Hiervoor moeten netconfiguratie, gegevens van verbindingen tussen de stations (knooppunten) en gegevens van de invoeringen op die stations ingevoerd worden. Door W.H. Geelen [3] zijn plots gemaakt van de modulus van de homopolaire impedantie en de modulus van de bedrijfsimpedantie van de beide deelnetten grenzend aan de lijn Krimpen-Diemen. Deze plots zijn gegeven in de figuren 3.8 t/m 3.11.

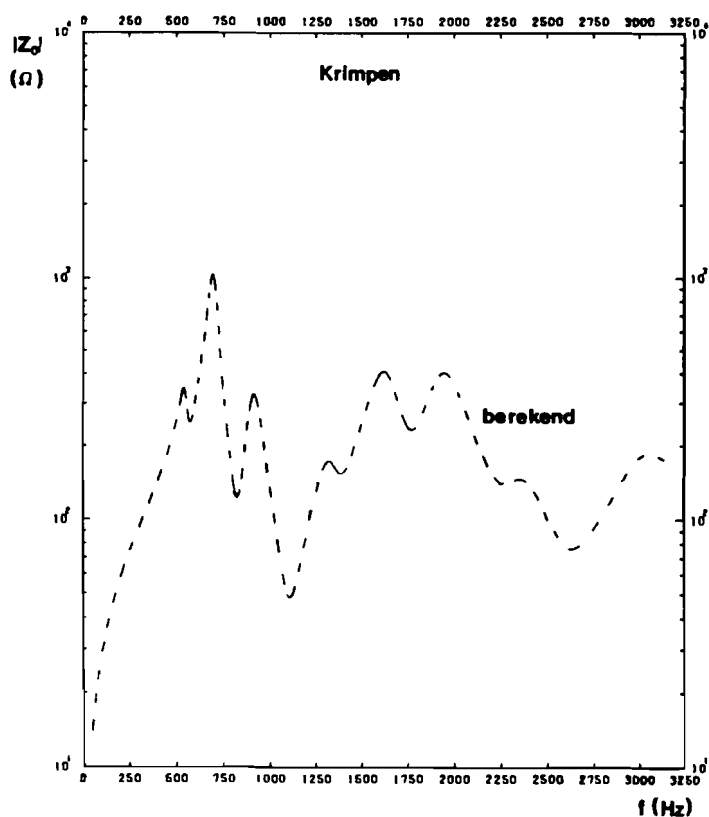


Fig.3.8 Modulus homopolaire impedantie deelnet Krimpen.

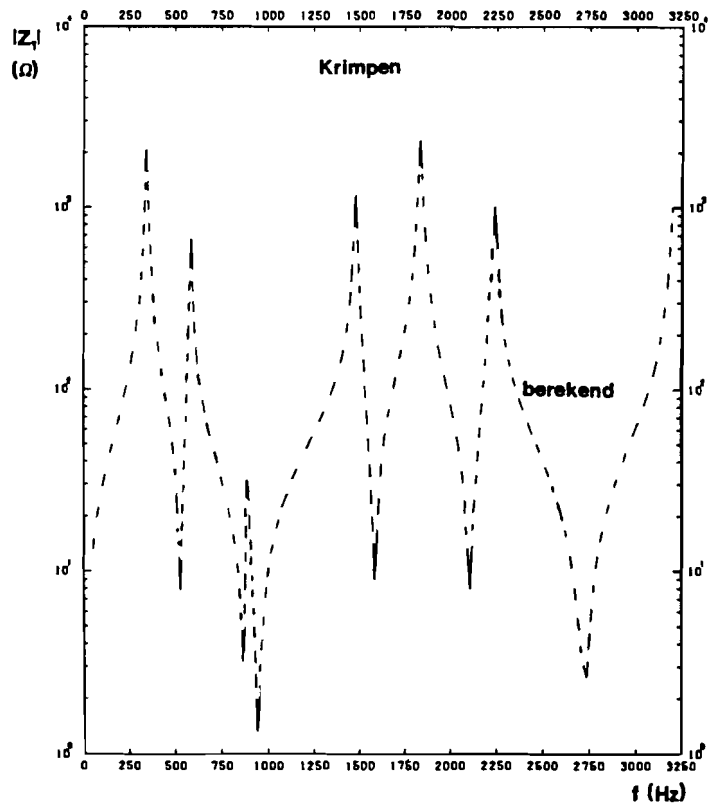


Fig.3.9 Modulus bedrijfsimpedantie deelnet Krimpen.

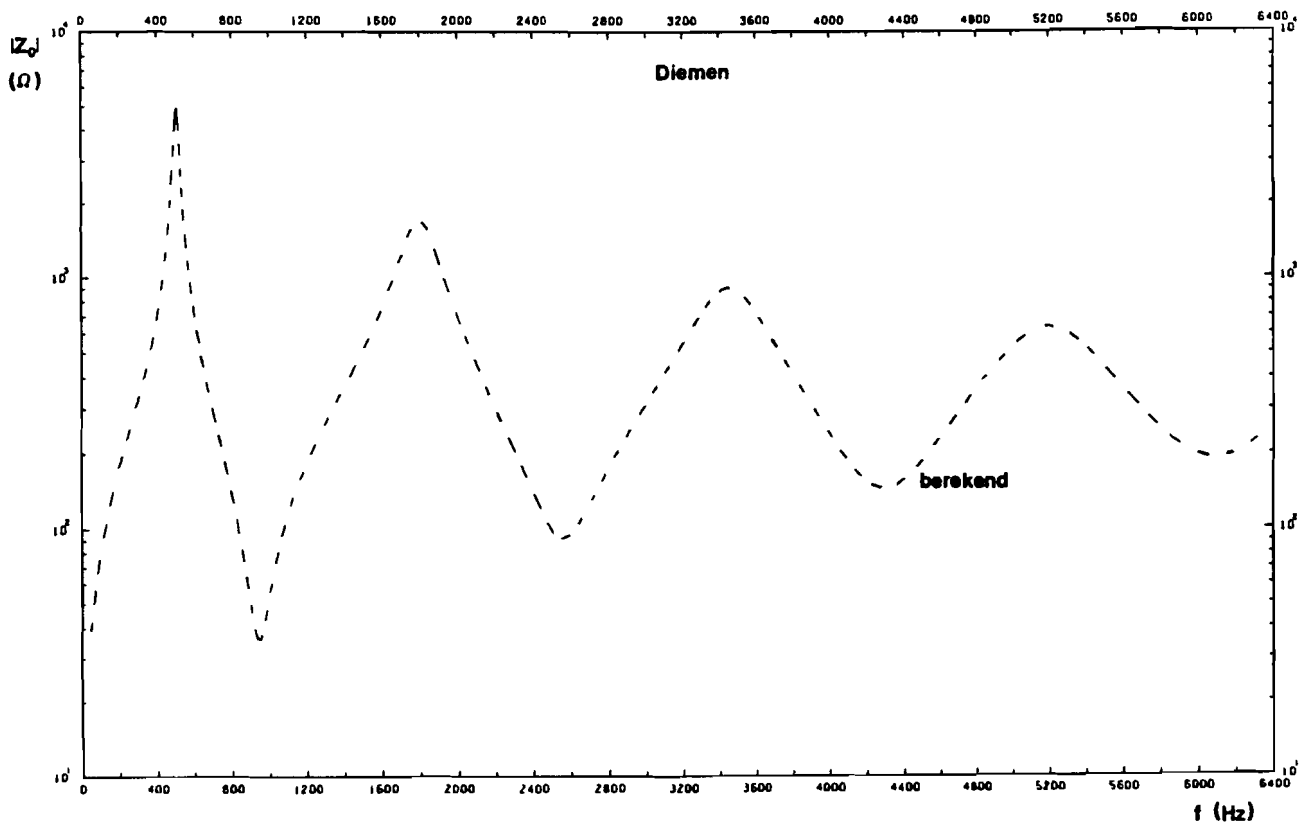


Fig.3.10 Modulus homopolaire impedantie deelnet Diemen.

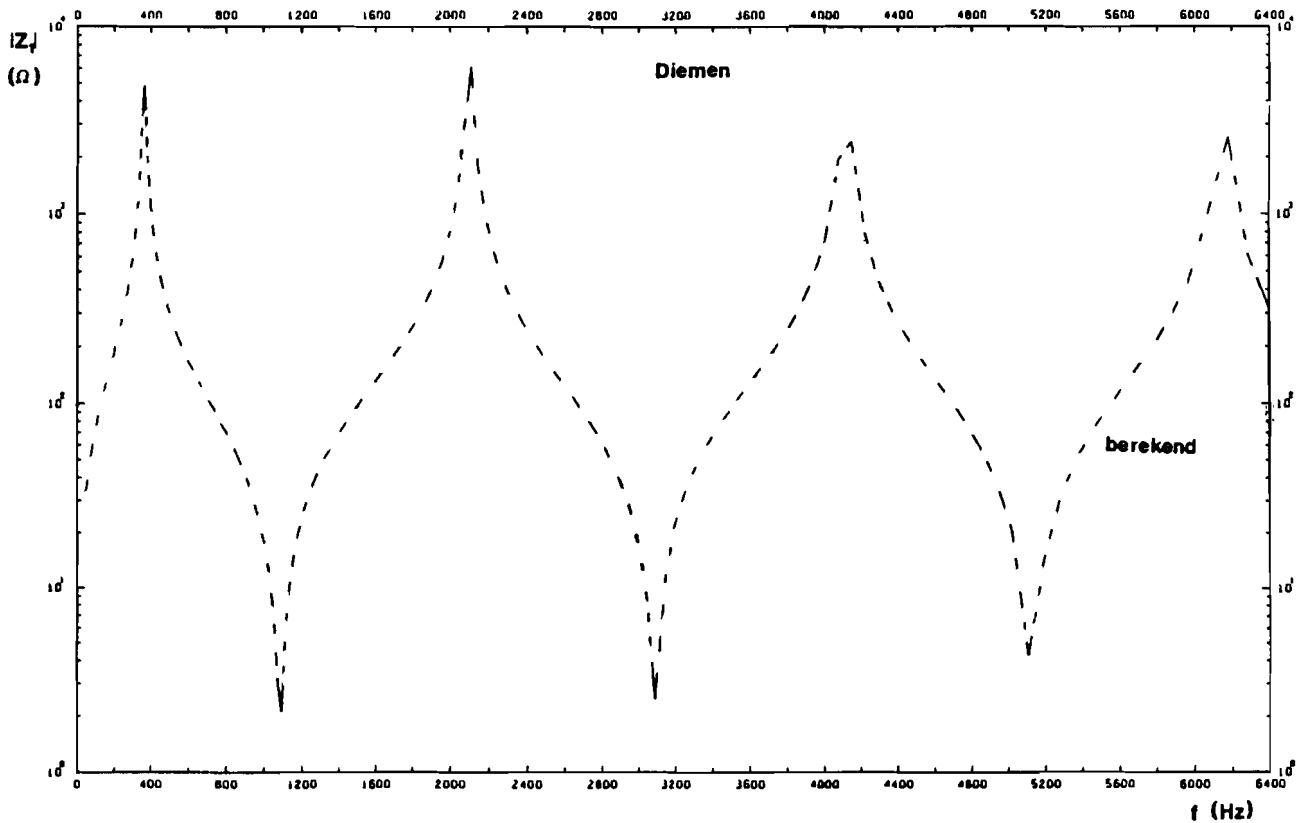


Fig.3.11 Modulus bedrijfsimpedantie deelnet Diemen.

Voor een volledige beschrijving van het programma INGANGS-IMPEDANTIE (het berekenen van het gedrag van de homopolaire impedantie en de bedrijfsimpedantie van een deelnet), wordt verwezen naar " De representatie van meervoudige invoedingen in een transiënt netmodel ", geschreven door W.H.Geelen [3].

Het realiseren van schakelingen die een verloop van de modulus van de impedantie hebben zoals afgebeeld in bovenstaande figuren, is mogelijk met de zogenaamde Foster-synthese. Deze methode behelst het in serie schakelen van parallelresonantiekringen (Foster-I netwerk), danwel het parallelschakelen van serieresonantiekringen (Foster-II netwerk). Zie fig.3.12 en fig.3.13.

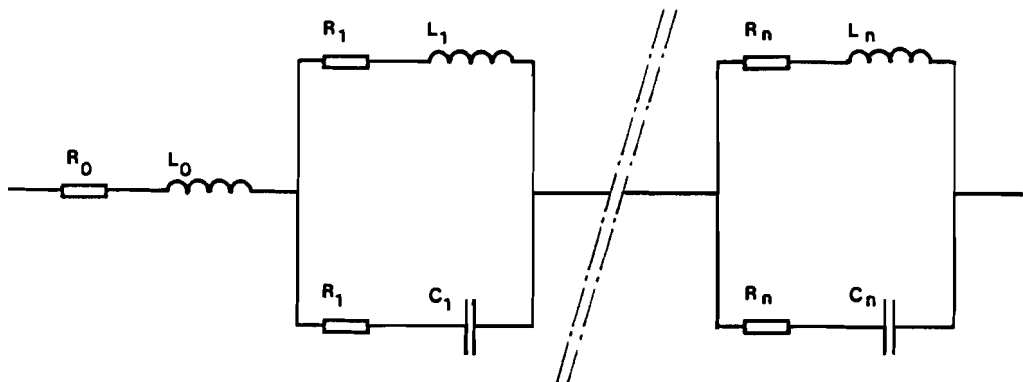


Fig.3.12 Foster-I netwerk.

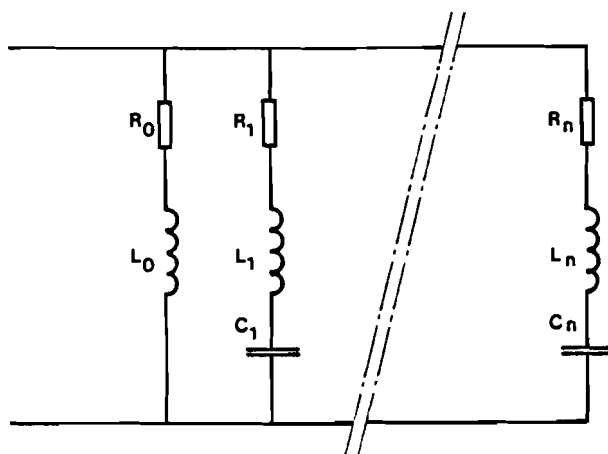


Fig.3.13 Foster-II netwerk.

De Foster-I synthese levert een netwerk op dat afgestemd is op de polen van de impedantie en de Foster-II synthese levert een netwerk dat op de nulpunten van de impedantie is afgestemd. Beide Foster syntheses resulteren in een zelfde polen-nulpuntenbeeld, dus identiek modulusverloop als functie van de frequentie. Het aantal benodigde RLC-kringen wordt bepaald door de frequentie tot waar men een simulatie wenst van het oorspronkelijk netwerk. De R, L en C-waarden van de kringen kunnen berekend worden met het computerprogramma VERVANGEND NETWERK. Van elke plot gegeven in fig.3.10 t/m fig.3.12 zijn door W.H. Geelen de R, L en C-waarden bepaald om een simulatie tot de frequentiegrens van 3200 Hz te verwezenlijken. Voor gebruik op de TNA moet

op de berekende L en C-waarden een frequentietransformatie worden toegepast. Deze transformatie houdt in het vermenigvuldigen van alle L en C-waarden met de factor $50/f_{TNA}$.

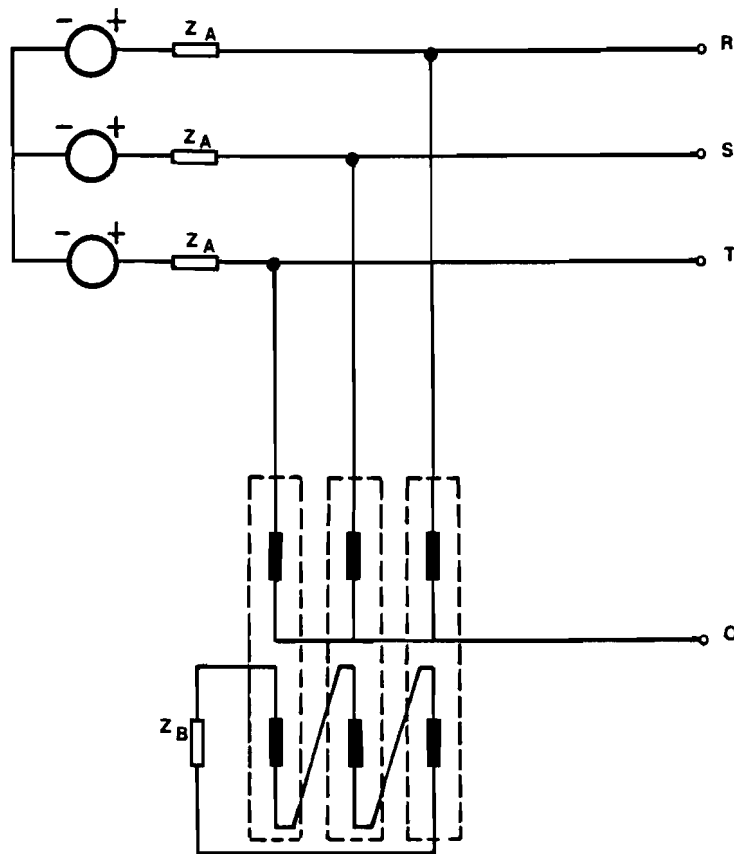


Fig.3.14 Théveninnetwerk.

Het representeren van een deelnet op de TNA door middel van Fosterkringen vereist een schakeling waarin de bedrijfs- en homopolaire netwerken elkaar niet beïnvloeden. Dit is te realiseren met de schakeling van fig.3.14, indien althans de transformatoren een ideaal gedrag zouden vertonen. Aangezien deze in werkelijkheid eindige nullast- en kortsluitimpedanties bezitten is enige correctie noodzakelijk.

De nullastimpedanties van de transformatoren vormen een bedrijfsimpedantie voor het netwerk. Derhalve dient Z_A zodanig te worden gemodificeerd dat de parallelschakeling van Z_A en Z_n (nullastimpedantie per fase) overeenkomt met de gewenste

$Z_1(f)$. Om deze reden moet Z_A uitgevoerd worden als een Foster-II netwerk.

De homopolaire impedantie wordt gevormd door de serieschakeling van de kortsluitimpedantie Z_k van de transformatoren en de naar primair getransformeerde waarde van $Z_B/3$. Om Z_k in mindering te kunnen brengen moet Z_B als een Foster-I netwerk worden uitgevoerd.

In de tabellen 2 t/m 5 zijn de betreffende R, L en C-waarden van het homopolair netwerk en het bedrijfsnetwerk gegeven, gebaseerd op de plots in fig.3.8 t/m fig.3.11 (frequentiegrens 3200 Hz). Hierbij is uitgegaan van $f_{TNA} = 80$ Hz, en 1:1 transformatoren met kortsluitweerstand = 3.3Ω , kortsluitinductiviteit = 2.6 mH, nullastweerstand = 130Ω , en nullastinductiviteit = 1.53 H.

Kring	L (mH)	C (nF)	R (Ω)
0	8.91		
1	41.63	491.67	14.19
2	8.16	1485.42	2.78
3	16.22	199.17	34.50

Tabel 2 R, L en C-waarden voor simulatie van homopolaire impedantie deelnet Krimpen volgens fig.3.8 tot 3200 Hz.

Kring	L (mH)	C (nF)	R (Ω)
0	26.26		1.18
1	75.00	471.88	7.80
2	7.26	1606.25	1.00
3	49.56	79.38	8.80
4	32.00	69.38	7.90
5	3.85	346.25	2.00

Tabel 3 R, L en C-waarden voor simulatie van bedrijfsimpedantie deelnet Krimpen volgens fig.3.9 tot 3200 Hz.

Kring	L (mH)	C (nF)	R (Ω)
0	15.10		
1	174.19	220.83	26.28
2	30.00	101.25	28.29
3	6.73	122.50	10.20

Tabel 4 R,L en C-waarden voor simulatie van homopolaire impedantie deelnet Diemen volgens fig.3.10 tot 3200 Hz.

Kring	L (mH)	C (nF)	R (Ω)
0	69.25		2.92
1	10.06	831.25	1.15
2	5.78	180.63	2.30

Tabel 5 R,L en C-waarden voor simulatie van bedrijfsimpedantie deelnet Diemen volgens fig.3.11 tot 3200 Hz.

Gebaseerd op het bovenstaande komen we tot een TNA-simulatie van het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979, als weergegeven in fig.3.15 (simulatie I).

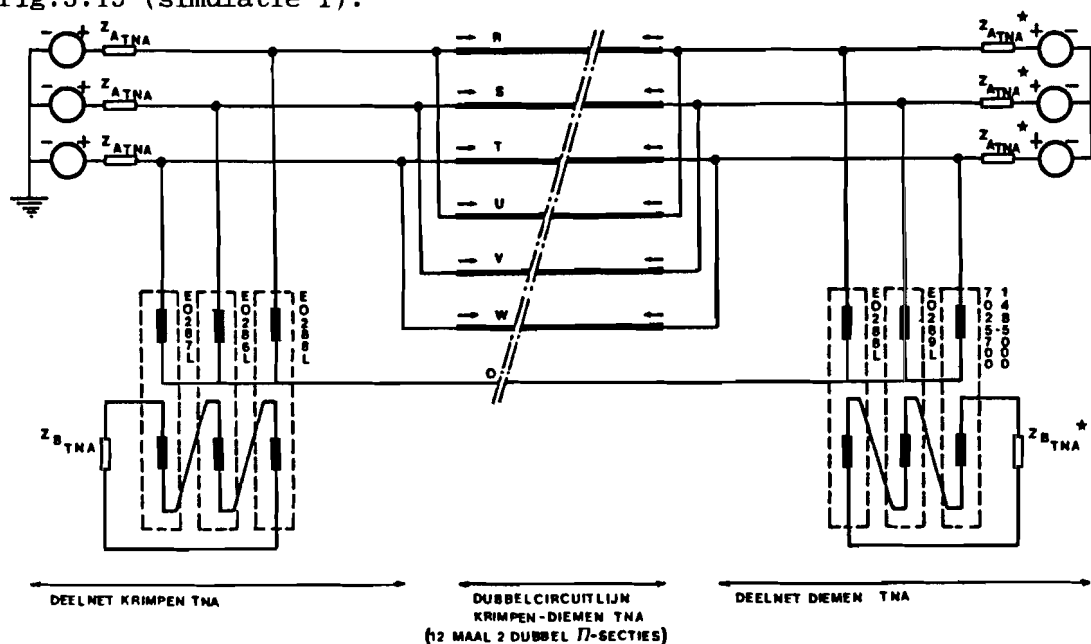


Fig.3.15 TNA-simulatie I van het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979.

De gegevens van de gebruikte transformatoren zijn gegeven in literatuur [4].

Hieronder wordt beknopt de procedure uiteengezet welke gehanteerd is om het gewenste impedantie verloop te realiseren.

Gebruik is gemaakt van instelbare R,L en C-units van het beschikbare Siemens wisselstroommodel. Door serie- en parallelschakelingen worden de netwerken gerealiseerd, waarbij vooralsnog de weerstanden op hun minimale waarden worden ingesteld. Met behulp van een HP impedantie analyzer en X-Y schrijver kan het impedantie verloop worden geregistreerd. Hierbij wordt dan over een berekende plot (fig.3.8 t/m fig.3.11) heen geschreven. In fig.3.16 t/m fig.3.19 zijn de op deze wijze verkregen plots van de bedrijfs- en homopolaire impedanties weergegeven. Hierin zijn tevens de berekende impedanties van elk deelnet weergegeven. De drie gerealiseerde bedrijfsimpedanties van elk deelnet (R-S,S-T, R-T) zijn over elkaar geschreven.

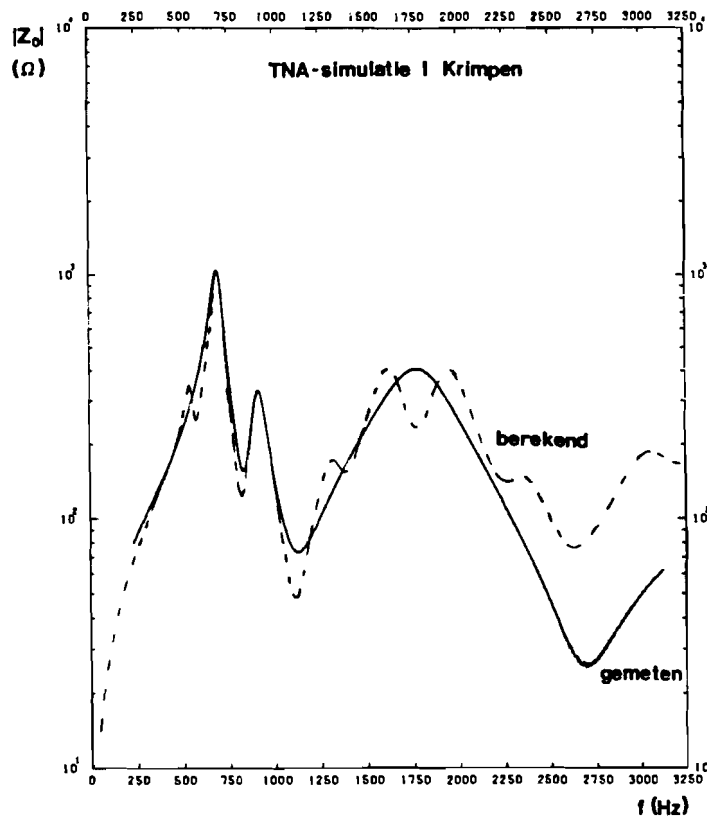


Fig.3.16 Modulus homopolaire impedantie deelnet Krimpen.

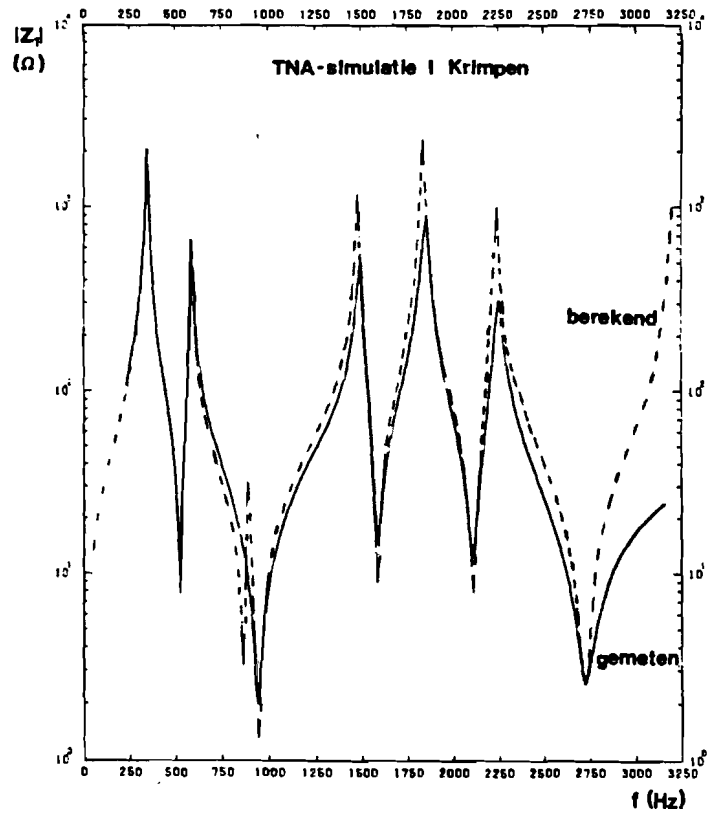


Fig.3.17 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Krimpen.

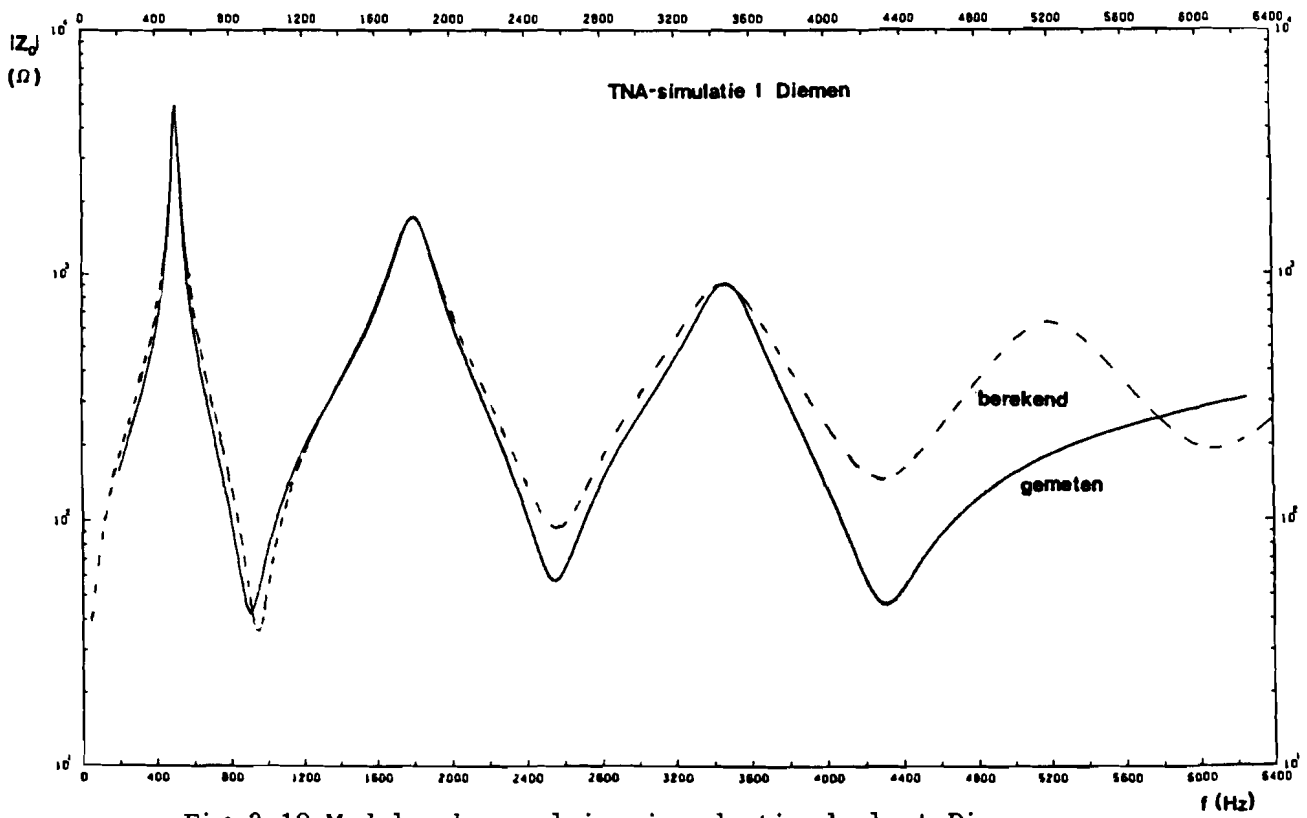


Fig.3.18 Modulus homopolaire impedantie deelnet Diemen.

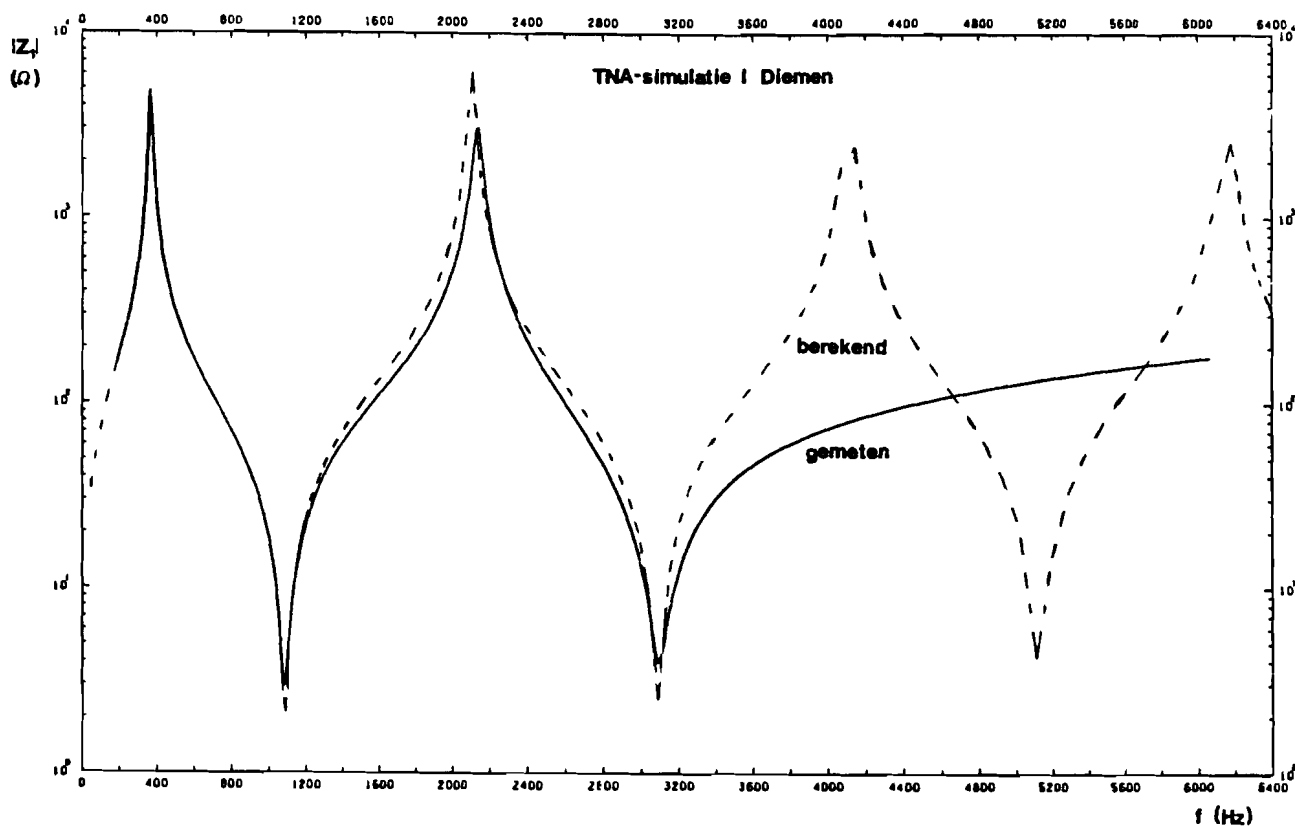


Fig.3.19 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Diemen.

