

MASTER

**CM-stromen en DM-spanningen bij de secundaire bekabeling van een 380 kV GIS-installatie
t.g.v. schakelhandelingen : invloed van de kabelloop : metingen en berekeningen**

van Horck, F.B.M.

Award date:
1998

[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

FACULTEIT ELEKTROTECHNIEK

Vakgroep Hoogspanningstechniek en
Electromagnetic Compatibiliy (EHC)

**CM-stromen en DM-spanningen bij de
secundaire bekabeling van een 380 kV
GIS-installatie t.g.v. schakelhandelingen:
Invloed van de kabelleop; metingen
en berekeningen.**

door: F.B.M. van Horck
EH.94.A.137

*De faculteit Elektrotechniek van de
Technische Universiteit Eindhoven
aanvaardt geen verantwoordelijkheid
voor de inhoud van stage- en
afstudeerverslagen.*

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:

dr. A.P.J. van Deursen
ir. M.J.A.M. van Helvoort

april, 1994

TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN

Samenvatting

In moderne (hoogspannings-) onderstations wordt de schakelinstallatie tegenwoordig voornamelijk als GIS (Gas Insulated Switchgear) uitgevoerd. Tijdens schakelhandelingen ontstaan ns-steile transiënte stroom- en spanninggolven in de GIS, die bij onderbrekingen zoals scheidingsisolatoren (spacers) en hoogspanningsdoorvoeren (bushings) naar buiten treden.

De besturingsapparatuur staat vaak dicht bij de GIS en is via kabels, de secundaire kabels genaamd, met de GIS verbonden. De CM-stromen (stoorstromen) door deze kabels en de bijbehorende DM-spanningen kunnen de met micro-elektronica uitgevoerde apparatuur beschadigen. De positie van de secundaire kabels t.o.v. de GIS heeft een sterke invloed op de grootte van de stoorstromen door deze kabels. Dit is theoretisch en experimenteel onderzocht aan de 380 kV GIS-installatie in het hoogspanningslaboratorium van de TUE.

In het experiment is een RG214/U-kabel gebruikt met een lengte van ca. 7 meter die naar de meetapparatuur gaat. Deze kabel is dicht bij de bushing op de GIS-mantel bevestigd. Dichtbij de apparatuur wordt de kabel door een aardplaat gevoerd die op het aardvlak (vloer) en op de GIS-mantel aangesloten is. We meten de stroom over de testkabel en GIS-buizen op enkele plaatsen en de DM-spanning aan het eind van de kabel.

De CM-stromen zijn gemeten m.b.v. één-winding- en meerwinding Rogowskispoelen. Bij het meten van de CM-stroom over de kabel met de één-winding Rogowskispoel moet deze correct aangesloten worden, anders wordt een meetfout van ongeveer 50 % gemaakt. Metingen met de meerwinding Rogowskispoel bevestigen dit.

Om de scheidingsisolatoren zijn folies aangebracht ter afscherming. De invloed ervan op de stroomverdeling over de GIS-buizen en kabel is echter gering.

We hebben de RG214/U-kabel verwisseld voor een VMVKAS-kabel; de DM-spanning stijgt van 1,7 V voor eerstgenoemde naar 175 V voor laatstgenoemde. Beide DM-spanningen zijn m.b.v. een transmissielijnenmodel vrij goed te reconstrueren uit de gemeten CM-stromen. De transferimpedantie van beide kabels is apart gemeten.

De interne spanningen van de GIS zijn met capacitieve sensoren gemeten. Een gedeelte van de uitgekoppelde stroom koppelt naar een bepaalde (loop)tijd weer in het interne van de GIS in.

De berekende en gemeten stroomverdeling van de uitgekoppelde stroom over de GIS-buizen en de kabelmantel stemmen vrij goed met elkaar overeen.

Inhoudsopgave

blz.

Samenvatting

| | |
|---|----|
| Hoofdstuk 1 Inleiding | 1 |
| Hoofdstuk 2 De meetopstelling | 2 |
| Hoofdstuk 3 Meetresultaten | 5 |
| 3.1 Inleiding. | 5 |
| 3.2 De uitgekoppelde stromen. | 6 |
| 3.3 De interne spanningen van de GIS. | 11 |
| 3.4 De transferimpedantie van de gebruikte kabels. | 14 |
| 3.5 De differential-mode spanningen. | 15 |
| 3.6 Overzicht van de metingen. | 16 |
| Hoofdstuk 4 Modelvorming en vergelijking met de praktijk | 18 |
| 4.1 Inleiding. | 18 |
| 4.2 De DM-spanning. | 18 |
| 4.3 De stroomverdeling. | 20 |
| 4.3.1 Beschrijving van het model. | 20 |
| 4.3.2 Vergelijking van het model met de metingen. | 22 |
| Hoofdstuk 5 Conclusies | 25 |
| Literatuurlijst | 27 |

Bijlagen

| | |
|--|--|
| 1 Stroommetingen | |
| 2 Overzicht van de stroommetingen | |
| 3 Stroommetingen m.b.v. de PTT-spoel | |
| 4 Spanningsmetingen | |
| 5 Transferimpedantie van de RG214/U- en VMVKAS-kabel | |
| 6 Schatting van de transferadmittantie voor de VMVKAS-kabel | |
| 7 Berekening van de DM-spanning uit de gemeten stromen | |
| 8 Een kanttekening m.b.t. de DFT en het amplitude spectrum | |
| 9 Gemeten en gesimuleerde DM-spanning | |
| 10 Het gekoppelde transmissielijnenmodel | |
| 11 Meet- en simulatieresultaten van het gekoppelde transmissielijnenprobleem | |
| 12 De coëfficiënten van de induktiematrix | |

Hoofdstuk 1

Inleiding

Het schakelmaterieel in een (hoogspannings-) onderstation wordt in Nederland tegenwoordig om ruimte te besparen voornamelijk in gasgevulde behuizing uitgevoerd (GIS=Gas Insulated Substation of Gas Insulated Switchgear). Dit materieel te samen met de inkomende hoogspanningslijnen, vermogenstransformatoren en de uitgaande lijnen of kabels vormen het primaire circuit. Een onderstation bestaat verder uit meet-, regel- en beveiligingsapparatuur met de bijbehorende bekabeling. Dit wordt het secundaire circuit genoemd.

De GIS is coaxiaal uitgevoerd en het gas, zwavelhexafluoride (SF_6), is daarin onder lichte overdruk opgesloten. Het blijkt dat de ns-steile transiënte stroom- en spanningsgolven, die ontstaan tijdens het schakelen, naar buiten koppelen bij onderbrekingen zoals spacers en bushings. Deze golven veroorzaken op hun beurt common-mode (CM) stromen in mantels en goten van het secundaire circuit. De CM-stromen over de mantels veroorzaken via de transferimpedantie van de kabels differential-mode (DM) spanningen op de uiteinden van de kabels.

Het is een vereiste om het mechanisme van de uitkoppeling te begrijpen om verantwoorde maatregelen te kunnen nemen. In het afstudeerverslag van G.J. Cliteur [1] is een model beschreven voor het bepalen van de stroomverhouding tussen GIS-mantel en kabelmantel. Met behulp van een bestaand computerprogramma zijn door hem berekeningen gedaan. Door R.P.J.M. Vandenboorn [2] zijn stroom- en spanningsmetingen gedaan aan de 380 kV GIS-laboratorium opstelling van de vakgroep EHC.

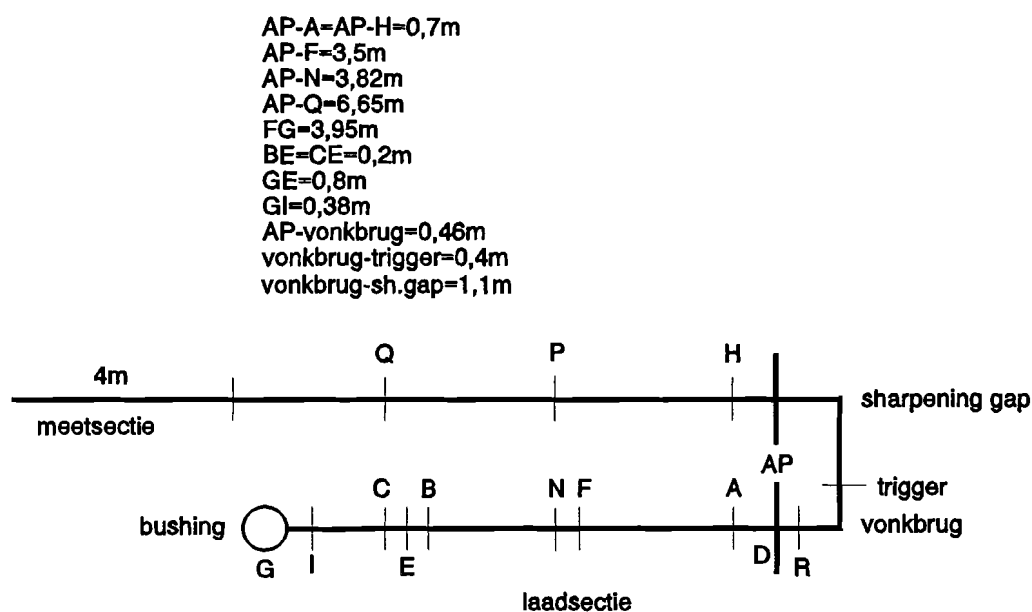
Het doel van dit afstudeerwerk is om enkele extra stroom- en spanningsmetingen uit te voeren en de gegevens te analyseren om zo meer inzicht over het uitkoppelen van stroomstromen te krijgen. De stroomverdeling over de GIS-buizen en secundaire kabel dient in een goed model te worden gegoten zodat de berekende en gemeten waarden beter overeenstemmen. Het model van Cliteur, opgezet m.b.v. transmissielijnen, vertoont nog enkele onvolmaaktheden. Ook blijkt het implementeren van zijn model in het bestaande programma *TLTA* met meer dan twee gekoppelde lijnen een lastig probleem. Het een en ander dient verbeterd te worden en het meer algemeen toepasbaar maken voor andere toepassingen.

Deze scriptie behandelt eerst de metingen en daarna de modelvorming. De scriptie is dan als volgt ingedeeld: Hoofdstuk 2 behandelt de meetopstelling waarna in hoofdstuk 3 de meetresultaten en verklaringen aan de orde komen. In hoofdstuk 4 komt de modelvorming met berekeningen aan de orde en zullen de resultaten afkomstig van deze berekeningen met de gemeten waarden worden vergeleken. Tenslotte worden in hoofdstuk 5 de conclusies gegeven.

Hoofdstuk 2

De meetopstelling

De laboratorium GIS-opstelling van de vakgroep EHC bestaat uit een laad- en meetsectie. De spanningsmetingen worden aan de laadsectie uitgevoerd, de stroommetingen worden aan beide secties verricht. Figuur 2.1 geeft het bovenaanzicht van de opstelling met bijbehorende maten weer. De maten zijn hartafstanden. Het zijaanzicht van de laadsectie zijde is in figuur 2.2 gegeven. In deze figuren zijn de punten A, B, C, D, E, H, N, P en Q stroommetingen en de punten F, I, M en R spanningsmetingen.

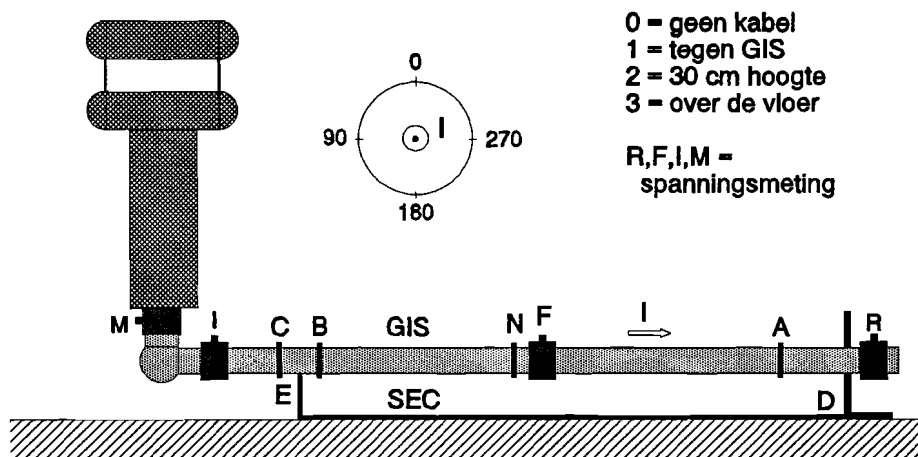


Figuur 2.1: Bovenaanzicht GIS-opstelling met afmetingen.

De instellingen van de GIS zijn hetzelfde gebleven als bij Vandenboorn [2]. Dit houdt in dat de laadspanning 70 kV bedraagt en de “sharpening gap” gesloten is tijdens de metingen. De meetsectie is op het uiteinde karakteristiek afgesloten met 300 Ω . Bij punt Q bevindt zich een goot die verbonden is met de vloer. Er wordt met en zonder vrije-lijn gemeten. Deze lijn is een 2,5 mm² elektriciteitsdraad met een lengte van 15 meter en bevestigd aan de bushing en m.b.v. een kunststof koord aan de railing van de hoogspanningsshal. Bij de metingen is in eerste instantie een RG214/U-kabel als secundaire kabel gebruikt. Bij enkele andere metingen wordt deze vervangen door een VMVKAS¹-kabel. De stromen worden gemeten met de één-winding Rogowskispoelen ontworpen door Vandenboorn (zie [2] paragrafen 2.4.1 en 2.4.2) en de meerwinding PTT-Rogowskispoel nr. 11. Voor de spanningsmeting is gebruik gemaakt van de inge-

¹Deze VMVKAS-kabel is een drie-aderige 2,5 mm² gewapende grondkabel.

goten platen in de scheidingsisolatoren die gebruikt worden als capacitieve sensoren. De metingen worden uitgevoerd m.b.v. de Tektronix digitizer² die zich in een EMC-kast bevindt. De RG214/U meetkabels zijn in koperen buizen gelegd en zijn met flenzen en doorvoerpluggen afgemonteerd op de kast en de aardplaat. De isolator tussen vonkbrug en "sharpening gap" dient voor de externe triggering van de digitizer. In de EMC-kast wordt het signaal voor de triggering geïntegreerd met een tijdconstante van $5,6 \mu\text{s}$. Het meetsignaal afkomstig van de spoel of capacitieve sensor wordt geïntegreerd met een tijdconstante van $1,5 \mu\text{s}$.



Figuur 2.2: Zijaanzicht met overzicht van de meetpunten.

De secundaire kabelmantel is bij het punt E met de GIS-mantel verbonden en bij punt D met de aardplaat. De GIS-mantel stromen zijn in eerste instantie m.b.v. de één-winding Rogowskispoel op elk punt voor 4 hoeken gemeten, te weten 0° , 90° , 180° en 270° (zie figuur 2.2). Met behulp van het computerprogramma *Vu-Point* wordt het rekenkundig gemiddelde van de GIS-mantelstromen verkregen. Om de spoel te kunnen draaien is 0,5 m RG214/U kabel met extra afscherming van litze gebruikt. Als deze kabel aan de zijde van de sensor wordt kortgesloten meet men geen signaal. Volgens de specificaties is dan het stoorsignaal kleiner of gelijk aan -60 dB .

De metingen zijn in eerste instantie uitgevoerd met de RG214/U als secundaire kabel. Indien de VMVKAS-kabel gebruikt wordt is dit apart in de figuren weergegeven. In de figuren wordt voorts aangegeven of met of zonder vrije-lijn is gemeten, de aanduiding is "with line" resp. "without line". Verder is zoveel mogelijk de nomenclatuur van Vandenboorn aangehouden, zie hiervoor [2] hoofdstuk 3.

Tenslotte volgen er nog enkele lengten van de gebruikte kabels en de afmetingen van de GIS:

² Er is gebruik gemaakt van de 7A19 50 Ω -insteek "unit" (serienummer B039250) die een bandbreedte van 300 MHz heeft.

Triggerkabel : 2,5 m; in de EMC-kast na de integrator met 16 m RG58 verlengd.

Signaalkabel GIS : 3,9 m; vanaf aardplaat tot EMC-kast.

Signaalkabel SEC : 3,9 m; vanaf aardplaat tot EMC-kast.

Secundaire kabel : 7,2 m.

Signaalkabel van aardplaat naar punt

A : 0,5 m.

E : 6,5 m.

F : 3,65 m.

N : 3,8 m.

M : 6,5+1 m.

I : 6,5+1 m.

H : 1,6 m.

P : 1,6+3,25 m.

Q : 1,6+6,5 m.

Hoogte vloer - onderkant GIS-mantel : 0,55 m.

Buitendiameter GIS-mantel : 323,9 mm ; wanddikte 7,1 mm.

Diameter binnengeleider : 90 mm.

Hoofdstuk 3

Meetresultaten

3.1 Inleiding.

De metingen zijn in eerste instantie uitgevoerd m.b.v. de één-winding Rogowskispoelen. De kabelmantel Rogowskispoel bezit een mutuele inductie $M=10,2$ nH en de GIS-mantel Rogowskispoel bezit een mutuele inductie $M=2,68$ nH. De gevoeligheid van deze sensoren met de integrator ($\tau=1,5$ μ s) bedraagt 147 A/V resp. 560 A/V (zie Vandenboorn [2] paragrafen 2.3 en 2.4).

Er is gemeten met en zonder vrije-lijn om zo de invloed hiervan te onderzoeken. Verder is voor de secundaire kabel de RG214/U-meetkabel en een 2,5 mm² drie-aderige gewapende VMVKAS-kabel gebruikt om te bezien wat de invloed van de soort kabel op de stroomverdeling en de differential-mode³ (DM) spanning is. Hierbij zijn de drie aders van de VMVKAS-kabel aan de uiteinden kortgesloten. Als laatste zijn enkele koperen folies over de scheidingsisolatoren [2] verwijderd om hun invloed te bekijken.

De secundaire kabel ligt bij de meeste metingen op de grond omdat in deze positie de grootste stoorstromen over de kabelmantel gaan lopen met als gevolg de grootste stoorspanningen op het uiteinde van deze kabel. Aan deze situatie zal in het vervolg de meeste aandacht worden geschonken. Ook zullen de stromen worden gemeten als de kabel halverwege de GIS en grond ligt. De secundaire kabel tegen de GIS-buis aan zal niet worden beschouwd omdat bij het meten van de stromen de structuur te veel wordt veranderd. Anders gezegd: bij het meten van de stromen ligt de kabel niet meer vlak genoeg tegen de buis aan.

In bijlage 1 zijn de resultaten van de stroommetingen op de posities A, B, C, D en E te vinden. Bijlage 2 geeft een overzicht van de stroommetingen. Voor elke meting is de stroomdichtheid voor de vier posities 0°, 90°, 180° en 270° gemeten en is het rekenkundig gemiddelde voor de stroom in de figuren weergegeven. Voor de meetpunten B en C met de secundaire kabel aanwezig is een correctie toegepast voor de 180° meting zoals is beschreven in Vandenboorn [2] paragraaf 4.1.

In bijlage 3 zijn de stromen A t/m E gemeten m.b.v. de PTT-Rogowskispoel en worden deze waarden vergeleken met de stromen gemeten m.b.v. de één-winding Rogowskispoel. Tenslotte geeft bijlage 4 de resultaten van de spanningsmetingen op de punten F, I, M en R van de GIS weer samen met de differential-mode spanningen aan het eind van de testkabel.

³De differential-mode spanning is de spanning tussen de ader en het aardscherm.

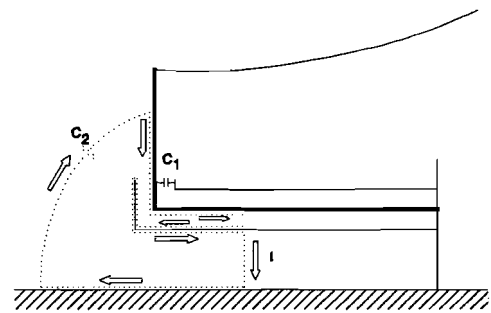
3.2 De uitgekoppelde stromen.

De figuren B1.1 t/m B1.5 in bijlage 1 geven de stromen gemeten m.b.v. de één-winding Rogowskispoel, voor de meetpunten A t/m E op de buis van de laadsectie. Door de aanwezigheid van de vrije-lijn zal minder stroom aan het uiteinde van de bushing worden gereflecteerd dan bij het niet aanwezig zijn van deze lijn. Als gevolg hiervan zullen de stromen na de eerste extrema minder snel naar nul gaan bij aanwezigheid van de vrije-lijn dan wanneer deze lijn niet aangebracht is.

De inwendige stroom en de verdeling.

In figuur 3.1 is weergegeven hoe de stroom loopt bij de bushing en hoe de koppeling van het inwendige van de GIS naar het uitwendige gedeelte plaatsvindt. De inwendige stroom kan bepaald worden door de gemeten interne spanningsgolf bij de posities R, F of I (zie paragraaf 3.3 en figuur 3.8) te delen door de GIS-impedantie van 74Ω . De "stationaire" waarde van deze stroom bedraagt 473 A ($= 35 \text{ kV}/74 \Omega$).

De inwendige stroom verdeelt zich via de capaciteit C_1 , de verschuivingsstromen van de bushing naar aarde (weergegeven d.m.v. capaciteit C_2) en eventuele aanwezige vrije-lijn. De verschuivingsstromen van het verticale gedeelte (de bushing) naar aarde zorgen ervoor dat de steilheid van de uitwendige stromen lager is dan die van de inwendige stroom. De verdeling van de uitgekoppelde stroom over de GIS- en kabelmantel



Figuur 3.1: De fysieke stroompaden.

en de externe reflecties tegen de aardplaat en goot zijn m.b.v. een transmissielijnenmodel goed te beschrijven, zie hiervoor paragraaf 4.3.

