

Het lokaliseren van partiële ontladingen in turbogeneratoren tijdens bedrijf met behulp van meetlussen

Citation for published version (APA):

de Poorter, W. J. W., & Pemen, G. (1993). *Het lokaliseren van partiële ontladingen in turbogeneratoren tijdens bedrijf met behulp van meetlussen*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/05/1993

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

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
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**Vakgroep Hoogspanningstechniek en
Electromagnetic Compatibility (EHC)**

**Het lokaliseren van partiële ontladingen
in turbogeneratoren tijdens bedrijf
met behulp van meetlussen**

**door: W.J.W. de Poorter
EH.93.A.127**

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

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:

ing. A.J.M. Pemen

datum: mei 1993

Voorwoord

Mijn afstudeeropdracht aan de T.U. Eindhoven, vakgroep EHC, is onderdeel van het promotieonderzoek van ing. A.J.M. Pemen. Dit promotieonderzoek heeft als doel het ontwikkelen van een meetsysteem, waarmee tijdens bedrijf de partiële ontladingen in een generator kunnen worden geregistreerd en gelokaliseerd.

Tijdens mijn afstuderen heb ik met verschillende onderwerpen te maken gekregen. Ik heb voornamelijk gewerkt aan een bepaald type sensor. Daarmee zijn metingen uitgevoerd aan eenheid 6 van de Hemweg-centrale, Amsterdam en aan eenheid 8 van de Amer-centrale, Geertruidenberg.

Bij de uitvoering van deze leerzame afstudeeropdracht heb ik met verschillende personen fijn samengewerkt. Met name mijn coach, ing. A.J.M. Pemen, wil ik bedanken voor zijn begeleiding. Tevens wil ik bedanken ir. P. van der Wurf van de Hogeschool Eindhoven voor zijn belangstelling en mijn medeafstudeerder J. Bogerd van de H.T.S.-Breda voor de prettige samenwerking.

Samenvatting

Mijn afstudeeropdracht, gedaan bij de vakgroep Hoogspanningstechniek en Electromagnetic Compatibility (EHC) faculteit Electrotechniek, Technische Universiteit Eindhoven (T.U.E.), bestond uit een drietal hoofdtaken:

1. Ontwikkelen van nieuwe meetlussen aan de hand van prototypen van reeds bestaande meetlussen
2. Metingen uitvoeren met deze prototypen aan de Hemweg-6 (Hemwegcentrale) en met de nieuwe meetlussen aan de Amer-8 (Amercentrale)
3. Meten aan de nieuwe meetlussen in het hoogspanningslaboratorium van vakgroep EHC

Verder heb ik een splitter ontwikkeld waarmee een hoogfrequente puls aan vier of vijf verschillende transmissielijnen tegelijk aangeboden kan worden.

In het statorisolatiemateriaal van een generator treden partiële ontladingen (engels: partial discharge, afgekort door pd) op. Dit zijn gedeeltelijke doorslagen die ontstaan in holten van het isolatiemateriaal t.g.v. grote E-velden. Door deze pd's ontstaan zogenaamde ontladingskanalen die steeds langer worden naarmate zich meer pd's voordoen. Bij een 50 Hz-spanning treden er enkele tientallen pd's op per halve periode. Door deze pd's zal de kwaliteit van het isolatiemateriaal in de stator afnemen en kan er zelfs een volledige doorslag optreden. De generator zal buiten bedrijf raken. De schade aan de generator is aanzienlijk, maar de schade die ontstaat omdat de generator niet meer aan het net kan leveren is nog veel groter. Er wordt gezocht naar een 'monitoring' systeem waarmee continu de toestand van het isolatiemateriaal bekeken kan worden.

Voor de detectie van pd's in generatoren zijn gedurende het promotieonderzoek van ing. A.J.M. Pemen een drietal sensoren ontwikkeld, te weten:

1. de meetlus,
2. de eenwindings Rogowskispoel,
3. en de capacatieve sensor.

Tijdens mijn afstuderen heb ik me voornamelijk beziggehouden met de verdere ontwikkeling van eerstgenoemde sensor. Bij aanvang van mijn afstuderen waren er reeds prototypen voor handen. De meetlus is een sensor die eenvoudig geplaatst kan worden tussen de kokers van het railkokersysteem van een generator. De meetlus is een éénwindingsspoel waarmee het H-veld van een railsstroom gemeten kan worden. De meetlus is afgeschermd van E-velden door een strip die om de spoel is gemonteerd. De elektrische en de mechanische constructie van de prototypen moesten verbeterd worden. Deze verbeteringen zijn doorgevoerd in de meetlussen voor Amer-8.

In het laboratorium zijn verschillende metingen uitgevoerd aan deze nieuwe versie. Daarbij worden de stroomhuishouding en bandbreedte van de meetlus bepaald.