Zoals uit deze figuren blijkt stemmen de gemeten plots redelijk overeen met de berekende plots.

De beide driefasengeneratoren zijn afgeregeld op een topwaarde van 5 V, géén offset en een $f_{TNA} = 80$ Hz.

Met dit model zijn een tweetal simulaties uitgevoerd van sluitingen op de dubbelcircuitlijn Krimpen-Diemen. Achtereenvolgens zijn uitgevoerd:

- 1) sluiting halverwege Krimpen-Diemen, tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase,
- 2) sluiting halverwege Krimpen-Diemen, tussen R,S,T-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase.

Van elke sluiting zijn met het programma TRANST (en de transiënt recorder) de volgende grootheden gemeten en opgeslagen:

- a)spanningen op foutplaats,
- b)spanningen in station Krimpen,
- c)spanningen in station Diemen,
- d)stromen op foutplaats,
- e)stromen in station Krimpen richting Diemen,
- f)stromen in station Diemen richting Krimpen.

Er is telkens gemeten met een sample interval van één microseconde. Opgeslagen is vanaf 10 samples voor het moment van de sluiting tot het 4096e sample. Voor de identificatiecodes datafiles wordt verwezen naar literatuur [4]. We moeten ons hierbij wel bedenken dat de opgeslagen data geldt voor driefasebronnen met een topwaarde 5 V en een frequentie 80 Hz. Met het programma EPSON is het mogelijk deze data te gebruiken voor bronnen met andere waarden.

Enige plots van de sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz zijn gegeven in de figuren 3.20 t/m 3.22. Verklaring afkortingen:

VRLS0003=spanning R-fase op foutplaats met code 0003, enz.

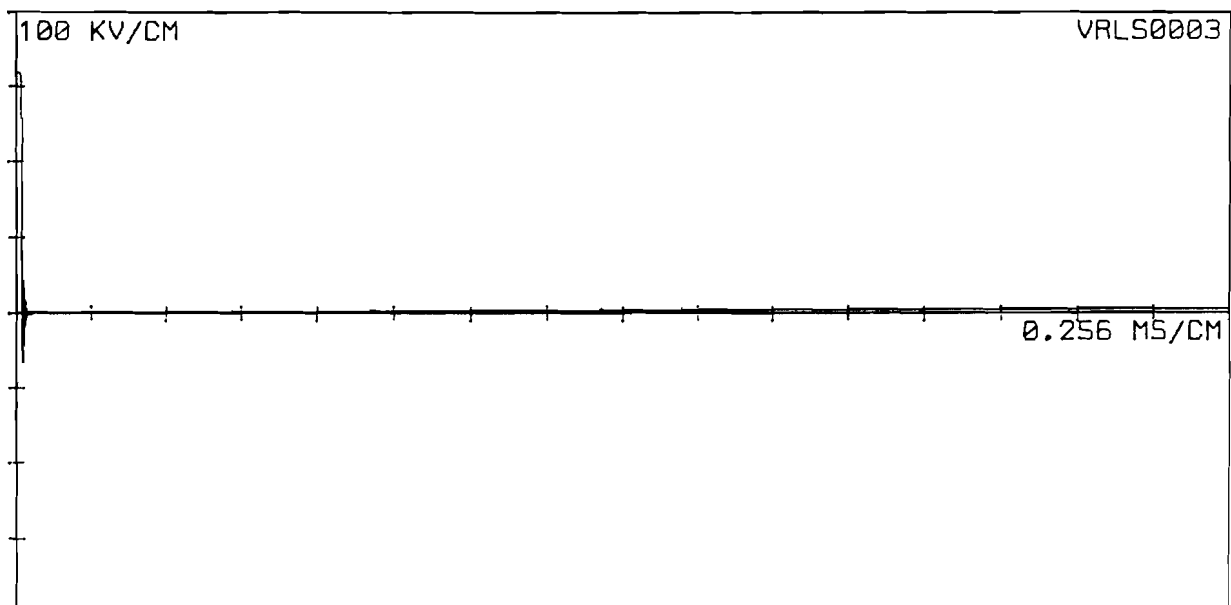
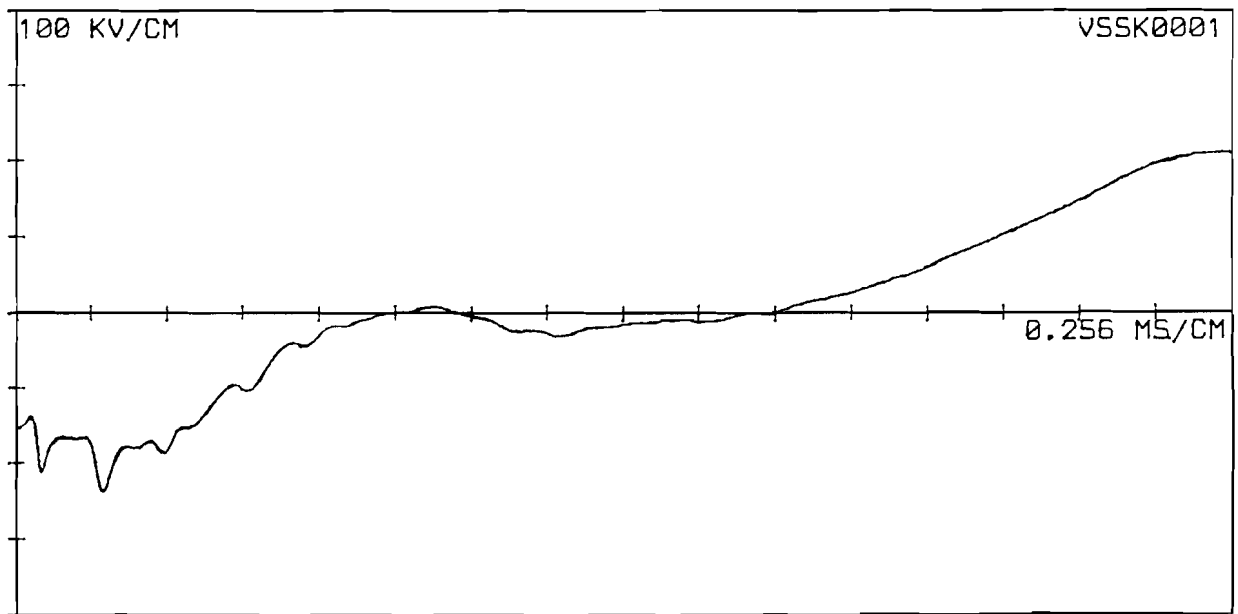
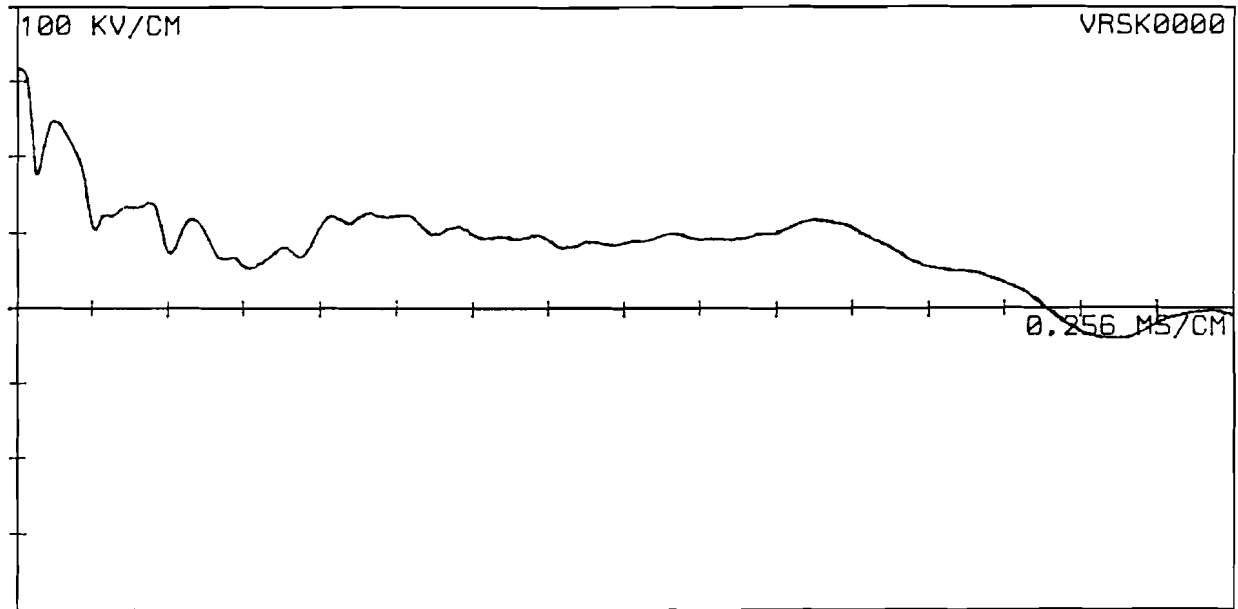


Fig.3.20 Spanning R-fase op foutplaats, TNA-simulatie I
sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



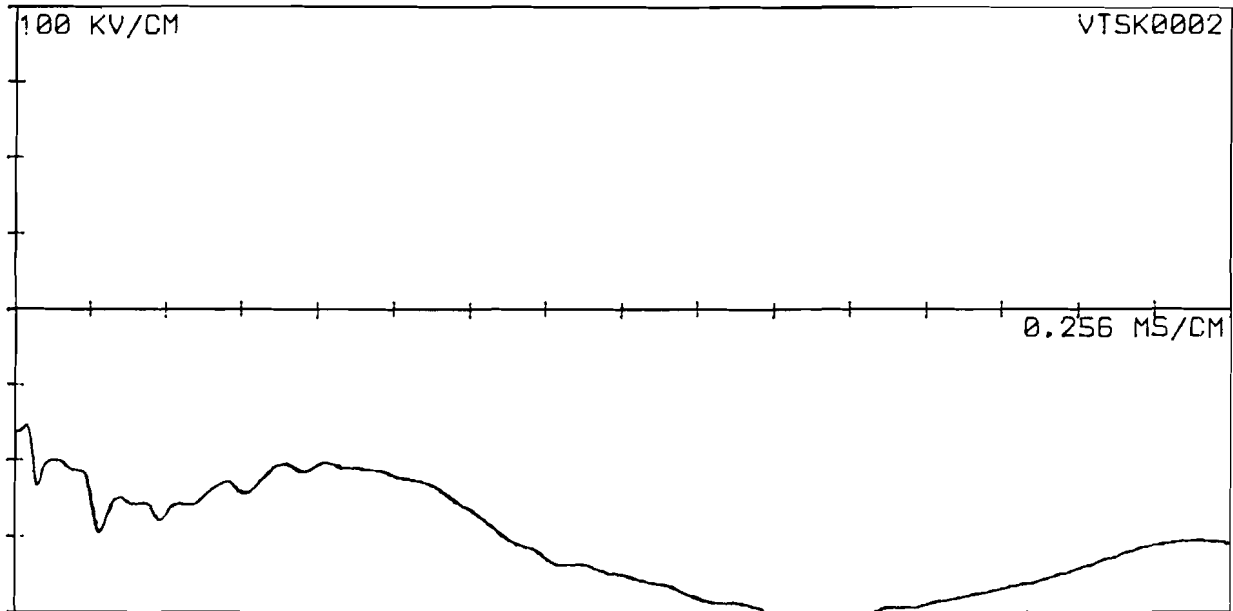
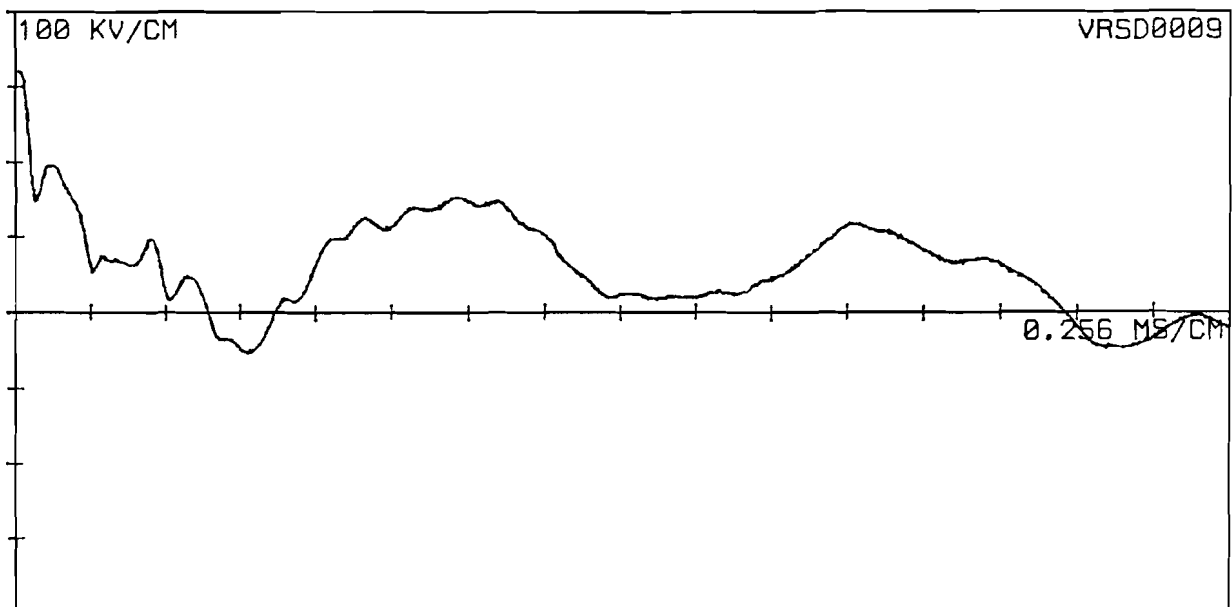


Fig.3.21 Spanningen in station Krimpen, TNA-simulatie I
sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



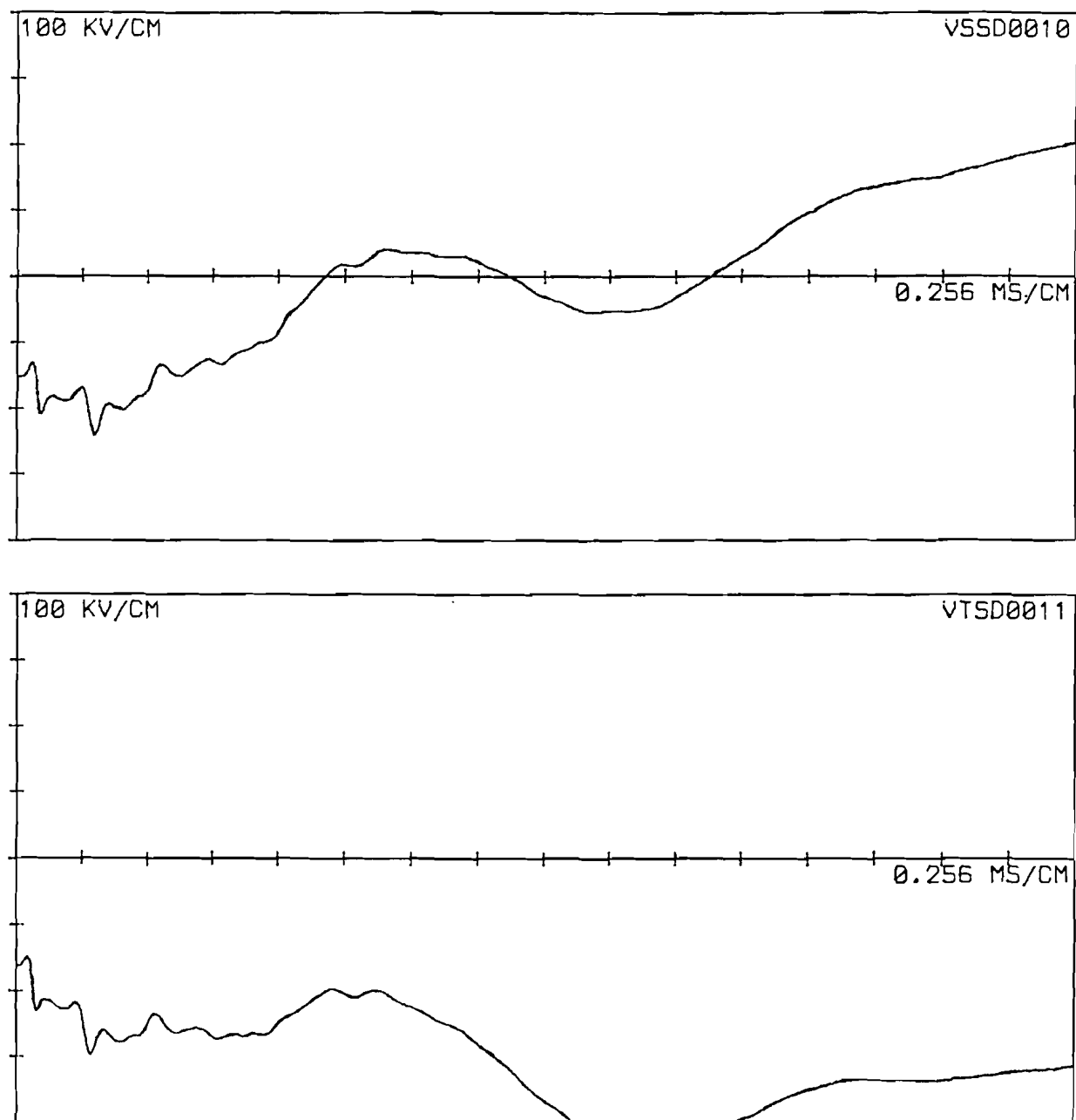


Fig.3.22 Spanningen in station Diemen, TNA-simulatie I
sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

In de plot VRSK0000 (fig.3.21) resp. plot VRSD0009
(fig.3.22) valt als eerste op dat gedurende de eerste loop-
tijd (192 μ sec) de spanning niet constant blijft, zoals we
zouden verwachten volgens de theorie en volgens de resulta-
ten van de EMTP-simulatie (fig.3.5 t/m 3.6).

Iets dergelijks zien we ook in de overige resultaten van deze sluiting. Dit wordt veroorzaakt door een niet juist elektrisch gedrag van de deelnetten Krimpen en Diemen voor hoge frequenties, zowel homopolair als bedrijf. Gedurende enkele looptijden van de lijn wordt het verloop van de spanningen en stromen bepaald door de lopende golven en de reflecties die aan de uiteinden van de lijn optreden. Bepalend voor de reflectie-factoren zijn de bedrijfs- en homopolaire impedanties van de netwerken welke de deelnetten Krimpen en Diemen representeren. De toegepaste netwerken zijn gesimuleerd tot een frequentie van 3200 Hz, daarboven is het gedrag inductief. Dit is niet in overeenstemming met de werkelijkheid. Indien we de invloed van de 150 kV invoedingen en de stationsapparatuur buiten beschouwing laten, dan worden de reflecties bepaald door de golfimpedanties van de aangesloten lijnen.

3.3.2.2 Simulatie II.

Uit de resultaten van de simulatie I blijkt dat het hoogfrequent gedrag van het deelnet Krimpen en deelnet Diemen onjuist is nagebootst. Dit probleem kan opgelost worden door het aantal Fosterkringen sterk te vergroten. Een eenvoudiger oplossing is echter het aanbrengen van het netwerk gegeven in fig. 3.23.

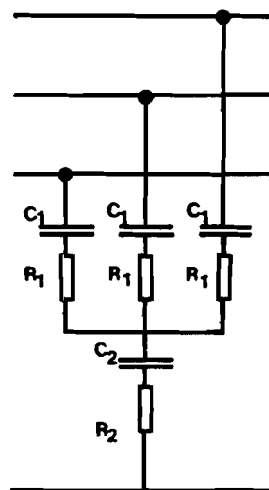


Fig. 3.23 Compensatie netwerk.

In de configuratie van de TNA-simulatie I wordt dit netwerk op zowel Krimpen als Diemen toegevoegd. Zie fig.3.24.

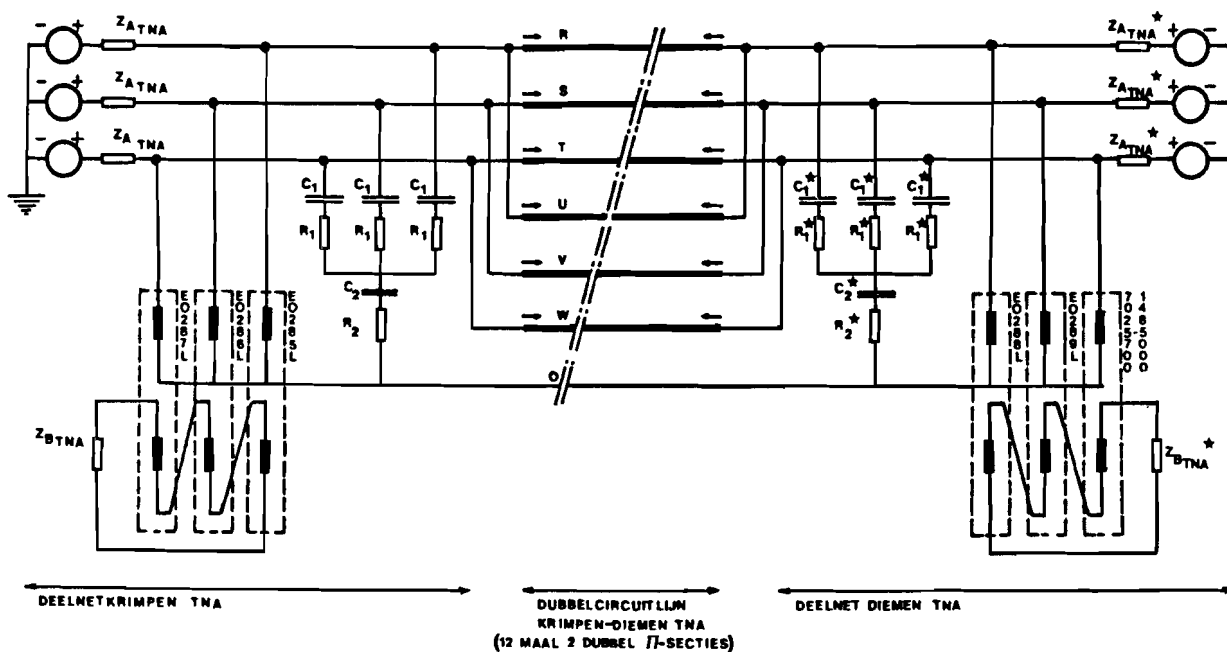


Fig.3.24 TNA-simulatie II van het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979.

De compensatienetwerken, maar ook de overige impedanties in fig.3.24 zijn nu zodanig gedimensioneerd dat voor lage frequenties een zo goed mogelijke overeenkomst met de berekende plots (fig.3.8 t/m fig.3.11) geldt. Voor hoge frequenties gaan de moduli van de impedanties naar waarden op basis van de moduli van de golfimpedanties van de vertrekkende lijnen bij $f=10000$ Hz. Voor deelnet Krimpen betekent dit voor de homopolaire golf de waarde 160.47Ω en voor de bedrijfsgolf de waarde 61.76Ω . Voor deelnet Diemen zijn dit de waarden 323.00Ω resp. 130.70Ω . De uiteindelijke gerealiseerde waarden voor hoge frequenties bedragen voor Krimpen 180Ω (homopolair) en 70Ω (bedrijf). Voor Diemen zijn dit 345Ω resp. 126Ω . Zie de fig.3.25 t/m 3.32.

TNA-simulatie II Krimpen

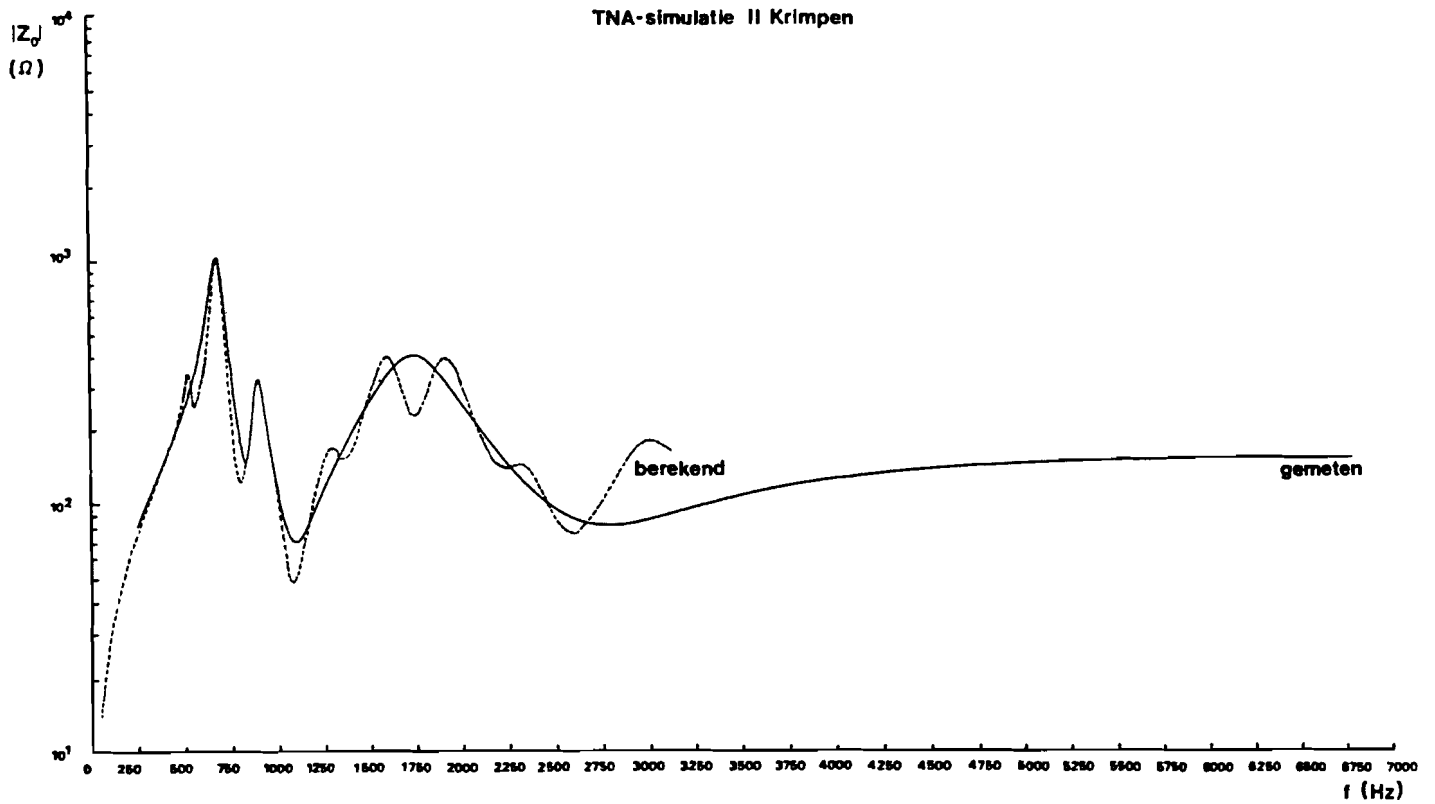


Fig.3.25 Modulus homopolaire impedantie deelnet Krimpen
(250 Hz/schaaleenheid).

TNA-simulatie II Krimpen

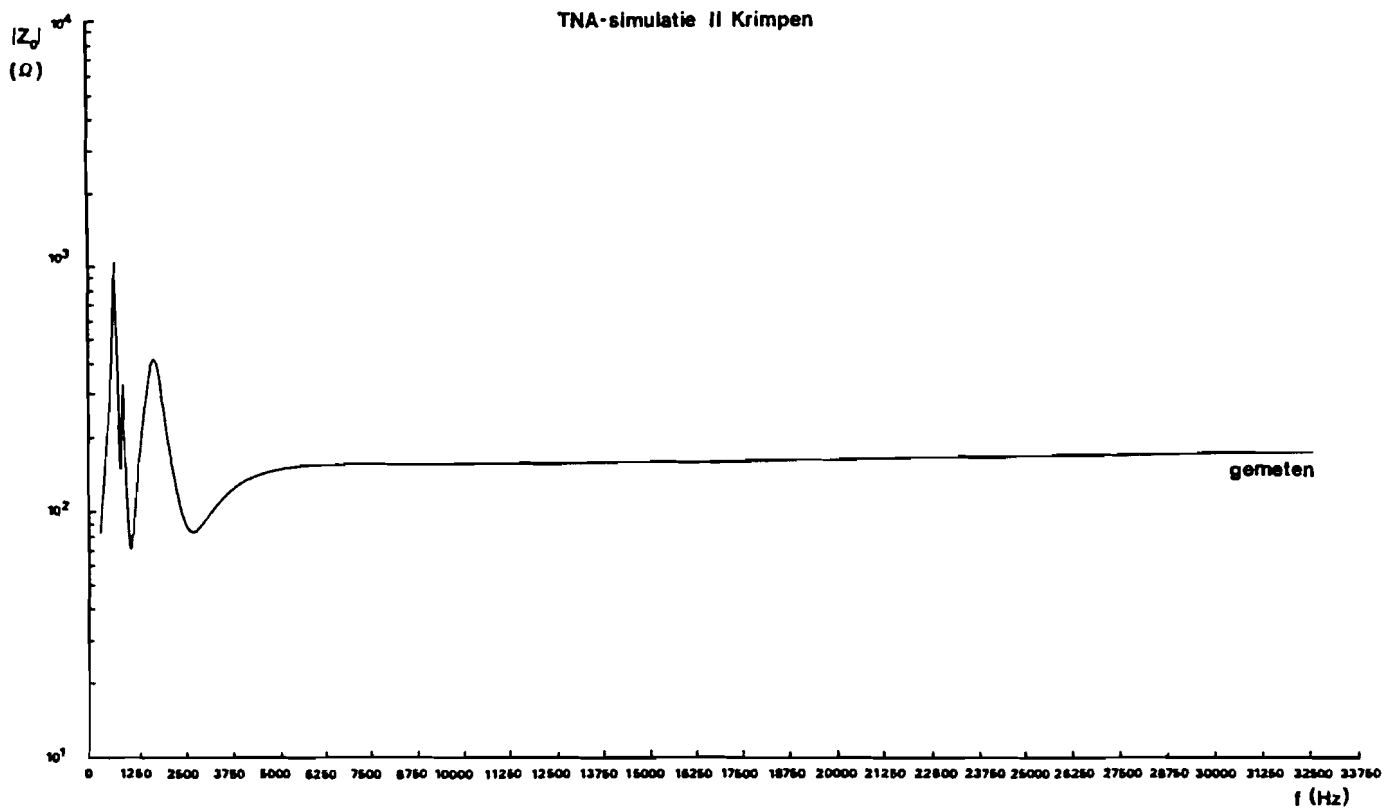


Fig.3.26 Modulus homopolaire impedantie deelnet Krimpen
(1250 Hz/schaaleenheid).