Invloed van de folies om de isolatoren.

Er zijn enkele metingen uitgevoerd zonder folie bij isolator I aanwezig. De resultaten zijn te vinden in de figuren B2.1 t/m B2.3 in bijlage 2. Verder is ook bij isolator F het folie verwijderd (folie bij isolator I wel aanwezig) en zijn eveneens een aantal metingen uitgevoerd die gegeven zijn in de figuren B2.4 t/m B2.8. Als laatste is de RG214/U-kabel vervangen door een drie-aderige ($2,5 \text{ mm}^2$) VMVKAS-grondkabel en zijn een aantal metingen uitgevoerd die gegeven zijn in de laatstgenoemde figuren, i.e. B2.4 t/m B2.8. De verschillen met en zonder folie bij de isolatoren I en F zijn klein. Dit is een gevolg van het grote aantal bouten door de isolatoren. Deze geleiders gedragen zich als "Reusenleiter" (zie Kaden [3] paragraaf L.3.1). De interne stroom kan dus door deze "Reusenleiter" blijkbaar moeilijk naar buiten koppelen in vergelijking met wat bij de bushing gebeurt. De stroommetingen bij de punten B en C met de RG214/U-kabel op de grond is voor de 180° metingen vrij gevoelig voor positievariaties, dus grote meeton nauwkeurigheid, langs de GIS. Als gevolg hiervan is er een

verschil tussen de stromen verkregen met en zonder folie bij de punten B en C. Dit verschil wordt dus niet veroorzaakt door de folie. Voorts is te zien dat bij aanwezigheid van de VMVKAS-kabel de stroom over de kabelmantel bij punt D met ongeveer 15 % afneemt terwijl de stroom over de buis (punten A en B) toeneemt. Dit is het gevolg van de hogere oppervlakte-impedantie van de stalen VMVKAS-kabelmantel t.o.v. de verzilverd koperen RG214/U-kabelmantel en de kleinere oppervlakte van de VMVKAS-mantel door de open structuur t.o.v. de RG214/U-mantel.

De stroom door de twee GIS-buizen.

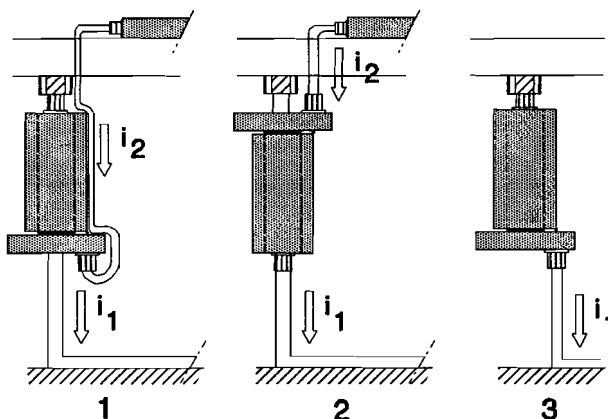
In bijlage 2 zijn in de figuren B2.9 t/m B2.14 de stroomgolven van telkens twee meetpunten op de naast elkaar liggende GIS-buizen gegeven. De stroomgolven van deze meetpunten hebben globaal dezelfde vorm waarbij de amplitude voor de meetpunten H0, P0 en Q0 op de meetsectiebuis ongeveer een factor vijf à zes lager is dan A0 resp. N0 en C0 op de laadsectiebuis. De timing kan niet worden nagegaan omdat bij het meten van de verschillende stroomgolven de digitizer niet telkens dezelfde instelling voor de triggering had. Dat de stroomgolven grosso modo aan elkaar gelijk zijn duidt erop dat er voornamelijk M-koppeling optreedt. Deze mutuele inductie per lengte eenheid bedraagt ongeveer 100 nH/m (zie paragraaf 4.3 en bijlage 10). Met behulp van formule (B10.10) met $I=1$ uit bijlage 10 bedraagt de koppelcapaciteit per lengte eenheid ongeveer 115 pF/m. Blijkbaar is het spanningsverschil tussen de twee buizen zo klein dat de C-koppeling t.g.v. de kortsluiting bij de punten H en Q mag worden verwaarloosd. De kleine afwijkingen tussen de stroomgolven worden waarschijnlijk veroorzaakt door lokale resonanties van de uitwendige stroom door de aan beide uiteinden kortgesloten meetsectiebuis (aardplaat en goot).

Meetfouten in de mantelstroom m.b.v. de kabelmantel Rogowskispoel.

Figuur B3.1 in bijlage 3 geeft de stromen i_B , i_C en i_E gemeten m.b.v. de één-winding Rogowskispoel met de RG214/U-kabel over de vloer. In figuur B3.2 is ter vergelijking de som van de stromen $i_C - i_B - i_E$ gegeven. De fout van de som blijft in de meettijd kleiner dan 25 procent. Het vermoeden ontstond dat de stroom i_E verkeerd gemeten was. Er is daarom 1) gezocht naar een andere sensor voor het meten van stroom bij positie E en 2) naar de oorzaak van de meetfout die optreedt bij het meten m.b.v. de kabelmantel Rogowskispoel bij positie E. Er zal eerst ingegaan worden op het laatstgenoemde punt. De andere sensor (meerwindingen spoel) wordt later behandeld.

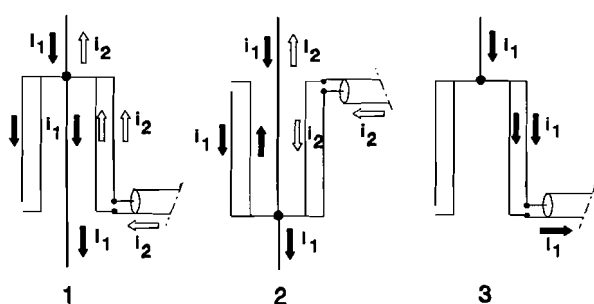
De kabelmantel Rogowskispoel is in eerste instantie ontwikkeld voor het meten van de kabelmantelstroom bij de aardplaat. In figuur 3.2 zijn een drietal configuraties gegeven voor het meten van de stroom op positie E. Configuratie 1 is gebruikt voor het meten van de deze stroom in de voorgaande metingen, hierbij staat de aansluiting van de connector haaks t.o.v. de GIS-buis. Deze manier is eveneens door Vandenboorn gebruikt bij zijn metingen. In deze figuur is stroom i_1 de te meten kabelmantelstroom en i_2 een ongewenste stroom die over de meetkabel gaat lopen. Door de secundaire kabel

als meetkabel te gebruiken, zoals is aangegeven in configuratie 3, wordt deze laatste stroom geëlimineerd. Figuur 3.3 geeft schematisch de stromenloop voor de drie configuraties weer.

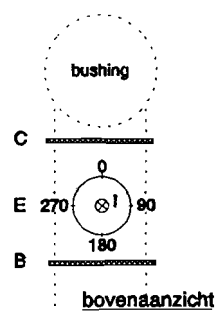


Figuur 3.2: Verschillende configuraties voor het meten van de stroom op positie E m.b.v. de één-winding Rogowskispoel.

In bijlage 3 is in figuur B3.3 de stroom E3 gegeven die gemeten is m.b.v. de drie configuraties. De oorspronkelijke meting m.b.v. configuratie 1 geeft te weinig aan t.o.v. de andere configuraties. In principe moet configuratie 3 de stroom korrekt meten omdat de ongewenste stroom i_2 niet kan lopen. De meetfout is klein (ongeveer 3 %) omdat de DM-spanning (ongeveer 1,7 Volt) als gevolg van deze stroom zeer veel kleiner is dan het meetsignaal van de sensor (ongeveer 70 Volt). Dit houdt in dat het eerste extrema van de stroom bij positie E3 toeneemt van 160 A naar ongeveer 240 A, een toename van 50 procent. Op een andere manier gezegd: bij configuratie 1 loopt ongeveer 35 procent van de totale stroom door de kabelmantel over de meetkabel waarbij we ervan uitgaan dat de gemeten stroom bij configuratie 3 korrekt is.



Figuur 3.3: De stromenloop voor de configuraties uit figuur 3.2.



Figuur 3.4: De hoeken voor de meting bij configuratie 3.

In figuur B3.4 is de stroom E3 gemeten bij een viertal hoeken (zie figuur 3.4) voor de connector aansluiting. De amplitude varieert ongeveer 15 procent omdat de "spoel" zich als meetlus gedraagt. Theoretisch gezien zouden de stromen bij de hoeken 90° en 270° hetzelfde resultaat moeten geven omdat de sensor in deze posities geen last heeft van de magnetische velden afkomstig van de GIS-buis. Kennelijk is er een extra magnetisch veld parallel aan de GIS-buis. Het is niet bekend wat de oorzaak van dit veld is.

Bij de GIS-mantel Rogowskispoel gaat een verwaarloosbare kleine stroom over de meetkabel lopen t.o.v. de stromen over de GIS-buizen (zie Vandenboorn [2] paragraaf 2.5.4) zodat de fout als gevolg van deze stroom mag worden verwaarloosd.

Vergelijking één-winding Rogowskispoelen met meerwindingen spoel.

De stromen over de GIS-buis van de laadsectie en de kabelmantel, i.e. de meetpunten A t/m E, zijn eveneens gemeten met de meerwinding PTT-Rogowskispoel nr. 11. Deze spoel bevat 10 wikkelingen die gevormd worden door een vlakke-bandkabel. De oppervlakte van één winding bedraagt $12,6 \text{ cm}^2$ (bij een diameter van 40 mm) en de straal van de spoel bedraagt 110 mm. De spoel bezit een mutuele inductie van $M=26 \text{ nH}$ en de bandbreedte bedraagt ongeveer 35 MHz (vrije opstelling) tegenover $M=2,68 \text{ nH}$ en een bandbreedte van 500 MHz voor de GIS-mantel Rogowskispoel.

Figuur B3.5 geeft de stroom voor E3 gemeten met de PTT-spoel. In deze figuur is de spoel zodanig om de kabel gelegd, in het vervolg oriëntaties genoemd, dat in het ene geval de uitgangsspanning van de spoel positief en in het andere geval negatief is. Deze waarden zijn vrijwel hetzelfde zoals is te verwachten voor een ideale meerwinding Rogowskispoel (zie [4] paragraaf 6.7). De amplitude bedraagt ongeveer 240 A, die in goede overeenstemming is met de gemeten stroom m.b.v. configuratie 3, hoek 270° . Er mag ervan uitgegaan worden dat de PTT-spoel minder gevoelig is voor externe magnetische velden dan de één-winding Rogowskispoel. Dit is eenvoudig in te zien door de PTT-spoel te bekrachtigen. Een gedeelte van de lekflux van de spoel omvat het gesloten circuit bestaande uit de GIS-buis, secundaire kabel en aardplaat en induceert aldaar een spanning V . De spanning veroorzaakt via de impedantie een stroom I . Het is aannemelijk dat deze lekflux bij de PTT-spoel kleiner zal zijn dan bij de bekrachtigde één-winding Rogowskispoel. Het reciprociteitstheorema zegt dat dezelfde stroom I door de kabel (die een gedeelte vormt van bovengenoemd circuit) dezelfde spanning V in de onbekrachte spoel koppelt. Onder de aanname dat de lekflux bij de PTT-spoel kleiner is dan de één-winding Rogowski zal eerstgenoemde spoel minder afhankelijk zijn van externe stoorvelden en dus nauwkeuriger meten. Zie ook Van Deursen [5] figuur 2.7 en Vandenboorn [2] figuur 13. De gemiddelde waarde van de gemeten stroom m.b.v. de PTT-spoel zal om deze reden de beste waarde opleveren.

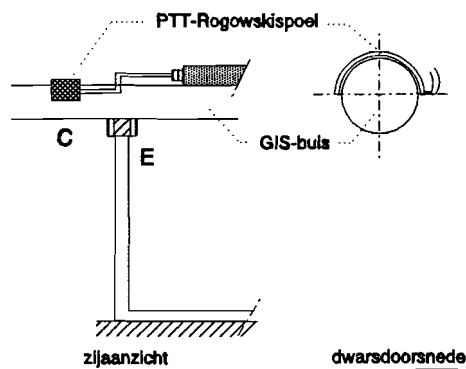
De stroom door de kabel bij de aardplaat, punt D3, is eveneens met de PTT-spoel en de één-winding Rogowskispoel gemeten en is weergegeven in figuur B3.6. De gemeten stroom m.b.v. beide methodes komt zeer goed overeen. Dit komt omdat vlak bij de aardplaat de stoorvelden klein zijn en dus beide spoelen dezelfde waarde aangeven. In de figuren B3.7 en B3.8 zijn de stromen E3 resp. D3 gegeven in het geval van een VMVKAS-kabel. De stroom gemeten m.b.v. de één-winding Rogowskispoel op positie E3 is uitgevoerd met configuratie 1 om de in eerste instantie gemeten waarden te kunnen vergelijken met de waarden verkregen met de PTT-spoel. Voor de PTT-spoel is de gemiddelde waarde genomen van de twee oriëntaties. De PTT-spoel

en de één-winding Rogowskispoel worden in de figuren B3.7 en B3.8 met elkaar vergeleken. Hierbij mag de waarde voor de PTT-spoel als beste waarde worden genomen.

De stromen over de GIS-buis A, B en C kunnen m.b.v. de PTT-spoel worden gemeten door deze open boven op de GIS-buis te leggen, zie figuur 3.5. De spoel past precies over de halve omtrek van de buis, zodat deze de helft van de contour-integraal $\oint H \cdot dl$ meet. Door de spoel, met dezelfde oriëntatie d.w.z. dezelfde polariteit van het meetsignaal, 180 graden om de buis te draaien wordt de andere helft van de integraal gemeten. De spoel zit dan aan de onderkant van de GIS-buis. Volgens de wet van Ampère moet deze gemeten integraal gelijk zijn aan de omsloten stroom.

De gevoeligheid van de spoel met integrator bedraagt 58 A/V (bij een $M=26$ nH en een integratieconstante van $\tau=1,5$ μ s). Bij verandering van de oriëntatie van de spoel keert het meetsignaal van polariteit om. Door nu weer de twee helften van de contour-integraal te meten kan op deze manier ook de stroom worden gemeten. Uit de metingen blijkt (niet weergegeven in bijlage 3) dat er vooral een verschil optreedt tussen de beide oriëntaties gemeten stromen op de posities B en C. Aangezien de Rogowskispoel niet ideaal is zullen externe velden invloed hebben op de metingen. Bij de posities B en C heeft de spoel waarschijnlijk last van elektrische velden die een externe stroom in de spoel inkoppelen. Door de gemiddelde stroom, door de beide oriëntaties verkregen waarden, te nemen is het aannemelijk dat deze invloed uitgemiddeld wordt. Bij verandering van de oriëntatie verandert immers de polariteit van de spanning geïnduceerd door het H-veld terwijl deze polariteit hetzelfde blijft voor de ingekoppelde capacatieve stroom.

Door een afscherming aan te brengen kan in principe de stroom om de spoel heen geleid worden. Met behulp van een "Zipper tubing" is deze afscherming gerealiseerd. De bandbreedte van de spoel daalt door de aanwezigheid van de afscherming van 35 MHz naar 10 MHz. Als gevolg van de GIS-buis zal de bandbreedte van de spoel kleiner zijn dan de 35 MHz in de vrije opstelling. Het is niet bekend hoeveel deze daling bedraagt. De daling van de bandbreedte met aanwezigheid van de "Zipper tubing" is het gevolg van de verdeelde capaciteiten van de windingen van de spoel naar het scherm. Er blijken oscillaties in het gemeten signaal op te treden bij beide oriëntaties als gevolg van de zelfinductie van de spoel en de capaciteiten. Deze oscillaties zorgen ervoor dat beide oriëntaties niet dezelfde waarde geven.



Figuur 3.5: Configuratie voor het meten van de stromen over de GIS-buis m.b.v. de PTT-spoel.

In de figuren B3.9 en B3.10 zijn de stromen i_B , i_C , i_E en de som weergegeven in het geval de stromen zijn gemeten met de PTT-spoel. Voor de stromen zijn de gemiddelde waarden gebruikt zoals hierboven is beschreven. De fout van de som in de meettijd is kleiner dan 10 procent een duidelijke verbetering t.o.v. de som (figuur B3.2) verkregen m.b.v. de één-winding Rogowskispoel.

De figuren B3.11 t/m B3.13 geven een vergelijking tussen met de PTT-spoel en de één-winding Rogowskispoel gemeten stromen (de RG214/U-kabel over de vloer). Er treden voornamelijk verschillen op in de metingen bij de stromen op de posities B en C. Deze verschillen zijn acceptabel m.b.t. de meetnauwkeurigheid en de lagere bandbreedte van de PTT-spoel.

Voor de volledigheid zijn in de figuren B3.16 t/m B3.20 de metingen en vergelijkingen gegeven indien de VMVKAS-kabel op de vloer ligt. De metingen zijn eveneens gedaan met de PTT-spoel en de één-winding Rogowskispoel.

3.3 De interne spanningen van de GIS.

In de scheidingsisolatoren van de GIS-opstelling bevindt zich een scherm met aansluitingen aan de buitenkant. De isolator is vervaardigd van een mengsel epoxyhars/kwartsglas met een ingegoten aluminium geleider. Het scherm wordt gebruikt als capacitieve sensor. De spanningsmetingen zijn uitgevoerd aan de punten R, F, I en M (zie de figuren 2.1 en 2.2). In figuur 3.6 is schematisch de gebruikte sensor weergegeven.

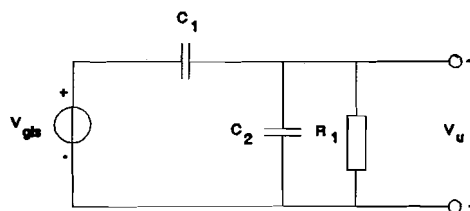
Tussen sensoraansluiting en aarde zijn een viertal weerstanden van elk 68Ω in ster geschakeld, zodat de waarde van R_1 17Ω bedraagt. Capaciteit C_1 is de meetcapaciteit terwijl C_2 een paracitaire capaciteit is. Om de juiste gemeten spanningen te krijgen dient voornamelijk de meetcapaciteit bekend te zijn. Er geldt namelijk (zie Vandenboorn, formule (43))

$$R_p(C_1 + C_2) \frac{dV_u}{dt} + V_u = \frac{R_p C_1}{\tau} V_{gis}. \quad (3.1)$$

Hierin is τ de integratie constante van de aangesloten integrator en R_p (12.7Ω) de vervangingsimpedantie van de meetkabel (RG214/U) en de weerstand R_1 .

Voor $f \ll f_c = 1/(2\pi R_1(C_1 + C_2))$ geldt

$$V_u = \frac{R_p C_1}{\tau} V_{gis}. \quad (3.2)$$



Figuur 3.6: Vervangingscircuit van de capacitieve sensor.

Om een nauwkeurige waarde van de meetcapaciteit te verkrijgen is de gelijkrichter van de voeding voor de GIS-opstelling verwijderd en de 50 Hz wisselspanning op de sensoren gemeten. Figuur 3.7 geeft het vervangingsschema van het meetgedeelte. De actieve integrator heeft een integratieconstante τ_i van 11 μs en een gelijkspanningsversterking A_0 . Voor $\omega \gg 1/(A_0\tau_i)$ geldt

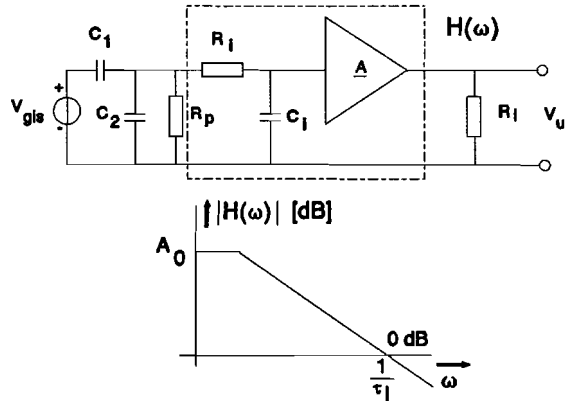
$$V_u = \frac{C_1 R_p}{\tau_i} V_{gis}. \quad (3.3)$$

In tabel 3.1 zijn de resultaten weergegeven van de metingen. De aangegeven spanningen zijn gegeven in effectieve waarden. De GIS-spanning is gemeten met de elektrostatische voltmeter. Tevens zijn in deze tabel de waarden voor C_2 weergegeven, deze zijn gemeten met een RLC-meetbrug (PHILIPS PM 6303) en dienen slechts om de grootte orde van deze waarden weer te geven. De capaciteit C_1 van sensor M is ongeveer een factor twee groter dan de andere sensoren vanwege een andere uitvoering van eerstgenoemde sensor. De isolator is bij M dikker en heeft vanwege het ontbreken van de GIS-buis een opener structuur dan de andere isolatoren. Dit laatste blijkt uit de duidelijk kleinere capaciteit C_2 .

Tabel 3.1: Meetresultaten voor de bepaling van de waarden van de meetcapaciteit C_1 en de paracitaire capaciteit C_2

| Sensor | V_{gis} [kV] | V_u [mV] | C_1 [pF] | C_2 [pF] |
|--------|----------------|------------|------------|------------|
| I | 9,7 | 117 | 10,4 | 370 |
| M | 9,6 | 220 | 19,9 | 239 |
| F | 9,6 | 115 | 10,4 | 372 |
| R | 9,6 | 113 | 10,2 | 330 |

In bijlage 4 zijn de spanningsmetingen weergegeven voor de punten R, F, I en M zowel met als zonder lijn en met of zonder secundaire kabel. De meetresultaten zijn de gemeten spanningen met de correctie voor de integrator in de EMC-kast toegepast ($\tau' = 67$ ns, formule (10) in Vandenboorn [2]). De omrekeningsfactor gegeven in formule (3.2) is hierbij niet gebruikt.