Door het verschil in constructie van het railkokersysteem van beide generatoren waaraan gemeten is, blijkt dat bij de Hemweg-6 60 % van het totale veld van een railstroom nog buiten de kokers aanwezig is. Bij de Amer-8 is dat 5 %. Uit de metingen blijkt dan ook dat alleen in het geval van de Hemweg-6 goede resultaten gehaald kunnen worden met meetlussen. De richting en oorsprong van een golf die veroorzaakt is door een pd kan bepaald worden. De exacte lokatie van de pd in de generator kan echter niet aangetoond worden. Verder heeft de meetlus de slechte E.M.C.-technische eigenschap, dat hij gevoelig is voor alle hoogfrequente stoorsignalen uit de omgeving.

INHOUDSOPGAVE

	pagina
1	INLEIDING 1
2	PARTIËLE ONTLADINGEN 3
2.1	Inleiding 3
2.2	Metingen aan testobjecten 3
3	PD'S IN TURBOGENERATOREN 6
3.1	Inleiding 6
3.2	Partiële ontladingen in het statorisolatiemateriaal 6
3.3	Registratie van pd's 7
4	SENSOREN VOOR HET REGISTREREN VAN PD'S 8
4.1	De eenwindings-Rogowski spoel 8
4.1.1	Splitter 9
4.1.2	Metingen aan de splitters 11
4.2	De capacitieve sensor 13
4.3	De meetlus 14
4.3.1	Inleiding 14
4.3.2	Berekeningen aan de meetlussen 16
4.3.3	Metingen aan de meetlussen 18
5	METINGEN MET MEETLUSSEN IN CENTRALES 27
5.1	Metingen aan Hemweg-6 27
5.2	Metingen aan Amer-8 30
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 33
	Geraadpleegde literatuur 34
BIJLAGE 1:	AFLEIDING ZELFINDUCTIE LUS 35
BIJLAGE 2:	AFLEIDING WEDERZIJDSE INDUCTIE TUSSEN MEETLUS EN MEETCIR- CUIT 37
	Lijst van gebruikte symbolen 38

1 INLEIDING

Bij de vakgroep EHC (Hoogspanningstechniek en Electromagnetic Compatibility) van de faculteit Elektrotechniek wordt onderzoek gedaan naar o.a.:

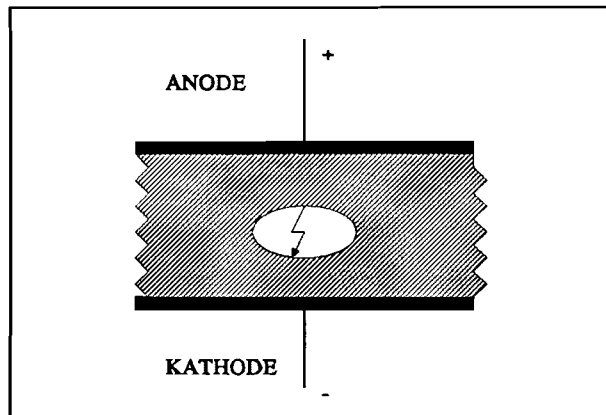
1. Verschijnselen voorafgaand aan doorslag.
2. Meettechnieken.
3. Toepassingen van corona.
4. Ongewenste ontladingen binnen en buiten microgolfbuizen in satellieten.
5. Electromagnetic Compatibility.

Het onderdeel "Verschijnselen voorafgaand aan doorslag" is opgesplitst in een aantal specifieke onderzoeken waarbij de situaties waarin doorslagen kunnen optreden verschillen:

1. Lawines in isolerende gassen.
2. Partiële ontladingen in kabels.
3. Partiële ontladingen in turbogeneratoren.

Het laatste is een promotieonderzoek van ing. A.J.M. Pemen en is een samenwerkingsproject tussen de vakgroep EHC (TUE), KEMA en de elektriciteitsproducenten (EPZ/EZH/UNA/EPON).

Partiële ontladingen zijn gedeeltelijke doorslagen die kunnen ontstaan in holten in een isolatiemateriaal. Wanneer over het isolatiemateriaal een spanning wordt aangelegd, ontstaan er in deze holten, ten gevolge van zeer hoge veldsterkten ter plaatse, partiële ontladingen. Hierdoor neemt de isolerende werking van een isolatiemateriaal af (veroudering) en aanhoudende partiële ontladingen kunnen zelfs leiden tot een volledige doorslag van anode naar kathode.



figuur 1.1: Partiële ontlading

Het verschijnsel partiële ontlading (engels: partial discharge, afgekort door pd) zal in hoofdstuk 2 nader toegelicht worden.

Bij een in bedrijf zijnde turbogenerator is een volledige doorslag natuurlijk catastrofaal. Zo'n totale doorslag zal een generator zodanig zwaar beschadigen, dat deze niet meer aan het net kan leveren, waardoor een vervolgschade zal ontstaan die doorgaans de reparatiekosten ver overtreft. Over pd's in turbogeneratoren en de gevolgen daarvan meer in hoofdstuk 3.