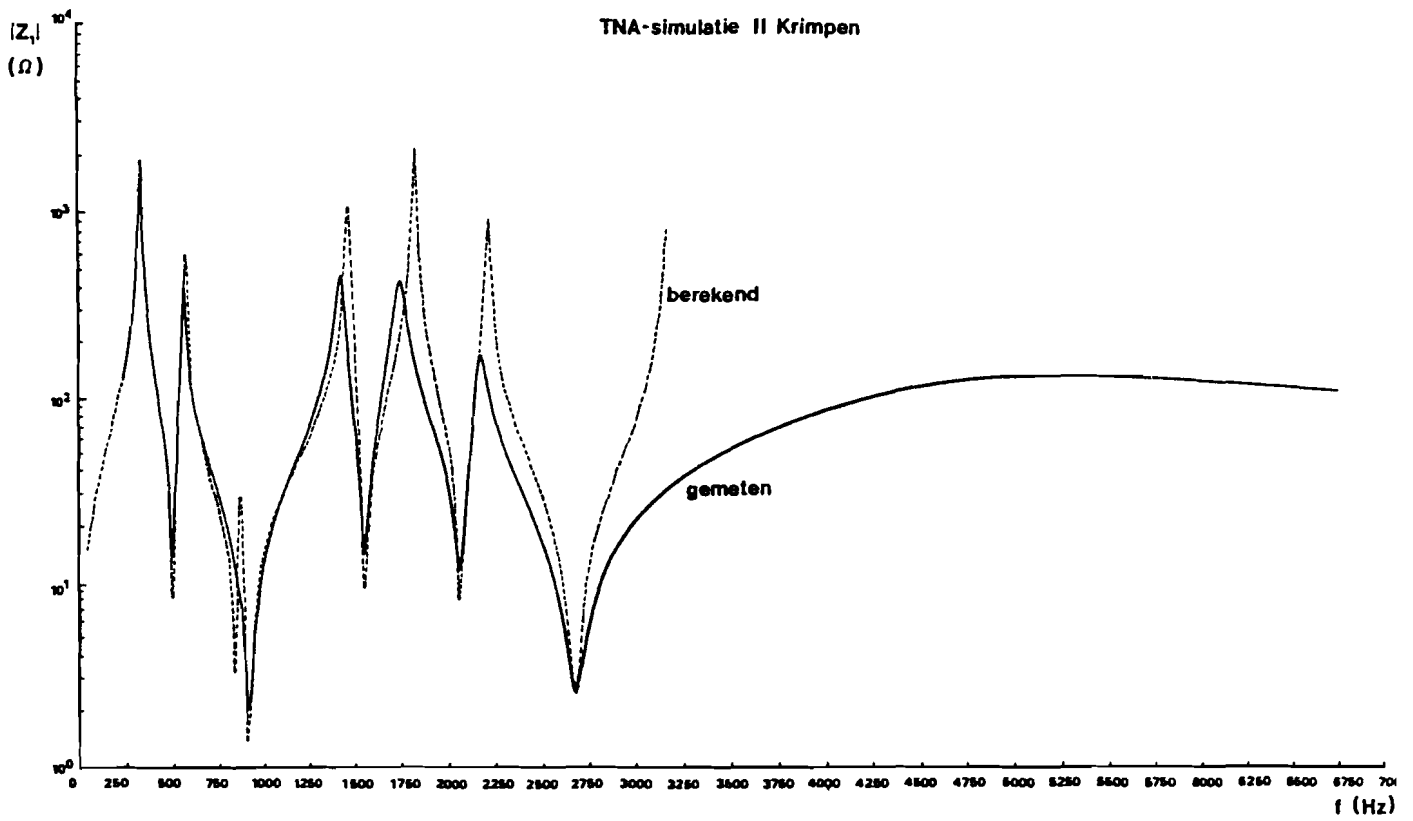


Fig.3.27 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Krimpen
(250 Hz/schaaleenheid).

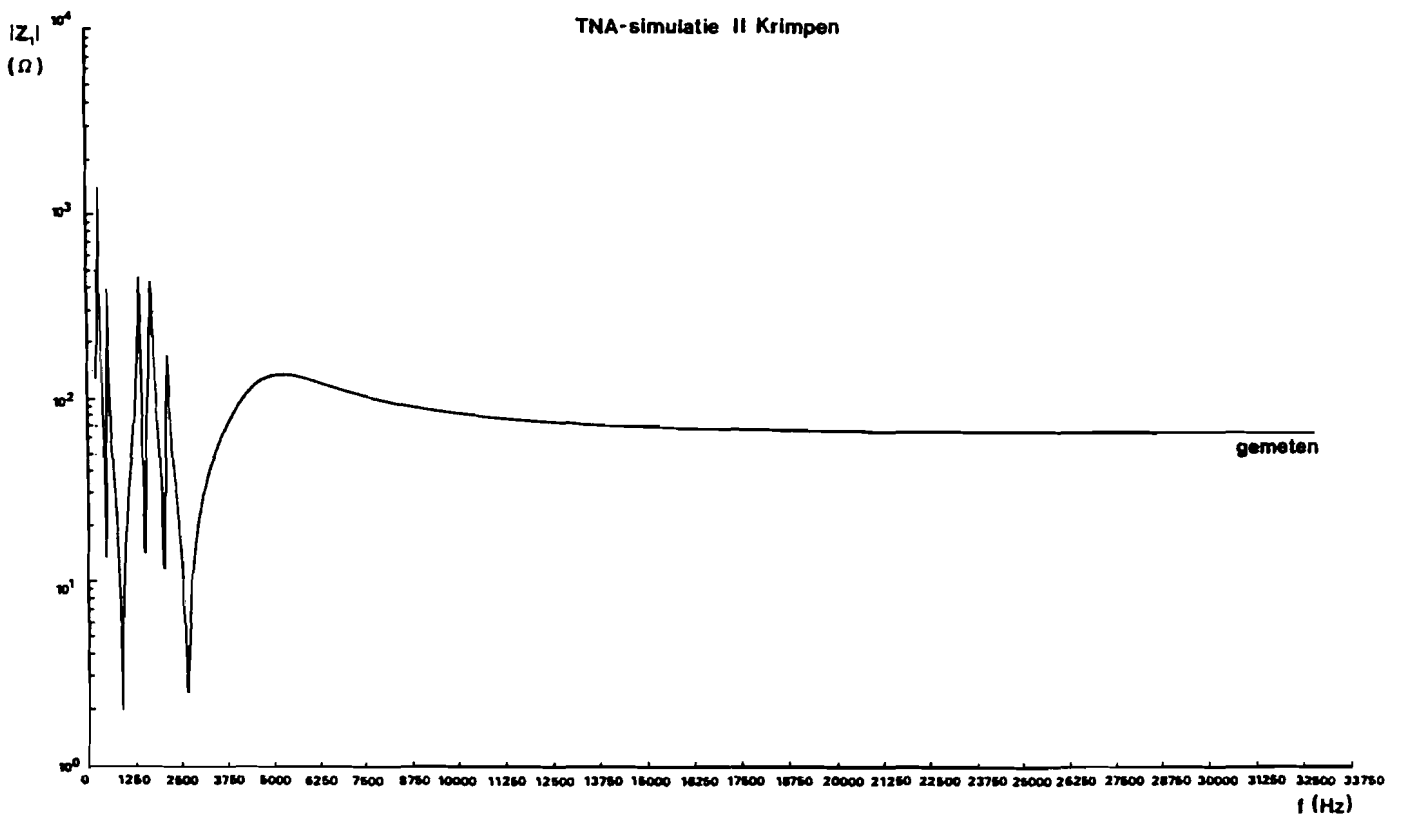


Fig.3.28 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Krimpen
(1250 Hz/schaaleenheid).

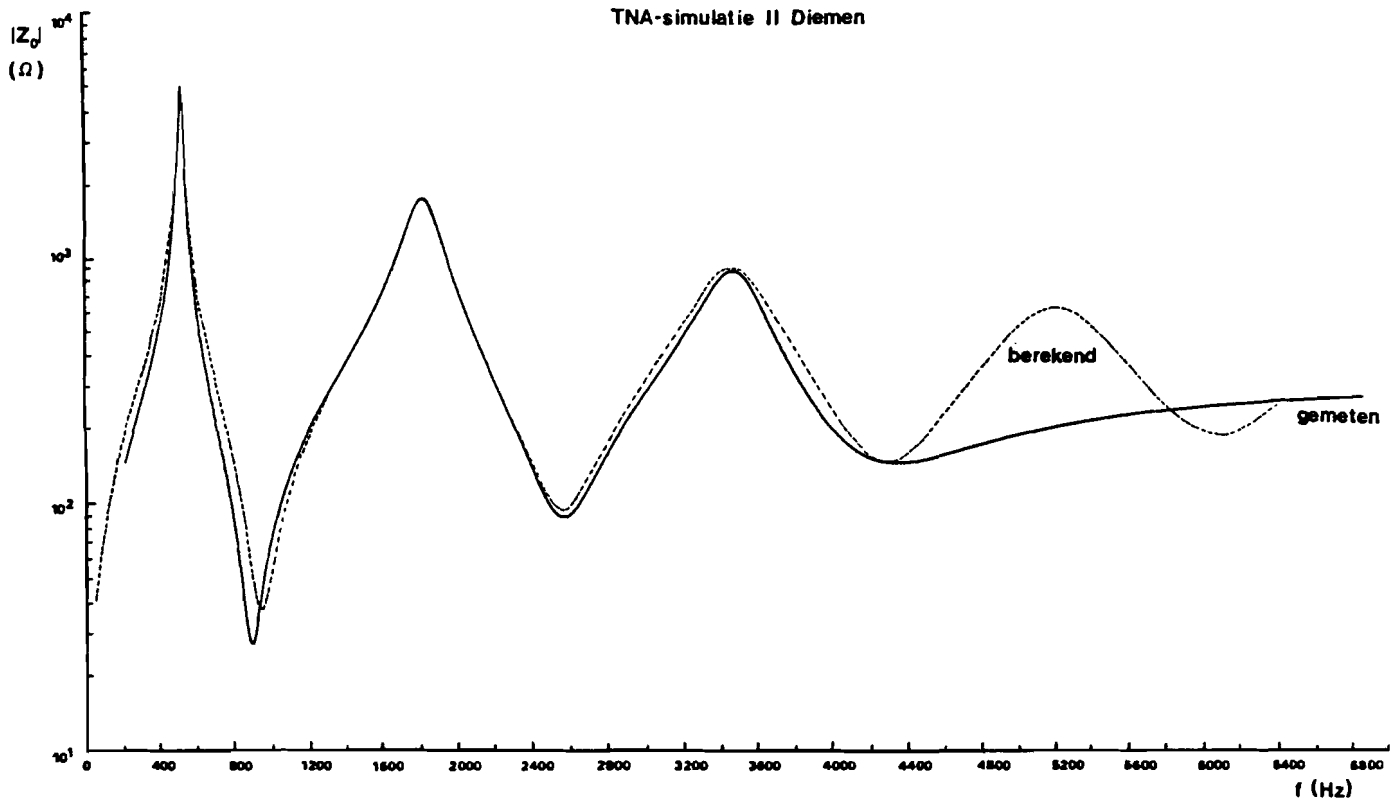


Fig.3.29 Modulus homopolaire impedantie deelnet Diemen
(200 Hz/schaaleenheid).

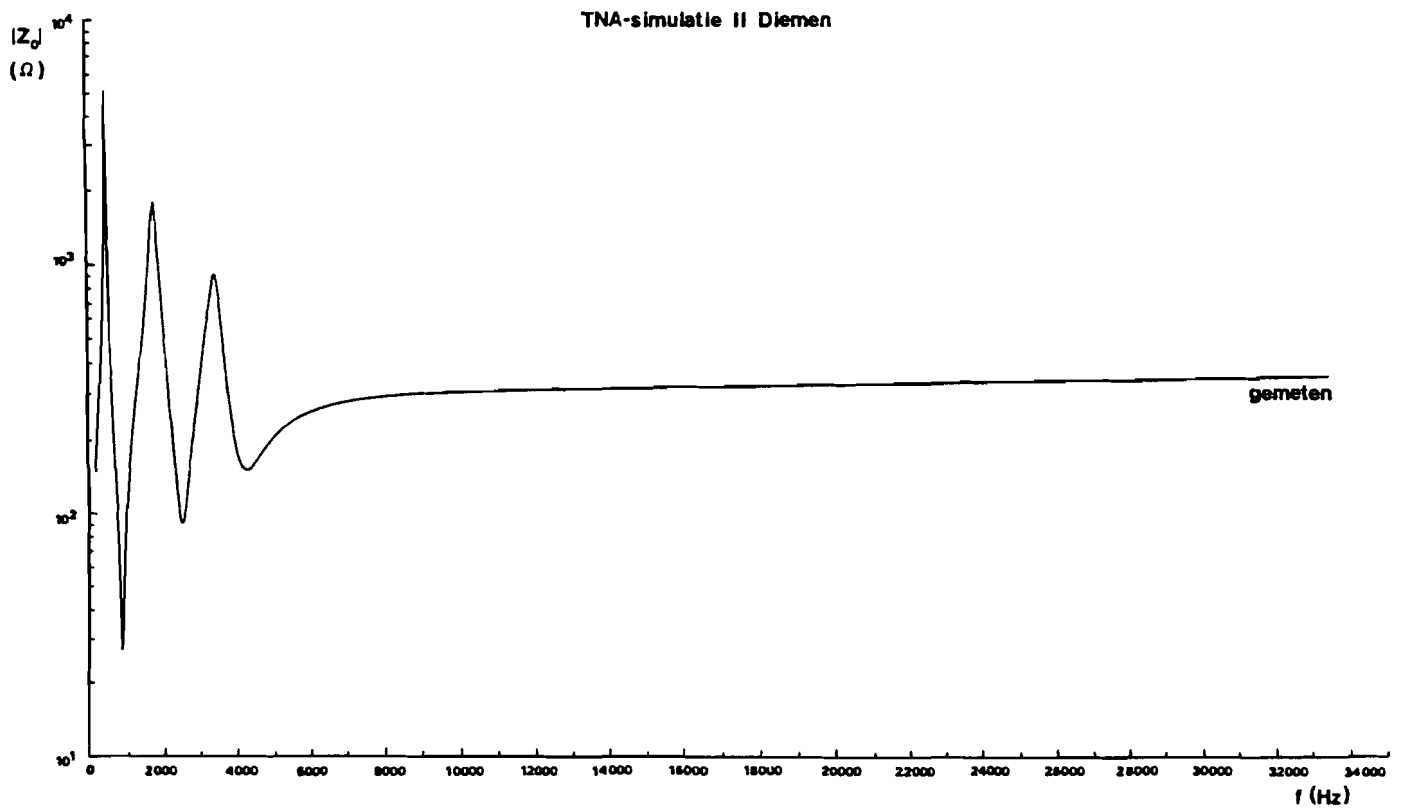


Fig.3.30 Modulus homopolaire impedantie deelnet Diemen
(1000 Hz/schaaleenheid).

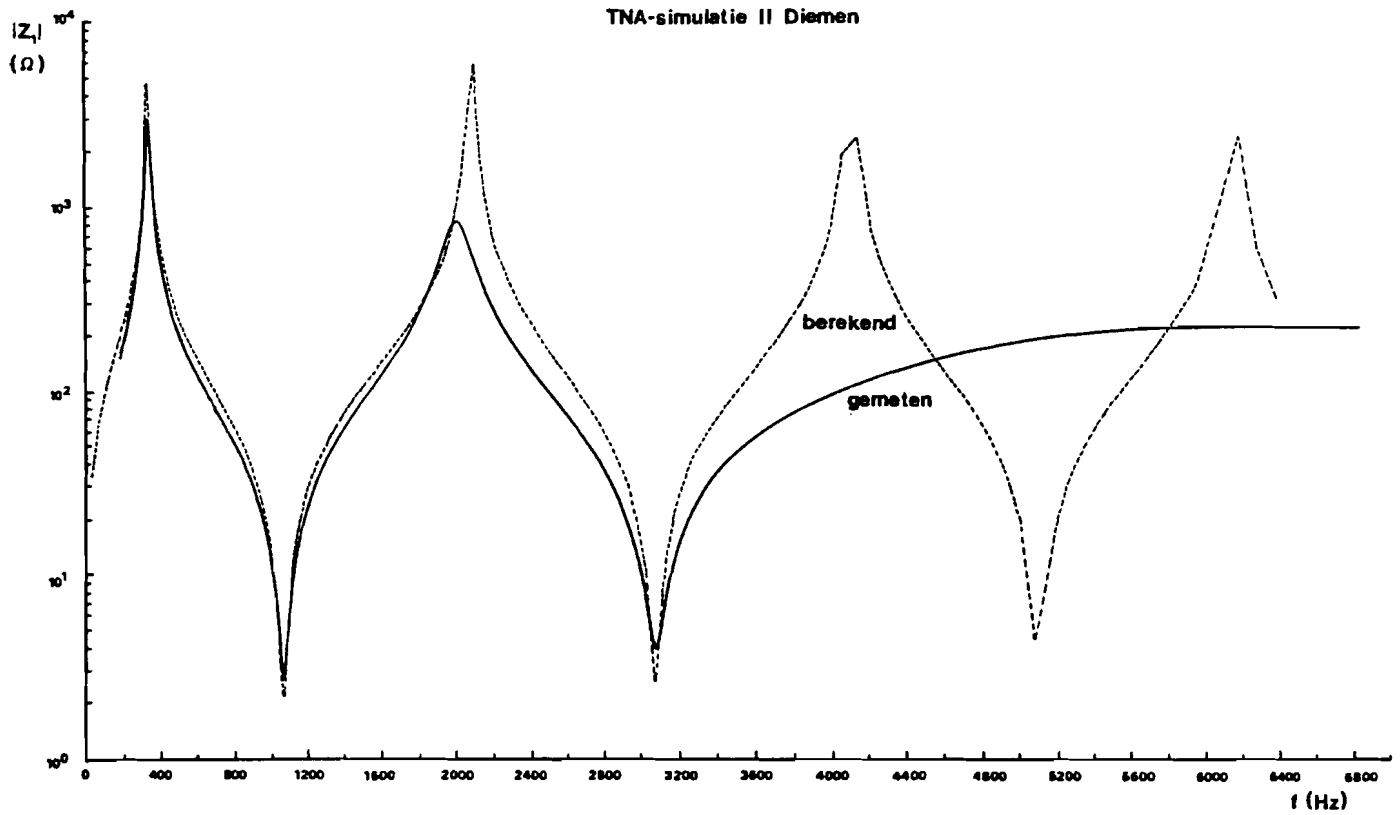


Fig.3.31 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Diemen
(200 Hz/schaaleenheid).

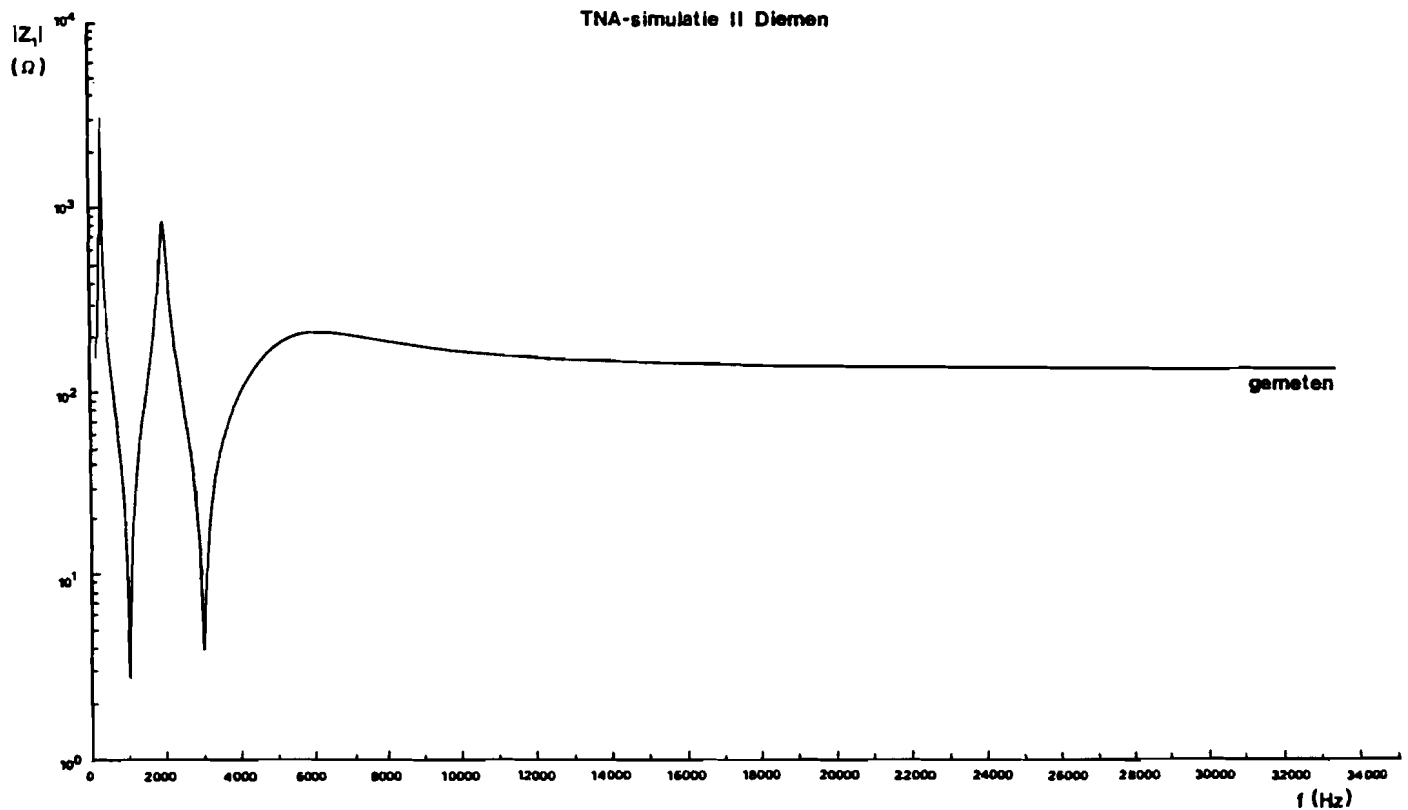


Fig.3.32 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Diemen
(1000 Hz/schaaleenheid).

De plots van de homopolaire impedanties vertonen in het laag frequentiegebied een betere overeenkomst met de berekende dan de betreffende plots van simulatie I (fig.3.16 en fig.3.18).

Dit in tegenstelling tot de bedrijfsimpedanties waar een compromis is gesloten tussen het gebied met overeenkomst met de berekende plots en het gebied met constante waarde.

Met dit model (simulatie II) zijn de foutsimulaties van het EMTP-model herhaald. Van elke sluiting zijn dezelfde grootheden gemeten en opgeslagen als met de simulatie I.

Gemeten is zowel met een sample interval van één microseconde als met een sample interval van tien microseconde. De opgeslagen data geldt voor driefasebronnen met een topwaarde van 319 V en een frequentie 50 Hz.

Enige plots van de sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz zijn gegeven in fig.3.33 t/m 3.35.

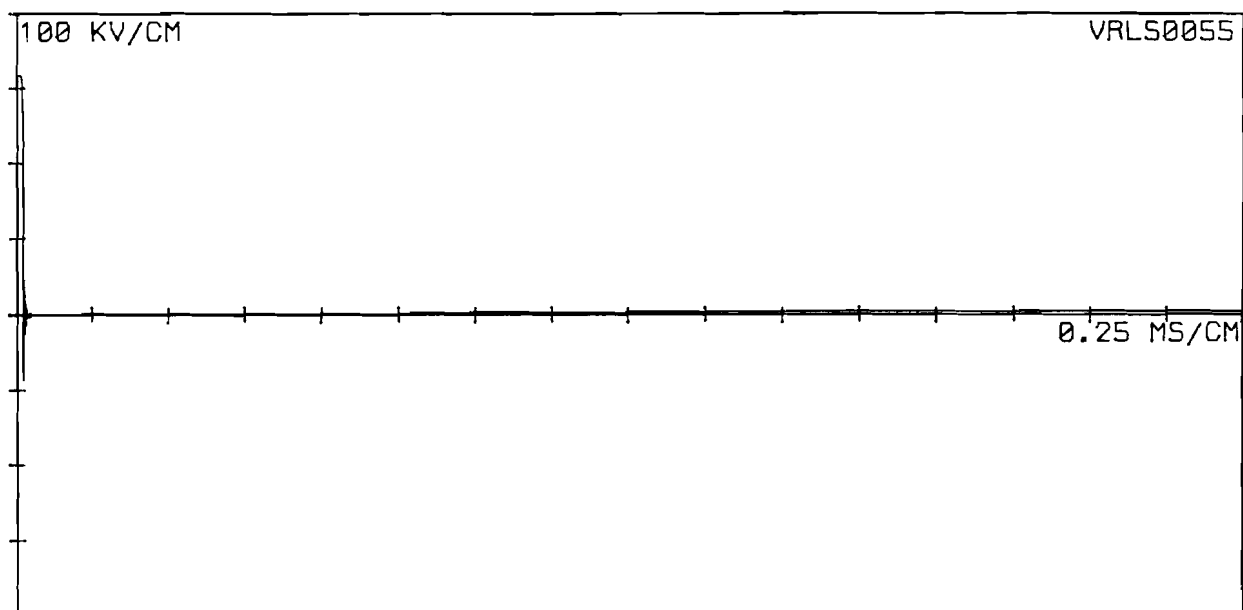
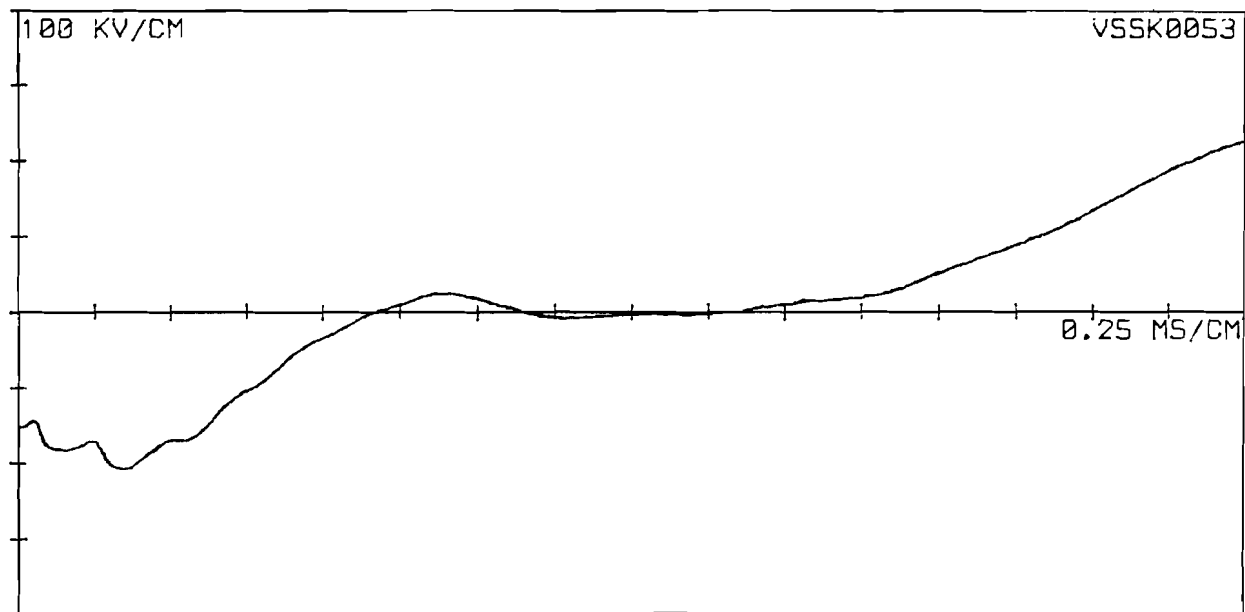
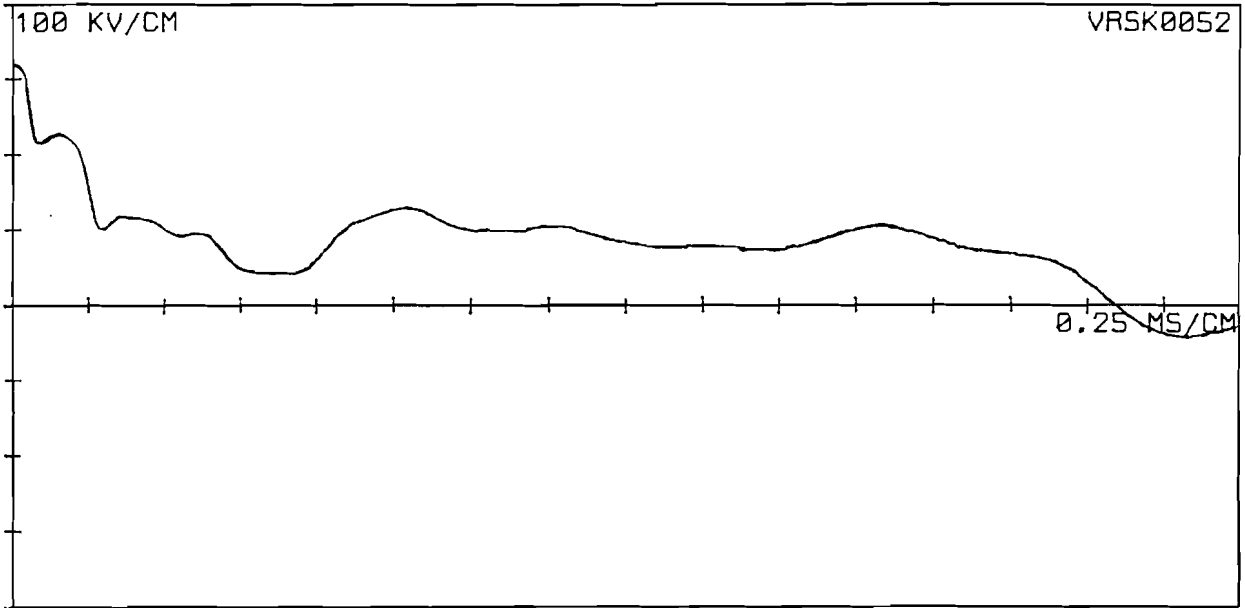


Fig.3.33 Spanning R-fase op foutplaats, TNA-simulatie II sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



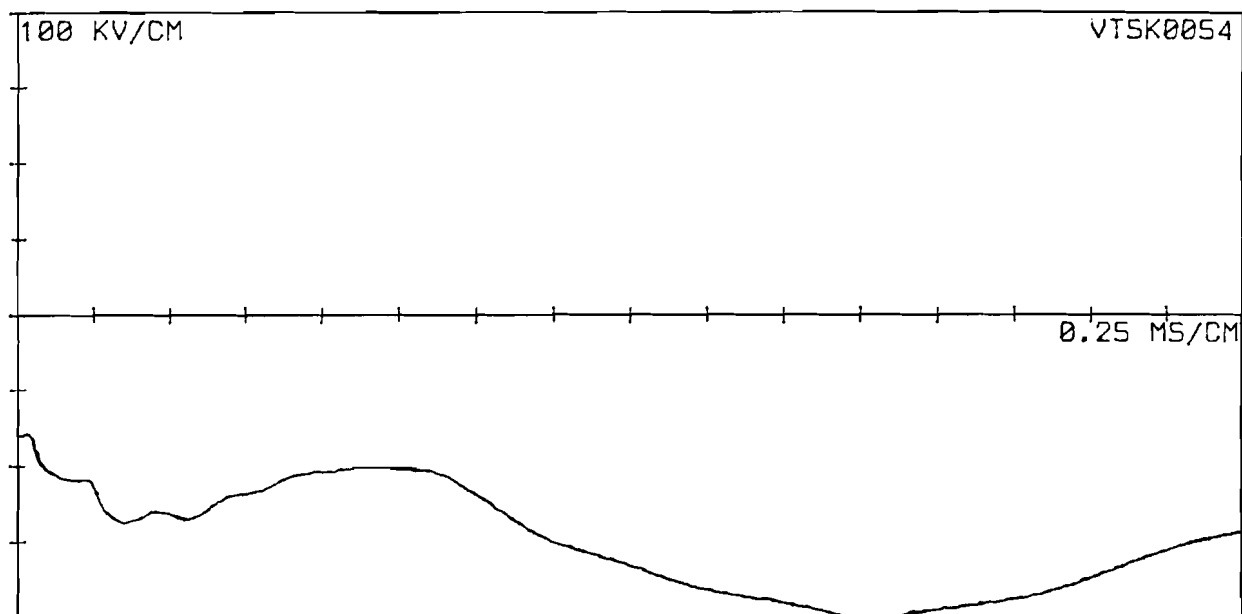
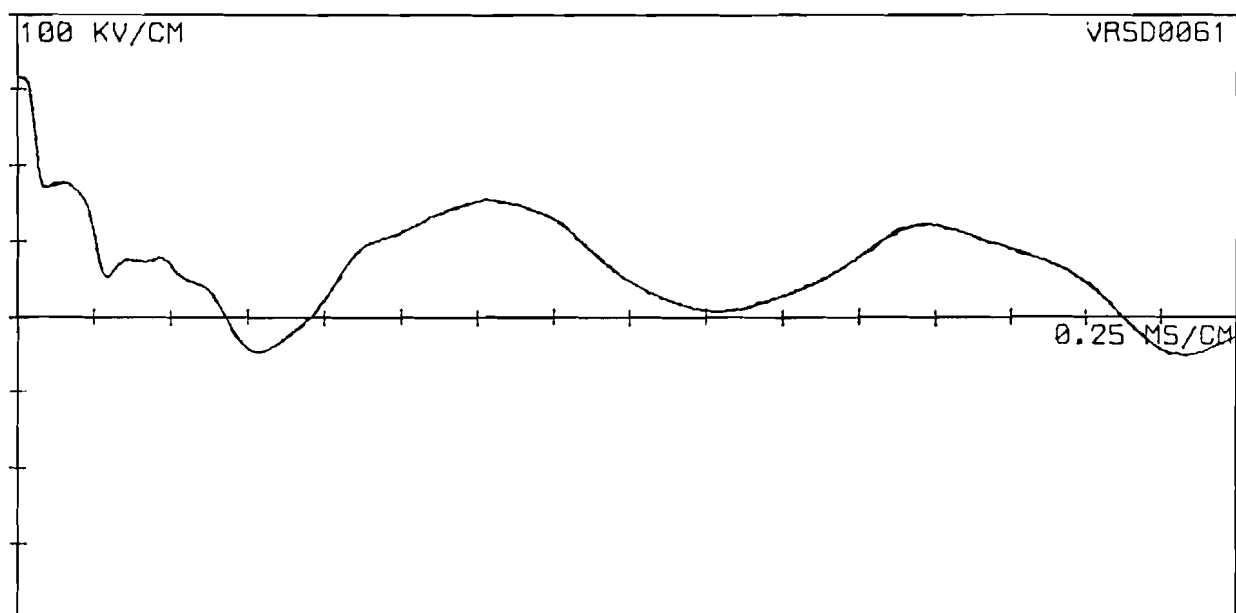


Fig.3.34 Spanningen in station Krimpen, TNA-simulatie II
sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



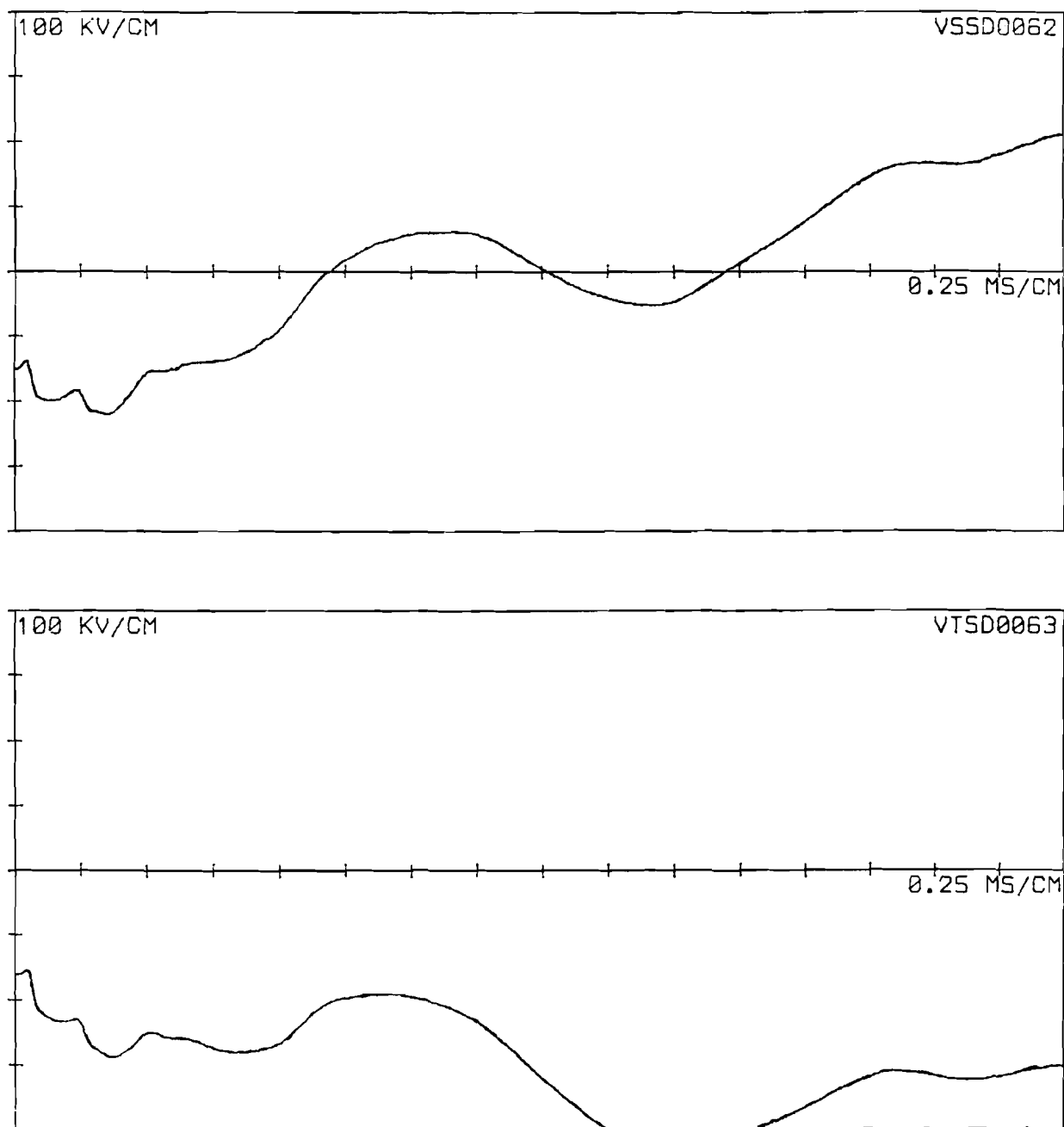


Fig.3.35 Spanningen in station Diemen, TNA-simulatie II
 sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
 en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
 topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

De plots VRSK0052 (fig.3.34) en VRSD0061 (fig.3.35) laten een vlakker verloop zien gedurende de eerste looptijd dan de overeenkomstige plots (fig.3.21 en fig.3.22) volgens de simulatie I. Dat het verloop niet geheel vlak is, komt

vermoedelijk doordat de impedanties nog niet helemaal perfect zijn nagebouwd (vooral in het gebied rond de 4 kHz zijn er flinke afwijkingen) en de aanwezigheid van een frequentiegrens tot waar de dubbelcircuit π -secties nog bruikbaar zijn.