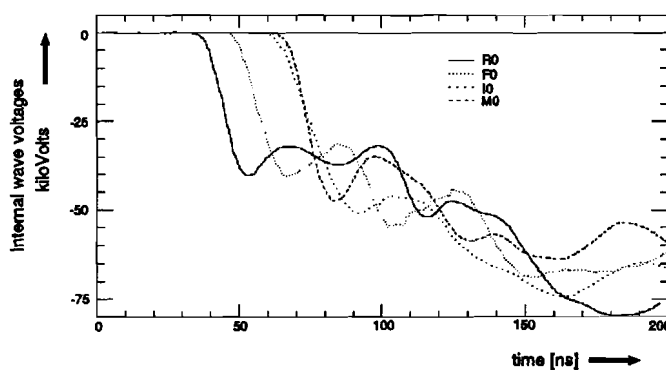


Figuur 3.7: Meetgedeelte voor het bepalen van de capaciteiten van de sensor.

Op sensor R (zie de figuren B4.1 en B4.2) zijn de spanningsgolven met en zonder aanwezigheid van de vrije-lijn, voor de situaties waarbij wel (figuur B4.2) of geen (figuur B4.1) kabel aanwezig zijn, gedurende de 90 à 110 ns aan elkaar gelijk. De gereflecteerde stroom tegen de wel of niet aanwezige vrije-lijn loopt via de verdeelde capaciteit van de bushing naar aarde. Dit stroompad is hetzelfde als aangegeven in figuur 3.1. De gereflecteerde stroom I in deze figuur gaat via de aardplaat naar de GIS-mantel. Bij de andere sensoren is dit effect natuurlijk eerder zichtbaar.

In de figuren B4.7 (M0) en B4.8 (M3) is het effect van de aanwezigheid van wel of geen secundaire kabel goed zichtbaar. De stroom gereflecteerd tegen het inkoppelpunt E van de kabel met GIS koppelt bij punt M in het inwendige van de GIS weer in. De afgelegde weg van M naar E en weer terug naar M bedraagt ongeveer 1,5 meter met een bijbehorende looptijd van ongeveer 10 ns. Bij de andere sensoren is dit effect op latere tijdstippen zichtbaar.

In figuur 3.8 zijn alle spanningsmetingen zonder kabel en vrije-lijn weergegeven in een plaatje, hierbij zijn de werkelijke GIS-spanningen m.b.v. formule (3.2) bepaald. Voor de sensoren R, F en I geldt $V_{gis} = 10,2 \cdot V_u$ [kV/V] en voor M geldt $V_{gis} = 5,3 \cdot V_u$ [kV/V]. Gedurende de eerste 60 ns na het actief worden van de spanningsgolf op positie R treedt er een doorschot en een min of meer oscillerend verloop op. Het vermoeden bestaat dat dit verloop door de vonkbrug wordt veroorzaakt.



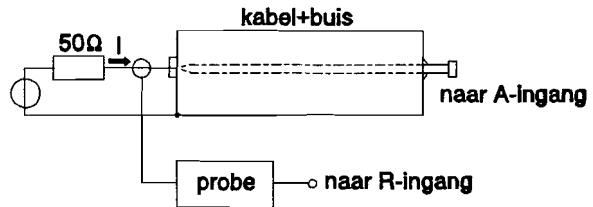
Figuur 3.8: GIS-spanningen bij de posities R, I, F en M zonder kabel en vrije-lijn.

Achteraf blijkt dat de integratietijd $\tau = 1,5 \mu\text{s}$ niet de juiste waarde is maar $1,35 \mu\text{s}$ bedraagt. Deze laatste tijd is gebruikt voor de omrekeningsfactoren van de gemeten spanningen naar de GIS-spanningen. De stromen zijn allemaal bepaald met de integratietijd van $1,5 \mu\text{s}$. Als gevolg hiervan zijn de gemeten stromen ongeveer 10 procent te groot. Dit is nog acceptabel gezien de nauwkeurigheid van de overige componenten bij de signaalregistratie.

3.4 De transferimpedanties van de gebruikte kabels.

Om de differential-mode (DM) spanningen te kunnen bepalen of te onderzoeken is het nodig dat de transferimpedanties van de kabels bekend zijn.

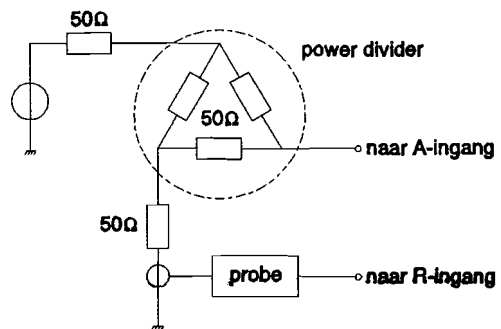
De in de literatuur gepubliceerde impedanties zijn niet tot voldoende hoge frequenties bekend, of helemaal niet bekend (voor de VMVKAS). De amplitude- en fase-karakteristieken voor de RG214/U en VMVKAS-kabels zijn gemeten van 5 Hz - 40 MHz. In figuur 3.9 is schematisch de testopstelling weergegeven. Voor het bereik van 5 Hz - 100 kHz is gebruik gemaakt van een losse functie generator (Thurlby Thandar TG230), een Lock-in amplifier (EG&G 128A) en een stroom-probe (Tektronix P6042). Voor het bereik van 100 kHz - 40 MHz is gebruik gemaakt van de HP spectrum/network-analyser (HP 4396A) en een stroom-probe (Tektronix AM503A).



Lengte kabel in buis: 0.315 meter.

Figuur 3.9: Principe van de meetopstelling voor de transferimpedantie.

Om de fase-invloed van de gebruikte probe met aangesloten kabels in het bereik van 100 kHz-40 MHz te bepalen is gebruik gemaakt van de opstelling volgens figuur 3.10. De invloed van de kabels van de probe kan geminimaliseerd worden door de vertragingstijd van de R-ingang van de analyser zo in te stellen dat de fase-karakteristiek (de verhouding A/R) nagenoeg vlak verloopt. Verder kan de invloed van het stukje kabel van het uiteinde van de buis



Figuur 3.10: Bepaling fase van de probe en bekabeling.

naar de A-ingang van analyser verwerkt worden door een extra vertraging in te bouwen die voor de RG214/U 0,5 ns en voor de VMVKAS 0,7 ns bedraagt.

De ingevoerde vertragingstijden geven op deze manier een betrouwbaar beeld van de gemeten fase-karakteristiek. Eventueel kan achteraf nog de m.b.v. figuur 3.10 gemeten vlakke karakteristiek van de probe van het eindresultaat worden afgetrokken om zo een nog nauwkeurigere karakteristiek te krijgen. Na deze methodes toegepast te hebben is in bijlage 5 de absolute waarde en de fase-hoek van de transferimpedantie voor beide kabels gegeven.

3.5 De differential-mode spanningen.

In bijlage 4 figuren B4.9 en B4.10 zijn de differential-mode spanningen weergegeven voor enkele situaties. De secundaire kabel is bij positie E met 50Ω afgesloten. In figuur B4.9 is de situatie gegeven waarbij over de scheidingsisolator bij positie F wel en geen folie aanwezig is. Zoals is te zien is het effect van de folie op de DM-spanning minimaal. De DM-spanning wordt met een factor 100 verhoogd wanneer de RG214/U-kabel wordt vervangen door een VMVKAS-grondkabel. Ondanks een afname van de stroom door de mantel (zie paragraaf 3.2 en de figuren B2.7 en B2.8) is de verhoging een gevolg van de veel slechtere transferimpedantie van de VMVKAS-kabel t.o.v. RG214/U-kabel.

Voor de signalen uit de figuren B4.9 en B4.10 geldt dat de frequentie van de grondgolf ongeveer 3,3 MHz ($=1/(2 \cdot 150 \cdot 10^{-9})$) bedraagt. Bij deze frequentie en hogere frequenties zit er tussen de moduli van de transferimpedanties van de twee kabels ongeveer een factor 110 verschil. Dit verklaart waarom de DM-spanning bij een VMVKAS-kabel een factor 100 groter is dan bij een RG214/U-kabel.

In tabel 3.2 staan de waarden van de eerste extrema van de DM-spanningen voor de verschillende posities van de kabel vermeld. Voor de RG214/U-kabel is gebruik gemaakt van de metingen van Vandenboorn. In de tabel zijn ook de reductiefactoren gegeven waarmee de spanningen dalen als de kabel niet over de vloer ligt.

Tabel 3.2: De eerste extrema van de DM-spanningen en de reductiefactoren voor verschillende posities van de kabel.

| positie kabel | DM-spanning RG214/U- kabel [V] | DM-spanning VMVKAS- kabel [V] | reductie- faktor RG214/U- kabel | reductie- faktor VMVKAS- kabel |
|-----------------|---|--|--|---|
| tegen GIS (1) | 0,09 | 13 | 18 | 13 |
| midden (2) | 0,29 | 55 | 6 | 3 |
| tegen grond (3) | 1,70 | 175 | 1 | 1 |

De DM-spanning daalt met een factor 18 als de RG214-kabel tegen de GIS wordt aangelegd i.p.v. over de vloer. Deze factor bedraagt voor de VMVKAS-kabel 13 en is lager omdat vanwege de stijfheid van de mantel de kabel niet geheel tegen de GIS en de aardplaat aan ligt. Verder kan hierbij ook de transferadmitantie van de VMVKAS-kabel een rol spelen omdat deze slechter is dan die van de dubbel afgeschermdde RG214/U-kabel.

De daling van de spanning bedraagt een factor 6 voor RG214/U-kabel als deze tussen

de GIS en de grond ligt. Deze daling is twee maal zo laag voor de VMVKAS-kabel. Mogelijk speelt in deze positie ook de transferadmittantie van de “open” kabel een rol. In bijlage 6 is een berekening voor de schatting van de transferadmittantie van de VMVKAS-kabel gegeven voor de gevallen waarbij de kabel op de grond of midden tussen de GIS en de vloer hangt. Bij een koppelcapaciteit van 7 fF/m (zie bijlage 6), een lengte van 7 meter en een gelijkmatig spanningsverschil van 70 kV is de ingekoppelde capacatieve stroom gelijk aan 0,2 A. Deze stroom veroorzaakt een DM-spanning van 10 V over de 50 Ω ingang van de digitizer. In dit geval bedraagt het aandeel van DM-spanning als gevolg van de ingekoppelde stroom ongeveer 18 % van de totale spanning. Bij de dubbel afgeschermdde RG214/U-kabel is het aannemelijk dat de spanning als gevolg van het elektrisch veld verwaarloosd mag worden t.o.v. de DM-spanning als gevolg van de stroom door de mantel. Uit tabel 3.2 volgt dan dat de VMVKAS-kabel ongeveer de helft van de DM-spanning veroorzaakt wordt door de capacatieve stroom. Wel zal de uitkoppeling bij de isolatoren een rol gaan spelen als er geen folies omheen zitten.

Uit bovenstaande kan geconcludeerd worden dat de DM-spanning fors verlaagd kan worden door de secundaire kabel niet over de vloer maar tegen de GIS aan te leggen. Uiteraard verdient de beter afgeschermdde RG214/U-kabel de voorkeur boven de elektrisch slecht afgeschermdde VMVKAS-kabel. Een verdere reductie wordt verkregen door een aardlitze [2] aan de onderzijde van de bushing te bevestigen. Beter is echter om de kabel in een goot te leggen zodat de totale transferimpedantie en -admittantie daalt. Een ander mogelijk is om een tweede aardplaat vlak bij punt C aan te brengen zodat de uitgekoppelde stroom lokaal via een lage impedantie naar aarde wordt afgevoerd.

3.6 Overzicht van de metingen.

Tabel 3.3 geeft een beknopt overzicht van de metingen die in de voorgaande paragrafen uitvoerig zijn beschreven. In deze tabel zijn de stromen genomen die gemeten zijn met de PTT-spoel met aanwezigheid van de vrije-lijn (zie bijlage 11). Bij aanwezigheid van de secundaire kabel is de RG214/U-kabel gebruikt bij deze metingen. In de tabel staat “exp.” voor de experimenteel (gemeten) waarden en “ber.” voor de berekende (gesimuleerde) waarden. Voor de waarden van de stromen en spanningen zijn telkens de eerste extrema genomen. Het minusteken “-” geeft aan dat desbetreffende stroom (stroomverhouding) of spanning niet van toepassing is voor die situatie.

Tabel 3.3: *Overzicht van de stroom- en spanningsmetingen, zowel gemeten alsook berekend.*

| positie van sec. kabel | I_B [A] | | I_E [A] | | I_H [A] |
|---------------------------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| | exp. | ber. | exp. | ber. | exp. |
| tegen GIS (1) | | | 15 | | |
| midden (2) | 185 | 175 | 50 | 50 | |
| over grond (3) | 140 | 120 | 240 | 180 | |
| geen kabel (0) | 230 | | - | - | -85 |

Vervolg tabel 3.3.

| I_E/I_B | | I_A/I_H | | U_{DM} RG214 [V] | | U_{DM} VMVKAS [V] | |
|-----------|------|-----------|------|-----------------------|------|------------------------|------|
| exp. | ber. | exp. | ber. | exp. | ber. | exp. | ber. |
| | | | 0,23 | 0,09 | | 3 | |
| 3,7 | 3,5 | | 0,23 | 0,29 | | 55 | |
| 0,58 | 0,67 | | 0,23 | 1,7 | 1,8 | 175 | 230 |
| - | - | 0,18 | 0,23 | - | - | - | - |

Hoofdstuk 4

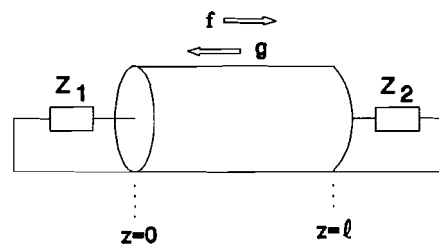
Modelvorming en vergelijking met de praktijk

4.1 Inleiding.

De modelvorming is vooral gericht op de DM-spanning en de stroomverdeling van de uitgekoppelde stroom over de GIS-buizen en de secundaire kabel. De aandacht zal, zoals in het voorgaande hoofdstuk, vooral uitgaan naar de situatie waarbij de secundaire kabel op de grond ligt. De DM-spanning wordt alleen bepaald voor de kabel over de vloer terwijl de bij de stroomverdeling ook de situatie bekeken wordt waarbij de kabel midden tussen de GIS-buis en grond ligt.

4.2 De DM-spanning.

Figuur 4.1 geeft het model weer dat de DM-spanning bepaald uit de gemeten stromen over de kabelmantel op de posities E ($z=0$) en D ($z=\ell$). Uit deze stromen kunnen een tweetal golven worden afgeleid. De golf f geeft de naar rechts lopende golf weer terwijl g de naar links lopende golf beschrijft. Z_1 en Z_2 zijn de impedanties waarmee de kabel is afgesloten. Voor zowel de RG214/U- als de VMVKAS-kabel geldt dat beide impedanties 50Ω bedragen. De externe golven koppelen via de transfer-impedantie en -admitantie in de kabel. De interne complexe voortplantingsconstante wordt beschreven door de grootte $\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i$. Onder verwaarlozing van de demping α_i geldt dus $\gamma_i = j\beta_i = j\omega\sqrt{L'C'}$, met L' en C' de zelfinductie resp. de capaciteit per lengte eenheid van de gebruikte kabel. De interne golfimpedantie Z_0 is in dit geval gelijk aan $Z_0 = \sqrt{L'/C'}$. In tabel 4.1 staan deze waarden vermeld voor de RG214/U- en VMVKAS-kabel, hierin is C' gemeten met een RLC-meetbrug (PHILIPS PM 6303) en L' bepaald via de relatie



Figuur 4.1: Model ter bepaling van de DM-spanning uit de gemeten stromen.

$$L'C' = \frac{1}{c^2} \tag{4.1}$$

door de snelheid c van de golf in de kabels m.b.v. de HP spectrum/network-analyser (HP 4396A) te meten.

De externe complexe voortplantingsconstante γ_e is onder verwaarlozing van de dem-

ping gelijk aan $\gamma_e = j\beta_e = j\omega/c$ met c de voortplantingssnelheid in lucht, i.e. $3 \cdot 10^8$ m/s.

Tabel 4.1: Enkele gegevens van de RG214/U- en VMVKAS-kabel, de lengte van de kabels bedraagt 7,2 m.

| type kabel | looptijd [ns] | L' [nH/m] | C' [pF/m] | Z_0 [Ω] |
|------------|---------------|-------------|-------------|--------------------|
| RG214/U | 36,2 | 256 | 100 | 50 |
| VMVKAS | 41,4 | 142 | 233 | 25 |

Onder de hierboven ingevoerde grootheden kan de externe stroomgolf mathematisch in het tijddomein beschreven worden door

$$i(z,t) = f\left(t - \frac{z}{c}\right) + g\left(t + \frac{z-\ell}{c}\right). \quad (4.2)$$

Via een iteratief proces kunnen de functies $f(t)$ en $g(t)$ worden bepaald uit de gemeten stromen $i(0,t)$ en $i(\ell,t)$, i.e. de stromen op de posities E en D. Door middel van Fourier-transformatie kan het frequentiespectrum van de externe golf worden beschreven door

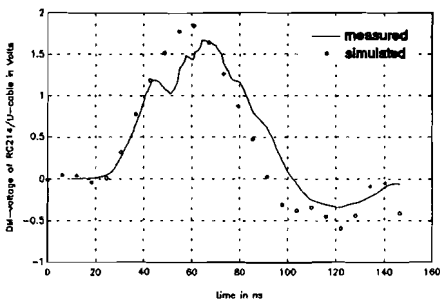
$$I(z,\omega) = \mathcal{F}\{i(z,t)\} = F(\omega) e^{-j\omega \frac{z}{c}} + G(\omega) e^{j\omega \frac{z-\ell}{c}}. \quad (4.3)$$

Met behulp van Vance [6] kan het frequentiespectrum van de DM-spanning berekend worden als de transferimpedantie en -admitantie bekend zijn. De invloed van de transferadmitantie wordt verwaarloosd t.o.v. de invloed van de transferimpedantie aangezien de admitantie gelijk is aan enkele tientallen fF/m (zie bijlage 6) voor de VMVKAS-kabel (die een slechtere impedantie en admitantie heeft dan de RG214/U-kabel). Verder is het elektrisch veld in de buurt van het aardvlak laag zodat het spanningsverschil tussen mantel en aardvlak laag zal zijn. In bijlage 7 is de berekening gegeven voor het bepalen van het spectrum van de DM-spanning als alleen de invloed van de transferimpedantie meegenomen hoeft te worden. Via de inverse Fourier-transformatie verkrijgt men het tijdsdomein signaal van de DM-spanning.

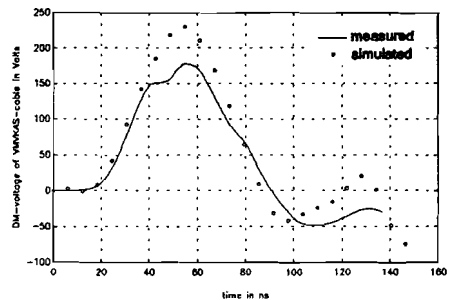
In de simulaties is geen gebruik gemaakt van de tijdcontinue Fourier-transform maar van de tijddiskrete Fourier-transform, de zogenaamde DFT. De transferimpedanties uit bijlage 5 zijn gesampled met een frequentie van 40 kHz. In totaal zijn 4096 punten gebruikt zodat de sample tijd in het tijdsdomein 6,1 ns ($= (40 \cdot 10^3 \cdot 2^{12})^{-1}$) bedraagt. Bijlage 8 geeft een kanttkening m.b.t. de relatie tussen de DFT en het amplitude spectrum van het signaal.

De figuren 4.2 en 4.3 geven de resultaten van de simulaties. In bijlage 9 zijn deze figuren vergroot gegeven waarbij ook de common-mode stromen D en E en de golven $f(t)$ en $g(t)$ zijn gegeven. Gedurende de eerste stijgtijd komen de gemeten en gesimu-

leerde waarden van de DM-spanning goed overeen. De eerste extrema zijn in de simulatie groter. Dit komt waarschijnlijk doordat de demping van de kabel is verwaarloosd. Bij de VMVKAS-kabel zal deze demping een grotere invloed hebben dan bij de RG214/U-kabel omdat eerstgenoemde kabel een beduidend slechter aardscherm heeft dan laatstgenoemde kabel. De demping is in dit geval niet in het model in te voeren omdat de externe golven niet meer uit de gemeten stromen kunnen worden gereconstrueerd. In een “overall” model kan natuurlijk wel een demping worden ingevoerd indien deze bekend is. Indien deze niet bekend is verkrijgt men een “worst case” DM-spanning die afwijkt van de werkelijke spanning.



Figuur 4.2: Gemeten en gesimuleerde DM-spanning van de RG214/U-kabel.



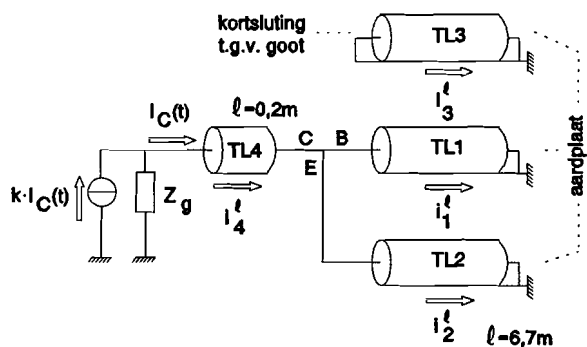
Figuur 4.3: Gemeten en gesimuleerde DM-spanning van de VMVKAS-kabel.