Vergelijking van de resultaten van deze sluiting met die van de EMTP laat zien dat het verloop van de spanningen en de stromen in de R-fase van beide modellen in het gebied tot een milliseconde redelijk overeenkomen, echter wel met de opmerking dat de TNA-resultaten geen scherpe piekjes vertonen. Dat de overige stromen (kleine stromen) in dat gebied minder met elkaar overeenkomen heeft vermoedelijk te maken met de offset van de gebruikte meetapparatuur en de altijd aanwezige ruis.

Als we alle resultaten van de simulatie II vergelijken met die van het EMTP-model mogen we concluderen dat de resultaten van simulatie II in het gebied tot één milliseconde vrij redelijk overeenstemmen met de resultaten van het EMTP-model, daarna wordt de overeenkomst steeds minder. Dit laatste is vermoedelijk te wijten aan de verschillen in:

- de modellering van het net vanaf station Maasbracht. In tegenstelling tot de simulatie II modelleert het EMTP-model niet de verbinding Maasbracht-Dodewaard als lijn en niet de invoeding Dodewaard. Het EMTP-model ziet in Maasbracht richting Dodewaard namelijk een geconcentreerde R-L serieschakeling (dezelfde R-L serieschakeling wordt gebruikt voor de invoeding Duitsland resp. België). Dit alles heeft tot gevolg dat de beide modellen elk een verschillend stationaire gedrag vertonen.
- resistieve gedrag van de 150 kV-netten, 220 kV-net en generatoren in beide modellen. In tegenstelling tot de simulatie II is dit gedrag in het EMTP-model frequentie-onafhankelijk.
- in het frequentiegebied rond de 4 kHz in de modellering van de deelnetten Krimpen en Diemen.

3.3.2.3 Simulatie III.

De resultaten van de simulatie II zijn redelijk te noemen. Een nadeel van deze simulatie is echter dat het opbouwen en afregelen van de netwerken een tijdrovende zaak is. Daarom is geprobeerd met de schakeling in fig.3.36 een eenvoudige simulatie, dus een snellere opbouw te realiseren.

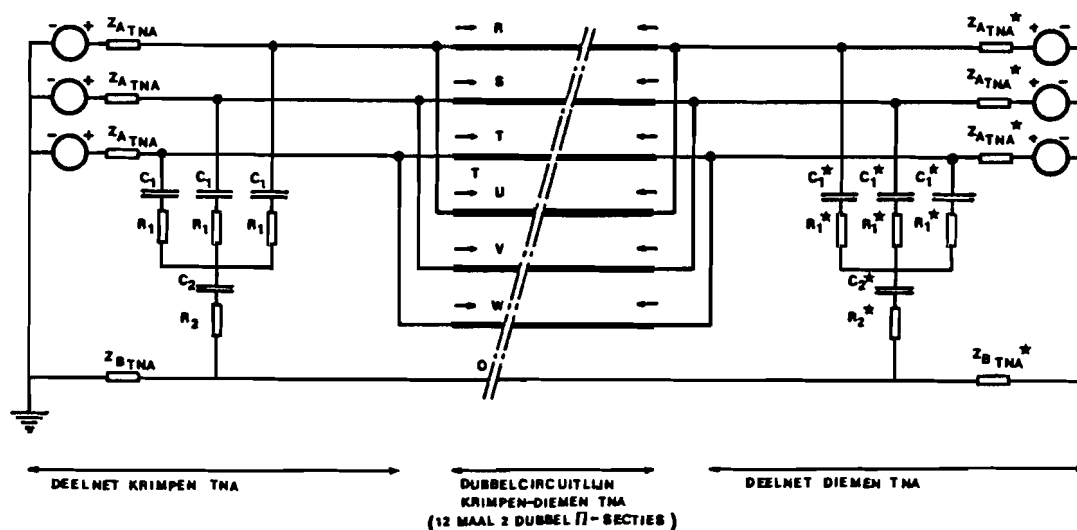


Fig.3.36 TNA-simulatie III van het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979.

Er zijn nu geen transformatoren aanwezig. Daardoor hebben we hier geen last van het niet-ideaal zijn van de transformatoren, zoals bij de simulatie II. Voor de impedanties van de deelnetten zijn geconcentreerde R-L serieschakelingen gebruikt. De plots van de homopolaire impedantie en de bedrijfsimpedanties van deelnet Krimpen en deelnet Diemen zijn gegeven in fig.3.37 t/m fig.3.40.

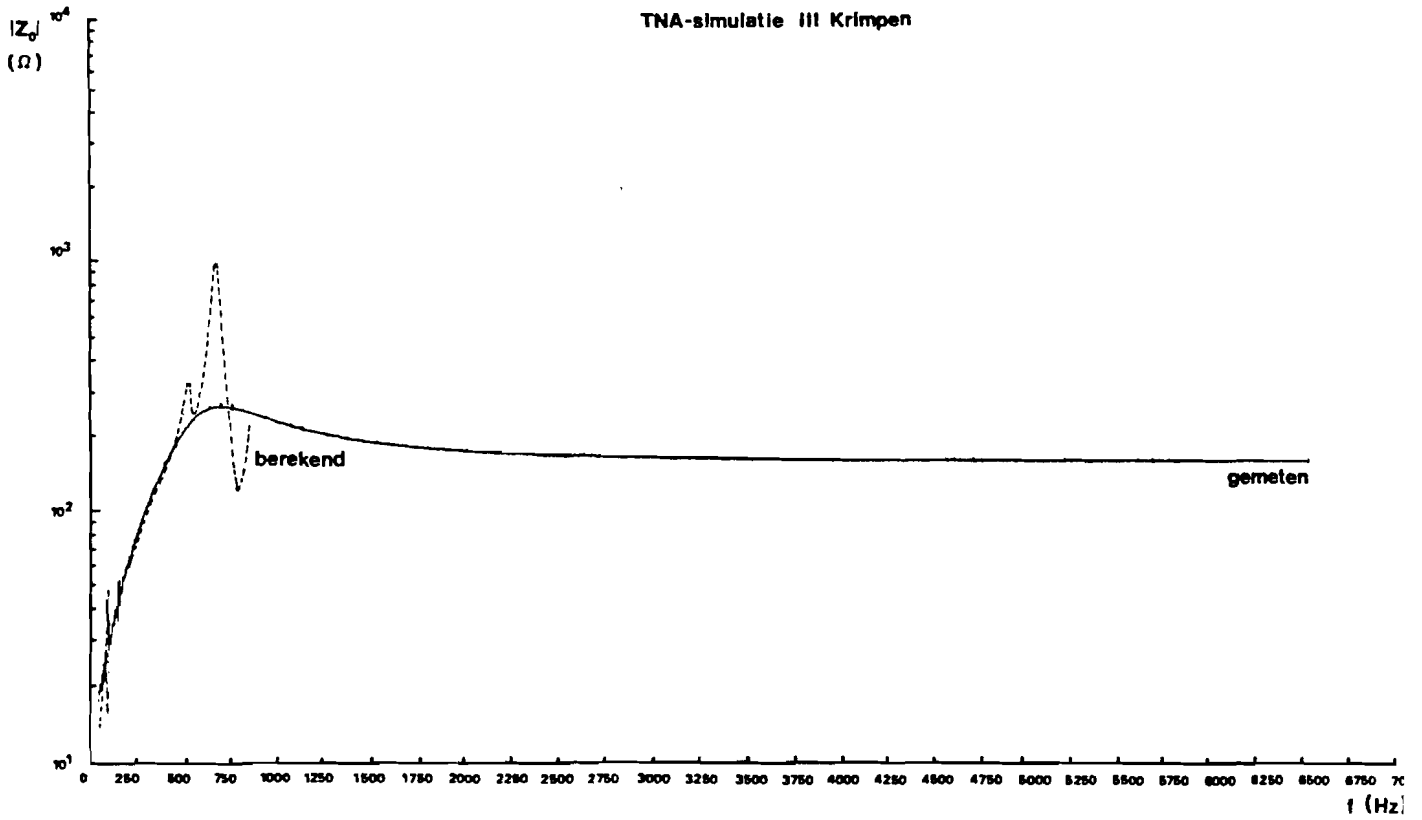


Fig.3.37 Modulus homopolaire impedantie deelnet Krimpen.

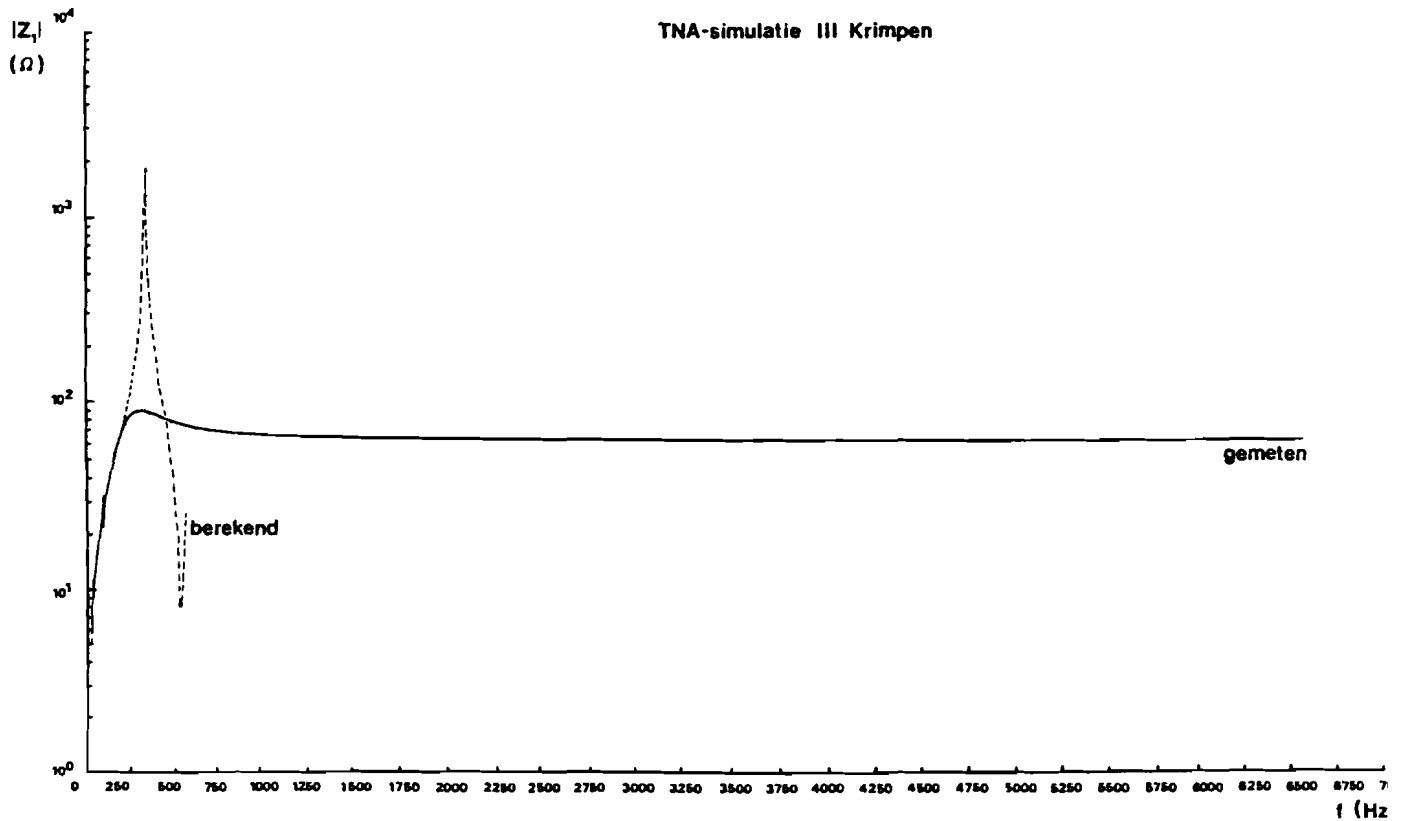


Fig.3.38 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Krimpen.

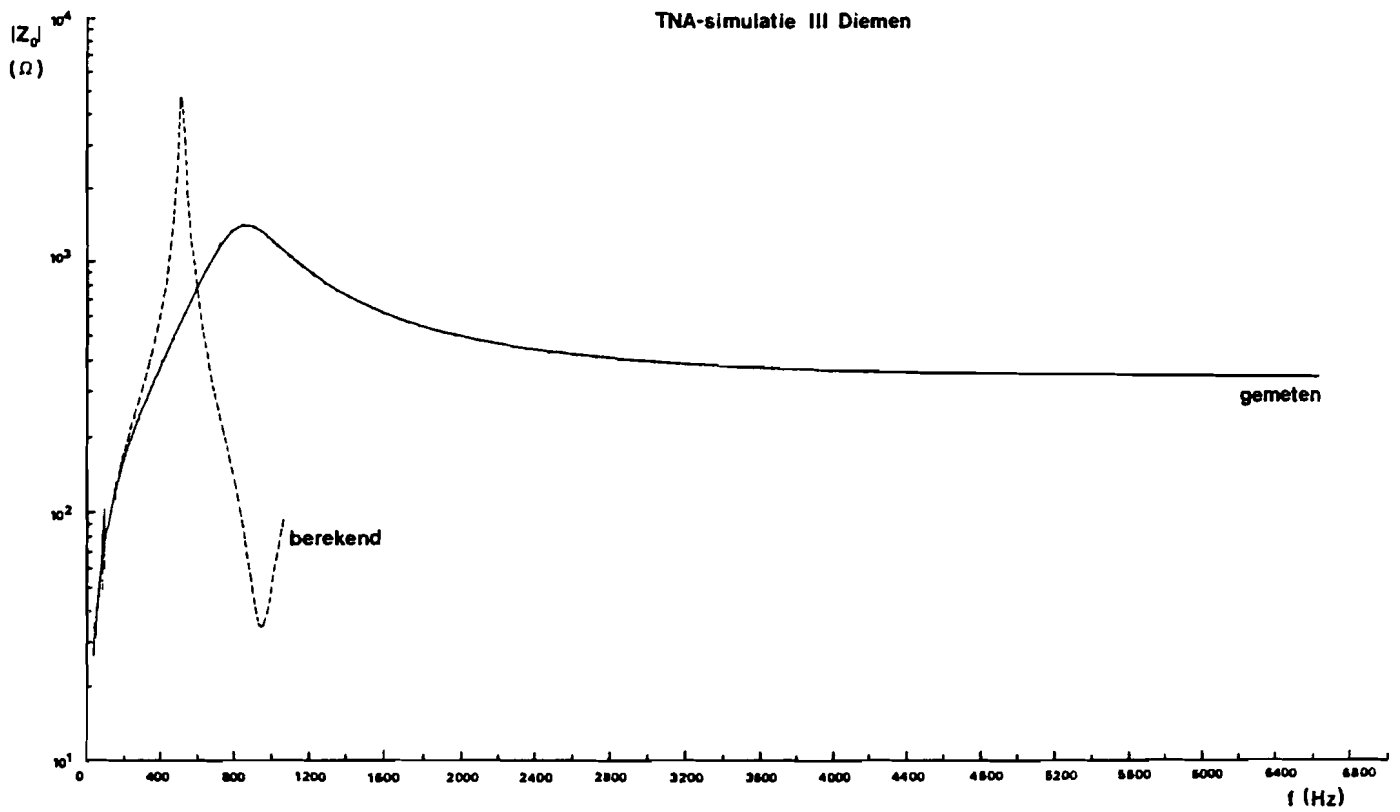


Fig.3.39 Modulus homopolaire impedantie deelnet Diemen.

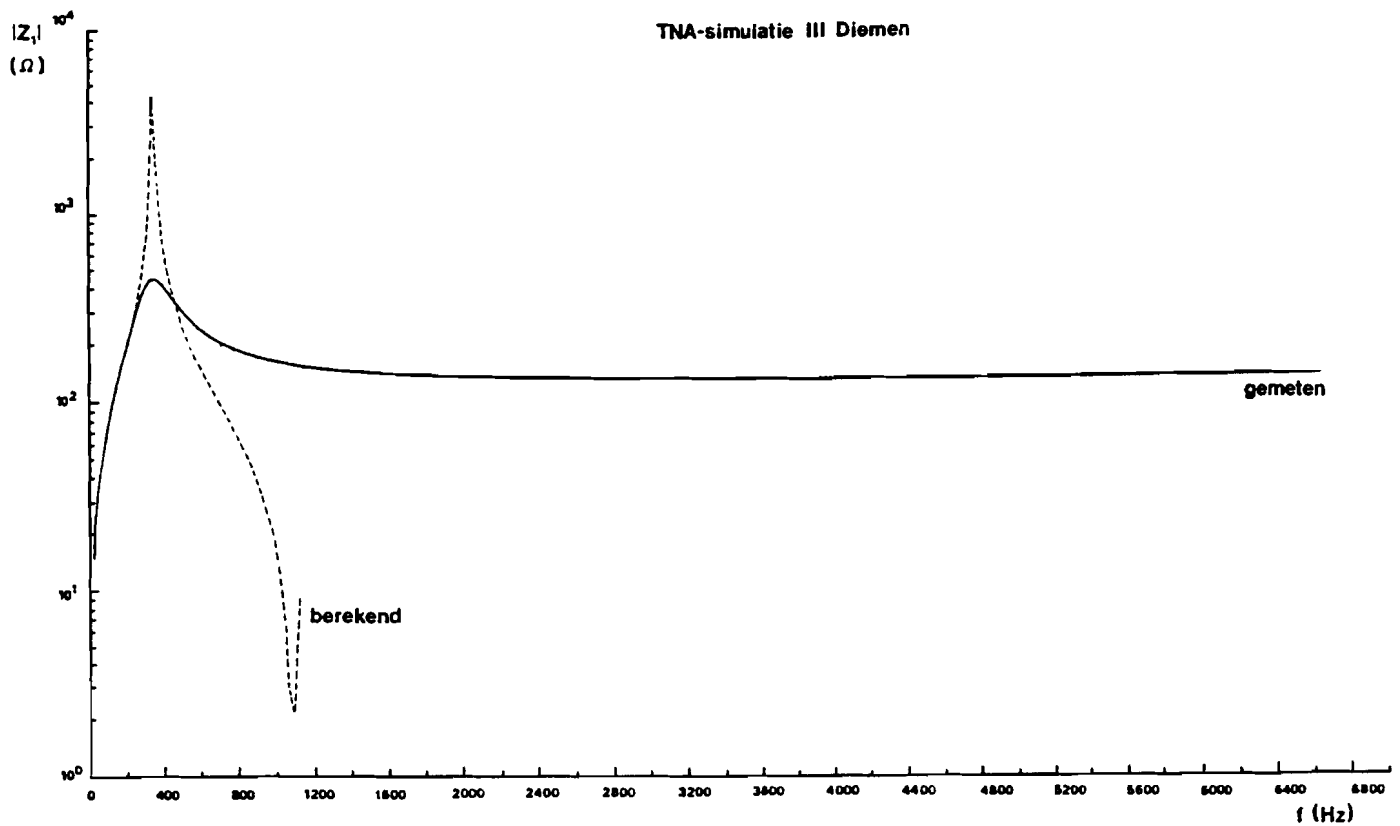


Fig.3.40 Moduli bedrijfsimpedanties deelnet Diemen.

Zoals uit de bovenstaande plots blijkt is voor de lage frequenties een goede overeenkomst tussen de gerealiseerde impedanties en de berekende impedanties. Voor hoge frequenties is de nastreving van de waarden 160.47Ω , 61.76Ω , 323.00Ω en 130.70Ω (zie paragraaf 3.3.2.2) beter als die met de simulatie II. Namelijk nu zijn de uiteindelijk waarden voor hoge frequenties 158Ω , 61Ω , 324Ω en 130Ω . Wel moeten we bedenken dat lage resp. hoge frequenties nu een ander frequentiegebied behelst dan die van de simulatie II!

Met dit model is wederom de sluiting halverwege Krimpen-Diemen, tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase gesimuleerd.

Enige plots met betrekking tot deze sluiting zijn in fig.3.41 t/m fig.3.43 gegeven.

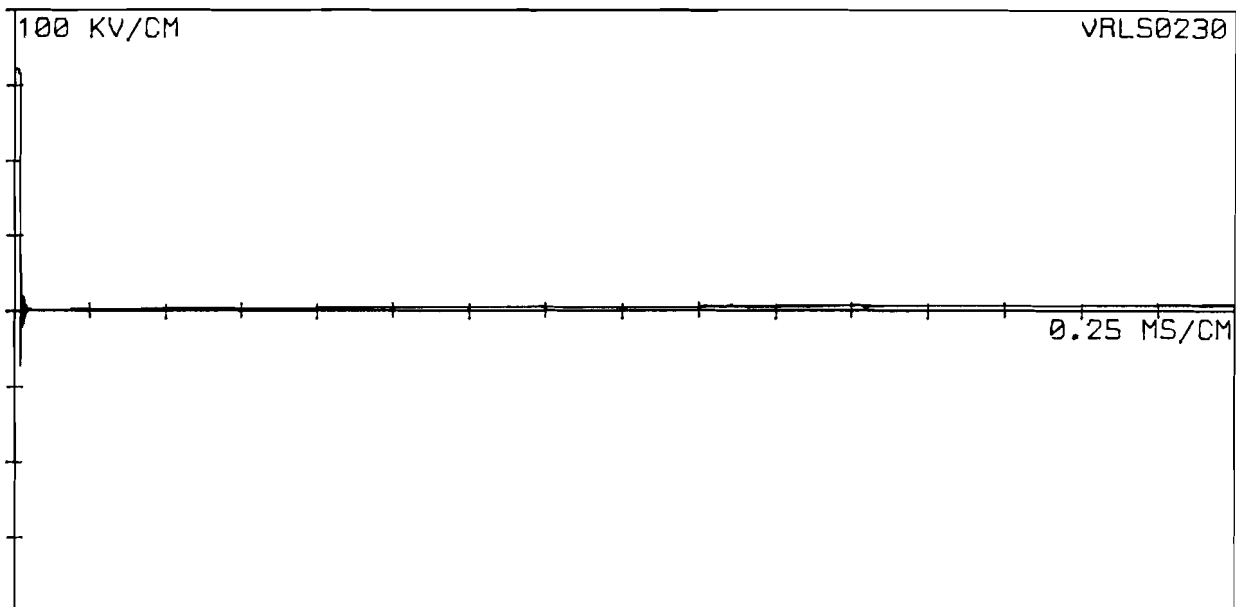
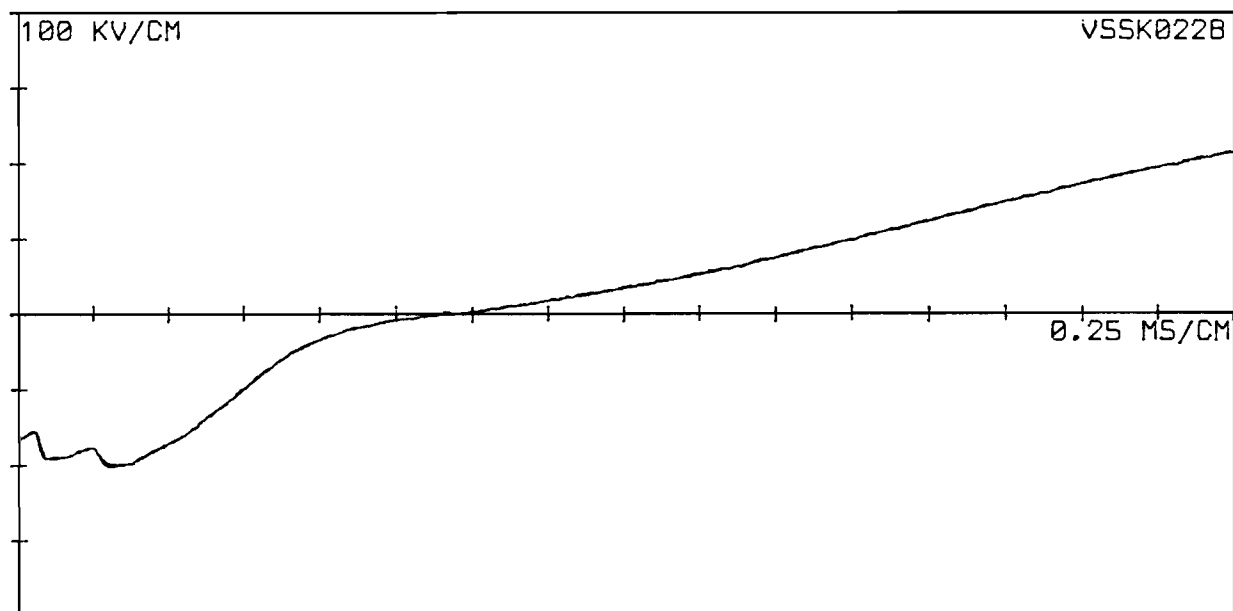
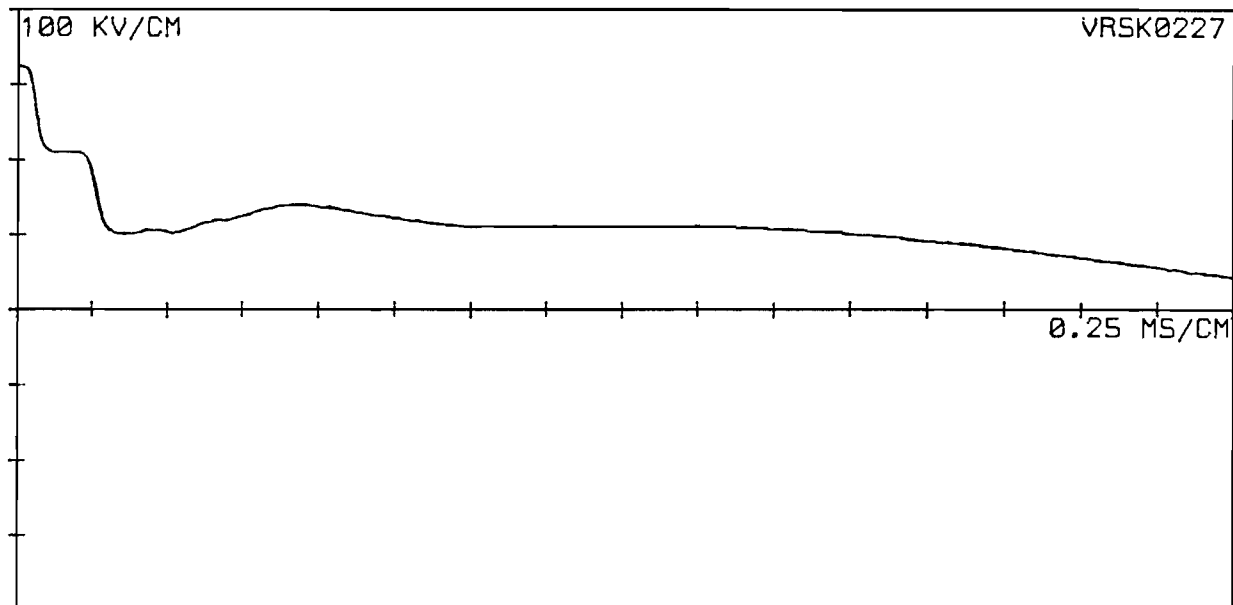


Fig.3.41 Spanning R-fase op foutplaats, TNA-simulatie III
sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