4.3 De stroomverdeling.

In deze paragraaf zal de stroomverdeling over de GIS-buizen en de secundaire kabel worden berekend. Er zal alleen gekeken worden of deze verdeling in eerste instantie goed beschreven wordt m.b.v. een transmissielijnenmodel (zie paragraaf 4.3.1).

4.3.1 Beschrijving van het model.

Figuur 4.4 geeft een eenvoudig model weer voor het beschrijven van de stroomverdeling over de GIS-buizen en de secundaire kabel. *TL1* is het laadsectie gedeelte van de GIS-buis, *TL2* is de mantel van de secundaire kabel, *TL3* is het meetsectie gedeelte van de GIS-buis en *TL4* is het (kleine) stukje transmissielijn (TL) van de gemeten stroom bij positie C naar het inkoppelpunt van de kabel.



Figuur 4.4: Eenvoudig model voor de bepaling van de stroomverdeling.

TL4 is ingevoerd omdat daarmee de reflectie van de stroom tegen het inkoppelpunt kan worden verwerkt. Zonder deze transmissielijn is dat niet mogelijk. De transmis-

sielijnen $TL1$ t/m $TL3$ zijn gekoppeld en worden in het frequentiedomein gekarakteriseerd d.m.v. de matrices L , C en R . De induktiematrix L is gedefinieerd door

$$L := \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Hierin zijn L_1 t/m L_3 de zelfindukties per lengte eenheid van de transmissielijnen $TL1$ t/m $TL3$. M_{ij} is de mutuele inductie per lengte eenheid tussen TLi en TLj (voor $i \neq j$). De capacitevmatrix C volgt uit bijlage 10 vergelijking (B10.10). De optredende hoogfrequent verliezen (skineffekt) worden beschreven d.m.v. de resisatievmatrix R die gedefinieerd is door

$$R := \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} \end{bmatrix} \sqrt{\omega} \quad (4.5)$$

Als deze matrix niet meegenomen wordt blijken er (ongedempte) oscillaties in de simulatie op te treden met als gevolg dat het resultaat van de simulatie slechter overeenstemt dan wanneer wel de resisatievmatrix wordt meegenomen.

Aangenomen is dat transmissielijn $TL4$ niet gekoppeld is met de overige lijnen. De karakteristieke impedantie van $TL4$ bedraagt 130Ω (zie Vandenboorn paragraaf 4.5). De stromen door de transmissielijnen worden aangeduid met $i_1^l(t)$ t/m $i_4^l(t)$. Uit simulaties blijkt dat het verticale gedeelte van de secundaire kabel opgevat als transmissielijn (met een geschatte impedantie van 200Ω) naar de GIS-buis onder E weinig invloed heeft. Om het model zo eenvoudig mogelijk te houden is deze weggelaten. De stroom bij positie E wordt gelijk genomen aan de stroom aan het begin van $TL2$. De stroom $i_C(t)$ gemeten op positie C wordt met behulp van een ideale stroombron geïnjecteerd in $TL4$. De faktor k van deze stroombron is zodanig gekozen dat de stroom door $TL4$ gelijk is aan $i_C(t)$. Deze faktor bedraagt voor de kabel op de grond 1,25 en voor de kabel midden tussen de GIS en de vloer 1,8. De stroombron is parallel afgesloten met een weerstand ter grootte Z_g die 130Ω bedraagt zodat reflecties afkomstig van $TL4$ niet nogmaals gereflecteerd worden. Na een tijd van 44 ns ($=2 \cdot 6,7 \text{ m} \cdot 3,3 \text{ ns/m}$) komen de reflecties afkomstig van de aardplaat bij het begin van de transmissielijn aan en zal de stroom $i_4^l(t)$ niet meer overeenstemmen met de gemeten stroom op positie C. Dit betekent dat het model in dat geval niet meer korrekt is. Het model is echter toereikend genoeg om te kunnen beoordelen of deze gedurende de eerste 44 ns de juiste stroomverdeling weergeeft.

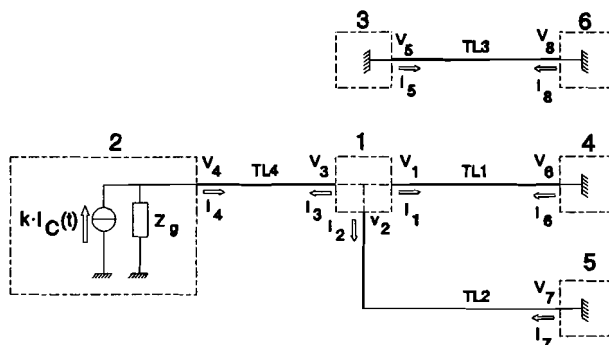
Het TL-model volgens figuur 4.4 kan in een netwerkmodel worden getransformeerd, zoals is gegeven in figuur 4.5. In dit model zijn V_1 t/m V_8 en I_1 t/m I_8 de netwerkspanningen resp. -stromen die gedefinieerd zijn in het frequentiedomein. De span-

ningen zijn gedefinieerd t.o.v. het aardvlak en de netwerkstromen lopen van het netwerk af. De geïnjecteerde stroom $i_C(t)$ wordt via de tijddiskrete Fourier-transformatie getransformeerd naar het amplitude spectrum $I_C(\omega)$. De relatie tussen de netwerkspanningen en -stromen luidt

$$PV + QI = U, \quad (4.6)$$

met $V=(V_1, \dots, V_8)^T$ en $I=(I_1, \dots, I_8)^T$.

Op de uiteinden van de TL-en zijn de randvoorwaarden voor de TL-spanningen en -stromen gelijk aan de netwerkspanningen en -stromen. Hierbij moet men bedacht zijn op het probleem dat de TL-stroom en netwerkstroom op het uiteinde van de lijn tegengesteld zijn aan elkaar. Met behulp van formule (4.6) volgt er een relatie tussen beide voor-

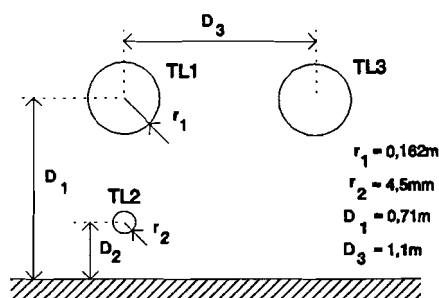


Figuur 4.5: Netwerkbeschrijving voor figuur 4.4.

waarden. Door invoering van een vector G (zie bijlage 10) die de spanningen aan het begin en aan het einde van de lijn beschrijft vindt men een stelsel van lineaire vergelijkingen in G . Oplossing van deze vector leidt tot oplossing van het stroomverdelingsprobleem in het frequentiedomein. Inverse Fourier-transformatie geeft de oplossing van het probleem in het tijdsdomein. Deze procedure is in Djordjević [7] uitgebreid beschreven, terwijl meer achtergrond informatie over deze en andere methoden voor het oplossen van een meervoudig gekoppelde TL-problemen wordt gegeven in Djordjević [8]. In bijlage 10 is bovenstaande procedure uitgewerkt voor het stroomverdelingsprobleem uit figuur 4.4.

4.3.2 Vergelijking van het model met de metingen.

In bijlage 11 zijn de resultaten van de simulaties gegeven waarbij de met de PTT-spoel gemeten stromen zijn genomen voor de injectie. Voorts worden deze gemeten stromen gebruikt ter vergelijking met het gesimuleerde. Als secundaire kabel is alleen de RG214/U-kabel gebruikt. Een dwarsdoorsnede van de GIS-buizen met de secundaire kabel en hun afmetingen en onderlingen afstanden is gegeven in figuur 4.6. Er wordt alleen de situatie bekeken waarbij de kabel op de grond ligt (D_2 bedraagt dan enkele millimeters) en waarbij de



Figuur 4.6: Dwarsdoorsnede van de GIS-opstelling met afmetingen.

kabel midden tussen de GIS-buis en grond hangt ($D_2=0,306$ m). In bijlage 12 worden de zelf- en mutuele inducties van de inductiematrix L vgl. (4.4) berekend voor verschillende hoogten van de secundaire kabel.

Als de secundaire kabel ver van de GIS-buis ligt, zal voor het quotiënt van de stroom over de laadsectiebuis (I_1^l) en de kabelmantel (I_2^l) gelden

$$\frac{I_2^l}{I_1^l} = \frac{L_1 - M_{12}}{L_2 - M_{12}} \approx \frac{L_1}{L_2} \quad \text{voor } M_{12} \ll L_1 \text{ en } L_2. \quad (4.7)$$

Voor de kabel over de grond zal $D_2=6,5$ mm bedragen en is het quotiënt gelijk aan 2,37 ($L_1=432$ nH/m en $L_2=182$ nH/m). Uit de gemeten waarden volgt (figuren B11.4 en B11.10, eerste extrema) dat dit quotiënt gelijk is aan $240/140=1,71$. Door D_2 met 2 mm te verhogen wordt de theoretisch berekende quotiënt nagenoeg gelijk aan de gemeten verhouding. Aangezien kleine variaties in D_2 grote veranderingen in de stroomverhouding geeft, is deze parameter zodanig veranderd dat de gesimuleerde stroom bij D zo goed mogelijk overeenkomt met de gemeten stroom. Deze methode is gekozen omdat de stroom bij de aardplaat het nauwkeurigst gemeten is. Het blijkt dat D_2 verhoogt dient te worden naar 9,5 mm. Deze verhoging t.o.v. de originele situatie, i.e. $D_2=6,5$ mm, is toe te schrijven aan het feit dat:

- Bij de aardplaat de kabel iets omhoog gaat zodat $TL2$ in feite niet homogeen is, in het model is een gemiddelde hoogte genomen;
- De isolatie van de kabel niet over de gehele lengte strak op de vloer ligt;
- Er een isolerende laklaag over de vloer ligt.

Voor de kabel halverwege de GIS-buis en de vloer bedraagt $D_2=0,306$ m. In dit geval hoeft geen correctie worden toegepast omdat L_2 voor dergelijke grootte waarde niet zo gevoelig is voor kleine afwijkingen in de aangenomen positie.

De stroomverhouding van de stroom door de laadsectiebuis I_1^l en de meetsectiebuis I_3^l wordt bepaald door

$$\frac{I_3^l}{I_1^l} = \frac{M_{13}}{L_3}. \quad (4.8)$$

Hierin is M_{13} de mutuele inductie tussen $TL1$ en $TL3$. Aangezien beide waarden nauwelijks veranderen onder invloed van variaties voor D_2 (zie bijlage 10) zal deze verhouding nagenoeg een constante zijn die gelijk is aan 0,23 ($M_{13}=98$ nH/m en $L_3=432$ nH/m, zie bijlage 10) oftewel over de meetsectiebuis loopt een stroom die 4,3 maal kleiner is dan de stroom over de laadsectiebuis. De waarde van het quotiënt vertoont een afwijking van ongeveer 15 % t.o.v. de gemeten waarde die 0,2 bedraagt (zie de figuren B2.9 t/m B2.12).

In de voorgaande paragraaf zijn de induktiematrix L en de resistievematrix R gedefinieerd d.m.v. de vergelijkingen (4.4) en (4.5). In bijlage 10 zijn deze matrices, die berekend zijn met het programma *Oersted*, voor $D_2=9,5$ mm en $D_2=0,306$ m gegeven. Voor de GIS-buizen en de kabel is aluminium als materiaal gebruikt terwijl voor de grond zink als materiaal gebruikt is. Alle geleiders in het model zijn massief uitgevoerd. De GIS-buizen zijn in werkelijkheid van staal gemaakt. De invloed van deze verkeerde materiaal keuze is niet zo groot omdat de weerstand van de secundaire kabel de belangrijkste grootheid is en deze veel groter is dan de weerstand van GIS-buizen (zie bijlage 10).

Zoals is te zien in bijlage 11 komen alle gesimuleerde stromen gedurende de eerste 44 ns goed overeen met de gemeten stromen. De stroom bij positie E3 vormt hier een uitzondering op. Zoals de figuren B3.7, B3.9, B3.14 en B3.16 tonen begint de stroom ongeveer 10 ns na het begin van de stromen $i_{B3}(t)$ en $i_{C3}(t)$ toe te nemen. Het is niet bekend waar deze vertraging door veroorzaakt wordt. In het model zit deze vertraging niet verwerkt waardoor de afwijking ontstaat.

Hoofdstuk 5

Conclusies

Voor een VMVKAS-kabel is de CM-stroom lager dan voor een RG214/U-kabel als gevolg van de hogere oppervlakte-impedantie. De DM-spanning is een factor 100 hoger als gevolg van de veel hogere transferimpedantie van de VMVKAS-kabel. Deze DM-spanningen blijken vrij goed gereconstrueerd te kunnen worden door de gemeten stromen aan de uiteinden van de kabels in een transmissielijnenmodel in te voeren. Via de transferimpedantie worden de stromen in het model omgezet naar de DM-spanningen.

De berekende (gesimuleerde) en gemeten stroomverdeling van de uitgekoppelde stroom over de GIS-buizen en de kabelmantel stemmen vrij goed met elkaar overeen.

Als gevolg van de aanwezige vrije-lijn zullen de stromen na hun eerste extrema sneller dalen dan als deze lijn niet aanwezig is. De afscherming bij de isolatoren verwijderen heeft slechts een geringe invloed op de stroomverdeling over de GIS-buizen en kabelmantel. De grootste stroom koppelt dus bij de bushing uit, de isolatoren hebben nauwelijks invloed op de uitkoppeling.

Het meten van de stroom over de kabelmantel bij het inkoppelpunt, i.e. punt E, m.b.v. de één-winding Rogowskispoel is nogal afhankelijk van de manier waarop de meetkabel aan de sensor is bevestigd. Bij een verkeerde bevestiging gaat ongeveer 35 procent van de totale stroom door kabel over de meetkabel lopen. Deze stroom wordt door de sensor niet gemeten. Verder is van belang welke hoek de aansluiting van de meetkabel aan de sensor t.o.v. de GIS-buis maakt. Dit komt doordat de één-winding Rogowskispoel zich niet als spoel maar als meetlus gedraagt.

Metingen m.b.v. de PTT-meerwinding Rogowskispoel en de één-winding Rogowskispoel tonen aan dat beide metingen consistent zijn. Externe velden die een stoorsignaal in de PTT-spoel veroorzaken kunnen m.b.v. een middelingsproces geminimaliseerd worden.

Literatuurlijst

- [1] Cliteur G.J.
Stoorstromen bij GIS-installaties.
Afstudeerverslag T.U. Eindhoven, faculteit Elektrotechniek, vakgroep EHC,
rapport nr. EH.92.A.125.

- [2] Vandenboorn R.P.J.M.
Storingen op secundaire bekabeling t.g.v. schakelhandelingen in GIS: Stroom-
en spanningsmetingen.
Afstudeerverslag T.U. Eindhoven, faculteit Elektrotechniek, vakgroep EHC,
rapport nr. EH.93.A.130.

- [3] Kaden, H.
Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik.
Berlin: Springer Verlag, 1959, 2. Auflage.

- [4] Laan, P.C.T. van der en E.J.M. van Heesch.
Magnetische gekoppelde ketens.
Collegedictaat TU-Eindhoven, nr. 5572, druk 1992.

- [5] Deursen, A.P.J. van.
Bliksemsimulatie-metingen aan de mobilfoonmast te Duizel-Eersel.
Samenwerkingsovereenkomst TUE-PTT.
TUE kenmerk: CvB 137.583 en EHO/PG/2077, 1989.

- [6] Vance E.F.
Coupling to shielded cables.
New York: John Wiley & sons, 1978.

- [7] Djordjević, A.R. and T.S. Sarkar.
Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks.
IEEE trans. on microwave theory and techniques, Vol. 35(1987), No. 10, p.
898-908.

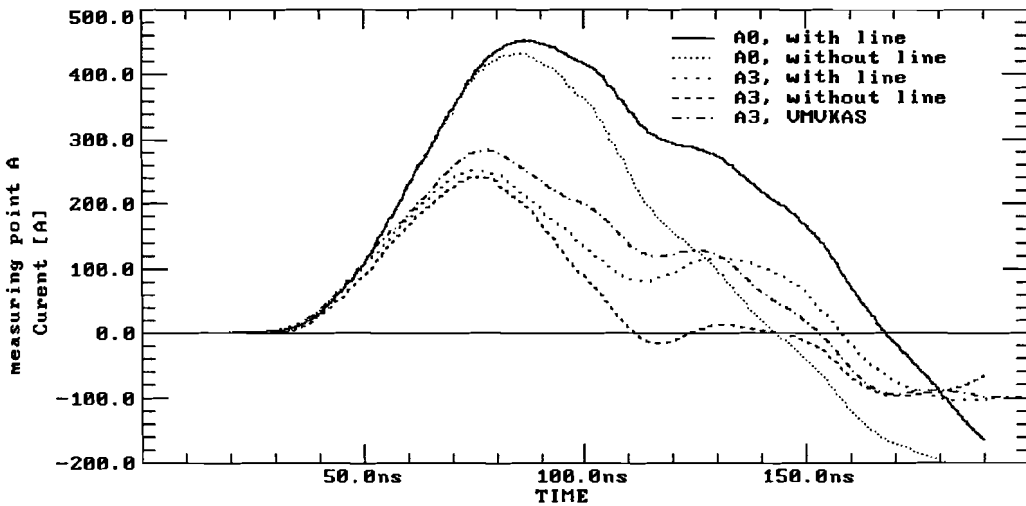
- [8] Djordjević, A.R.; T.S. Sarkar and R.F. Harrington.
Time-domain response of multiconductor transmission lines.
Proceedings of the IEEE, Vol. 75(1987), No. 6, p. 743-764.

- [9] Verkroost, G.
Digitale signaalbewerking.
Collegedictaat TU-Eindhoven, nr. 5625.

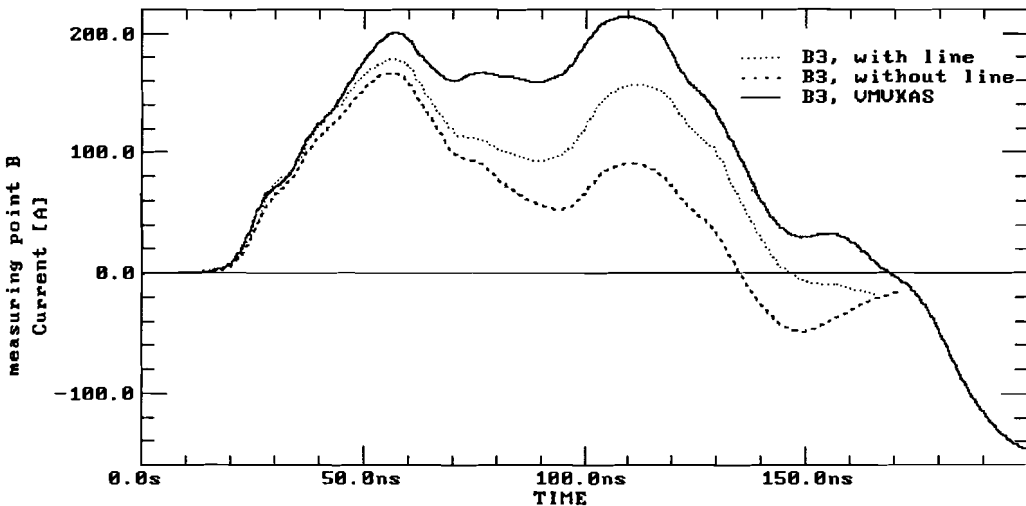
Bijlage 1

Stroommetingen

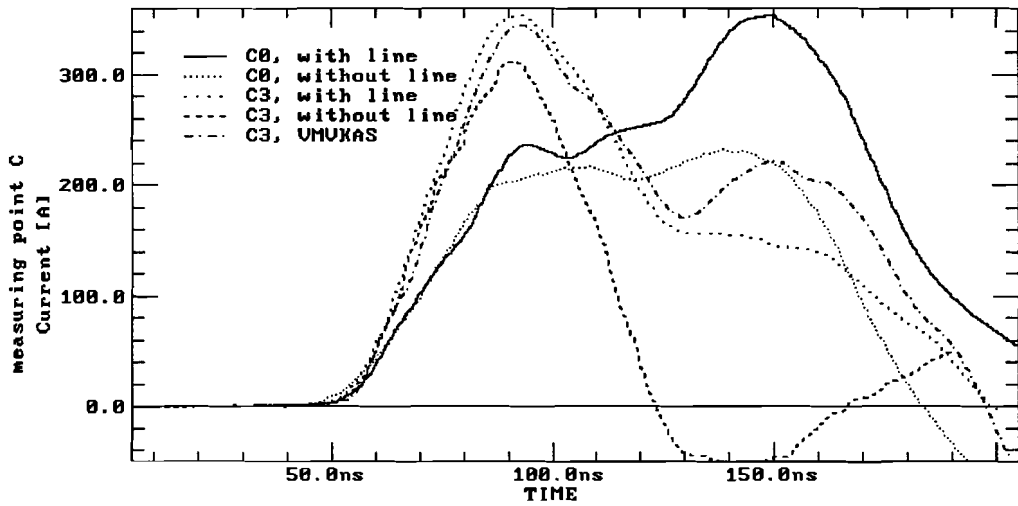
De figuren in deze bijlage geven de gemeten stromen m.b.v. de één-winding Rogowski spoel met en zonder vrije-lijn weer, aangeduid met “with line” resp. “without line”. In beide gevallen is de RG214/U-kabel als secundaire kabel gebruikt, zie ook hoofdstuk 2. De gemeten stromen met aanwezigheid van de VMVKAS-kabel zijn alleen met vrije-lijn uitgevoerd.