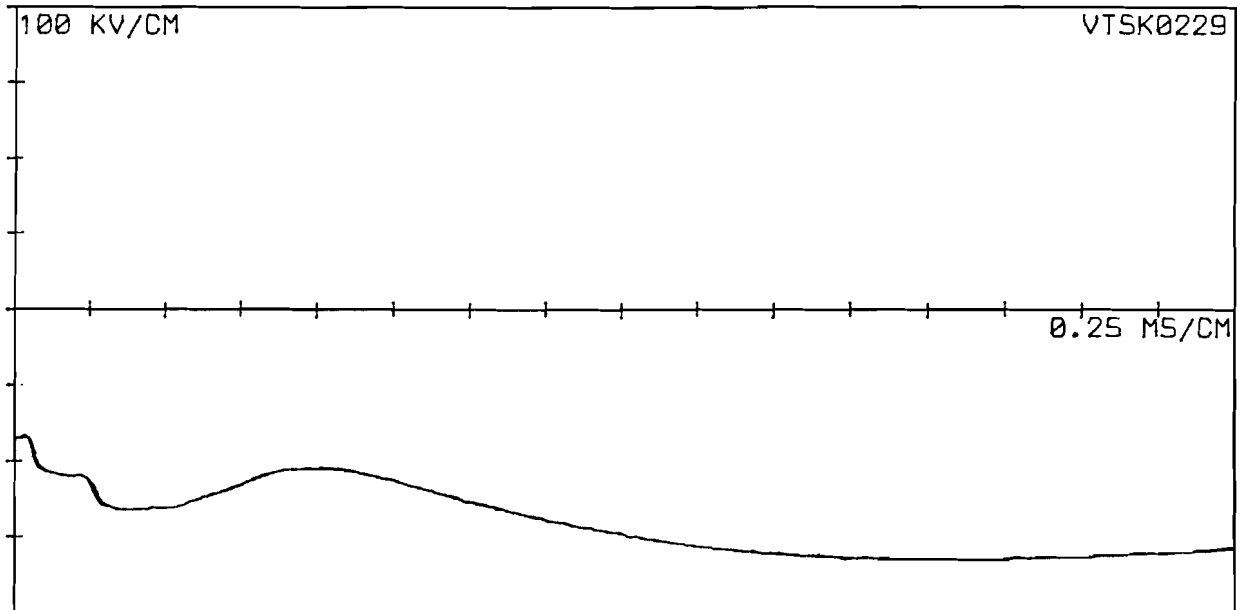
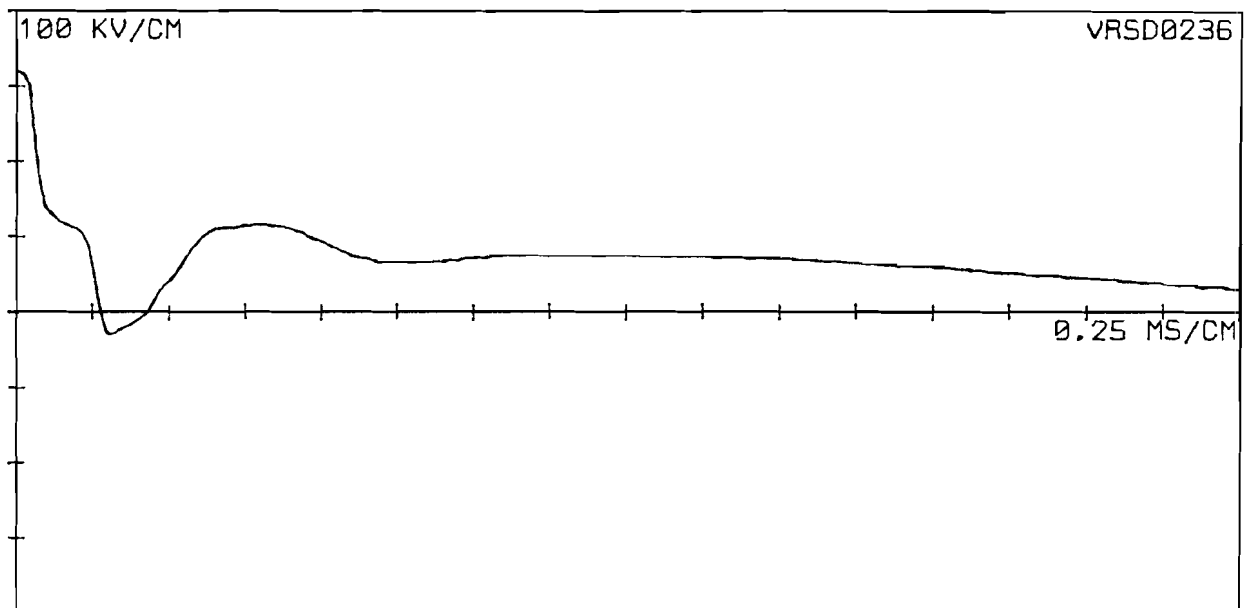


Fig.3.42 Spanningen in station Krimpen, TNA-simulatie III
sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



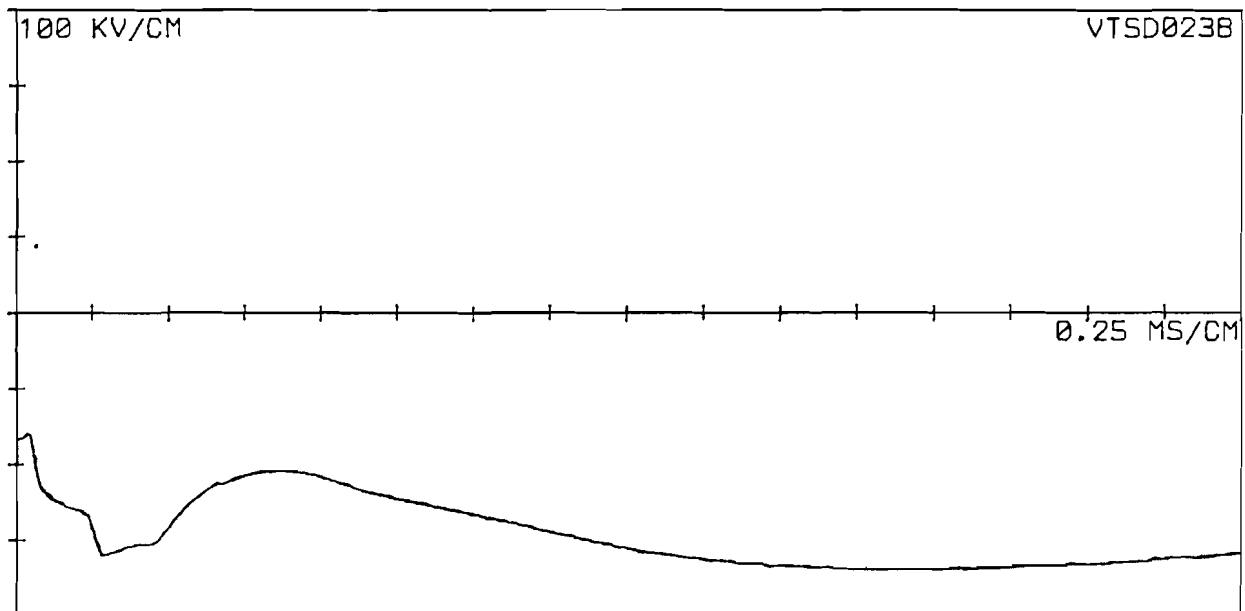
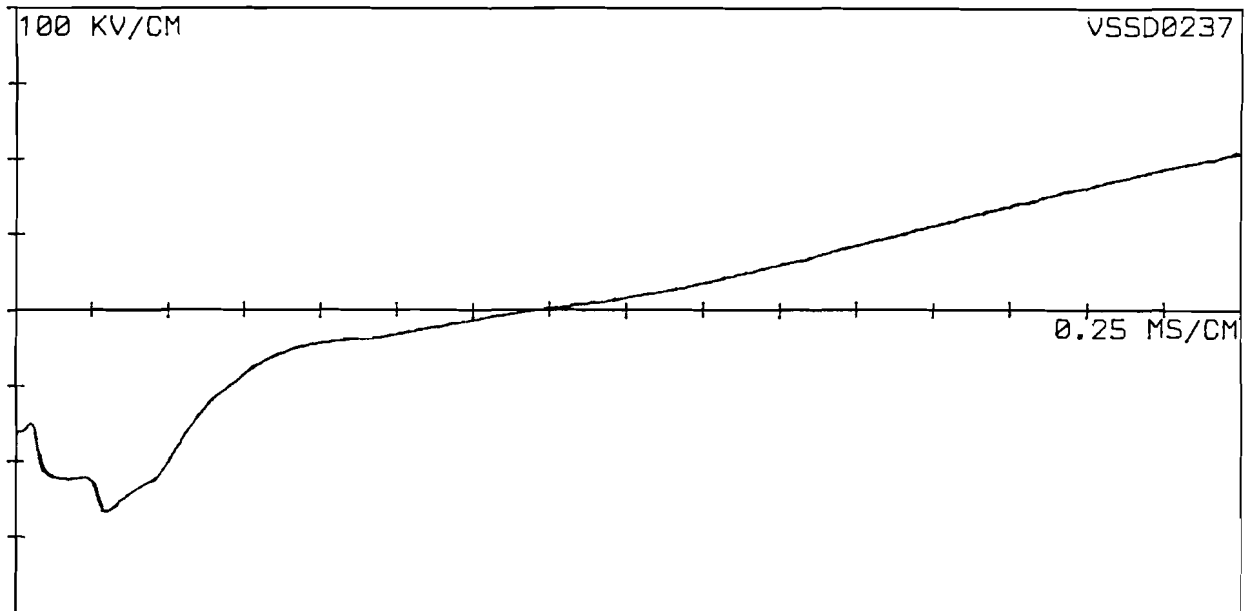


Fig.3.43 Spanningen in station Diemen, TNA-simulatie III
sluiting halverwege Krimpen-Diemen tussen R-fase
en aarde op spanningsmaximum R-fase, geschaald naar
topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

Gedurende de eerste looptijd laat de plot VRSK0227
(fig.3.42) een vlak verloop zien, precies zoals we zouden
verwachten. De plot VRSK0227 komt in het gebied tot 0.5 mil-
liseconde overeen met het overeenkomstige EMTP resultaat.

De plot VRSD0236 (fig.3.43) laat helemaal geen overeenkomst zien met het overeenkomstige EMTP resultaat. Wanneer we alle resultaten met EMTP vergelijken zien we dat de resultaten in station Krimpen van beide modellen in het gebied tot 0.5 milliseconde goed met elkaar overeenkomen. Daarna missen we de superpositie op de 50 Hz. De resultaten van station Die-men komen helemaal niet overeen met EMTP. Ook bij deze resultaten missen we na 0.5 milliseconde de superpositie op de 50 Hz.

Van alle drie TNA-simulaties vertoont de simulatie II dus de meeste overeenkomst met de EMTP-resultaten.

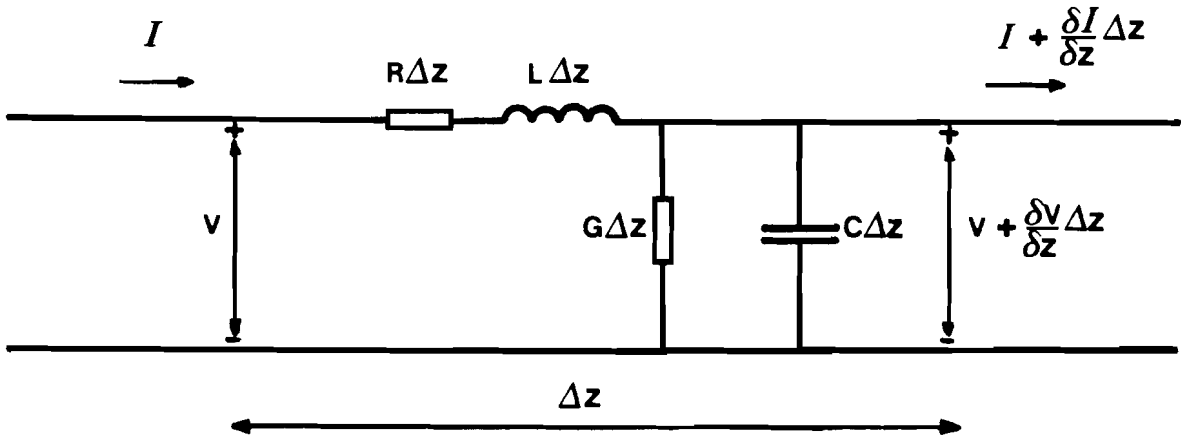
4. Enige snelle beveiligingsalgoritmen.4.1 Bergeronvergelijkingen verliesvrije lijn.

Fig.4.1 Eenfasetransmissielijn.

Voor een eenfasetransmissielijn (fig.4.1) gelden de volgende stroom- en spanningsrelaties, de zogenaamde telegraafvergelijkingen in het frequentiedomein:

$$\frac{\delta V}{\delta z} = -(R + j\omega L) I \quad (4.1)$$

$$\frac{\delta I}{\delta z} = -(G + j\omega C) V \quad (4.2)$$

met R weerstand per lengte-eenheid,
 L inductiviteit per lengte-eenheid,
 G conductiviteit per lengte-eenheid,
 C capaciteit per lengte-eenheid.

Eliminatie van I geeft de volgende differentiaalvergelijkingen:

$$\frac{\delta^2 V}{\delta z^2} = \lambda^2 V \quad (4.3)$$

$$I = -\frac{1}{\lambda Z_g} \frac{\delta V}{\delta z} \quad (4.4)$$

met $\lambda Z_g = R + j\omega L$,

$$\lambda/Z_g = G + j\omega C,$$

waarbij λ de voortplantingsexponent per lengte-eenheid is en Z_g de karakteristieke impedantie.

met als algemene oplossing:

$$V(z, \omega) = A(\omega)e^{\lambda z} + B(\omega)e^{-\lambda z} \quad (4.5)$$

$$I(z, \omega) = -A(\omega)e^{\lambda z}/Z_g + B(\omega)e^{-\lambda z}/Z_g \quad (4.6)$$

waarbij $A(\omega)$ en $B(\omega)$ worden bepaald door de randvoorwaarden.

Volgens deze oplossingen kunnen de signalen op een eenfasetransmissielijn beschouwd worden als een superpositie van een signaal met $B(\omega) = 0$ en een signaal met $A(\omega) = 0$.

Beschouw de term $V_1 = A(\omega)e^{\lambda z}$. In het tijddomein wordt dit:

$$V_1(z, t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega)e^{\lambda z} e^{j\omega t} d\omega \quad (4.7)$$

Met $\lambda = \alpha + j\beta$ ($\alpha > 0, \beta > 0$) en $A(\omega) = |A(\omega)| e^{j\phi}$ wordt formule (4.7):

$$V_1(z, t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |A(\omega)| e^{\alpha z} e^{j(\omega t + \beta z + \phi)} d\omega \quad (4.8)$$

(een superpositie van harmonische signalen met amplitude $|A(\omega)| e^{\alpha z}$ en fasehoek $\omega t + \beta z + \phi$). We hebben hier te maken met een lopende golf welke zich met de snelheid $-\omega/\beta$ voortplant in negatieve z-richting. Namelijk voor elke waarde van t kan een corresponderende waarde voor z worden gevonden, zodanig dat de fasehoek constant is. Uit de factor $e^{\alpha z}$ volgt nog dat het een gedempte golf betreft. Het quotiënt van spanning en stroom wordt bepaald door de golfimpedantie $Z_g(\omega)$. Bij de

spanningsterm V_1 hoort de stroomterm $I_1(z, \omega) = A(\omega)e^{\lambda z}/Z_g$, die zich met dezelfde demping en snelheid in negatieve z -richting beweegt.

Op overeenkomstige wijze is aan te tonen dat de termen met $B(\omega)$ lopende golven zijn welke zich voortplanten in de positieve z -richting, met dezelfde snelheid en demping als de golven welke zich bewegen in negatieve richting.

Met de formules (4.5) en (4.6) zijn de volgende vergelijkingen samen te stellen:

$$V(z, \omega) - Z_g I(z, \omega) = 2A(\omega)e^{\lambda z} \quad (4.9)$$

$$V(z, \omega) + Z_g I(z, \omega) = 2B(\omega)e^{-\lambda z} \quad (4.10)$$

Met de aannames:

- i) Z_g is onafhankelijk van de frequentie,
- ii) α is onafhankelijk van de frequentie,
- iii) $\beta = \omega/v$, met v frequentie-onafhankelijke voortplantingssnelheid

levert een inverse Fouriertransformatie van de formules (4.9) en (4.10) de volgende vergelijkingen in het tijddomein:

$$V(z, t) - Z_g I(z, t) = e^{\alpha z} a(t + z/v) \quad (4.11)$$

$$V(z, t) + Z_g I(z, t) = e^{-\alpha z} b(t - z/v) \quad (4.12)$$

$$\text{met } a(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} 2A(\omega)e^{j\omega t} d\omega,$$

$$b(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} 2B(\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

Toegepast op een stuk eenfaselijns ter lengte l met een looptijd τ volgt nu voor de uiteinden van de lijn:

$$V(0, t) - Z_g I(0, t) = a(t) \quad (4.13)$$

$$V(0, t) + Z_g I(0, t) = b(t) \quad (4.14)$$

$$V(1,t) - Z_g I(1,t) = e^{-\alpha l} a(t+\tau) = e^{-\alpha l} \{V(0,t+\tau) - Z_g I(0,t+\tau)\} \quad (4.15)$$

$$V(1,t) + Z_g I(1,t) = e^{-\alpha l} b(t-\tau) = e^{-\alpha l} \{V(0,t-\tau) + Z_g I(0,t-\tau)\} \quad (4.16)$$

Wanneer nu de lijn verliesvrij is ($\alpha=0$) en een naar het midden van de lijn toe gerichte stroom wordt positief gesteld dan gaan de vergelijkingen (4.15) en (4.16) over in:

$$V(0,t) + Z_g I(0,t) = V(1,t+\tau) - Z_g I(1,t+\tau) \quad (4.17)$$

$$V(0,t) - Z_g I(0,t) = V(1,t-\tau) + Z_g I(1,t-\tau) \quad (4.18)$$

Deze twee vergelijkingen zijn de zogenaamde Bergeronvergelijkingen voor de verliesvrije lijn.

4.2 Beveiliging, gebaseerd op directe detectie van lopende golven.

4.2.1 Principe.

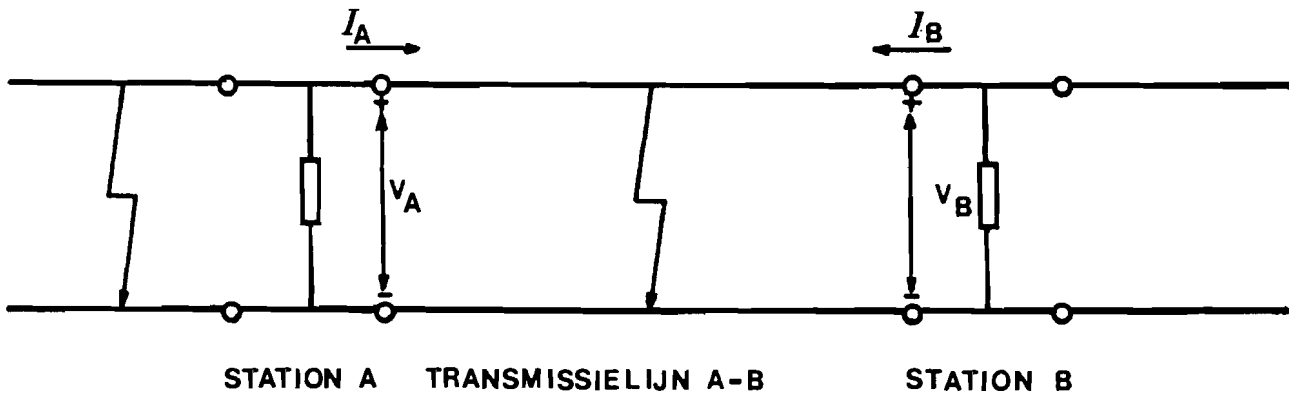


Fig.4.2 Gedeelte verliesvrije eenfasetransmissieconfiguratie.

In fig.4.2 is een gedeelte van een verliesvrije eenfasetransmissieconfiguratie gegeven. We zien hier twee transmissielijnen en twee stations. In deze configuratie zijn de karakteristieke impedanties en looptijden frequentie-onafhankelijk verondersteld.

Wanneer er ergens rechts van station A een sluiting optreedt (we spreken dan van een voorwaartse fout) zal er een lopende golf in de richting van station A gaan lopen. Wanneer deze golf, afkomstig van de fout, station A bereikt zal voor de transiënte signalen in A in eerste instantie gelden

$$V_A(t) - Z_g I_A(t) = A(t) \quad (4.19)$$

met V_A transiënte spanning station A,

I_A transiënte stroom station A.

$A(t)$ wordt bepaald door de randvoorwaarden voor stroom en spanning op de foutplaats. Onmiddellijk treedt er reflectie op waardoor er een golf in de richting van station B gaat lopen. Stel de reflectiefactor is r met $|r| < 1$ dan geldt voor de transiënte signalen in A tevens

$$V_A(t) + Z_g I_A(t) = rA(t) \quad (4.20)$$

Wanneer er een sluiting links van station A optreedt (achterwaartse fout) dan zal er in A gedurende twee maal de looptijd van de lijn A-B slechts een golf in de richting van station B worden waargenomen, zodat voor de transiënte signalen in A geldt

$$V_A(t) + Z_g I_A(t) = V(t) \quad (4.21)$$

$$V_A(t) - Z_g I_A(t) = 0 \quad (4.22)$$

Volgens de formules (4.19) en (4.20) geldt dus voor een voorwaartse fout op moment dat de fout merkbaar is in A:

$$|V_A(t) - Z_g I_A(t)| > 0 \quad (4.23)$$

$$|V_A(t) + Z_g I_A(t)| > 0 \quad (4.24)$$

$$|V_A(t) - Z_g I_A(t)| > |V_A(t) + Z_g I_A(t)| \quad (4.25)$$

terwijl voor een achterwaartse fout geldt (formules (4.21) en (4.22)):

$$|V_A(t) - Z_g I_A(t)| = 0 \quad (4.26)$$

$$|V_A(t) + Z_g I_A(t)| > 0 \quad (4.27)$$

We noemen $|V_A(t) - Z_g I_A(t)|$ de absolute achterwaartse golf en $|V_A(t) + Z_g I_A(t)|$ de absolute voorwaartse golf.

Uit de formules (4.23) t/m (4.27) blijkt dat het mogelijk is in een station te detecteren of er een voorwaartse fout of een achterwaartse fout is opgetreden. Een detectie-methode is de volgende:

Wordt $|V_A(t) - Z_g I_A(t)|$ groot vóór $|V_A(t) + Z_g I_A(t)|$ of het gebeurt tegelijkertijd dan is er sprake van een voorwaartse fout. Wanneer $|V_A(t) - Z_g I_A(t)|$ ná $|V_A(t) + Z_g I_A(t)|$ groot wordt is er sprake van een achterwaartse fout.

Met deze detectie-methode kan nu bepaald worden of de fout tussen station A en station B (interne fout) is opgetreden of niet. Wanneer namelijk zowel station A als station B een voorwaartse fout detecteren is er sprake van een interne fout, anders niet.

Bedenk hier bij wel dat we de transiënte signalen in beide stations tot beschikking moeten hebben. Echter de transiënte signalen per station hoeven zelf niet te worden verstuurd, ze kunnen ter plekke van het station worden verwerkt (alleen resultaat, voorwaartse fout/achterwaartse fout, wordt dan verstuurd).

Willen we het bovenstaande toepassen op driefaselijnen dan zullen we in principe een componenttransformatie op de fasegrootheden van de driefaselijn moeten toepassen. Voor elk van deze componenten in elk station berekenen we de absolute achterwaartse golf en de absolute voorwaartse golf. Mogelijke foutcriteria zijn dan:

Wanneer zowel in station A als station B minstens één van de absolute achterwaartse golven groot wordt vóór de bijbehorende absolute voorwaartse golf of het gebeurt tegelijkertijd dan bevindt zich ergens in de driefaselijn tussen A en B een sluiting. In de andere gevallen is sprake van geen sluiting in de driefaselijn tussen A en B.

Als er in de driefaselijns tussen A en B sluiting optreedt is het mogelijk aan de hand van de waarden van de absolute golven de gestoorde fase(n) te selecteren.

In de formules (4.28) t/m (4.36) zijn de uitdrukkingen gegeven voor de transiënte spanningen en stromen in een station als gevolg van de eerste reflectie van de lopende bedrijfsgolven en de lopende dubbelcircuitgolf afkomstig van de sluiting tussen de R-fase en aarde ergens op de dubbelcircuitlijn. Voor richtingen van de spanningen en stromen zie fig.3.2. Deze uitdrukkingen zijn op een analoge wijze afgeleid als in paragraaf 3.1, echter nu met $F_0=0$.

$$V_A = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{4Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \quad (4.28)$$

$$V_B = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-2Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \quad (4.29)$$

$$V_C = V_B \quad (4.30)$$

$$I_R = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{5Z_1 + 6Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \quad (4.31)$$

$$I_S = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-Z_1}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \quad (4.32)$$

$$I_T = I_S \quad (4.33)$$

$$I_U = \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-Z_1 - 6Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \quad (4.34)$$

$$I_V = I_S \quad (4.35)$$

$$I_W = I_S \quad (4.36)$$

In de uitdrukkingen voor de transiënte spanningen en stromen als gevolg van de eerste reflectie van alle lopende golven, formules (3.68) t/m (3.76), herkennen we de bovenstaande uitdrukkingen.

Met de bovenstaande uitdrukkingen, (4.28) t/m (4.36), kunnen we voor elke component van een transformatie de waarde van de absolute achterwaartse golf en de bijbehorende absolute voorwaartse golf berekenen. Bedenk hierbij dat de richting van de stromen in de bovenstaande uitdrukkingen tegengesteld gekozen is aan de stromen in de uitdrukkingen van de absolute golven. Bereken voor de componenttransformatie:

$$B_1 = 1/3F_a - 1/3F_b \quad (4.37)$$

$$B_2 = 1/3F_a - 1/3F_c \quad (4.38)$$

$$H = 1/3F_a + 1/3F_b + 1/3F_c \quad (4.39)$$

met F_{a-c} de fasecomponenten,

ontstaan de uitdrukkingen (4.40) t/m (4.51). De hierbij gebruikte karakteristieke impedanties zijn voor zowel de component B_1 als B_2 de impedantie Z_1 en voor de component H de impedantie Z_0 . Verklaring van in de uitdrukkingen (4.40) t/m (4.51) gebruikte afkortingen:

AB1RST=absolute achterwaartse golf berekend met component

$B_1 = 1/3F_a - 1/3F_b$ voor beveiliging circuit R-S-T,

VB1RST=absolute voorwaartse golf berekend met component

$B_1 = 1/3F_a - 1/3F_b$ voor beveiliging circuit R-S-T, enz..

$$AB1RST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{2(Z_1)^2 + 4Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \right| \quad (4.40)$$

$$VB1RST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-2(Z_1)^2}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \right| \quad (4.41)$$

$$AB2RST = AB1RST \quad (4.42)$$

$$VB2RST=VB1RST \quad (4.43)$$

$$AHRST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[Z_0 \right] \right| \quad (4.44)$$

$$VHRST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[-Z_0 \right] \right| \quad (4.45)$$

$$AB1UVW=0 \quad (4.46)$$

$$VB1UVW = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{4Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \right| \quad (4.47)$$

$$AB2UVW=AB1UVW \quad (4.48)$$

$$VB2UVW=VB1UVW \quad (4.49)$$

$$AHUVW=VHRST \quad (4.50)$$

$$VHUVW=AHRST \quad (4.51)$$

Analoog voor de eerste reflectie van alle lopende golven, dus ook van de homopolaire golf (rekenen met de formules (3.68) t/m (3.76)):

$$AB1RST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{2(Z_1)^2 + 4Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \right| \quad (4.52)$$

$$VB1RST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-2(Z_1)^2}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \right| \quad (4.53)$$

$$AB2RST=AB1RST \quad (4.54)$$

$$VB2RST=VB1RST \quad (4.55)$$

$$AHRST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[2Z_0 \right] \right| \quad (4.56)$$

$$VHRST = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{-2(Z_0)^2}{Z_0 + 2Z_0^*} \right] \right| \quad (4.57)$$

$$AB1UVW = 0 \quad (4.58)$$

$$VB1UVW = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{4Z_1 Z_1^*}{Z_1 + 2Z_1^*} \right] \right| \quad (4.59)$$

$$AB2UVW = AB1UVW \quad (4.60)$$

$$VB2UVW = VB1UVW \quad (4.61)$$

$$AHUVW = 0 \quad (4.62)$$

$$VHUVW = \left| \frac{2E}{Z_0 + Z_d + 4Z_1} \left[\frac{4Z_0 Z_0^*}{Z_0 + 2Z_0^*} \right] \right| \quad (4.63)$$

Uit deze formules (4.52) t/m (4.63) blijkt dat de komst van de homopolaire golf de absolute achterwaartse golven met de bijbehorende absolute voorwaartse golven van de componenten B_1 en B_2 niet beïnvloed, echter wel die van de component H .

In paragraaf 4.2.2 zal op de bovenstaande uitdrukkingen voor de absolute golven in een station worden teruggekomen.

Een beveiliging, gebaseerd op absolute achterwaartse golven en absolute voorwaartse golven noemen we een beveiliging, gebaseerd op directe detectie van lopende golven. Meer informatie over deze beveiliging staat in "New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of EHV transmission lines", geschreven door A.T. Johns [5].

4.2.2 Test.

Een beveiligingsalgoritme, gebaseerd op directe detectie van lopende golven, is getest met transiënte signalen van de TNA-simulatie II, en wel van:

- sluiting A: de sluiting halverwege Krimpen-Diemen, tussen R-fase en aarde op spanningsmaximum R-fase, en
- sluiting B: de sluiting halverwege Krimpen-Diemen, tussen R-fase en W-fase op 30° na spanningsmaximum R-fase.

Daartoe zijn, alvorens met het testen is begonnen, van de sluitingen A en B gesimuleerd met de TNA-simulatie II, de stationaire signalen gemeten.

Het testen is uitgevoerd op een personal computer. Hierbij zijn de volgende computerprogramma's gebruikt:

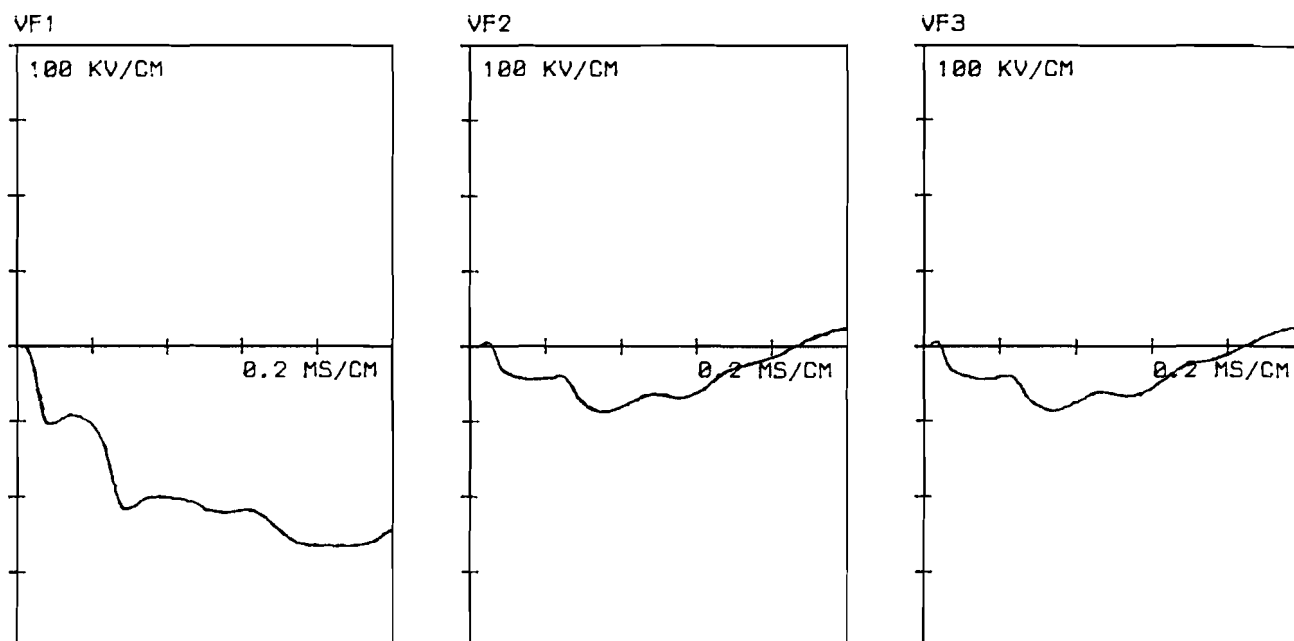
- 1) DATCON,
- 2) MSKERMIT,
- 3) DATAF,
- 4) LOGODIR1,
- 5) EPS1,
- 6) EPS2.

Korte toelichting op de programma's:

De van simulatie II opgeslagen data zijn gecodeerd. Doordat deze data in die vorm niet bruikbaar zijn voor allerlei databewerkingen moeten deze gedecodeerd worden. Dit gebeurt met het programma DATCON op de computer van de TNA. Met het programma MSKERMIT wordt de met DATCON op scherm geplaatste file overgestuurd naar een personal computer en opgeslagen. Daar brengt DATAF op de signalen van de sluitingen de stationaire signalen in mindering en slaat de resulterende signalen (transiënte signalen) op. Denk hierbij dat deze signalen gelden voor driefasebronnen met een topwaarde 319 V en frequentie 50 Hz. Met het programma EPS1, een programma voor plotten op de EPSON HI 80 plotter, is het toch mogelijk deze data te gebruiken voor driefasebronnen met andere

waarden. De met DATAF verkregen transiënte fasespanningen en stromen worden verwerkt met het programma LOGODIR1. Dit programma berekent voor elke component van een componenttransformatie aan elk uiteinde van een driefaselijns de absolute achterwaartse golf en de absolute voorwaartse golf. De componenttransformatie die in LOGODIR1 wordt gebruikt is dezelfde als die in paragraaf 4.2.1. Met het programma EPS2 is het mogelijk de resultaten van LOGODIR1 te plotten. Voor meer informatie over de programma's zie literatuur [4].

In de fig. 4.3 t/m 4.6 zijn de transiënte signalen in Krimpen en Diemen afkomstig van de sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz, gegeven (verklaring afkortingen: VF1=spanning fase-R of fase-U, IF1=stroom fase-R of fase-U, enz.).