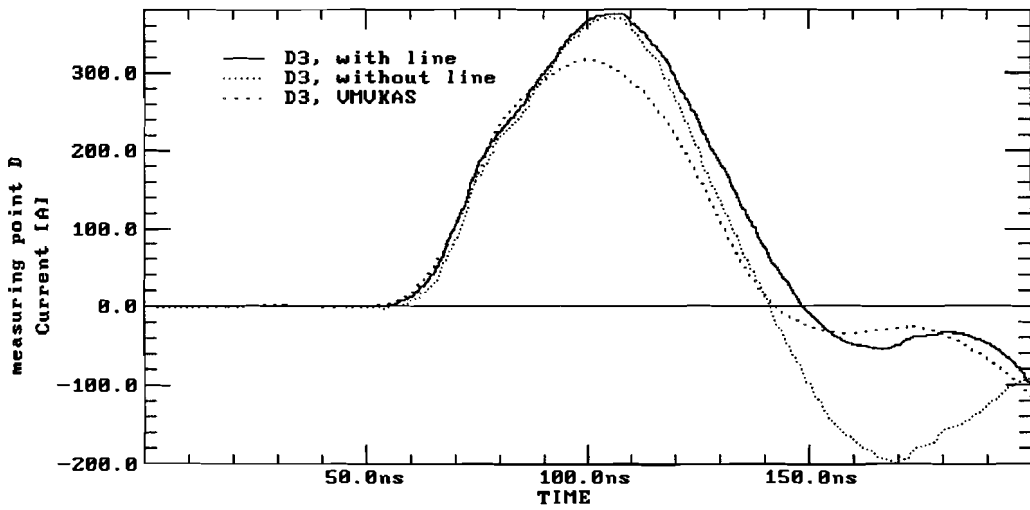
Figuur B1.1: Overzicht van de stroommetingen bij meetpunt A.



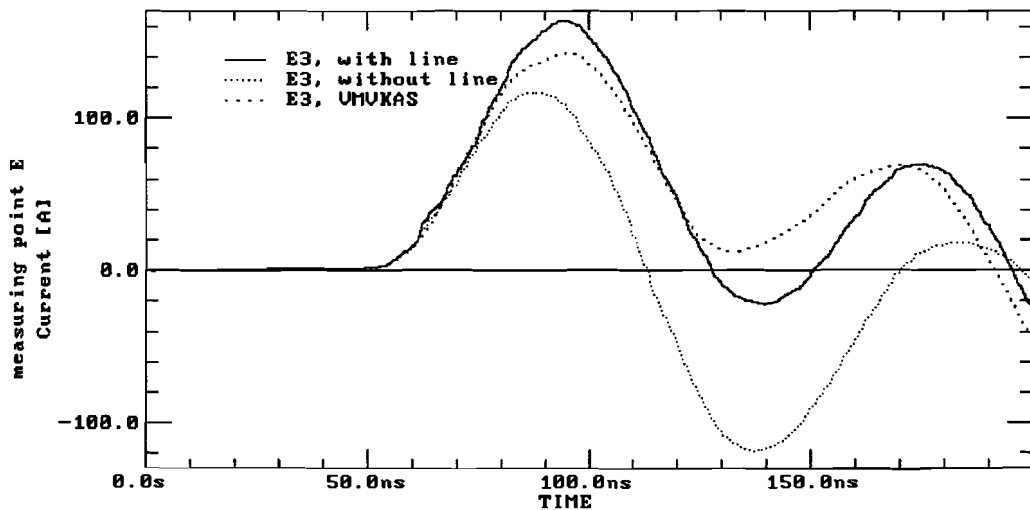
Figuur B1.2: Overzicht van de stroommetingen bij meetpunt B.



Figuur B1.3: Overzicht van de stroommetingen bij meetpunt C.



Figuur B1.4: Overzicht van de stroommetingen bij meetpunt D.

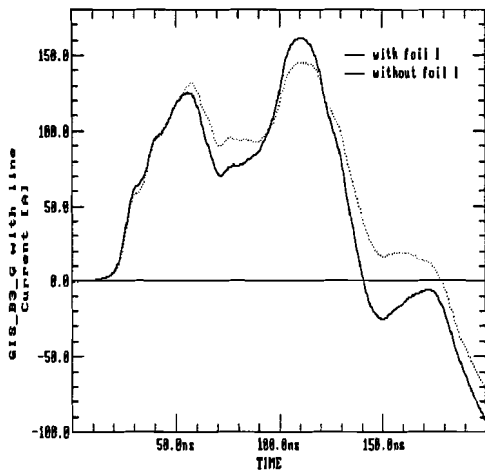


Figuur B1.5: Overzicht van de stroommetingen bij meetpunt E.

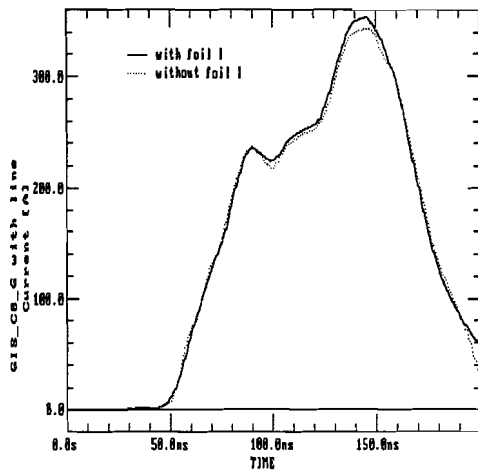
Bijlage 2

Overzicht van de stroommetingen

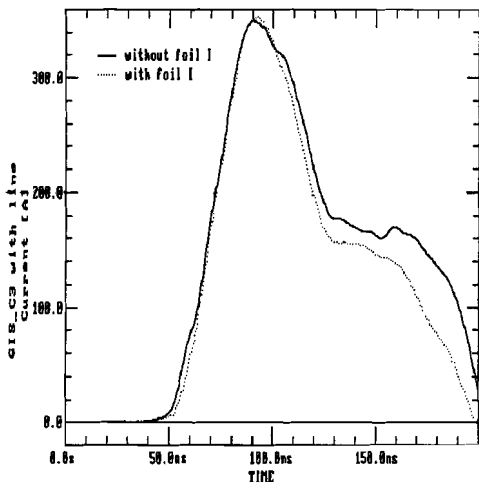
De figuren B2.1 t/m B2.3 geven een overzicht van enkele gemeten stromen m.b.v. de één-winding Rogowskispoel met en zonder folie bij scheidingsisolator I. De eventueel aanwezige kabel is een RG214/U-kabel. Alle metingen zijn uitgevoerd met vrije-lijn. De figuren B2.4 t/m B2.8 geven een overzicht van enkele gemeten stromen met en zonder folie bij isolator F. Indien niets anders is vermeld wordt de RG214/U-kabel gebruikt. Bij aanwezigheid van de VMVKAS-kabel is het folie F niet verwijderd.



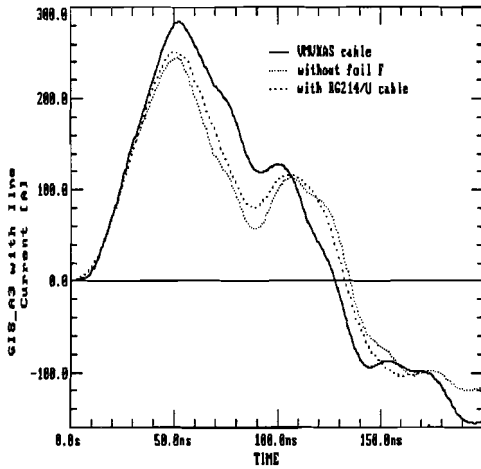
Figuur B2.1: Gemiddelde stroom bij meetpunt B3, met en zonder folie I.



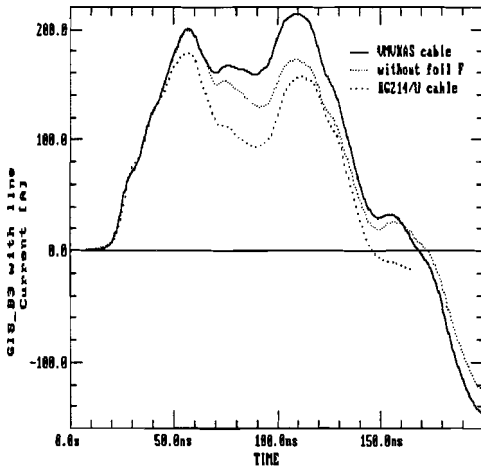
Figuur B2.2: Gemiddelde stroom bij meetpunt C0, met en zonder folie I.



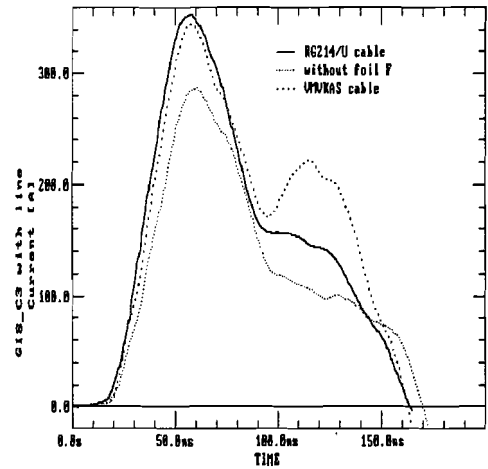
Figuur B2.3: Gemiddelde stroom bij meetpunt C3, met en zonder folie I.



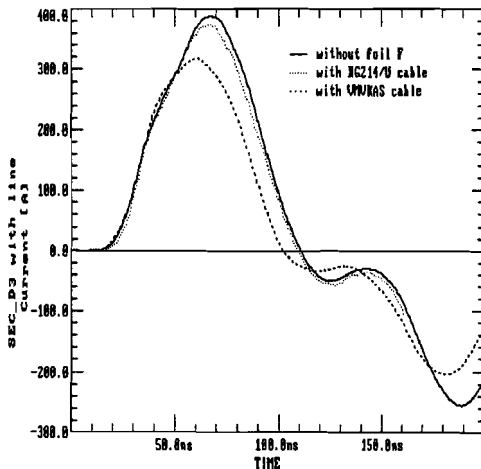
Figuur B2.4: Stroom bij A3, zonder folie F, RG214- en VMVKAS-kabel.



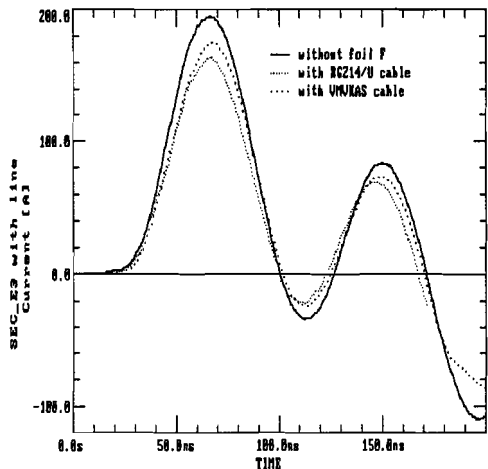
Figuur B2.5: Stroom bij B3, zonder folie F, RG214- en VMVKAS-kabel.



Figuur B2.6: Stroom bij C3, zonder folie F, RG214/U- en VMVKAS-kabel.

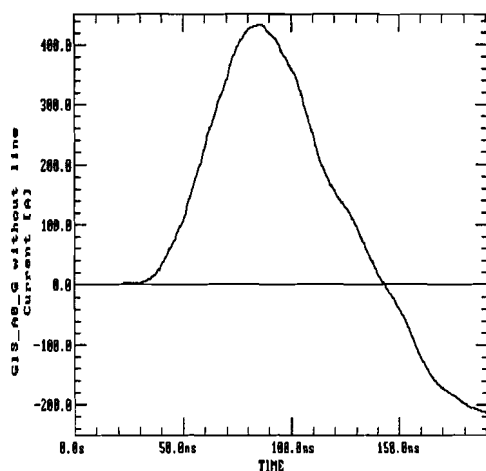


Figuur B2.7: Stroom bij D3, zonder folie F, RG214/U- en VMVKAS-kabel.

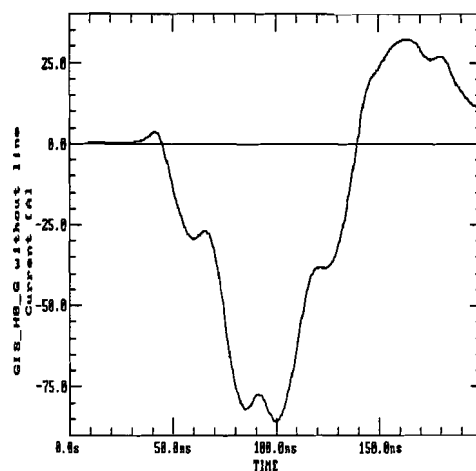


Figuur B2.8: Stroom bij E3, zonder folie F, RG214/U- en VMVKAS-kabel.

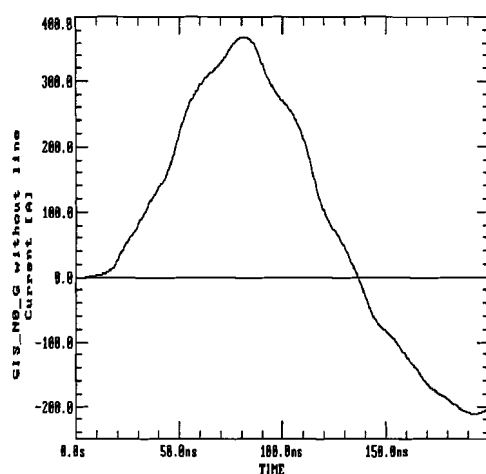
De stromen van twee tegenover elkaar liggende punten op de laadsectie- en meetsectie-buis zijn gegeven in de figuren B2.9 t/m B2.14. Er is geen vrije-lijn aanwezig.



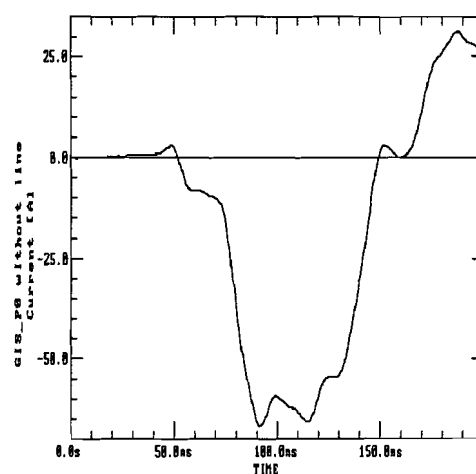
Figuur B2.9: Gemiddelde stroom A0.



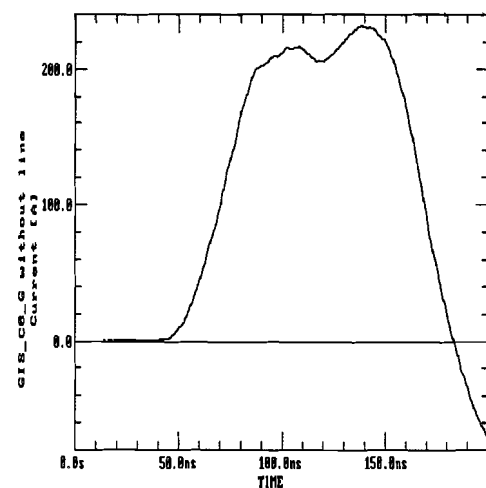
Figuur B2.10: Gemiddelde stroom H0.



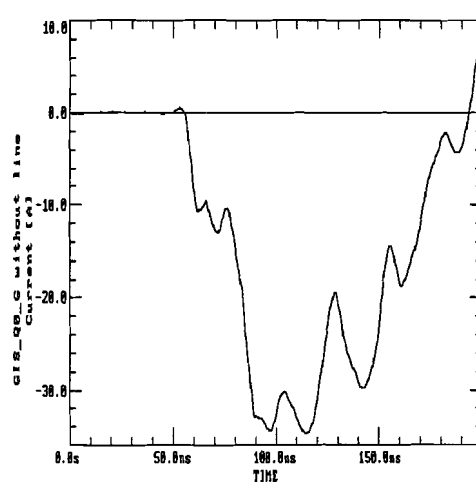
Figuur B2.11: Gemiddelde stroom N0.



Figuur B2.12: Gemiddelde stroom P0.



Figuur B2.13: Gemiddelde stroom C0.

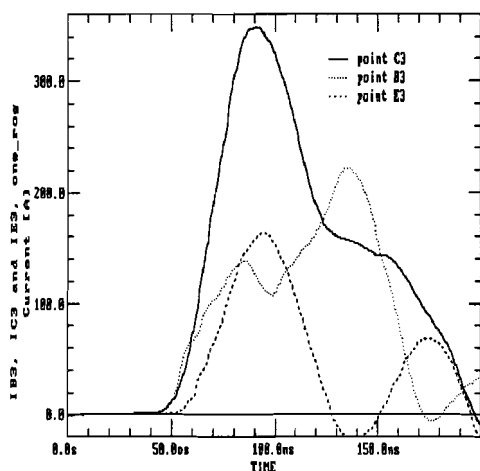


Figuur B2.14: Gemiddelde stroom Q0.

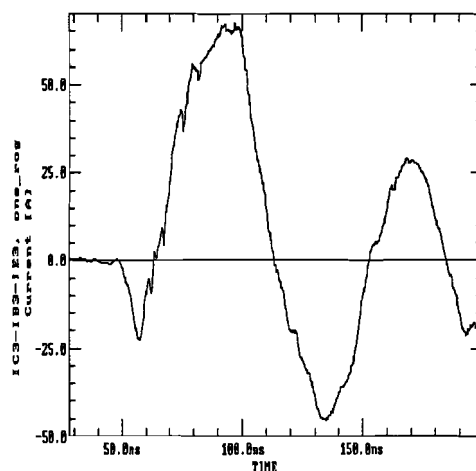
Bijlage 3

Stroommetingen m.b.v. de PTT-spoel

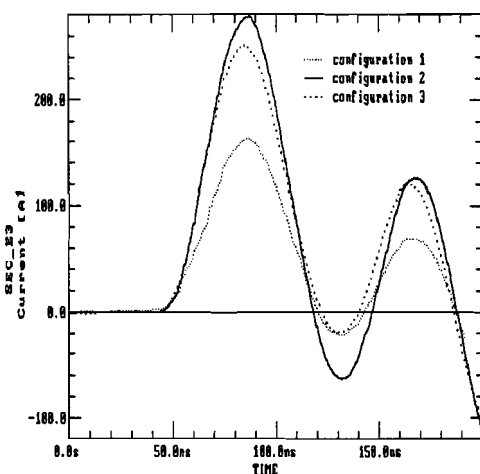
De stromen in deze bijlage zijn gemeten met de PTT meerwinding Rogowskispoel en de één-winding Rogowskispoel, zie hoofdstuk paragraaf 3.2. De gebruikte sensor wordt aangegeven met “ptt” voor de PTT-spoel en “one_rog” voor de één-winding Rogowskispoel. Bij geen nadere aanduiding is de RG214/U-kabel gebruikt als secundaire kabel.



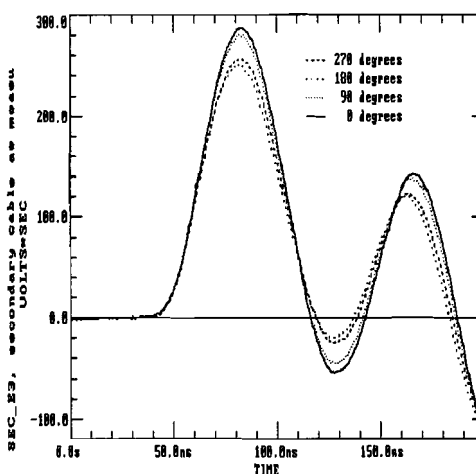
Figuur B3.1: Stromen B3, C3 en E3, gemeten met de één-winding Rogowskispoel.



Figuur B3.2: IC3-IB3-IE3, gemeten met de één-winding Rogowskispoel.

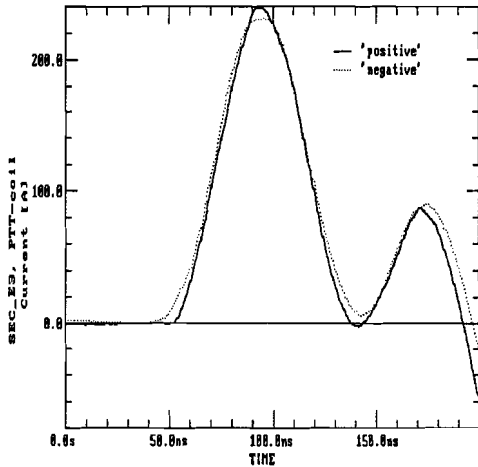


Figuur B3.3: Stroom bij E3 gemeten m.b.v. de één-winding Rogowskispoel, voor de configuraties zie figuur 3.2.

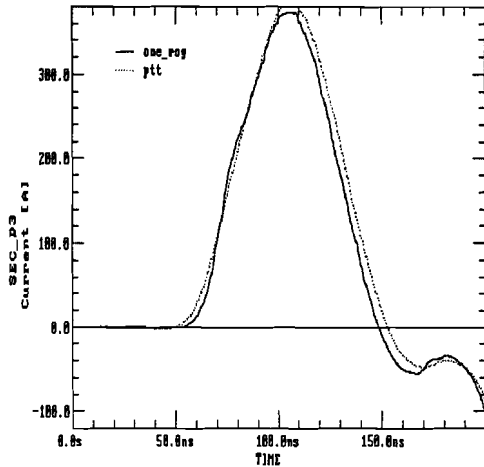


Figuur B3.4: Stroom bij E3 gemeten met de één-winding Rogowskispoel, configuratie 3, zie figuur 3.4.

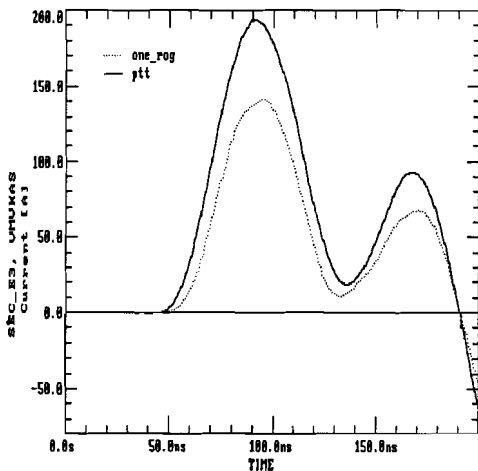
In de figuren B3.6 t/m B3.20 geldt dat als de stroom over de kabel gemeten is met de één-winding Rogowskispoel configuratie 1 (zie paragraaf 3.2 en figuur 3.2) gebruikt is. Is deze stroom gemeten m.b.v. de PTT-spoel dan is het middelingsproces zoals beschreven is in de hoofdtekst uitgevoerd.



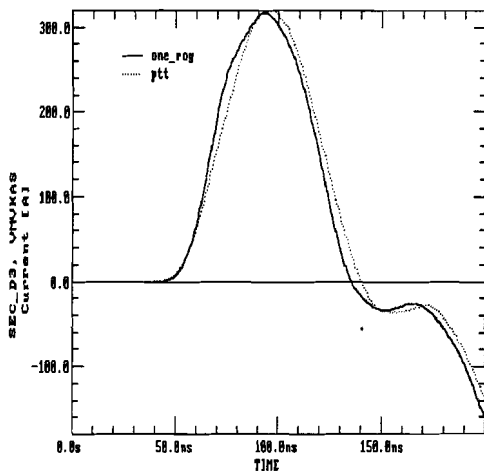
Figuur B3.5: Stroom E3 gemeten met de PTT-spoel met positieve en negatieve uitgangsspanning.



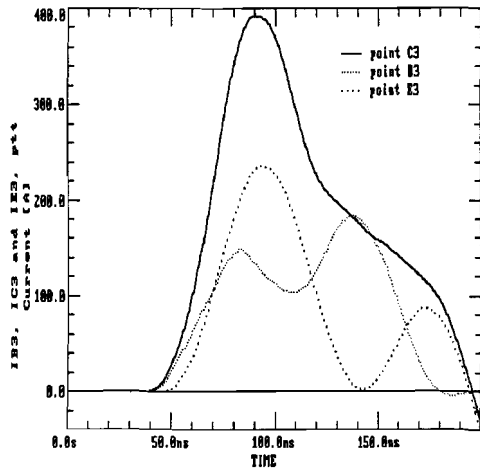
Figuur B3.6: Stroom D3 gemeten met de één-winding en de PTT-Rogowskispoel.



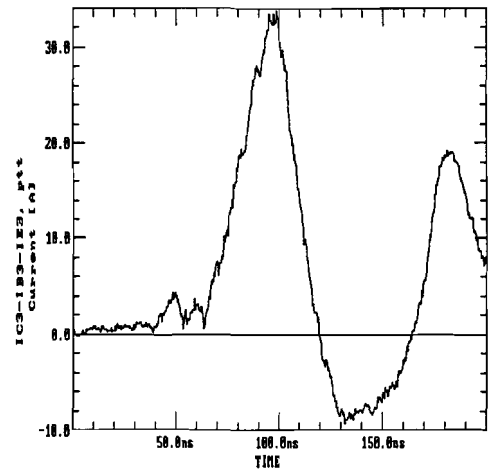
Figuur B3.7: Stroom E3 met VMVKAS-kabel.



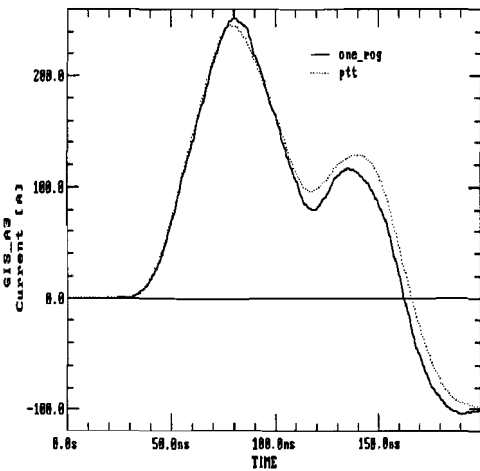
Figuur B3.8: Stroom D3 met VMVKAS-kabel.



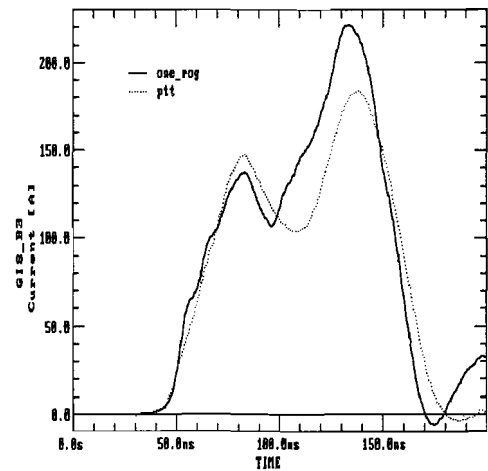
Figuur B3.9: *Stromen B3, C3 en E3 gemeten met de PTT-spoel.*



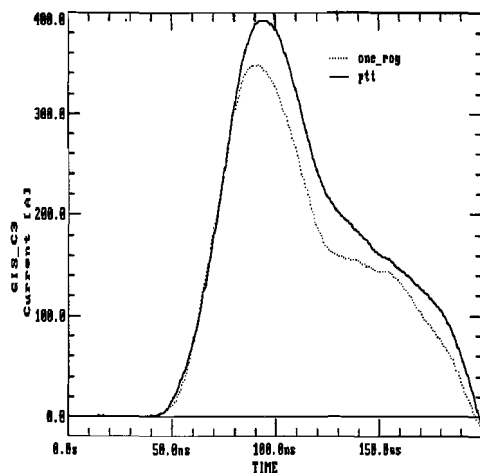
Figuur B3.10: *IC3-IB3-IE3, gemeten met de PTT-spoel.*



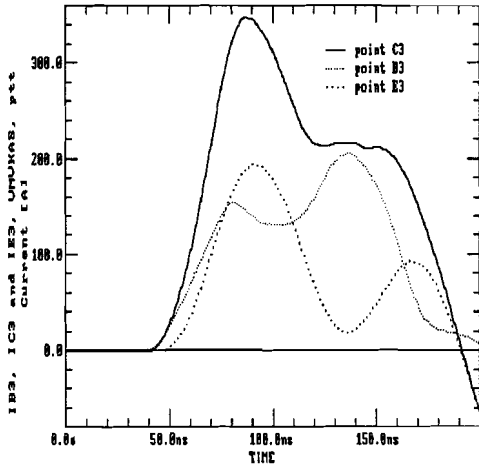
Figuur B3.11: *Gemiddelde stroom bij meetpunt A3.*



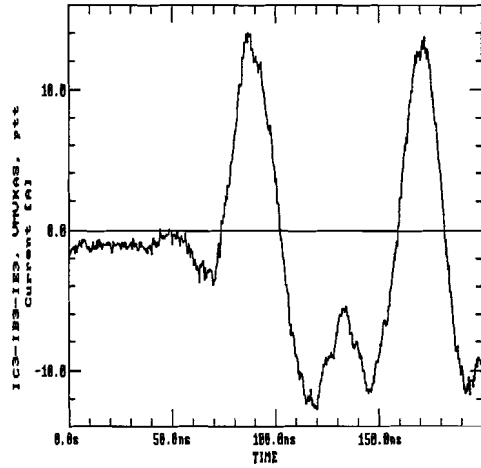
Figuur B3.12: *Gemiddelde stroom bij meetpunt B3*



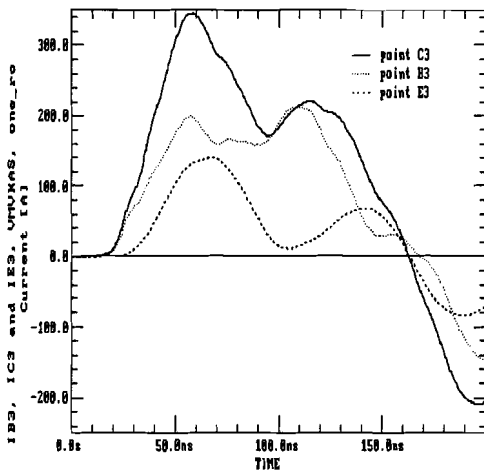
Figuur B3.13: *Gemiddelde stroom bij meetpunt C3.*



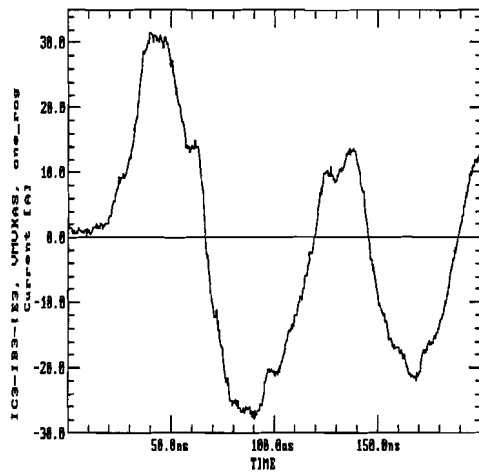
Figuur B3.14: *Stromen B3, C3 en E3 met VMVKAS-kabel, gemeten met de PTT-spoel.*



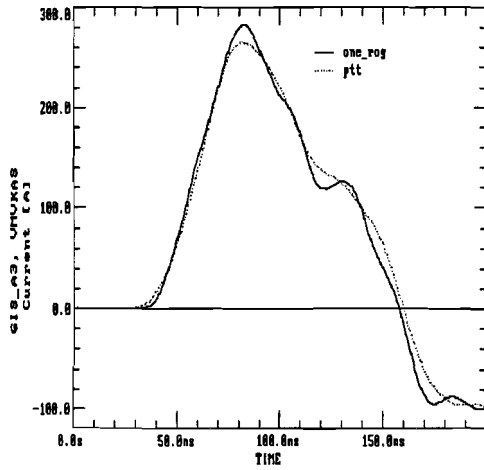
Figuur B3.15: *IC3-IB3-IE3 met VMVKAS-kabel, gemeten met de PTT-spoel.*



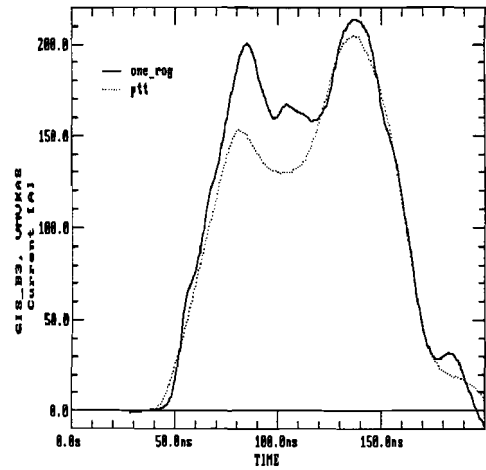
Figuur B3.16: *Stromen B3, C3 en E3 met VMVKAS-kabel, gemeten met de één-winding Rogowskispoel.*



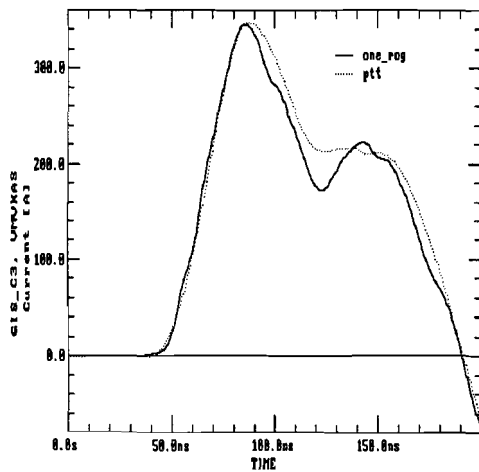
Figuur B3.17: *IC3-IB3-IE3 met VMVKAS-kabel, gemeten met de één-winding Rogowskispoel.*



Figuur B3.18: Gemiddelde stroom bij meetpunt A3 met VMVKAS-kabel.



Figuur B3.19: Gemiddelde stroom bij meetpunt B3 met VMVKAS-kabel.

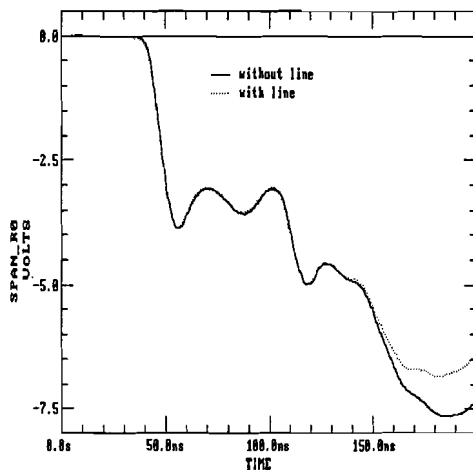


Figuur B3.20: Gemiddelde stroom bij meetpunt C3 met VMVKAS-kabel.

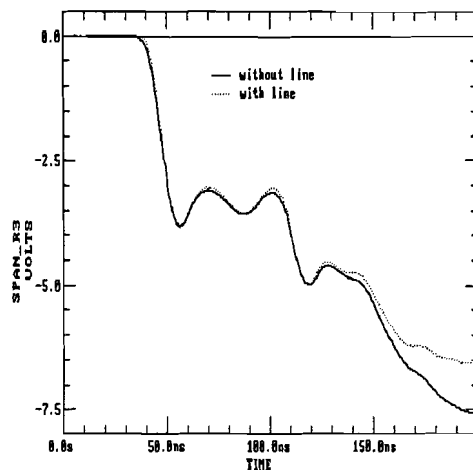
Bijlage 4

Spanningsmetingen

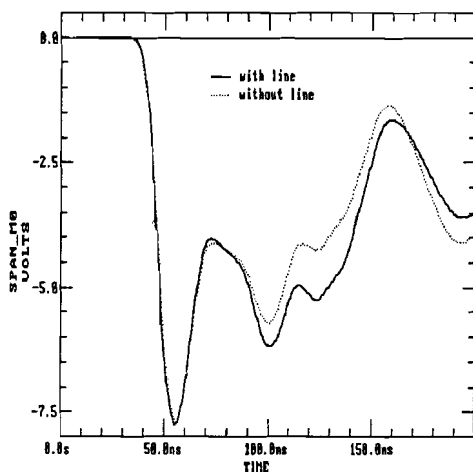
De spanningsmetingen gedaan m.b.v. de capacitieve sensor zijn uitgevoerd met en zonder secundaire kabel (RG214/U en niet VMVKAS). De meetresultaten zijn de gemeten spanningen met de correctie voor de integrator ($\tau' = 67$ ns) in de EMC-kast toegepast. De omrekeningsfactor gegeven in formule (3.2) is hierbij niet gebruikt. Verder worden de DM-spanningen gegeven voor het geval dat de RG214/U- en de VMVKAS-kabel op de grond ligt.



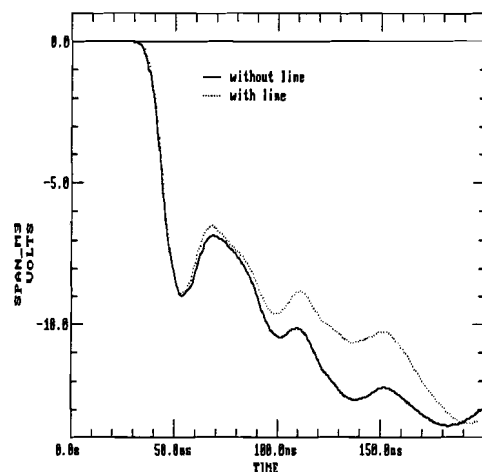
Figuur B4.1: *Spanning op R0.*



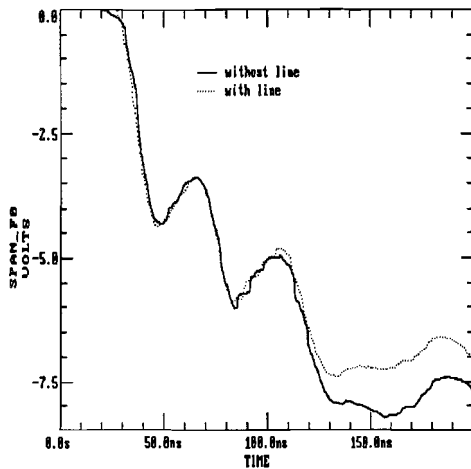
Figuur B4.2: *Spanning op R3.*



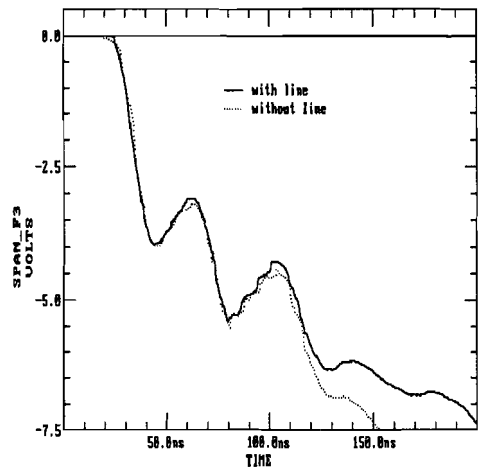
Figuur B4.3: *Spanning op M0.*



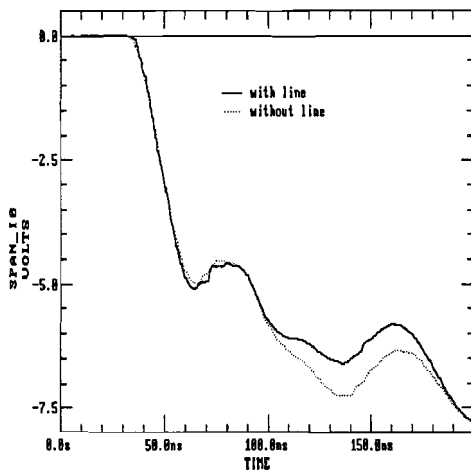
Figuur B4.4: *Spanning op M3.*



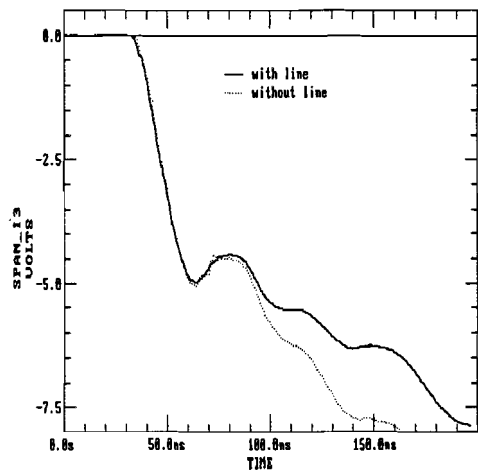
Figuur B4.5: *Spanning op FO.*



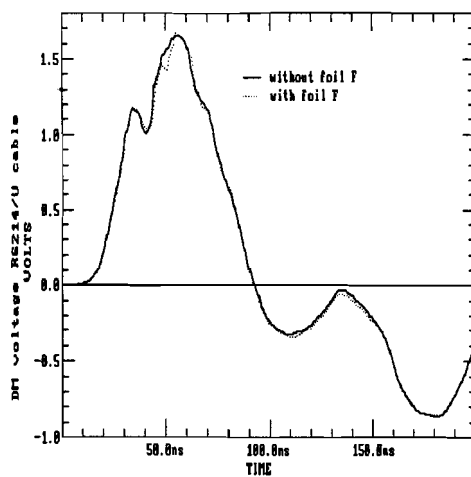
Figuur B4.6: *Spanning op F3.*



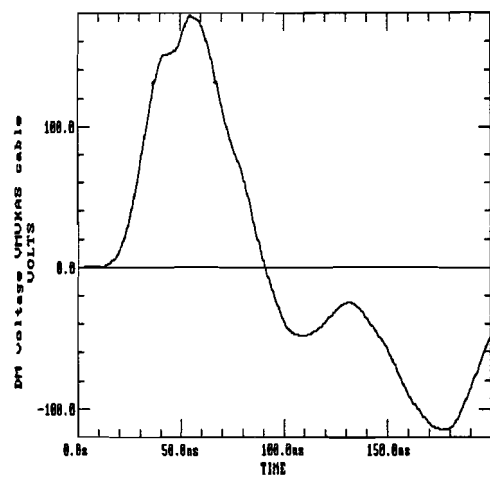
Figuur B4.7: *Spanning op IO.*



Figuur B4.8: *Spanning op I3.*



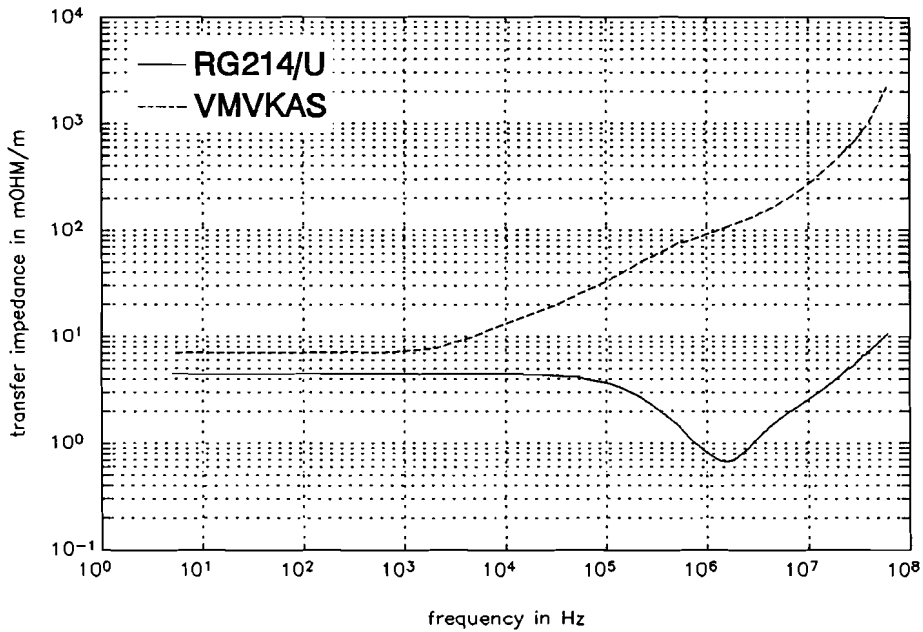
Figuur B4.9: *DM-spanning op het uiteinde van de op de grond liggende RG214/U-kabel met en zonder folie F.*



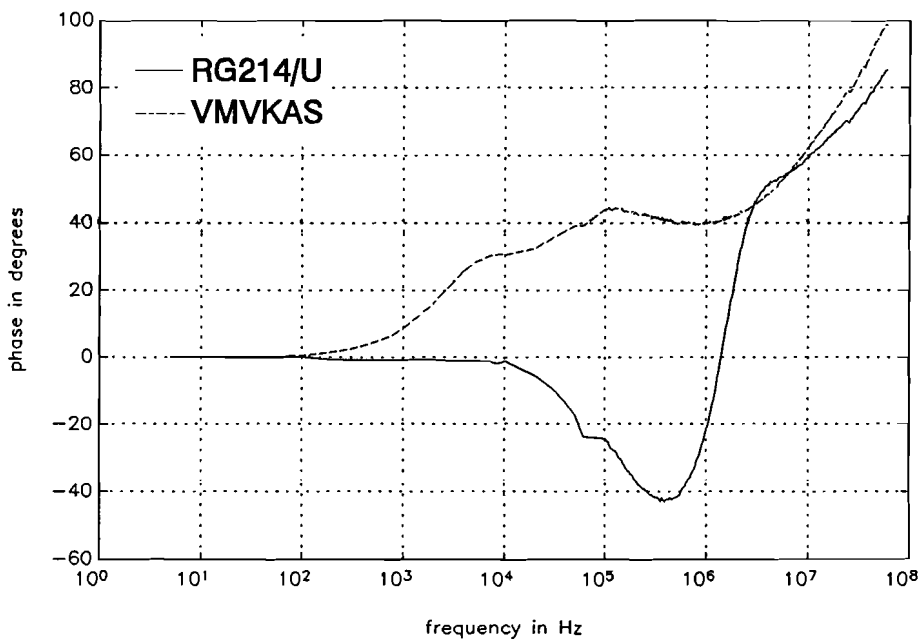
Figuur B4.10: *DM-spanning op het uiteinde van de op de grond liggende VMVKAS-kabel.*

Bijlage 5

Transferimpedantie van de RG214/U- en VMVKAS-kabel



Figuur B5.1: De modulus van de transferimpedantie van de RG214/U- en VMVKAS-kabel.