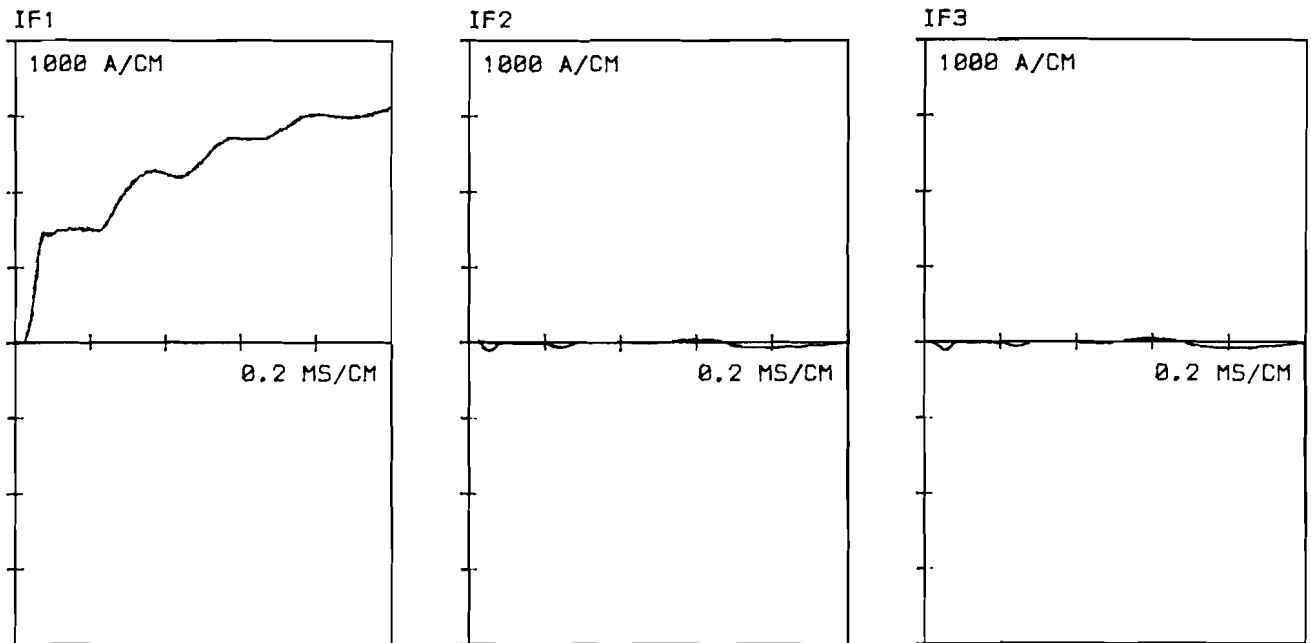
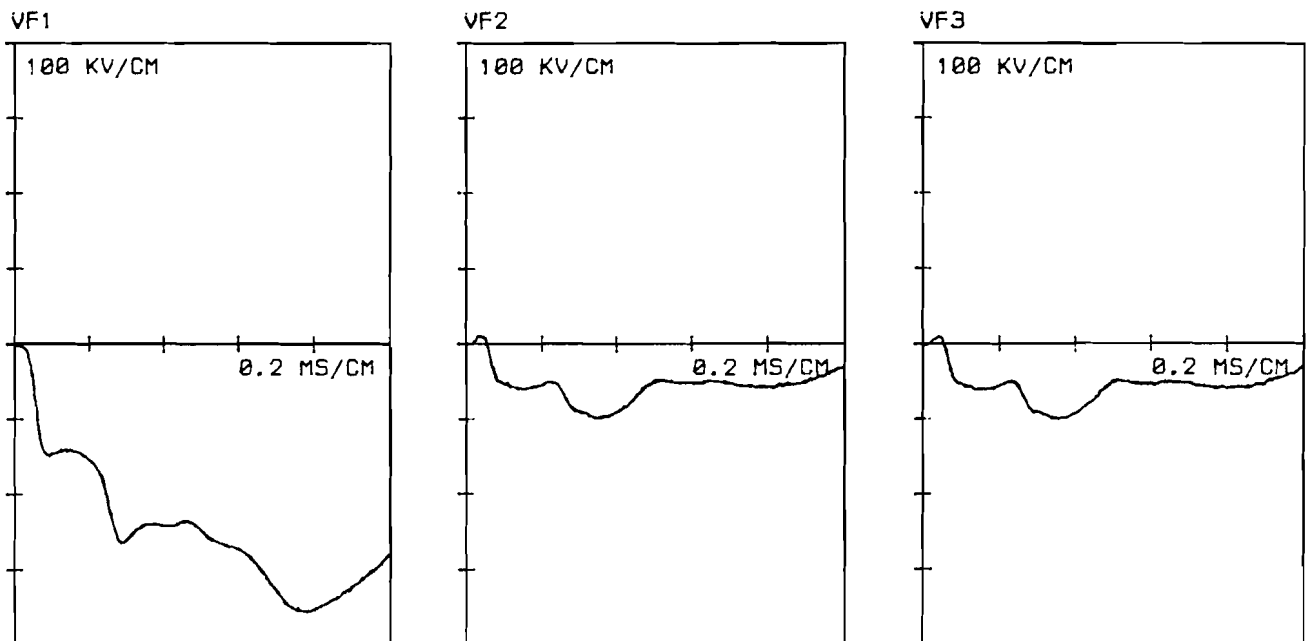


Fig.4.3 Transiënte signalen in circuit R,S,T in station Krimpen, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



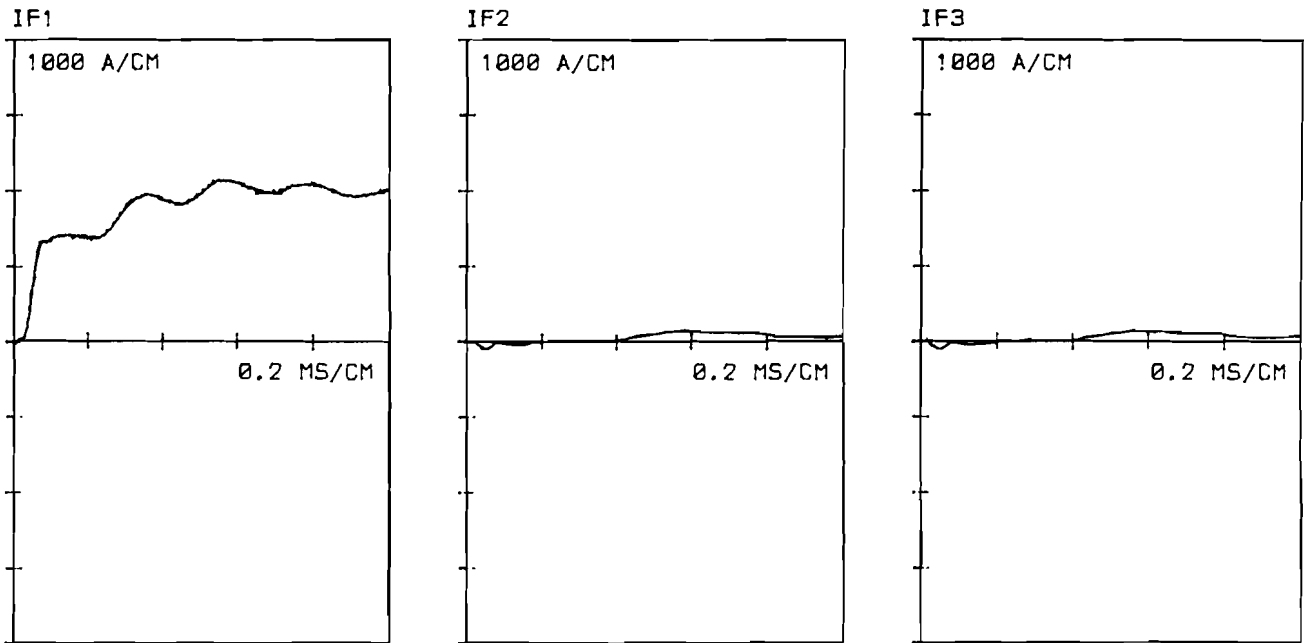
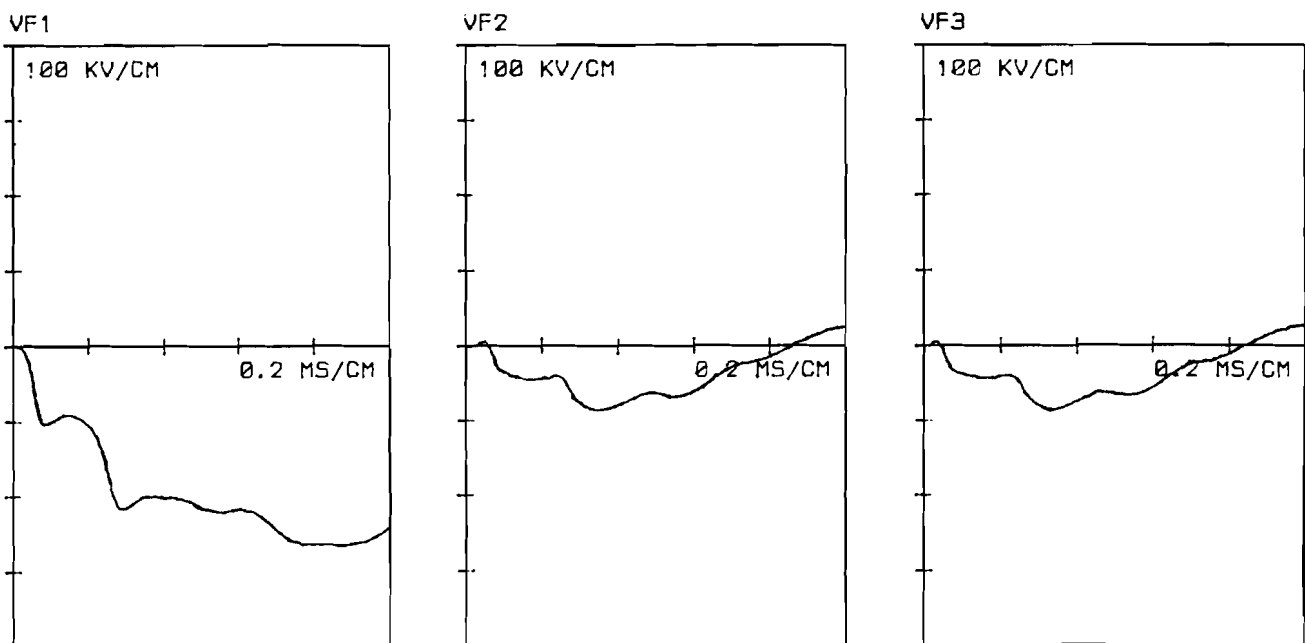


Fig.4.4 Transiënte signalen in circuit R,S,T in station Diemen, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



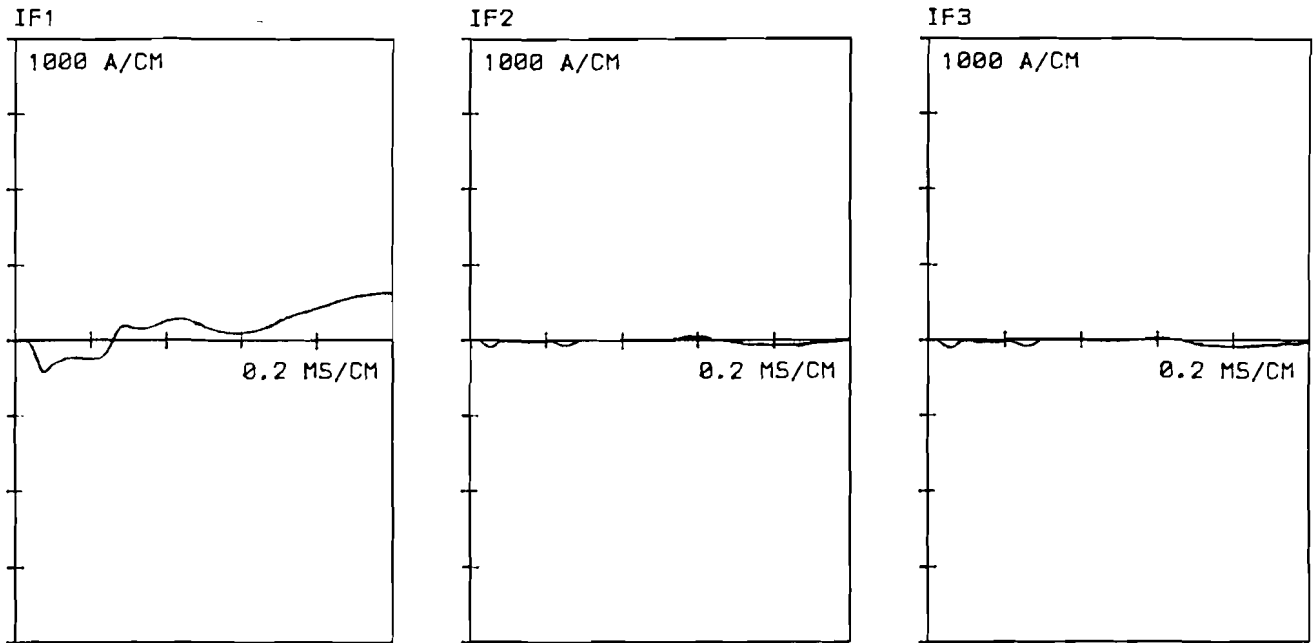
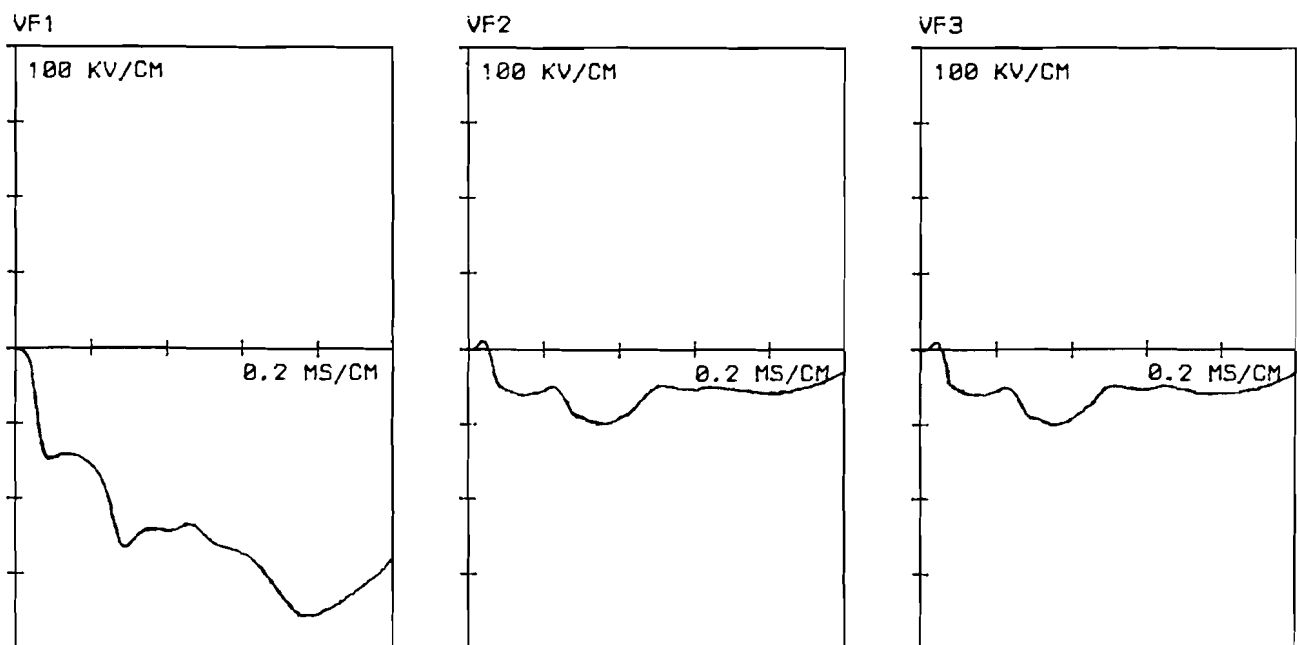


Fig.4.5 Transiënte signalen in circuit U,V,W in station Krimpen, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



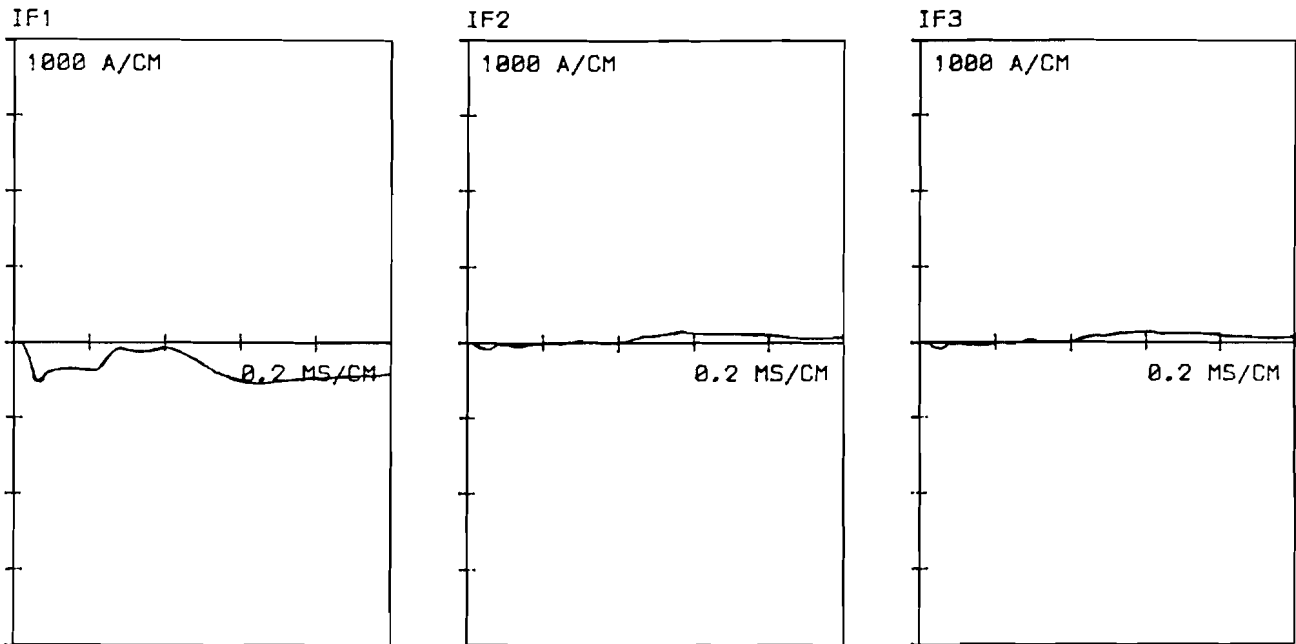


Fig.4.6 Transiënte signalen in circuit U,V,W in station Diemen, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

Uit de bovenstaande plots van elk station blijkt dat $V_S = V_T$ ($=V_V = V_W$) en $I_S = I_T = I_V = I_W$. We herkennen deze gelijkheden ook in de uitdrukkingen voor de transiënte signalen afkomstig van de eerste reflectie van de lopende golven (par.3.1 en par.4.2.1). Dus niet alleen bij de eerste reflectie gelden deze gelijkheden, maar gedurende het hele verschijnsel.

In fig.4.7 t/m 4.10 zijn de LOGODIR1 resultaten van de sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz, gegeven (verklaring afkortingen:

ABS ACHTER GOLF=absolute achterwaartse golf, enz.). Voor de karakteristieke impedantie voor zowel de component B_1 als B_2 is de waarde 260.30Ω en voor component H de waarde 632.70Ω gehanteerd. Deze waarden zijn de Z_1 (260.30Ω) en de Z_0 (632.70Ω) van de dubbelcircuitlijn Krimpen-Diemen bij $f=10000$ Hz.

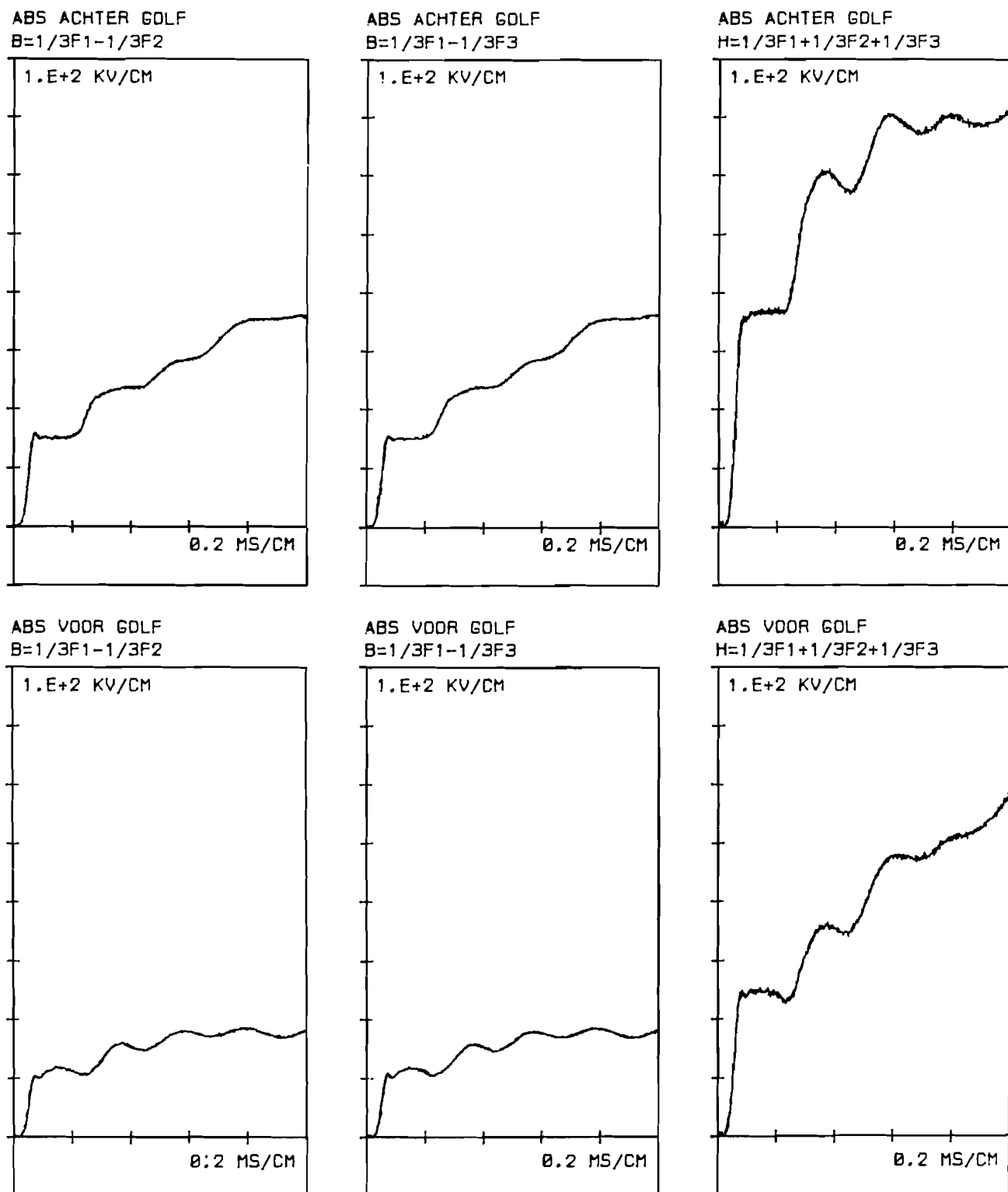


Fig.4.7 Absolute golven in station Krimpen voor beveiliging
 circuit R-S-T,TNA-simulatie II sluiting A;geschaald
 naar topwaarde naar 319 kV en frequentie 50 Hz.

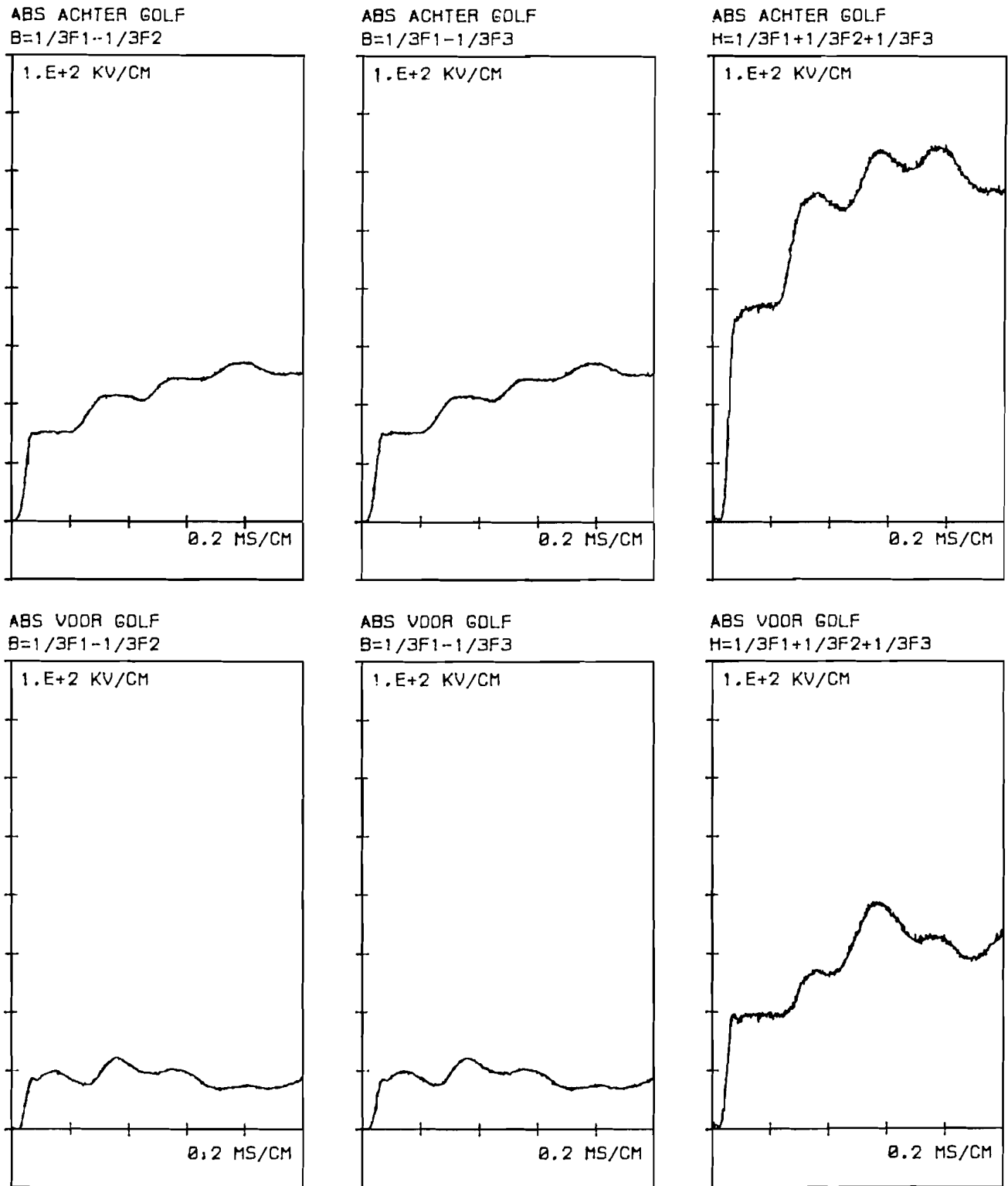


Fig.4.8 Absolute golven in station Diemen voor beveiliging circuit R-S-T, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

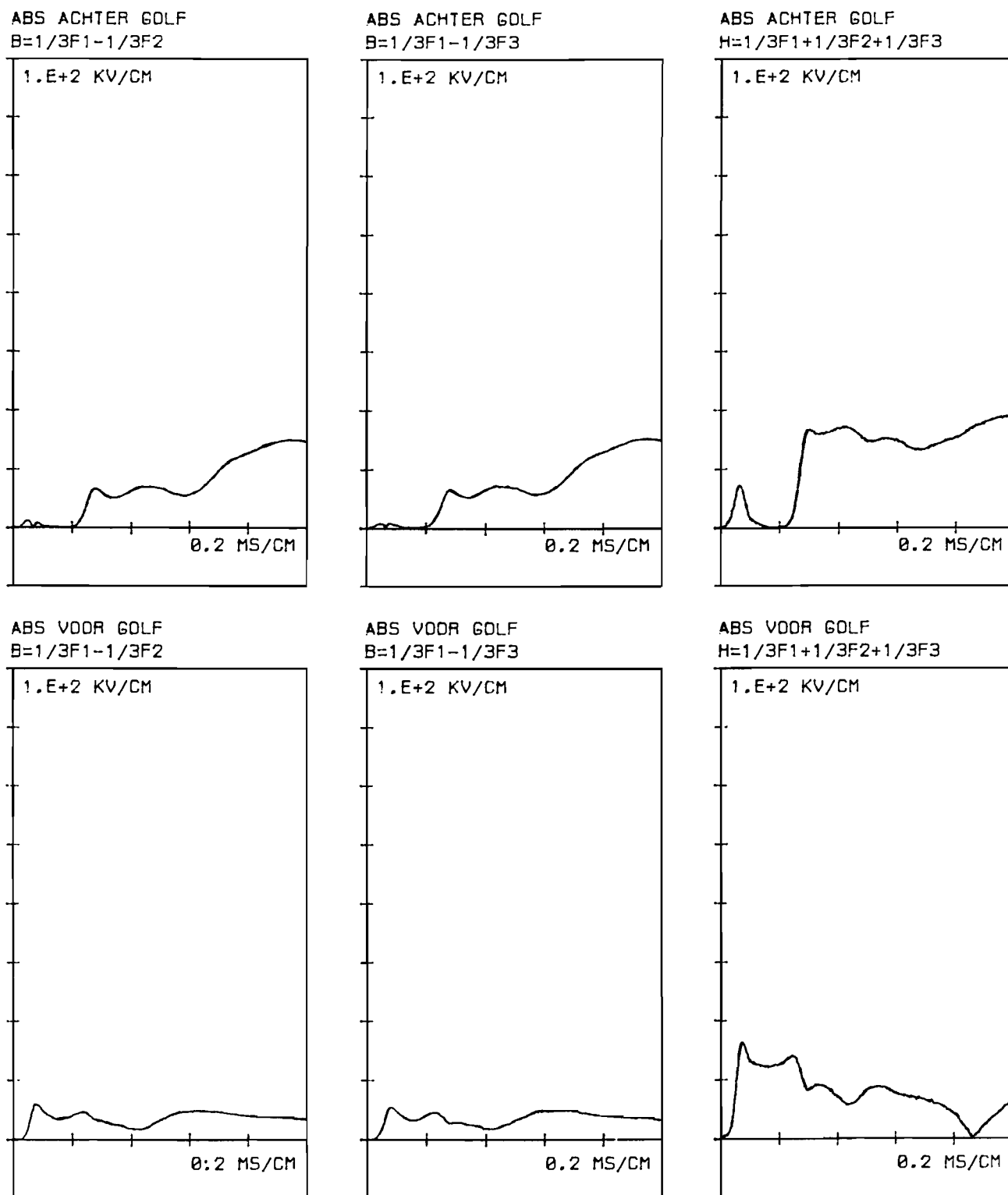


Fig.4.9 Absolute golven in station Krimpen voor beveiliging circuit U-V-W,TNA-simulatie II sluiting A,geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

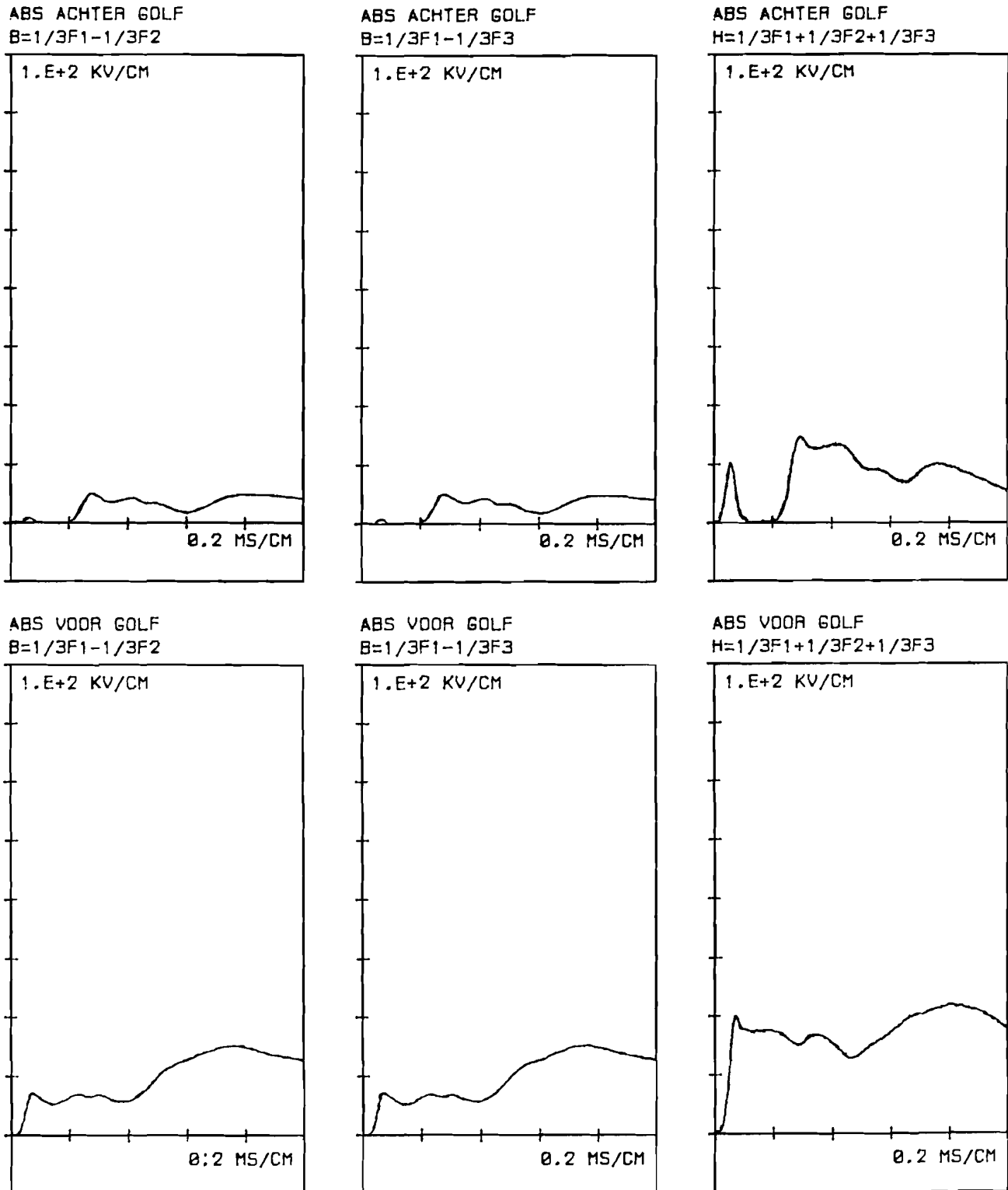


Fig.4.10 Absolute golven in station Diemen voor beveiliging circuit U-V-W, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

De plots betreffende de beveiliging van circuit R-S-T (fig.4.7, fig.4.8) laten zien dat zowel in Krimpen als in Diemen telkens een absolute achterwaartse golf tegelijkertijd start met zijn absolute voorwaartse golf, dus volgens de foutcriteria in paragraaf 4.2.1 een sluiting in circuit R-S-T. Echter de plots betreffende circuit U-V-W (fig.4.9, fig.4.10) doen dit niet. Daar wordt elke absolute achterwaartse golf van zowel component B_1 als B_2 groter ná zijn bijbehorende absolute voorwaartse golf en start elke absolute achterwaartse golf van de component H tegelijkertijd met zijn bijbehorende absolute voorwaartse golf. Dit zou volgens dezelfde criteria betekenen dat er een sluiting is in circuit U-V-W, en dit is echter niet geval!