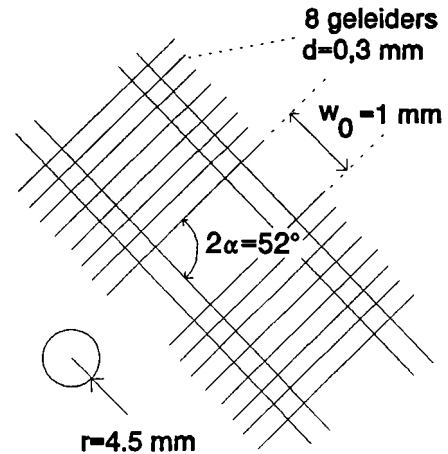


Figuur B5.2: Fase van de transferimpedantie van de RG214/U- en VMVKAS-kabel.

Bijlage 6

Schatting van de transferadmittantie voor de VMVKAS-kabel

In figuur B6.1 is de afscherming van de VMVKAS-kabel gegeven met de afmetingen. De diameter d van de geleiders bedraagt 0,3 mm. De 8 geleiders liggen vrijwel tegen elkaar aan en de ruimte tussen de volgende 8 geleiders wordt w_0 genoemd. De geleiders worden bij elkaar gehouden door paarsgewijs een tweetal geleiders die een hoek van 52° maken met de andere geleiders. Voor het berekenen van de koppelpaciteit C_{12} tussen de GIS-buis en de kabelmantel wordt de mantel opgevat als een band met breedte 2,4 mm (= 8 geleiders \times 0,3 mm/geleider) die helisch gewikkeld is. De hoek van de spoed bedraagt 26° en de ruimte tussen de band bedraagt $w_0=1$ mm. Volgens Vance [6] (formule 5.51, blz. 147) is de koppelpaciteit per lengte eenheid bij benadering gelijk aan



Figuur B6.1: Scherm van de VMVKAS-kabel.

$$C_{12} = \frac{C_1 C_2 w_0^2}{64 \pi \epsilon r^2 \cos(\alpha)} \approx 2,6 \cdot 10^6 C_1 C_2 \quad (\text{B6.1})$$

hierin is $C_1=233$ pF/m de capaciteit per lengte eenheid tussen de afscherming en de aders (zie tabel 4.1, blz. 19). C_2 is de capaciteit per lengte eenheid van de afscherming naar het aardvlak. Deze capaciteit van de kabelmantel is gelijk aan (zie Vance tabel 3.2)

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\cosh^{-1}\left[\frac{D_2}{r_2}\right]} \quad (\text{B6.2})$$

als de afscherming met aardvlak als transmissielijn wordt beschouwd (de invloed van de GIS-buis wordt niet meegenomen). In deze formule is D_2 de afstand van de kabel tot het aardvlak (zie ook figuur 4.6). Voor de kabel op de grond is $D_2=6,5$ mm zodat $C_2=61$ pF/m. De koppelpaciteit is dan $C_{12}=37$ fF/m. Voor de kabel midden tussen de GIS-buis en het aardvlak is $D_2=0,306$ m en bedraagt C_2 dan 11,3 pF/m. De koppelpaciteit is nu gelijk aan 7 fF/m.

De transferadmitantie volgt uit

$$Y' = j\omega C_{12}. \quad (\text{B6.3})$$

Als de spanningsverdeling van het aardvlak naar de kabelmantel bekend is kan de ingekoppelde capacatieve stroom m.b.v. de transferadmitantie berekend worden.

Bijlage 7

Berekening van de DM-spanning uit de gemeten stromen

Gegeven is het frequentiespectrum $I(z, \omega)$ van de stroomgolf $i(z, t)$ door

$$I(z, \omega) = \mathcal{F}\{i(z, t)\} = F(\omega) e^{-j\omega \frac{z}{c}} + G(\omega) e^{j\omega \frac{z-\ell}{c}}. \quad (\text{B7.1})$$

Hierin zijn $F(\omega)$ en $G(\omega)$ de spectra van de tijdcontinue signalen $f(t)$ en $g(t)$. De stroom op positie $z = \ell$ wordt volgens Vance [6], formule (5.57b) beschreven door

$$I_m(\ell) = (1 - \rho_2) \frac{P(\ell) - \rho_1 Q(0)}{e^{\gamma \ell} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma \ell}}, \quad (\text{B7.2})$$

met

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \quad \rho_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}, \\ \gamma &= j\beta = j\omega \sqrt{L'C'}, \\ P(\ell) &= \frac{1}{2Z_0} \int_0^\ell e^{j\beta \nu} E_z(\nu) d\nu, \\ Q(0) &= \frac{1}{2Z_0} \int_0^\ell e^{-j\beta \nu} E_z(\nu) d\nu. \end{aligned} \quad (\text{B7.3})$$

Hierin is $E_z(\nu)$ de spanning die ontstaat over een element dz als gevolg van de ingekoppelde stroom via de transferimpedantie op positie $z = \nu$

$$E_z(\nu) = I(\nu, \omega) Z_t'(\omega) = (F(\omega) e^{-j\omega \frac{\nu}{c}} + G(\omega) e^{j\omega \frac{\nu-\ell}{c}}) Z_t'(\omega). \quad (\text{B7.4})$$

Substitutie van (B7.4) in (B7.3) levert na uitwerken op

$$P(\ell) = \frac{Z_t'(\omega)}{2Z_0} \left[F(\omega) e^{-j\frac{\pi}{2}} \frac{e^{j\ell(\beta - \frac{\omega}{c})} - 1}{\beta - \frac{\omega}{c}} + G(\omega) e^{-j(\frac{\omega \ell}{c} + \frac{\pi}{2})} \frac{e^{j\ell(\beta + \frac{\omega}{c})} - 1}{\beta + \frac{\omega}{c}} \right] \quad (\text{B7.5})$$

en

$$Q(0) = \frac{Z_t'(\omega)}{2Z_0} \left[F(\omega) e^{j\frac{\pi}{2}} \frac{e^{-j\ell(\beta + \frac{\omega}{c})} - 1}{\beta + \frac{\omega}{c}} + G(\omega) e^{-j(\frac{\omega \ell}{c} - \frac{\pi}{2})} \frac{e^{-j\ell(\beta - \frac{\omega}{c})} - 1}{\beta - \frac{\omega}{c}} \right] \quad (\text{B7.6})$$

Voor $\omega=0$ geldt

$$P(\ell) = \frac{Z_t'(0)\ell}{2Z_0} [F(0) + G(0)] = Q(0). \quad (\text{B7.7})$$

De spanning op de positie $z=\ell$ als gevolg van de stroom over de mantel volgt dan uit de formule

$$V_m(\ell) = Z_2 I_m(\ell). \quad (\text{B7.8})$$

Bijlage 8

Een kanttekening m.b.t. de DFT en het amplitude spectrum

Gegeven het signaal $f(t)$ dat nul is buiten het interval $t \in (0, T)$. Sample $f(t)$ over een tijd van $T_s := T/N$ en definieer

$$t_i := i \frac{T}{N}, \quad i = 0, \dots, N-1 \quad (\text{B8.1})$$

noteer verder

$$f(t=t_i) = f[i]. \quad (\text{B8.2})$$

Voor de Fourier-transform $F(\omega)$ geldt dan m.b.v. de trapezium regel¹:

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_0^T f(t) e^{-j\omega t} dt = \\ &= \frac{T}{N} \left[\frac{1}{2} (f[0] + f[N] e^{-j\omega T}) + f[1] e^{-j\omega t_1} + \dots + f[N-1] e^{-j\omega t_{N-1}} \right]. \end{aligned}$$

Met behulp van de definitie

$$\omega_k := \frac{2\pi}{T} k \quad (\text{B8.4})$$

en onder de aanname $f[0]=f[N]$ geldt dan

$$\begin{aligned} F[k] := F(\omega_k) &= \frac{T}{N} \left[\frac{1}{2} (f[0] + f[N]) + f[1] e^{-j\omega_k t_1} + \dots + f[N-1] e^{-j\omega_k t_{N-1}} \right] = \\ &= \frac{T}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{-j \frac{2\pi k}{T} n \frac{T}{N}} = \\ &= \frac{T}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} = \\ &= \frac{T}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n] W_N^{-kn} = \frac{T}{N} \text{DFT}(f). \end{aligned} \quad (\text{B8.5})$$

¹De vergelijking $p \doteq q$ geeft aan dat p in goede benadering gelijk is aan q .

Hierin is DFT de diskrete Fourier-transformatie zoals is gedefinieerd in [9], dus

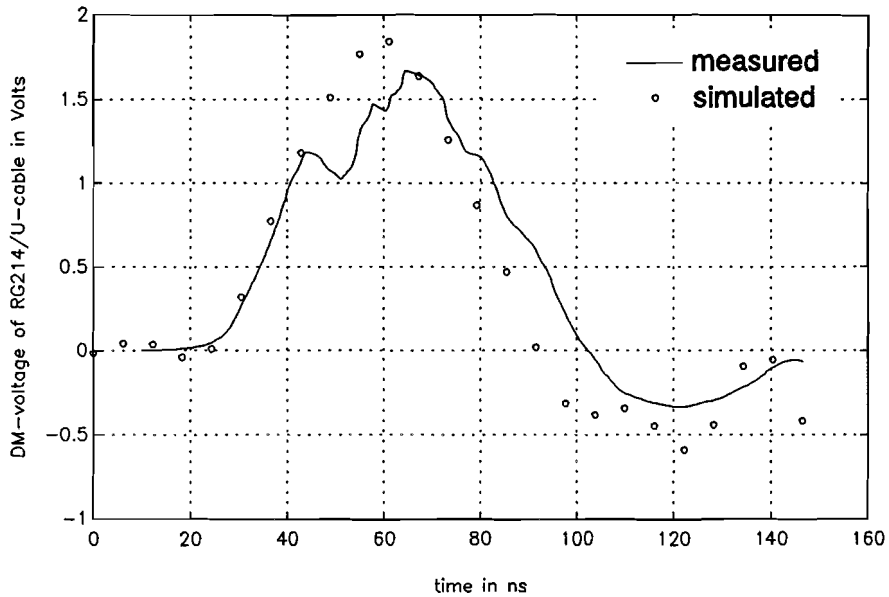
$$DFT(f) = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] W_N^{-kn}. \quad (\text{B8.6})$$

Om het amplitude spectrum te krijgen moet de DFT met de sample tijd $T_s = T/N$ worden vermenigvuldigd.

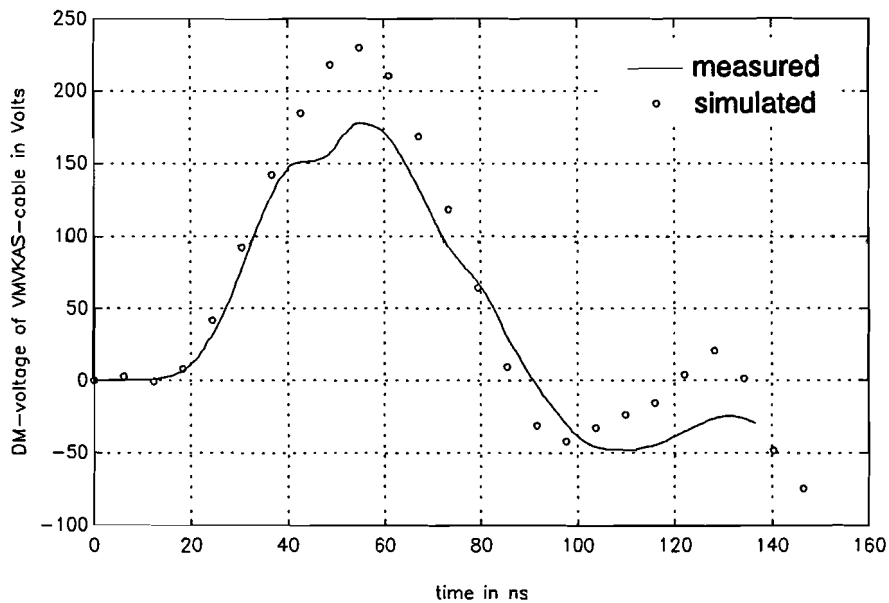
Bijlage 9

Gemeten en gesimuleerde DM-spanning

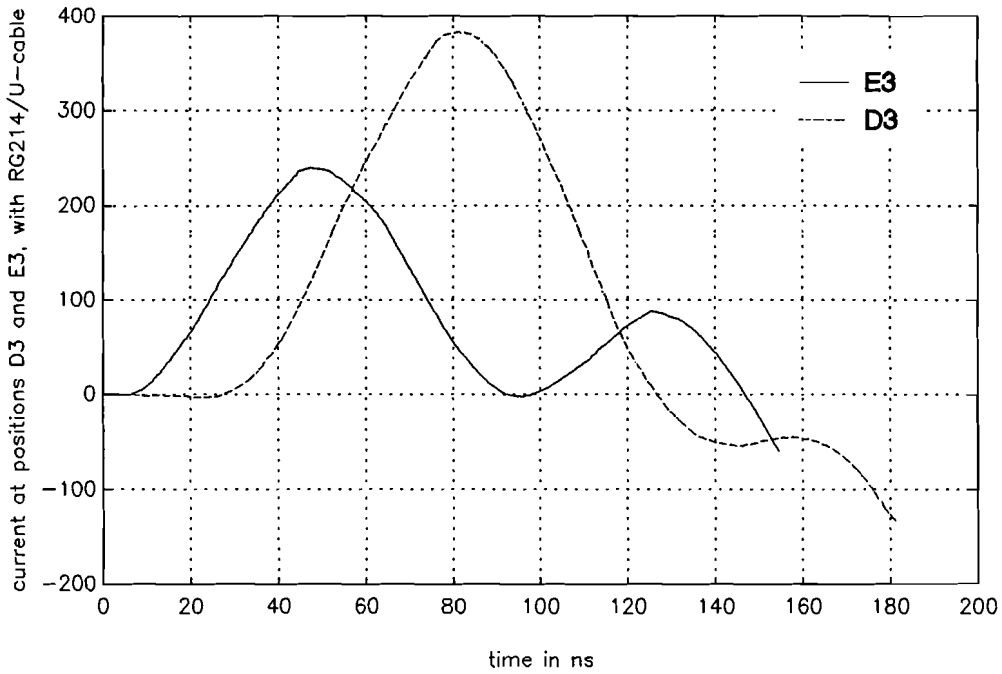
De RG214/U- en VMVKAS-kabel liggen op de grond.



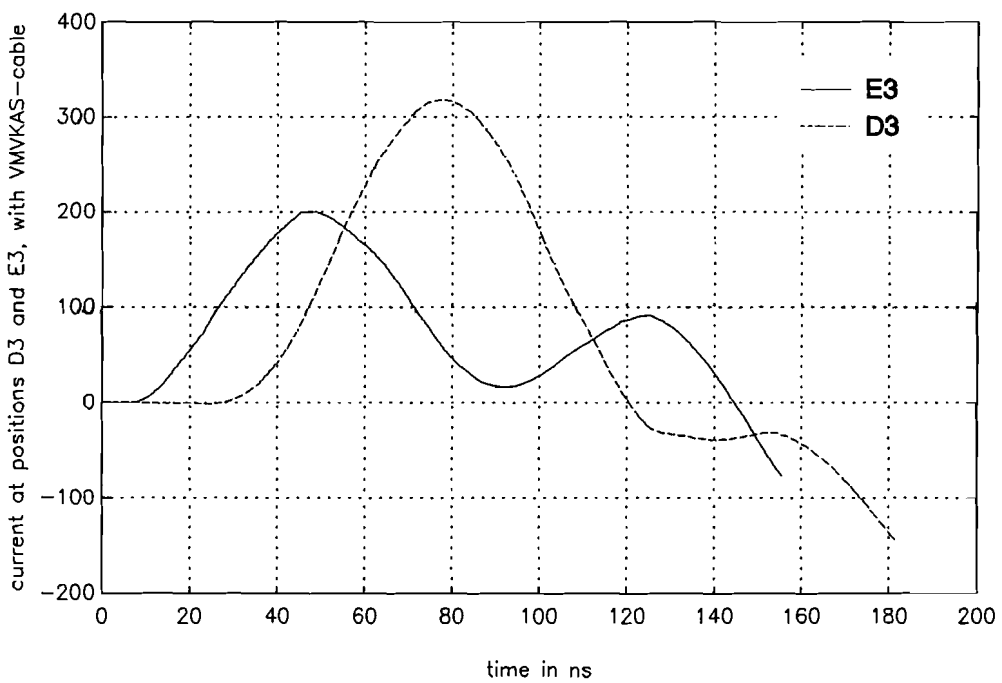
Figuur B9.1: Gemeten en gesimuleerde DM-spanning van de RG214/U-kabel.



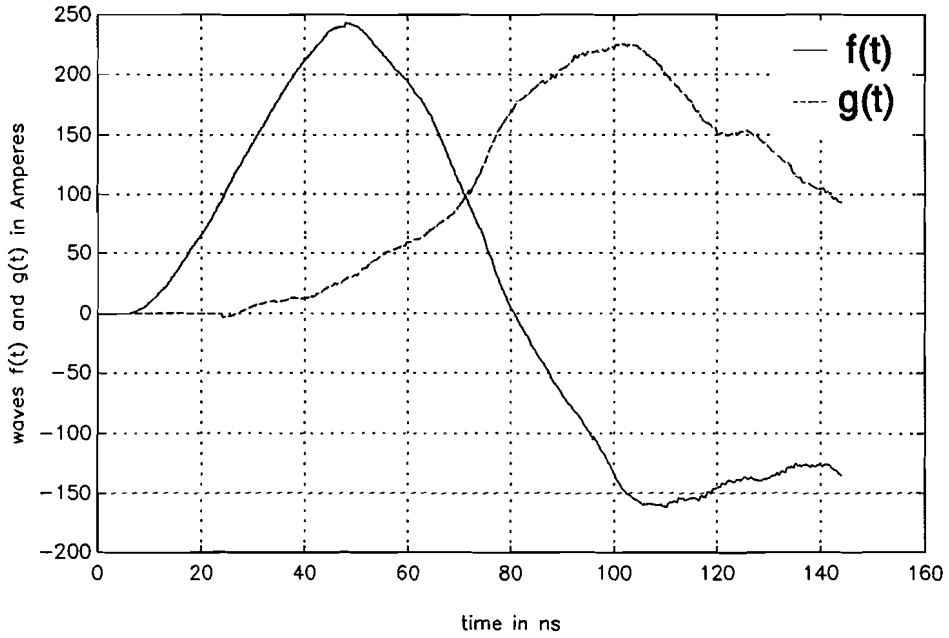
Figuur B9.2: Gemeten en gesimuleerde DM-spanning van de VMVKAS-kabel.



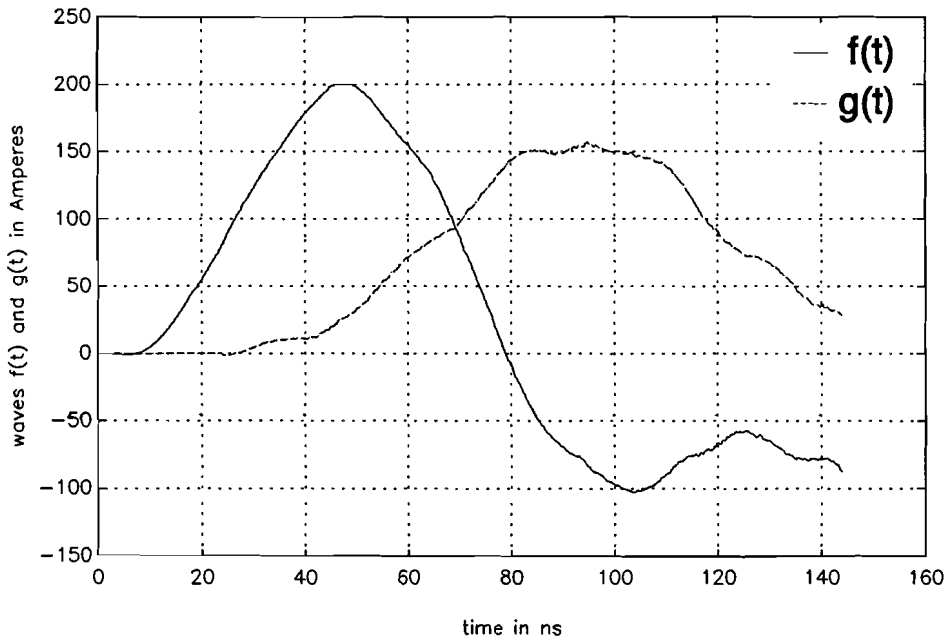
Figuur B9.3: De gebruikte en gemeten common-mode stromen door de RG214/U-kabelmantel.



Figuur B9.4: De gebruikte en gemeten common-mode stromen door de VMVKAS-kabelmantel.



Figuur B9.5: De golven $f(t)$ en $g(t)$ voor de RG214/U-kabel.

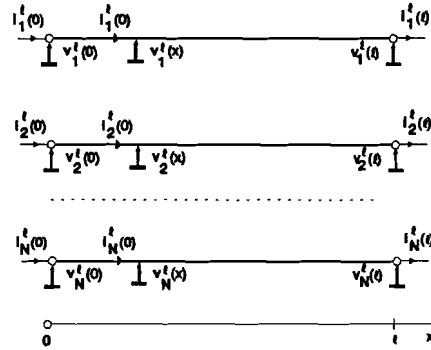


Figuur B9.6: De golven $f(t)$ en $g(t)$ voor de VMVKAS-kabel.

Bijlage 10

Het gekoppelde transmissielijnenmodel

Gegeven zijn gekoppelde transmissielijnen (GTL-en) bestaande uit $N+1$ geleiders waarvan er een de functie van referentiegeleider heeft (zie figuur B10.1). Introduceer een lokale x -as langs de lengte van de GTL met $x=0$ corresponderend met het begin van de lijnen en $x=\ell$ corresponderend met het eind van de lijnen.



Figuur B10.1: Schema van een gekoppelde transmissielijn.

Zij gegeven L de induktiematrix per lengte eenheid, R de resistentiematrix per lengte eenheid, C de capacitievematrix per lengte eenheid en G de geleidingsmatrix per lengte eenheid. De gekoppelde transmissielijnen kunnen in het frequentiedomein dan beschreven worden met de bekende telegraaf vergelijkingen

$$\frac{dV^l(x)}{dx} = -Z' I^l(x) \tag{B10.1}$$

$$\frac{dI^l(x)}{dx} = -Y' V^l(x)$$

met vector $V^l(x)$ de complexe lijnspanningen en $I^l(x)$ de complexe lijnstromen. De impedantie Z' en admitantie Y' zijn gedefinieerd door

$$Z' = R + j\omega L \tag{B10.2}$$

$$Y' = G + j\omega C$$

met ω de cirkelfrequentie. Deze matrices zijn symmetrisch omdat de lijnen reciproom zijn. Oplossingen van vergelijking (B10.1) zijn

$$V^m(x) = V_0^m e^{\pm\gamma_m x} \tag{B10.3}$$

$$I^m(x) = I_0^m e^{\pm\gamma_m x}$$

met V_0^m en I_0^m constante complexe eigenvectoren. Het min teken correspondeert met een golf die loopt in de positieve x richting terwijl het plus teken correspondeert met de in de negatieve x richting lopende golf.

De complexe voortplantingsconstante γ_m is een oplossing van de vergelijking (kies $\text{Im}(\gamma_m) > 0$)

$$\det\{\gamma_m^2 \mathbf{I} - \mathbf{Z}'\mathbf{Y}'\} = \det\{\gamma_m^2 \mathbf{I} - \mathbf{Y}'\mathbf{Z}'\} = 0 \quad (\text{B10.4})$$

met \mathbf{I} de $N \times N$ eenheidsmatrix en $m=1, \dots, N$. Definieer de matrix \mathbf{S}_V van eigenvectoren van de matrix $\mathbf{Z}'\mathbf{Y}'$. Introduceer de complexe vectoren \mathbf{G}_{i0} en $\mathbf{G}_{r\ell}$ die de spanningen aan het begin resp. aan het einde van de lijn beschrijven. De oplossing van het probleem wordt dan gegeven door

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^\ell(x) &= \mathbf{S}_V \{ \mathbf{E}(x) \mathbf{G}_{i0} + \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{E}(\ell) \mathbf{G}_{r\ell} \} \\ \mathbf{I}^\ell(x) &= \mathbf{Y}_c \mathbf{S}_V \{ \mathbf{E}(x) \mathbf{G}_{i0} - \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{E}(\ell) \mathbf{G}_{r\ell} \} \end{aligned} \quad (\text{B10.5})$$

met

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x) &= \text{diag}(e^{-\gamma_1 x}, \dots, e^{-\gamma_N x}) \\ \mathbf{Z}_c &= \mathbf{S}_V \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{S}_V^{-1} \mathbf{Z}' = \mathbf{Y}_c^{-1} \\ \mathbf{\Gamma} &= \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_N\}. \end{aligned} \quad (\text{B10.6})$$

Hierin is \mathbf{Z}_c de karakteristieke impedantiematrix op basis van de eigenvectoren.

Beschouw vervolgens het transmissielijnenprobleem beschreven in hoofdstuk 4. Voor de netwerken (de index i slaat op het nummer van het netwerk, zie figuur 4.5) gelden

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & \mathbf{Q}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{U}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{P}_2 &= 1, & \mathbf{Q}_2 &= \mathbf{Z}_g, & \mathbf{U}_2 &= \mathbf{Z}_g \mathbf{I}_c(\omega) \\ \mathbf{P}_i &= 1, & \mathbf{Q}_i &= 0, & \mathbf{U}_i &= 0, & i=3,4,5,6. \end{aligned}$$

Definieer de matrix \mathbf{P} die in de linkerbovenhoek matrix \mathbf{P}_1 bevat en uitgebreid is op de diagonaal met de scalaren \mathbf{P}_2 t/m \mathbf{P}_6 , dus

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \times 3 \\ (\mathbf{P}_1) \end{bmatrix} & & & & & \\ & \mathbf{P}_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \mathbf{P}_6 & & \end{bmatrix}.$$

Op dezelfde wijze wordt matrix \mathbf{Q} gedefinieerd. Door het invoeren van vector $\mathbf{U} = (\mathbf{U}_1^T, \mathbf{U}_2^T, \dots, \mathbf{U}_6^T)^T$ krijgt men vervolgens de algemene netwerkrelatie (formule (4.6))

$$PV + QI = U, \quad (\text{B10.7})$$

met $V=(V_1, \dots, V_8)^T$ en $I=(I_1, \dots, I_8)^T$. Definieer de vector G door

$$G = (G_{i0}, G_{40}, G_{r\ell}, G_{4\ell}) = (G_{10}, G_{20}, G_{30}, G_{40}, G_{1\ell}, G_{2\ell}, G_{3\ell}, G_{4\ell}). \quad (\text{B10.8})$$

We voeren de matrices $A_1G=V$ en $A_2G=I$ in; A_1 en A_2 zijn verkorte schrijfwijzen voor de twee uitdrukkingen in vergelijking (B10.5). Vergelijking (B10.7) gaat dan over in

$$(PA_1 + QA_2)G = U. \quad (\text{B10.10})$$

De onbekende vector G is eenvoudig op te lossen uit deze vergelijking. Substitutie van de vectoren G_{i0} en $G_{r\ell}$ in vgl. (B10.5) levert de transmissielijnspanningen en -stromen op voor de GTL-en TL1 t/m TL3. Deze spanningen en stromen kunnen voor TL4 bepaald worden door de scalair G_{40} en $G_{4\ell}$ in vgl. (B10.5) te substitueren waarbij de spanningen en stromen nu scalair en geen vectoren zijn.

Het zij uitdrukkelijk vermeld dat de netwerkstromen I_1 t/m I_8 en de lijnstromen I_1^ℓ t/m I_4^ℓ op het einde van de transmissielijn, i.e. $x=\ell$, tegengesteld van teken zijn. Er geldt dus

$$I_1 = I_1^\ell(0), \quad I_2 = I_2^\ell(0), \quad I_3 = -I_4^\ell(\ell_4), \dots$$

Tot slot volgen hier de inductie- en resistievematrixes voor de hoogten $D_2=10,5$ mm en $D_2=0,306$ m van de secundaire kabel. Voor de GIS-buizen en de secundaire is aluminium en voor de vloer is zink als materiaal gebruikt. In werkelijkheid zijn de GIS-buizen van staal gemaakt.

$D_2 = 9,5$ mm:

$$R = \begin{bmatrix} 0,021 & 0,121 & 0,004 \\ 0,121 & 8,869 & 0,037 \\ 0,004 & 0,037 & 0,016 \end{bmatrix} \sqrt{\omega} \quad \left[\frac{\mu\Omega}{\text{m}} \right], \quad L = \begin{bmatrix} 0,432 & 0,005 & 0,098 \\ 0,005 & 0,277 & 0,002 \\ 0,098 & 0,002 & 0,432 \end{bmatrix} \left[\frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right]$$

$D_2 = 0,306$ m:

$$R = \begin{bmatrix} 0,017 & 0,013 & 0,004 \\ 0,013 & 4,790 & 0,005 \\ 0,004 & 0,005 & 0,011 \end{bmatrix} \sqrt{\omega} \quad \left[\frac{\mu\Omega}{\text{m}} \right], \quad L = \begin{bmatrix} 0,432 & 0,190 & 0,098 \\ 0,190 & 0,969 & 0,054 \\ 0,098 & 0,054 & 0,432 \end{bmatrix} \left[\frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right]$$

De capacitevematix C volgt dan uit (onder verwaarlozing van R)

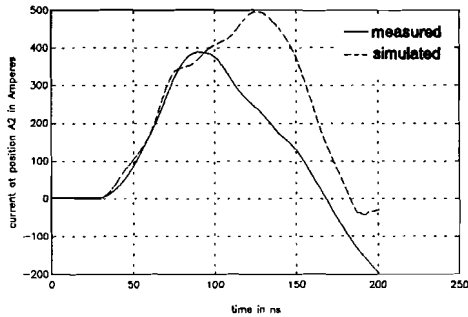
$$LC = CL = \frac{1}{c^2} \mathbf{I} \quad (\text{B10.10})$$

met c de snelheid van de golf in lucht, i.e. $c=3 \cdot 10^8$ m/s.

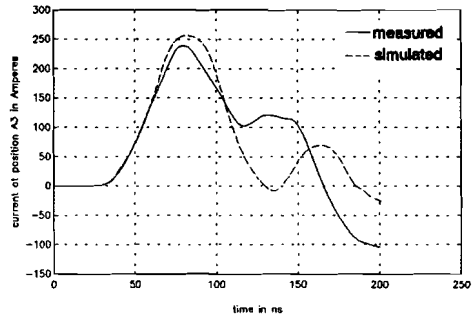
Bijlage 11

Meet- en simulatieresultaten van het gekoppelde transmissielijnenprobleem

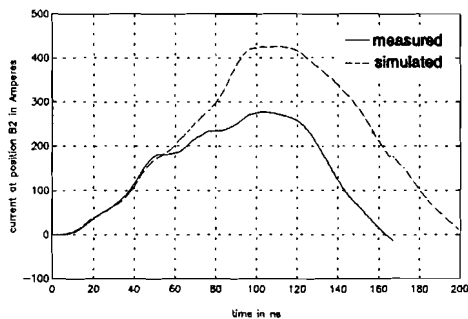
De stromen in deze bijlage zijn m.b.v. de PTT-Rogowskispoel gemeten. De simulaties zijn gedaan aan de hand van het model gegeven in de figuren 4.2 en 4.3.



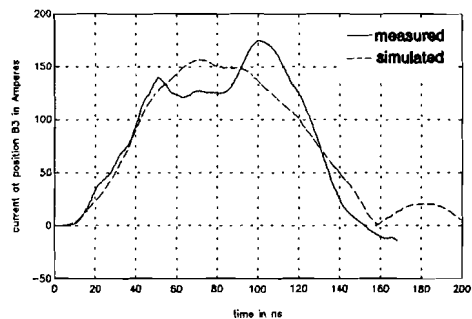
Figuur B11.1: Gemeten en gesimuleerde stroom bij A2.



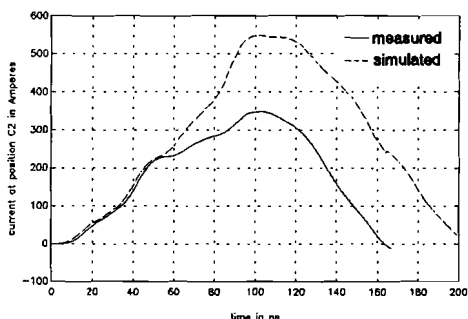
Figuur B11.2: Gemeten en gesimuleerde stroom bij A3.



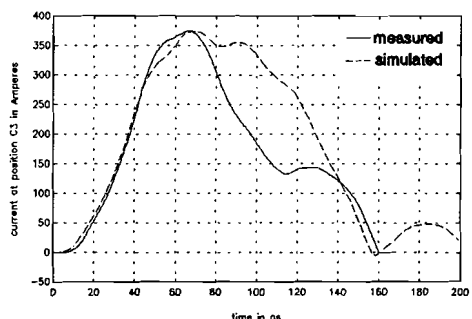
Figuur B11.3: Gemeten en gesimuleerde stroom bij B2.



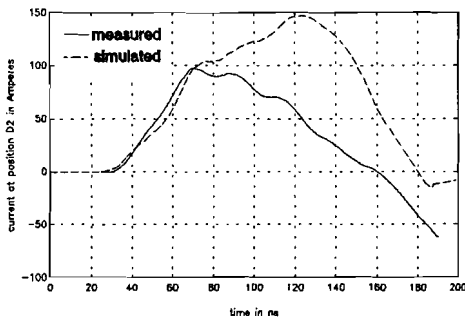
Figuur B11.4: Gemeten en gesimuleerde stroom bij B3.



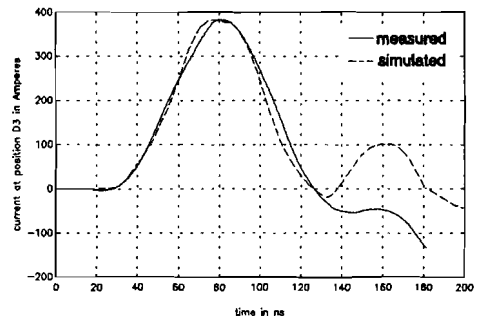
Figuur B11.5: Gemeten en gesimuleerde stroom bij C2.



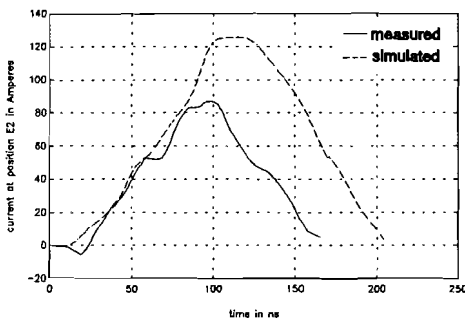
Figuur B3.6: Gemeten en gesimuleerde stroom bij C3.



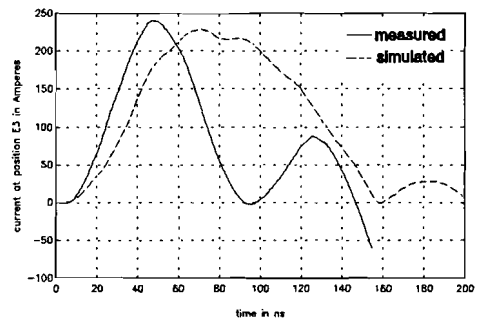
Figuur B11.7: Gemeten en gesimuleerde stroom bij D2.



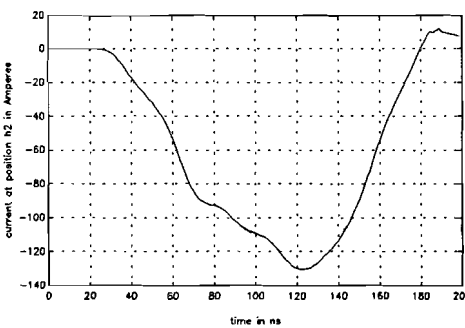
Figuur B11.8: Gemeten en gesimuleerde stroom bij D3.



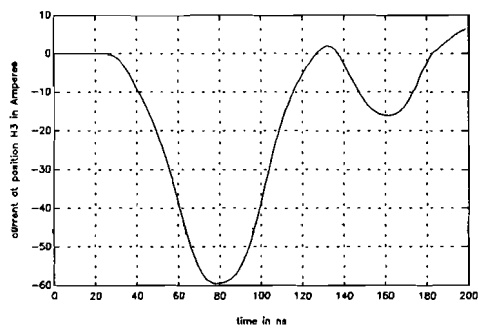
Figuur B11.9: Gemeten en gesimuleerde stroom bij E2.



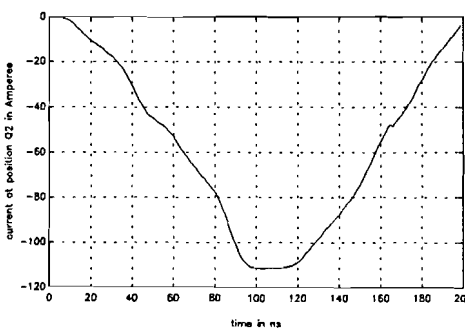
Figuur B11.11: Gemeten en gesimuleerde stroom bij E3.



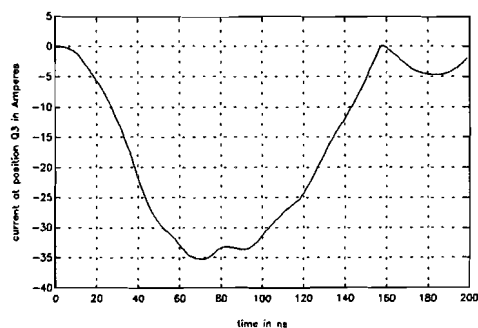
Figuur B11.11: Gesimuleerde stroom bij H2.



Figuur B11.12: Gesimuleerde stroom bij H3.



Figuur B11.13: Gesimuleerde stroom bij Q2.



Figuur B11.14: Gesimuleerde stroom bij Q3.

Bijlage 12

De coëfficiënten van de induktiematrix

Een dwarsdoorsnede van de GIS-buizen met secundaire kabel en hun afmetingen en onderlingen afstanden is gegeven in figuur B12.1. In Vandenboorn [2] paragraaf 4.6 zijn uitdrukkingen gegeven voor de zelfindukties L_1 en L_2 en de mutuele inductie M_{12} zonder dat de meetsectiebuis ($TL3$) in rekening is gebracht. Bij afwezigheid van $TL3$ geldt

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cosh^{-1} \left[\frac{D_1}{r_1} \right]. \quad (B12.1)$$

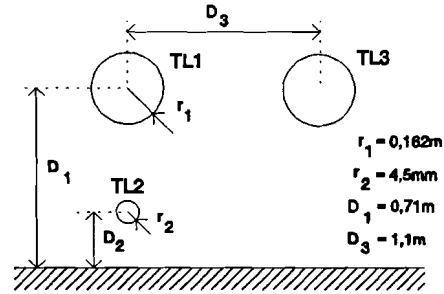
Numerieke gegevens invullen geeft een waarde van $L_1=432$ nH/m. Met behulp van het computerprogramma *Oersted* is deze waarde berekend indien de meetsectiebuis aanwezig is, de zelfinductie bedraagt dan 432 nH/m. De zelfinductie L_2 zal nauwelijks veranderen als $TL3$ toegevoegd wordt, in het geval de kabel ver genoeg van de GIS-buis ligt geldt voor L_2 in zeer goede benadering

$$L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cosh^{-1} \left[\frac{D_2}{r_2} \right]. \quad (B12.2)$$

De mutuele inductie M_{12} tussen de laadsectiebuis en de kabel dicht bij de grond wordt gegeven door

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{D_1^2 - r_1^2} + (D_2 - r_2)}{\sqrt{D_1^2 - r_1^2} - (D_2 - r_2)} \right]. \quad (B12.3)$$

De invloed van de meetsectiebuis op deze mutuele inductie is nogal groot als $D_2 \ll D_1$, d.w.z. voor de secundaire kabel nabij de vloer. Zo geldt voor $D_2=6,5$ mm (kabel over de vloer) m.b.v. formule (B12.3) $M_{12}=2,74$ nH/m terwijl *Oersted* een waarde van 1,16 nH/m vindt, een afwijking van 136 procent.



Figuur B12.1: Dwarsdoorsnede van de GIS-opstelling met afmetingen.