De verklaring hiervoor is het feit dat de homopolaire lopende golf een grotere looptijd bezit dan de andere lopende golven. Door het toepassen van de criteria van paragraaf 4.2.1 heeft men een gelijke looptijd voor alle lopende golven ingevoerd. Uitgaande van gelijke looptijden bekijken we de formules (4.52) t/m (4.63), waaruit in het geval van het circuit U-V-W blijkt dat er geen absolute achterwaartse golf eerder start of gelijktijdig dan de bijbehorende absolute voorwaartse golf.

Voor de juiste criteria moeten we echter uitgaan van de reflectie van de eerste golven die arriveren op het station. Bij deze sluiting mogen we voor zowel Krimpen als Diemen aannemen dat de lopende bedrijfsgolven en de lopende dubbelcircuitgolf gelijktijdig arriveren. Bekijken we dan de formules (4.40) t/m (4.51) dan zien we dat in het geval van circuit R-S-T voor zowel Krimpen als Diemen elke absolute achterwaartse golf gelijktijdig start met zijn bijbehorende absolute voorwaartse golf. En in het geval van circuit U-V-W wordt elke absolute achterwaartse golf van zowel de component B_1 als B_2 groter na zijn voorwaartse golf en start elke absolute achterwaartse golf van component H gelijktijdig met zijn voorwaartse golf. Dit alles zien we ook terug in de plots (fig.4.8 t/m fig.4.10).

Verder zien we in deze plots dat in elk station de absolute golven berekend met de component B_1 identiek zijn met de golven berekend met de component B_2 . Dit herkennen we ook in de berekende uitdrukkingen van de absolute golven in paragraaf 4.2.1.

Een overeenkomstige analyse van de sluiting B laat zien dat bij de beveiliging van circuit R-S-T zowel in Krimpen als in Diemen elke absolute achterwaartse golf gelijktijdig start met zijn absolute voorwaartse golf. Bij de beveiliging van circuit U-V-W zien we zowel in Krimpen als in Diemen dat de absolute achterwaartse golf van B_1 later start dan de bijbehorende voorwaartse golf, terwijl de overige golven gelijktijdig starten. Volgens de foutcriteria van paragraaf 4.2.1 betekent dit fouten in beide circuits.

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat het algoritme aangepast moet worden, wil het hier juist detecteren of er in een circuit van de dubbelcircuitlijn een sluiting is opgetreden. Gedacht kan worden aan de foutcriteria aan te passen. B.v.: geen sluiting in een circuit als in elk aangrenzend station geldt dat er tenminste twee van de absolute achterwaartse golven later starten als de bijbehorende absolute voorwaartse golven en indien dit niet is dan sluiting in het circuit. Men zou ook alleen maar de golven met de component B_1 en component B_2 kunnen berekenen, wat misschien weer ten koste zal gaan van de eventuele selectie van de gestoorde fase(n). Een andere oplossing zou zijn het toepassen van aanspreekrelais per component, die boven een voor elke component verschillende waarde van de absolute golven het beslissingmechanisme start. Ook kan gedacht worden aan het aanbrengen van een zekere tijdvertraging. Een voorwaartse fout is pas een echte fout als hij gedurende enige tijd een voorwaartse fout is geweest. Een andere mogelijkheid zou

zijn, in plaats van een componenttransformatie per circuit, een transformatie voor beide circuits te nemen. Een zesfase Karrenbauertransformatie zou een goede keuze zijn.

4.3 Lopende golfdifferentiaalbeveiliging.

4.3.1 Principe.

Bekijk weer het gedeelte van een verliesvrije transmissieconfiguratie zoals besproken in paragraaf 4.2. In fig. 4.11 is deze configuratie opnieuw weergegeven.

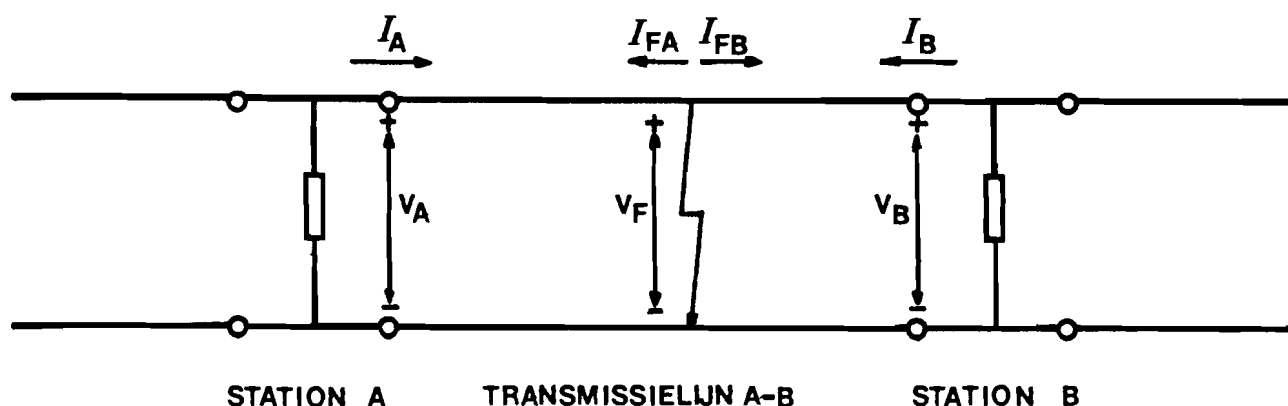


Fig. 4.11 Gedeelte verliesvrije eenfasetransmissieconfiguratie.

Wanneer er een fout optreedt buiten de sectie tussen station A en station B zal een golf die A passeert richting station B met een tijdsvertraging τ in B aankomen. We kunnen het verband dat dan heerst tussen de transiënte signalen in station A en die van station B uitdrukken met een Bergeronvergelijking:

$$V_A(t) + Z_g I_A(t) = V_B(t + \tau) - Z_g I_B(t + \tau) \quad (4.64)$$

met V_{A-B} transiënte spanningen,

I_{A-B} transiënte stromen,

τ looptijd tussen station A en station B.

Voor een golf welke loopt van station B naar station A geldt op dezelfde manier:

$$V_A(t) - Z_g I_A(t) = V_g(t - \tau) + Z_g I_B(t - \tau) \quad (4.65)$$

Wanneer een sluiting tussen station A en station B optreedt gelden voor de transiënte signalen de volgende Bergeronvergelijkingen:

$$V_A(t) - Z_g I_A(t) = V_F(t - \tau_A) + Z_g I_{FA}(t - \tau_A) \quad (4.66)$$

$$V_A(t) + Z_g I_A(t) = V_F(t + \tau_A) - Z_g I_{FA}(t + \tau_A) \quad (4.67)$$

$$V_B(t) - Z_g I_B(t) = V_F(t - \tau_B) + Z_g I_{FB}(t - \tau_B) \quad (4.68)$$

$$V_B(t) + Z_g I_B(t) = V_F(t + \tau_B) - Z_g I_{FB}(t + \tau_B) \quad (4.69)$$

met V_F transiënte spanning

I_{FA-FB} transiënte stromen,

τ_A looptijd tussen de foutplaats en station A,

τ_B looptijd tussen de foutplaats en station B.

Beschouw de onderstaande funkties:

$$\xi(t) = \{V_A(t) + Z_g I_A(t)\} - \{V_B(t + \tau) - Z_g I_B(t + \tau)\} \quad (4.70)$$

$$\varepsilon(t) = \{V_A(t) - Z_g I_A(t)\} - \{V_B(t - \tau) + Z_g I_B(t - \tau)\} \quad (4.71)$$

Volgens de formules (4.64) en (4.65) geldt voor geen sluiting in de lijn tussen A en B:

$$\xi(t) = 0 \quad (4.72)$$

$$\varepsilon(t) = 0 \quad (4.73)$$

terwijl voor wel sluiting in de lijn tussen A en B geldt

(formules (4.66) t/m (4.69):

$$\xi(t) = -Z_g I_F(t + \tau_A) \quad (4.74)$$

$$\varepsilon(t) = Z_g I_F(t - \tau_A) \quad (4.75)$$

met $I_F = I_{FA} + I_{FB}$.

Uit de formules (4.72) t/m (4.75) blijkt dat $\xi(t)$ en $\varepsilon(t)$ gebruikt kunnen worden om een sluiting te detecteren.

Een detectie-methode is de volgende:

Wanneer $\xi(t)$ ongelijk aan nul wordt, dan er sprake van een interne sluiting, anders niet.

Analoog is de detectiemethode met $\varepsilon(t)$. Bedenk dat we bij beide methoden de transiënte signalen van elk station op een plaats tot beschikking moeten hebben, zodat een overdracht noodzakelijk is. In tegenstelling tot de beveiliging, gebaseerd op directe detectie van lopende golven is men nu niet afhankelijk van de plaats van de sluiting.

Willen we het bovenstaande toepassen op driefaselijnen dan zullen we net als bij de beveiliging, gebaseerd op directe detectie (in principe) een componenttransformatie op de fasegrootheden moeten toepassen. Voor elk van de componenten berekenen we $\xi(t)$ of $\varepsilon(t)$. Mogelijke foutcriteria zijn dan: Wanneer minstens één van de $\xi(t)$ of $\varepsilon(t)$ ongelijk aan nul wordt, dan treedt in de driefaselijns tussen A en B ergens een sluiting op. In de andere gevallen is er sprake van geen sluiting in de driefaselijns tussen A en B.

Als er in de driefaselijns tussen A en B een sluiting optreedt, is het mogelijk aan de hand van de ξ -waarden of ε -waarden de gestoorde fase(n) te selecteren.

Een beveiliging gebaseerd op de $\xi(t)$ of/en $\varepsilon(t)$ noemen we een lopende golfdifferentiaalbeveiliging. Meer informatie over deze beveiliging staat in "Fault protection based on travelling waves — part I Theory", geschreven door T. Takagi et al. [6].

4.3.2 Test.

Twee algoritmen, gebaseerd op het lopende golfdifferentiaal-principe, zijn met dezelfde transiënte signalen getest als welke gebruikt zijn bij het testen in paragraaf 4.2.2. De transiënte fasespanningen en stromen afkomstig van een sluiting zijn verwerkt door de programma's LOGODIF1 en LOGODIF2.

Het programma LOGODIF1 berekent voor elke component van een componenttransformaties $\xi(t)$. Het programma LOGODIF2 berekent voor dezelfde componenten $\varepsilon(t)$. In de formules (4.76) t/m (4.82) zijn de in deze programma's gebruikte componenttransformatie gegeven:

$$B_1 = 2/3F_a - 1/3F_b - 1/3F_c \quad (4.76)$$

$$B_2 = F_b - F_c \quad (4.77)$$

$$B_3 = -1/3F_a + 2/3F_b - 1/3F_c \quad (4.78)$$

$$B_4 = -F_a + F_c \quad (4.79)$$

$$B_5 = -1/3F_a - 1/3F_b + 2/3F_c \quad (4.80)$$

$$B_6 = F_a - F_b \quad (4.81)$$

$$H = 1/3F_a + 1/3F_b + 1/3F_c \quad (4.82)$$

Van deze uitdrukkingen zijn er wel een aantal afhankelijk.

Er geldt namelijk:

$$B_1 + B_3 + B_5 = 0 \quad (4.83)$$

$$B_2 + B_4 + B_6 = 0 \quad (4.84)$$

De beide programma's berekenen elk dus zeven waarden. Met deze ξ -waarden of ε -waarden zou het, volgens literatuur [6], mogelijk moeten zijn te bepalen welke fase gestoord is bij eenfasefouten en welke bij tweefasefouten zonder aarde.

In fig.4.12 t/m fig.4.13 zijn de LOGODIF1 resultaten van de sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz, gegeven. Hierbij is voor elke karakteristieke impedantie van een B-component de waarde 260.30 Ω en voor de karakteristieke impedantie van de H-component de waarde 632.70 Ω gehanteerd. Deze waarden stellen resp. voor de Z_1 resp. de Z_0 van de dubbelcircuitlijn Krimpen-Diemen bij $f=10000$ Hz! De looptijd voor alle componenten is gelijk gekozen. Er is hiervoor de waarde 192.33 microseconde genomen.

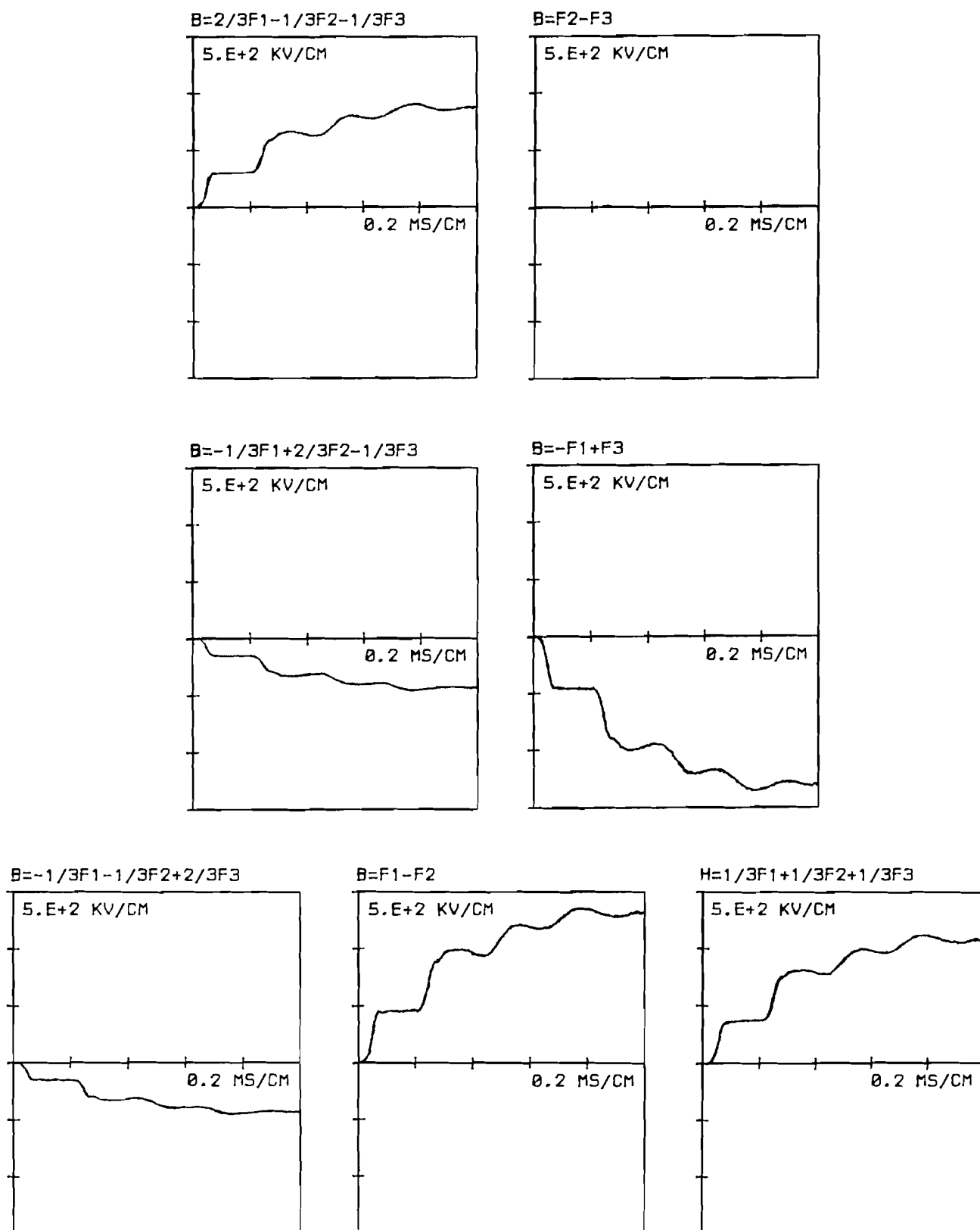


Fig.4.12 ξ -waarden voor beveiliging circuit lijn R-S-T
 ,TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar top-
 waarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

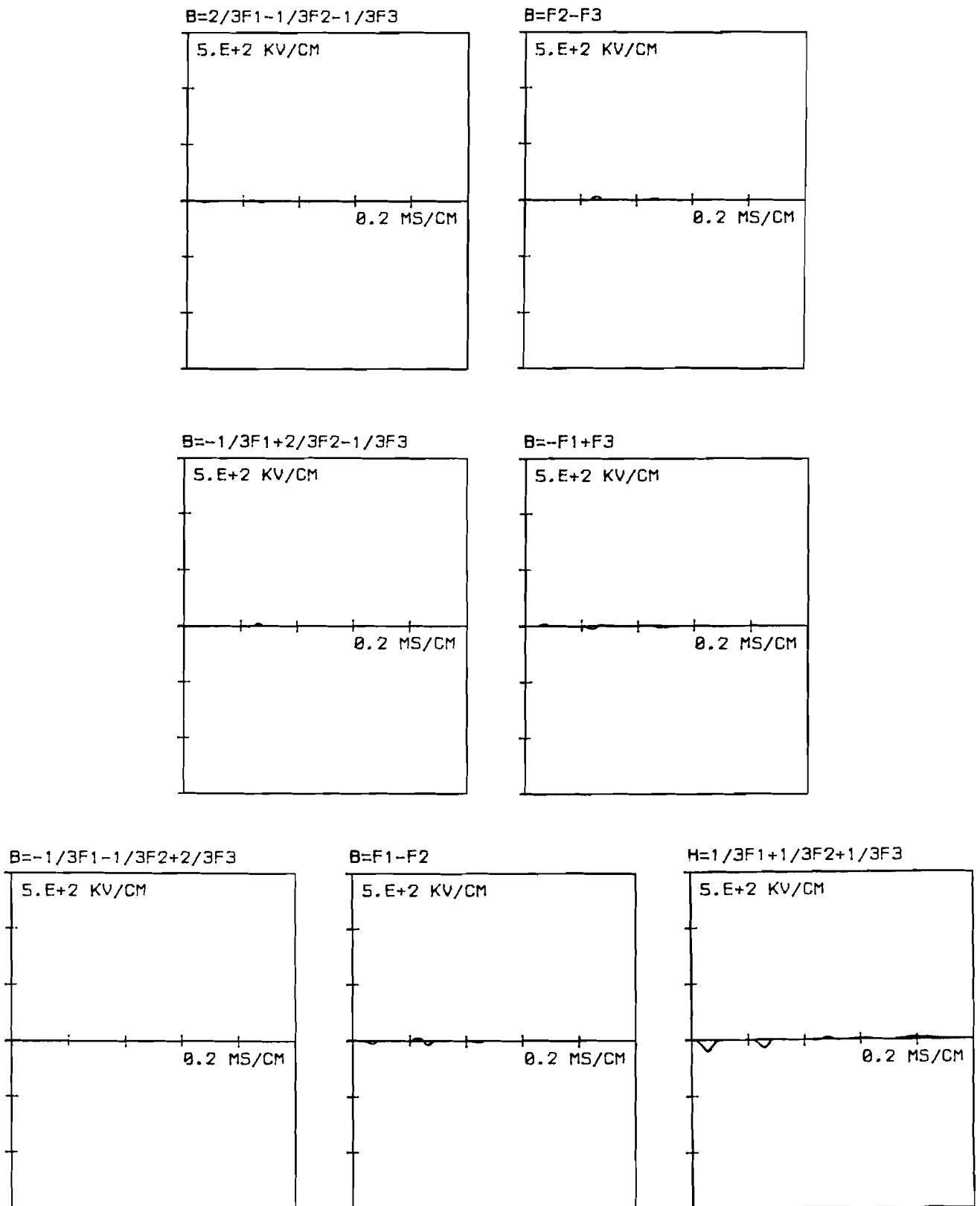
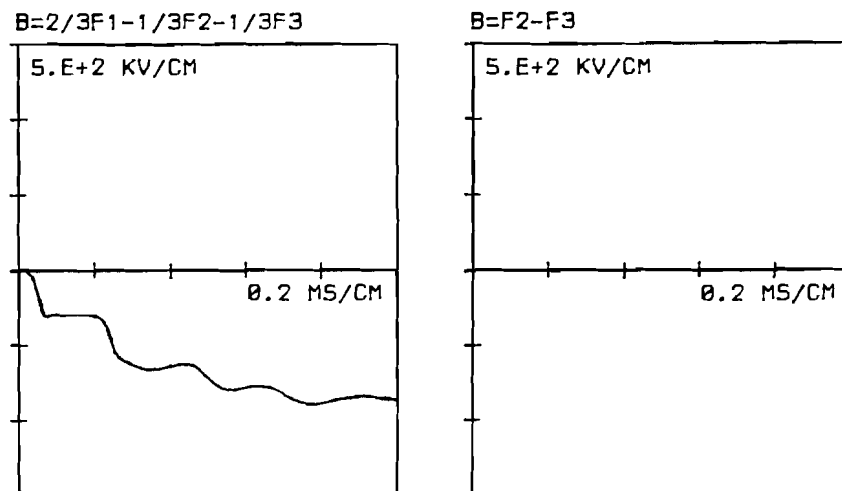


Fig.4.13 E -waarden voor beveiliging circuit U-V-W
 ,TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar top-
 waarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

De plots betreffende de beveiliging van circuit R-S-T (fig.4.12) laten zien dat alle ξ -waarden behalve die berekend met de component $B_2 = F_b - F_c$ ongelijk aan nul worden, dus volgens de foutcriteria in paragraaf 4.3.1 een sluiting in circuit R-S-T. Echter de plots betreffende circuit U-V-W (fig.4.13) doen dit niet. Daar blijven de ξ -waarden berekend met de B-componenten gelijk aan nul en de ξ -waarden berekend met de H-component worden ongelijk aan nul. Dit zou betekenen volgens dezelfde criteria dat er ook een sluiting optreedt in het circuit U-V-W, en dit is echter niet het geval. De verklaring hiervoor is net als bij de verklaring van de schijnbare sluiting in circuit U-V-W in paragraaf 4.2.2. Door het toepassen van de criteria van paragraaf 4.3.1 heeft men ook hier een gelijke looptijd voor alle lopende golven ingevoerd.

In fig.4.14 t/m fig.4.15 zijn de LOGODIF2 resultaten van de sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz gegeven. Hierbij zijn dezelfde waarden voor de karakteristieke impedanties en looptijden gehanteerd als bij bovenstaande LOGODIF1 resultaten.



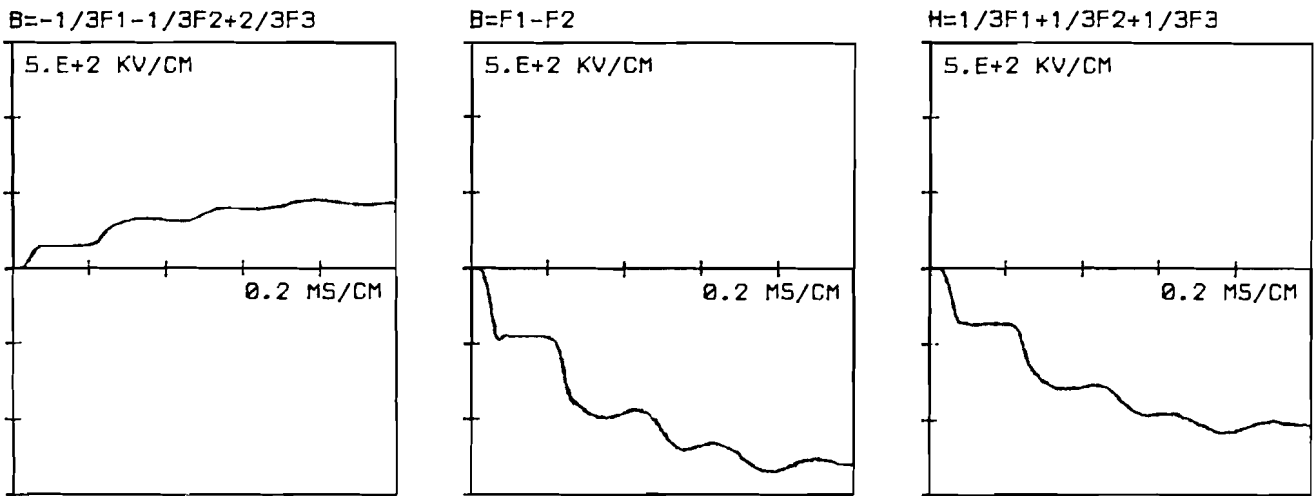
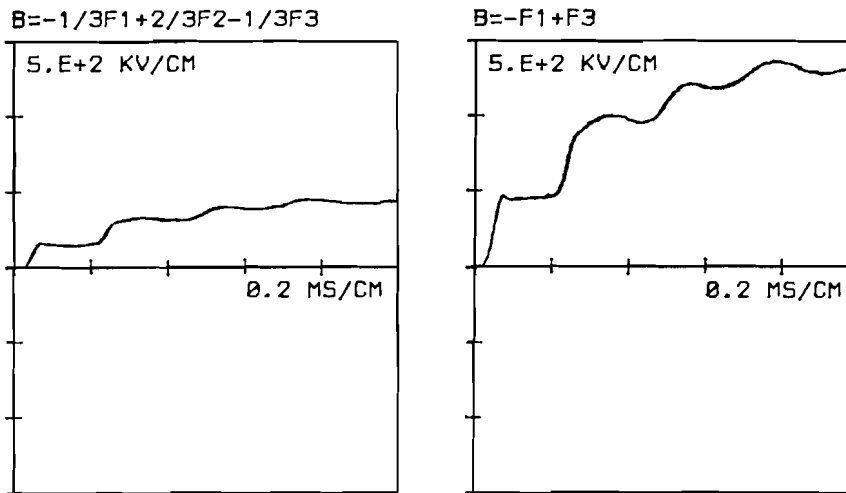
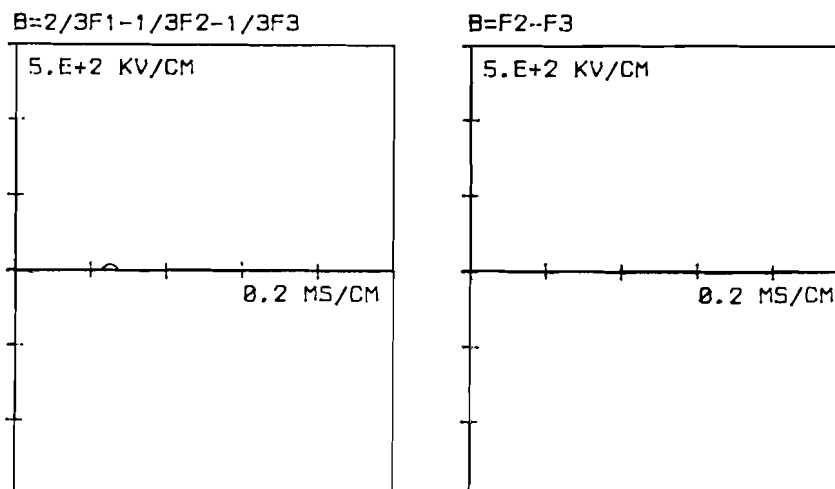


Fig.4.14 ϵ -waarden voor beveiliging circuit R-S-T
 ,TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar top-
 waarde 319 kV en frequentie 50 Hz.



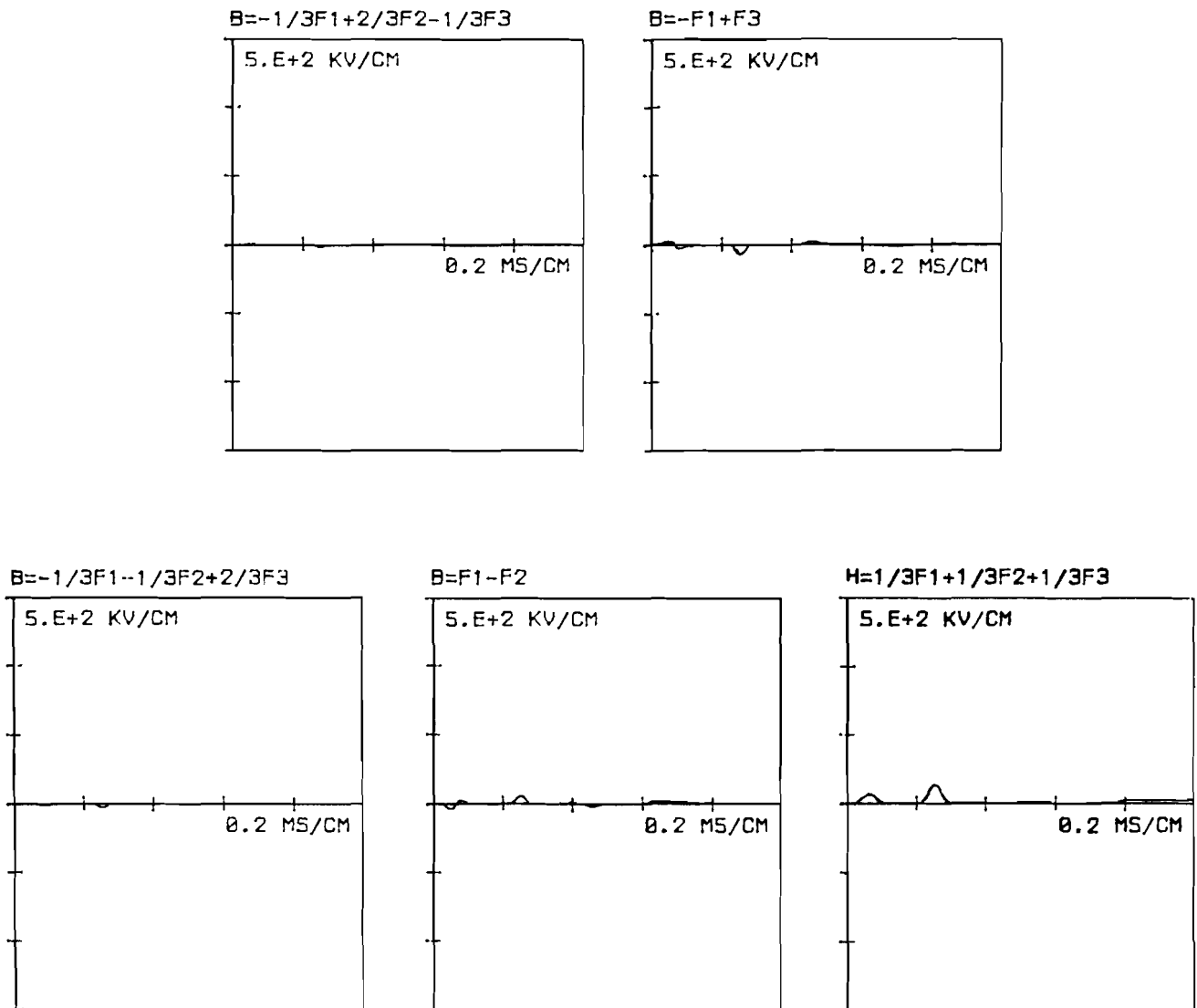


Fig.4.15 ϵ -waarden voor beveiliging circuit U-V-W
 ,TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar top-
 waarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

Voor deze ϵ -waarden geldt een analoog verhaal als voor de
 de reeds besproken ξ -waarden van deze sluiting.

Bij vergelijking van de plots in fig.4.14 met die in fig.
 4.12 valt het tegengesteld teken op, dit in overeenstemming
 met de formules (4.74) en (4.75).

Een overeenkomstige analyse van de sluiting B laat zien dat bij de beveiliging van circuit R-S-T zowel de ξ -waarden als de ε -waarden alle behalve die berekend met de component $B_2 = F_b - F_c$ ongelijk aan nul worden. Bij de beveiliging van circuit U-V-W zien we hetzelfde, alleen die berekend met de component $B_6 = F_a - F_b$ blijft gelijk aan nul. Volgens de criteria van paragraaf 4.3.1 betekent dit fouten in beide circuits. Verder blijkt uit deze resultaten dat we uit de ξ -waarden of ε -waarden de gestoorde fase kunnen bepalen. Namelijk in het geval van gestoorde R-fase geldt dat ξ -waarde en ε -waarde berekend met $B_2 = F_b - F_c$ gelijk aan nul blijven, terwijl bij gestoorde T-fase (hier W-fase) dit bij de ξ -waarde en ε -waarde berekend met $B_6 = F_a - F_b$ gebeurt.

Uit de bovenstaande resultaten blijkt dat beide algoritmen aangepast moeten worden, willen ze hier juist detecteren of er in een circuit van de dubbelcircuitlijn een sluiting is opgetreden. Ook hier kan men denken aan de ξ -waarden resp. de ε -waarden alleen met de B-componenten te berekenen, het toepassen van aanspreekrelais of tijdrelais, of een componenttransformatie voor beide circuits.

4.4 Lopende golfdiscriminantbeveiliging.

4.4.1 Principe.

Beschouw weer het gedeelte van de verliesvrije eenfase-transmissieconfiguratie zoals gegeven in fig.4.2.

Beschouw de onderstaande functies:

$$D_V = \left\{ V_A(t) - Z_g I_A(t) \right\}^2 + \frac{1}{w_0} \left\{ \frac{dV_A}{dt} - Z_g \frac{dI_A}{dt} \right\}^2 \quad (4.85)$$

$$D_A = \left\{ V_A(t) + Z_g I_A(t) \right\}^2 + \frac{1}{w_0} \left\{ \frac{dV_A}{dt} + Z_g \frac{dI_A}{dt} \right\}^2 \quad (4.86)$$

met V_A transiënte spanning

I_A transiënte stroom

$\omega_0 = 2\pi f_0$, met f_0 frequentie van het net.

Volgens de formules (4.23) t/m (4.25) hebben deze twee functies bij een voorwaartse fout op moment dat de fout merkbaar is in A de volgende uitdrukkingen:

$$D_V > 0 \quad (4.87)$$

$$D_A > 0 \quad (4.88)$$

$$D_V > D_A \quad (4.89)$$

terwijl bij een achterwaartse fout geldt (volgens de formules (4.26) en (4.27)):

$$D_V = 0 \quad (4.90)$$

$$D_A > 0 \quad (4.91)$$

We noemen D_V de voorwaartse golfdiscriminant en D_A de achterwaartse golfdiscriminant.

Uit de bovenstaande uitdrukkingen blijkt dat het ook met de discriminanten mogelijk is in een station te detecteren of er een voorwaartse fout of een achterwaartse fout is opgetreden. Een detectie-methode is de volgende:

Wordt de voorwaartse golfdiscriminant groot vóór de achterwaartse golfdiscriminant of het gebeurt gelijktijdig dan is er sprake van een voorwaartse fout. Wanneer de voorwaartse golfdiscriminant ná de achterwaartse golfdiscriminant groot wordt is er sprake van een achterwaartse fout.

Met deze detectie-methode kan net als met de absolute golven van paragraaf 4.2 bepaald worden of er een fout tussen station A en station B is opgetreden of niet.

Willen we dit toepassen op driefaselijnen dan zullen we weer in principe een componenttransformatie op de fasegrootheden van de driefaselijn moeten toepassen.

Voor elk van deze componenten in elk station berekenen we de voorwaartse golfdiscriminant en de achterwaartse golfdiscriminant. Mogelijke foutcriteria zijn dan:

Wanneer zowel in station A als in station B minstens één van de voorwaartse golfdiscriminanten groot wordt voor de bijbehorende achterwaartse golfdiscriminant of het gebeurt tegelijkertijd dan bevindt zich ergens in de driefaselijn tussen station A en station B een sluiting. In de andere gevallen is er sprake van geen sluiting in de driefaselijn tussen A en B.

Een beveiliging gebaseerd op voorwaartse golfdiscriminanten en achterwaartse golfdiscriminanten noemen we een lopende golfdiscriminantbeveiliging. Meer informatie over deze beveiliging staat in "High speed relaying using travelling wave transient analysis", geschreven door H.W. Dommel et al. [7], en in "A multi-microprocessor based travelling wave relay — theory and realization", geschreven door M.M. Mansour et al. [8].

4.4.2 Test.

Een algoritme, gebaseerd op het lopende golfdiscriminant-principe, is getest met de transiënte signalen van de sluitingen A en B. De transiënte fasespanningen en stromen afkomstig van een sluiting zijn verwerkt door het programma LOGODIS1. Het berekent voor elk component van een componenttransformatie aan elk uiteinde van een driefaselijn de voorwaartse golfdiscriminant en de achterwaartse golfdiscriminant. De componenttransformatie, die gebruikt wordt is dezelfde als die in het programma LOGODIR1.

In fig. 4.16 t/m 4.19 zijn de LOGODIS1 resultaten van de sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz gegeven. Voor de karakteristieke impedanties zijn dezelfde waarden gehanteerd als bij de resultaten van LOGODIR1. Voor de frequentie van het net is de waarde 50 Hz genomen.

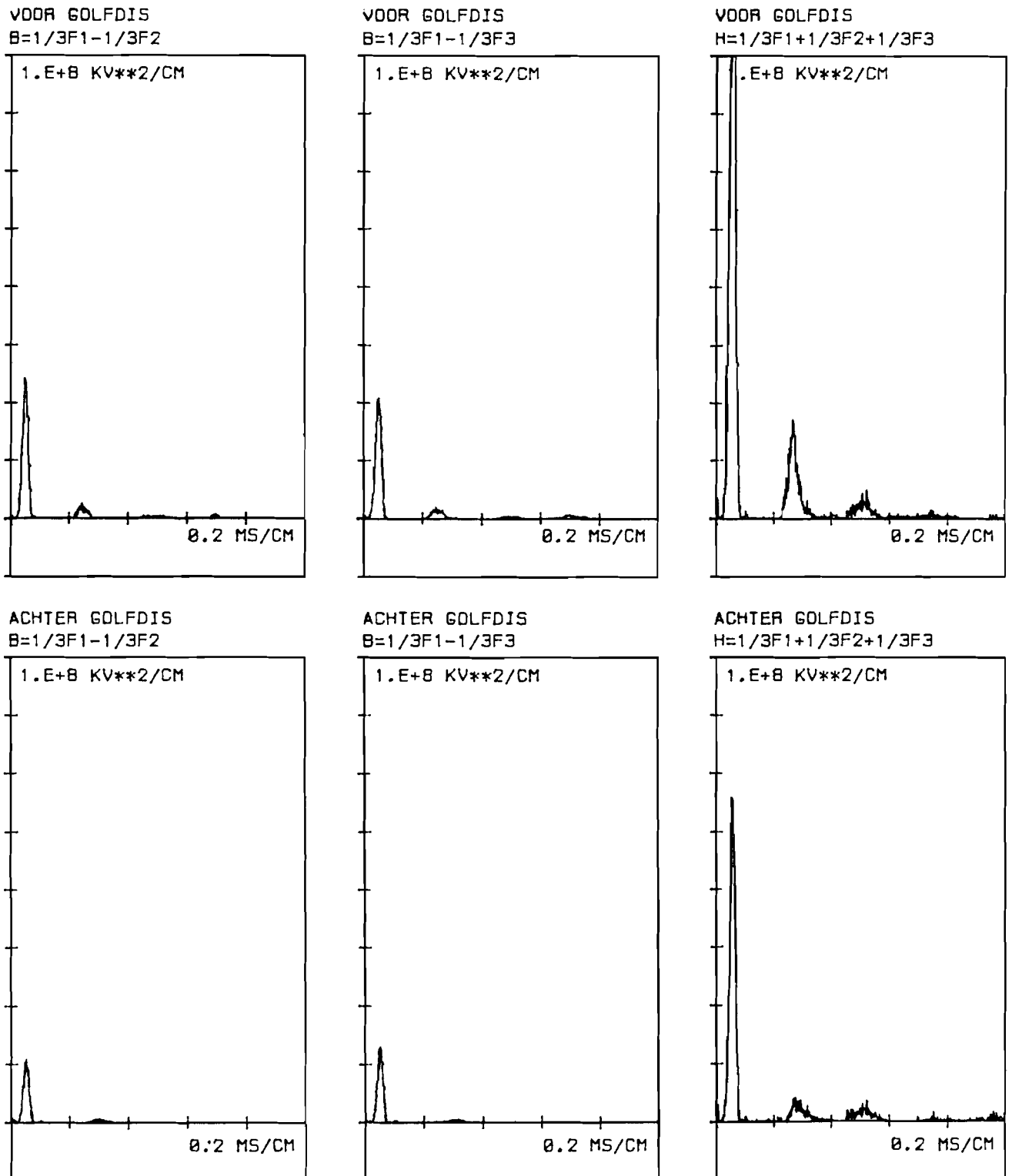
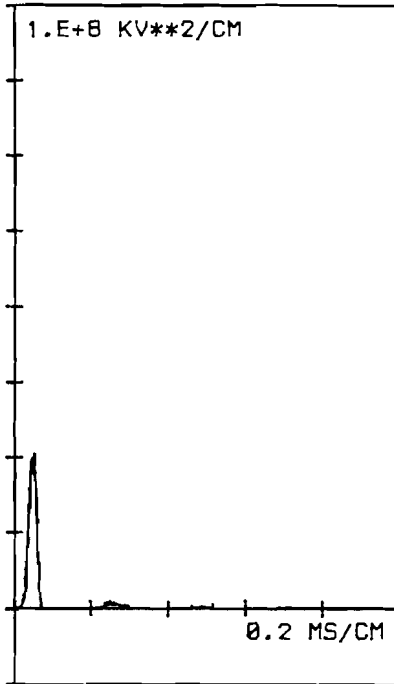
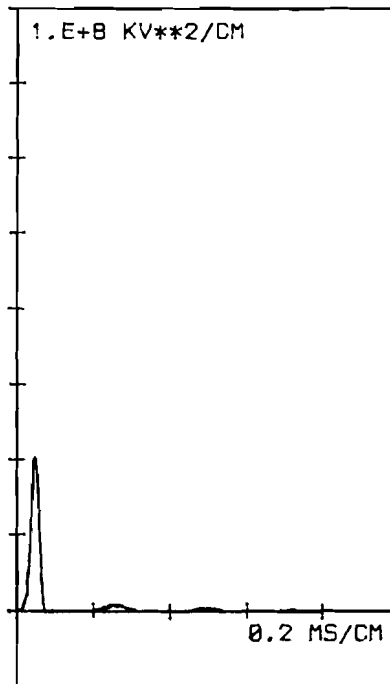


Fig.4.16 Golfdiscriminanten in station Krimpen voor beveiliging circuit R-S-T, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

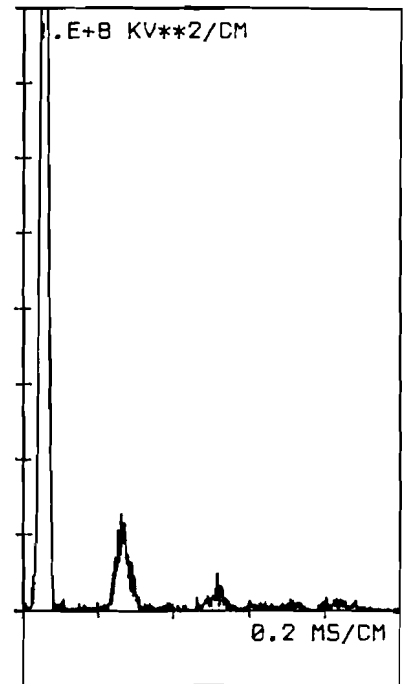
VOOR GOLFDIS
B=1/3F1-1/3F2



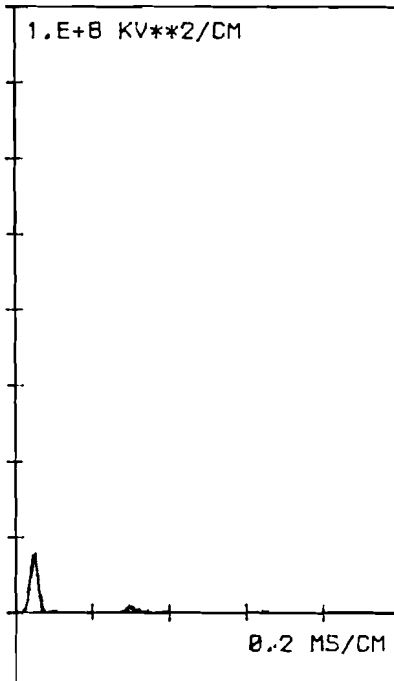
VOOR GOLFDIS
B=1/3F1-1/3F3



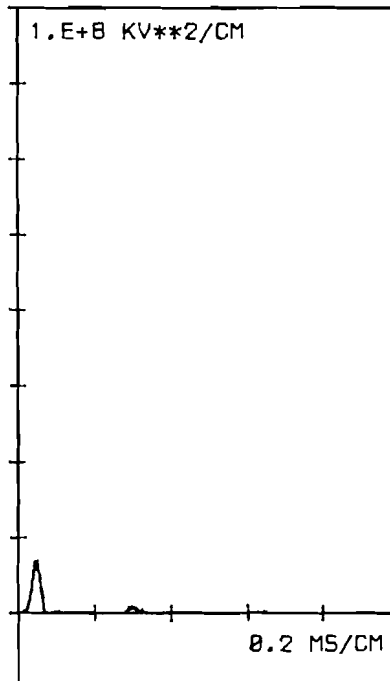
VOOR GOLFDIS
H=1/3F1+1/3F2+1/3F3



ACHTER GOLFDIS
B=1/3F1-1/3F2



ACHTER GOLFDIS
B=1/3F1-1/3F3



ACHTER GOLFDIS
H=1/3F1+1/3F2+1/3F3

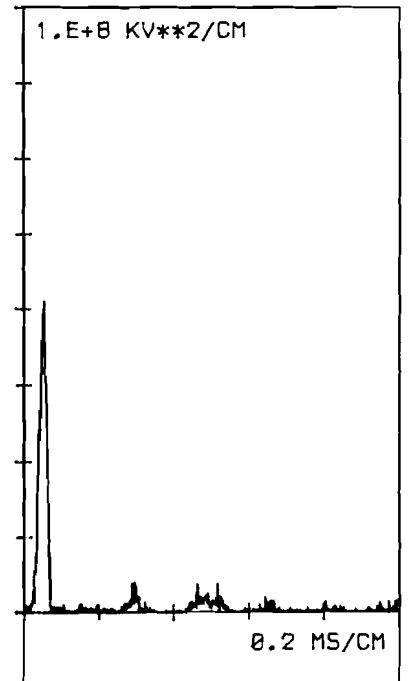


Fig.4.17 Golfdiscriminanten in station Diemen voor beveiliging circuit R-S-T, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

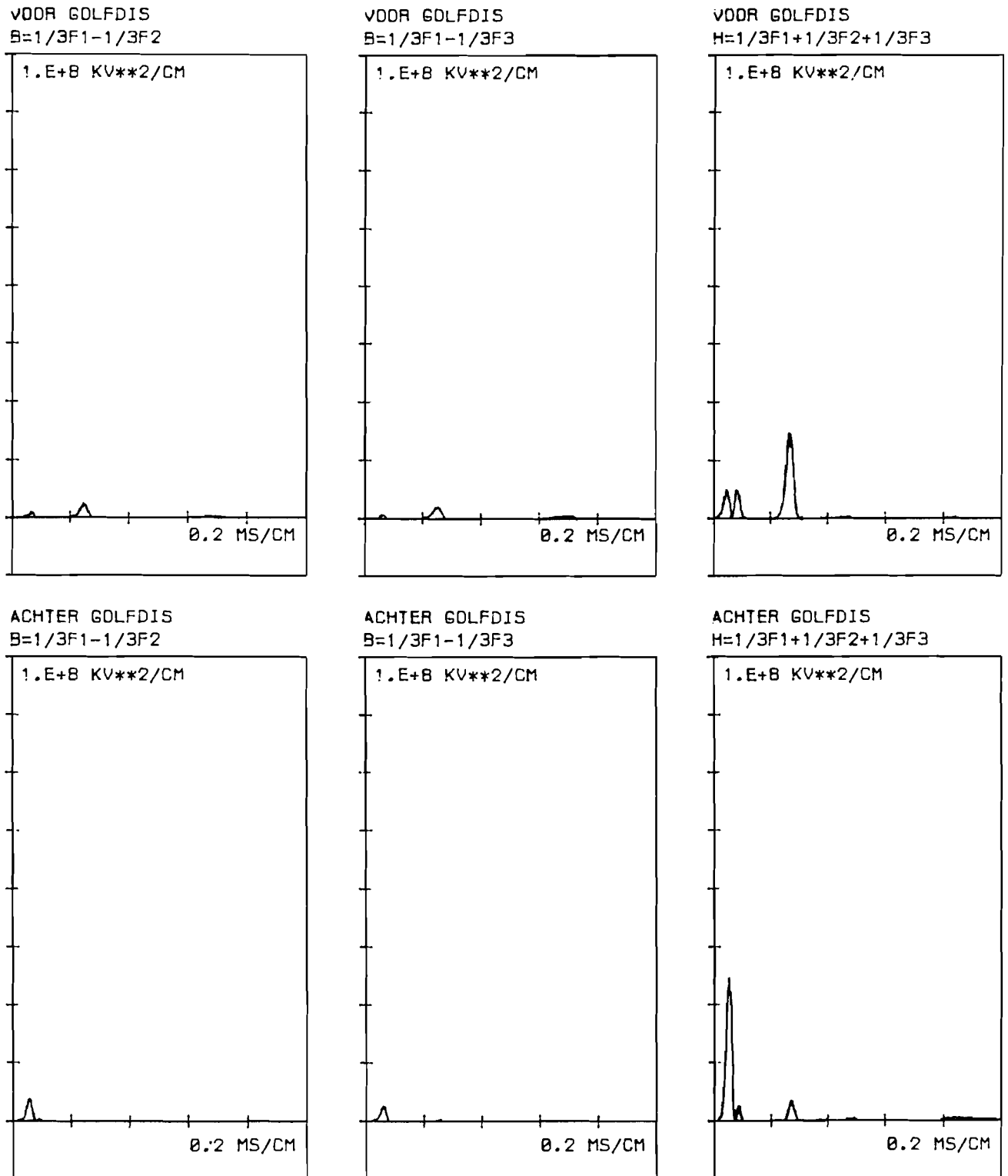


Fig.4.18 Golfdiscriminanten in station Krimpen voor beveiliging circuit U-V-W, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

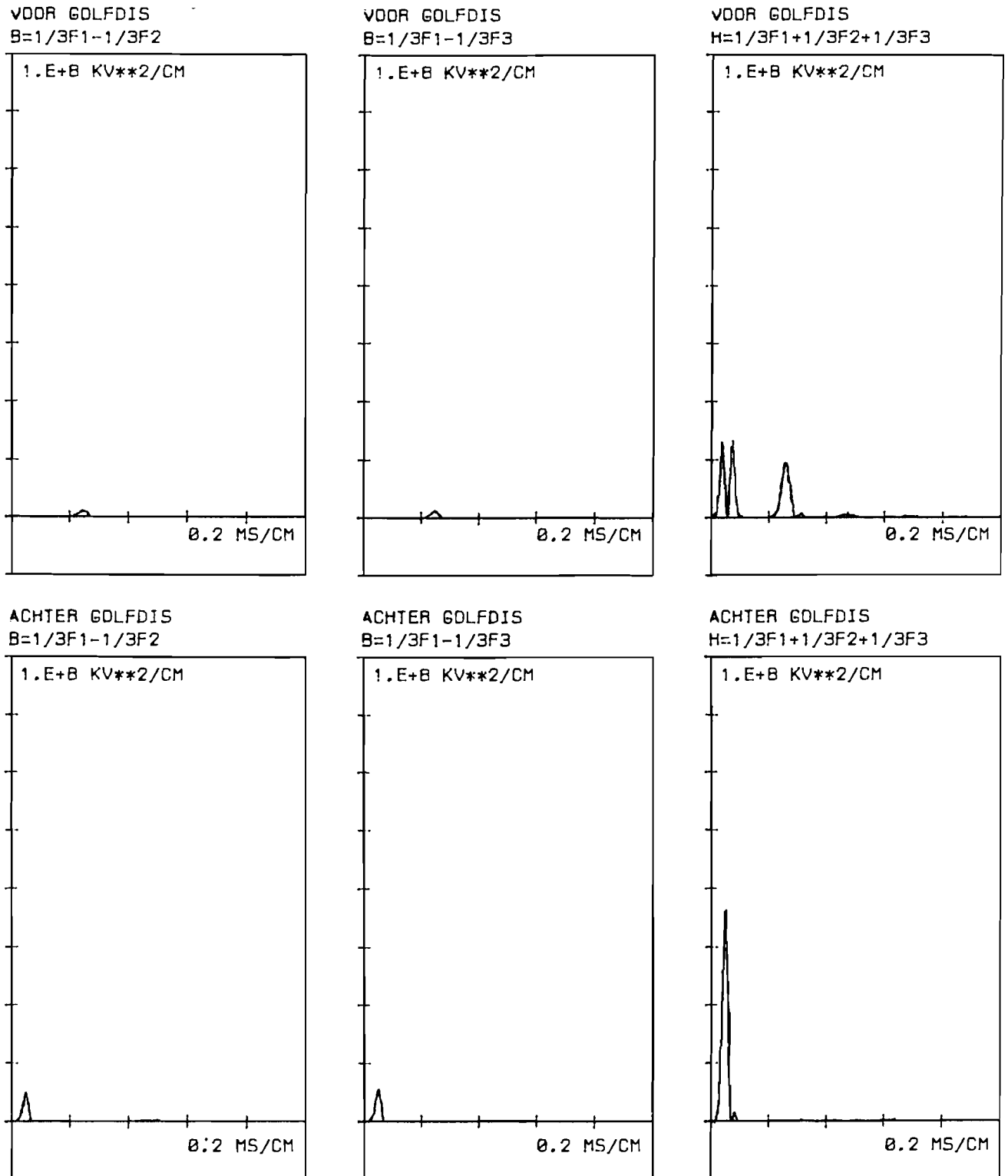


Fig.4.19 Golfdiscriminanten in station Diemen voor beveiliging circuit U-V-W, TNA-simulatie II sluiting A, geschaald naar topwaarde 319 kV en frequentie 50 Hz.

De plots betreffende de beveiliging van circuit R-S-T (fig.4.16 en 4.17) laten zien dat zowel in Krimpen als in Diemen telkens een voorwaartse golfdiscriminant gelijktijdig start met zijn bijbehorende achterwaartse golfdiscriminant. Dit betekent volgens de foutcriteria van paragraaf 4.4.1 een sluiting in circuit R-S-T. De plots betreffende circuit U-V-W (fig.4.18 en 4.19) laten zien dat elke voorwaartse golfdiscriminant van zowel component B_1 als B_2 groot wordt ná zijn bijbehorende achterwaartse golfdiscriminant en dat elke voorwaartse golfdiscriminant van de component H gelijktijdig start met zijn achterwaartse golfdiscriminant, volgens de foutcriteria een sluiting in circuit U-V-W. Voor deze schijnbare sluiting geldt dezelfde verklaring als de verklaring voor de schijnbare sluitingen in de paragrafen 4.2.2 en 4.3.2.

De spannings en -stroomsprongen welke optreden bij aankomst van de lopende golven zullen bij het berekenen van de afgeleiden erg grote waarden veroorzaken. Dit zien we dan ook in de bovenstaande plots (verticale schaal van $1.E+8$ KV**2/CM!).

Een overeenkomstige analyse van de sluiting B laat zien dat bij de beveiliging van circuit R-S-T elke voorwaartse golfdiscriminant gelijktijdig start met zijn achterwaartse golfdiscriminant. Bij de beveiliging van circuit U-V-W zien we zowel in Krimpen als in Diemen dat de voorwaartse golfdiscriminant van $B_1 = 1/3F_a - 1/3F_b$ later start dan zijn achterwaartse discriminant, terwijl de overige gelijktijdig starten. Deze resultaten komen overeen met betreffende resultaten van LOGODIR1. Volgens de criteria van paragraaf 4.4.1 betekent dit fouten in beide circuits.

Ook dit algoritme moet dus aangepast worden aangepast, wil het hier juist detecteren of er in een circuit van de dubbelcircuitlijn een sluiting is opgetreden. Ook hier kan men denken aan het rekenen met alleen de B-componenten, het toepassen van aanspreekrelais of tijdrelais, of een componenttransformatie voor beide circuits.

5. Conclusies.

Doordat in het EMTP-model (bijna) iedere lijn is gemodelleerd geven de gesimuleerde sluitingen, althans dat nemen we aan, een goed beeld van datgene wat we in de configuratie van het Nederlandse 380 kV net ten tijde van de KEMA veldmetingen op 16 augustus 1979 bij sluitingen in het dubbelcircuitverbinding Krimpen-Diemen konden verwachten. Dit geldt overigens alleen in het gebied tot de eerste milliseconden. Een vergroting van het gebied is niet noodzakelijk voor het testen van snelle beveiligingsalgoritmen, daar de snelle beveiligingsalgoritmen juist hun beslissing nemen in de eerste milliseconde.

De signalen van het TNA-simulatie I model zijn niet geschikt om snelle beveiligingsalgoritmen te testen. De deeltetten Krimpen en Diemen in dit model vertonen voor hoge frequenties, zowel homopolair als bedrijf, een niet juist elektrisch gedrag.

Het TNA-simulatie II model is wel geschikt om snelle beveiligingsalgoritmen te testen. In het gebied tot de eerste milliseconde komen de resultaten van de gesimuleerde sluitingen redelijk goed overeen met die van het EMTP-model.

Met de signalen van het eenvoudige TNA-simulatie III model kunnen snelle beveiligingsalgoritmen niet worden getest.

De beveiliging, gebaseerd op directe detectie van lopende golven, voor beveiliging van een dubbelcircuitverbinding tussen station A en station B, met:

- een componenttransformatie volgens:

$$B_1 = 1/3F_a - 1/3F_b,$$

$$B_2 = 1/3F_a - 1/3F_c,$$

$$H = 1/3F_a + 1/3F_b + 1/3F_c.$$

- karakteristieke impedanties volgens:

$$Z_g(B_1) = \text{bedrijfsgolfimpedantie dubbelcircuitlijn bij} \\ f = 10000 \text{ Hz,}$$

$$Z_g(B_2) = Z_g(B_1),$$

$$Z_g(H) = \text{homopolaire golfimpedantie dubbelcircuitlijn bij} \\ f = 10000 \text{ Hz.}$$

- als criteria voor sluiting ergens in een circuit:

Wanneer zowel in station A als in station B minstens één van de absolute achterwaartse golven voor de beveiliging van een circuit groot wordt vóór de bijbehorende absolute voorwaartse golf of het gebeurt gelijktijdig, dan bevindt zich ergens in dat circuit tussen A en B een sluiting.

detecteert niet betrouwbaar of er een sluiting in één circuit van de dubbelcircuitverbinding tussen A en B is opgetreden.

De lopende golfdifferentiaalbeveiliging, voor beveiliging van een dubbelcircuitverbinding tussen station A en station B, met:

- een componenttransformatie volgens:

$$B_1 = 2/3F_a - 1/3F_b - 1/3F_c,$$

$$B_2 = F_b - F_c,$$

$$B_3 = -1/3F_a + 2/3F_b - 1/3F_c,$$

$$B_4 = -F_a + F_c,$$

$$B_5 = -1/3F_a - 1/3F_b + 2/3F_c,$$

$$B_6 = F_a - F_b,$$

$$H = 1/3F_a + 1/3F_b + 1/3F_c.$$

- karakteristieke impedanties volgens:

$$Z_g(B_1) = \text{bedrijfs golfimpedantie dubbelcircuitlijn bij} \\ f = 10000 \text{ Hz,}$$

$$Z_g(B_2) = Z_g(B_1),$$

$$Z_g(B_3) = Z_g(B_1),$$

$$Z_g(B_4) = Z_g(B_1),$$

$$Z_g(B_5) = Z_g(B_1),$$

$$Z_g(B_6) = Z_g(B_1),$$

$$Z_g(H) = \text{homopolaire golfimpedantie dubbelcircuitlijn bij} \\ f = 10000 \text{ Hz.}$$

- looptijden volgens:

$$\tau(B_1) = \text{quotiënt van lengte dubbelcircuitlijn en licht-} \\ \text{snelheid,}$$

$$\tau(B_2) = \tau(B_1),$$

$$\tau(B_3) = \tau(B_1),$$

$$\tau(B_4) = \tau(B_1),$$

$$\tau(B_5) = \tau(B_1),$$

$$\tau(B_6) = \tau(B_1),$$

$$\tau(H) = \tau(B_1).$$

- als criteria voor sluiting ergens in een circuit:

Wanneer zowel in station A als in station B minstens één van de ξ -waarden of ϵ -waarden voor de beveiliging van een circuit ongelijk aan nul wordt, dan bevindt zich ergens in dat circuit tussen A en B een sluiting.

detecteert niet betrouwbaar of er een sluiting in een circuit van de dubbelcircuitverbinding tussen A en B is opgetreden.

De lopende golfdiscriminantbeveiliging, voor beveiliging van een dubbelcircuitverbinding tussen station A en station B, met:

- een componenttransformatie volgens:

$$B_1 = 1/3F_a - 1/3F_b,$$

$$B_2 = 1/3F_a - 1/3F_c,$$

$$H = 1/3F_a + 1/3F_b + 1/3F_c.$$

- karakteristieke impedanties volgens:

$$Z_g(B_1) = \text{bedrijfsgolfimpedantie dubbelcircuitlijn bij} \\ f = 10000 \text{ Hz,}$$

$$Z_g(B_2) = Z_g(B_1),$$

$$Z_g(H) = \text{homopolaire golfimpedantie dubbelcircuitlijn bij} \\ f = 10000 \text{ Hz.}$$

- een netfrequentie gelijk aan 50 Hz.
- als criteria voor sluiting ergens in een circuit:
Wanneer zowel in station A als in station B minstens één van de voorwaartse golfdiscriminanten voor de beveiliging van een circuit groot wordt vóór de bijbehorende achterwaartse golf of het gebeurt gelijktijdig, dan bevindt zich ergens in dat circuit tussen A en B een sluiting.

detecteert niet betrouwbaar of er een sluiting in één circuit van de dubbelcircuitverbinding tussen A en B is opgetreden.

Willen we de bovenstaande beveiligingsprincipes toch gebruiken dan moet er iets veranderd worden. Daar valt te denken aan:

- andere karakteristieke impedanties,
- andere looptijden,
- andere foutcriteria,
- een componenttransformatie voor twee circuits.

Van groot belang is, als we een uitspraak willen doen of een beveiligingsalgoritme goed functioneert, dat we dit pas kunnen doen nadat het algoritme is getest op vele (gesimuleerde) sluitingen!

Literatuur.

- [1] W.M.A. Sinx, *Inschakeloverspanningen in het 380 kV net: Implementatie en ervaringen met het EMTP programma*, stageverslag TUE, EO.85.S.40, 1985.
- [2] J.W.C.C. Herps, *Handleiding voor de Transient Network Analyzer*, TUE, 1983.
- [3] W.H. Geelen, *De representatie van meervoudige invoedingen in een transient netmodel*, afstudeerverslag TUE, EO.80.A.32, 1980.
- [4] E.M.L. von Berg, *Het testen van enige snelle beveiligingsalgoritmen voor hoogspanningslijnen: nadere informatie*, TUE, 1987.
- [5] A.T. Johns, *New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of EHV transmission lines*, *Proceedings IEE* vol.127, pp.228-239, 1980.
- [6] T. Takagi, J. Baba, K. Uemura, T. Sakgushi, *Fault protection based on travelling waves — part I Theory*, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1977*, paper 750-3.
- [7] H.W. Dommel, J.M. Michels, *High speed relaying using travelling wave transient analysis*, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 1978*, paper 214-9.
- [8] M.M. Mansour, G.W. Swift, *A multi-microprocessor based travelling wave relay — theory and realization*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol PWRD-1, No.1, January 1986.

- [9] A. Clerici, L. Marzio, Coordinated Use of TNA and Digital Computer for Switching-Surge Studies: Transient Equivalent of a complex Network, IEEE transactions on power apparatus and systems, vol. pas-89, november/december 1970.
- [10] C.P.M. de Bakker, TNA-simulatie van inschakelproeven in het 380 kV net, stageverslag TUE, EO.83.S.36, 1983.
- [11] M.H.J. Bollen, Ontwikkelingen op het gebied van snelle beveiliging van hoogspanningslijnen, aangeboden aan Elektrotechniek, 1987.