Er is een behoefte ontstaan aan een systeem waarmee tijdens bedrijf de toestand van het isolatiemateriaal van de stator bepaald kan worden. Door het registreren en lokaliseren ("monitoring") van optredende pd's is er continu informatie beschikbaar over de kwaliteit van de isolatie. Het is dan mogelijk om vroegtijdig in te grijpen wanneer de kans op doorslag te groot dreigt te worden. Gedurende het onderzoek zijn er drie hoogfrequente meetsensoren ontwikkeld waarmee pd's tijdens bedrijf kunnen worden gemeten:

1. Rogowski spoelen
2. Capacitieve sensoren
3. Meetlussen

In hoofdstuk 4 worden de meetsystemen ter registratie van pd's behandeld.

Mijn afstudeeropdracht was voornamelijk gericht op het registreren van pd's met behulp van meetlussen. Voor het onderzoek zijn metingen met meetlussen gedaan aan draaiende generatoren in elektriciteitscentrales (Hemwegcentrale, Amsterdam en Amercentrale, Geertruidenberg). Gedurende het onderzoek is onder andere duidelijk geworden dat de prototypes van de meetlussen, waarover ik bij aanvang van mijn afstudeeropdracht kon beschikken, verbeterd moesten worden. Door mij is zowel de constructie als de E-werking verbeterd. Deze nieuwe meetlussen zijn gebruikt voor metingen aan de Amer-8 (Amercentrale). In hoofdstuk 4 worden de resultaten van metingen en berekeningen aan de meetlussen besproken. De meetresultaten van metingen met de meetlussen aan generatoren zijn in hoofdstuk 5 te vinden. De conclusies van de metingen en aanbevelingen zijn in hoofdstuk 6 gegeven.

2 PARTIËLE ONTLADINGEN

2.1 Inleiding

Partiële ontladingen (engels: partial discharge, afgekort door pd) zijn elektrische ontladingen in een isolatiesysteem, beperkt tot een gedeelte van het diëlektrikum. Het isolatiemateriaal kan zowel een vloeistof, vaste stof of gas zijn, of een combinatie daarvan. Er zijn verschillende soorten pd's:

- interne ontladingen in oneffenheden of holten in een vaste stof of vloeistof.
- oppervlakteontladingen die ontstaan aan grenslagen van verschillende isolatiematerialen.
- coronaontladingen bij sterke inhomogene velden.

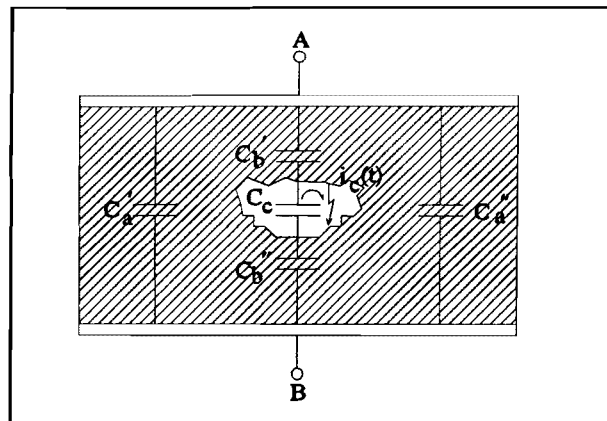
Alleen de pd's in holten van een vaste stof zullen verder besproken worden. Het gevolg van ontladingen in een 'vast' diëlektrikum is het ontstaan van ontladingskanalen. Door pd's zal de levensduur van een isolatiemateriaal afnemen. De detectie van een pd is gebaseerd op de energieoverdracht die ontstaat gedurende een ontlading. De detecteerbare verschijnselen zijn:

- elektrische impulsstroompjes
- diëlektrische verliezen
- elektro-magnetische uitstraling (licht)
- geluid (ruis)
- toenemende gasdruk
- chemische reacties

De meest toegepaste methode van detectie is de elektrische.

2.2 Metingen aan testobjecten

Een partiële ontlading in een gesloten systeem kan aan de klemmen gemeten worden. In figuur 2.1 is een pd in een holte van een diëlektrikum symbolisch weergegeven. Dit schema geldt voor een vloeibaar of vast diëlektrikum. De holte is de oorsprong van een pd. Als de aangelegde spanning V_{AB} toeneemt, zal de veldsterkte in de holte, t.g.v. van het verschil in permeabiliteit en de vorm, sterk toenemen en zal er een pd optreden.



figuur 2.1: partiële ontlading in een holte

Bij een toenemende wisselspanning zal de eerste pd optreden gedurende de stijgende flank van een halve periode, waarbij de capaciteit van de holte C_c grotendeels ontladen wordt. De ontlaadstroom $i_c(t)$, die overigens niet direkt gemeten kan worden, heeft een vorm die nagenoeg gelijk is aan de Dirac-functie, dit is een puls met een tijdsduur van enkele nanoseconden. Door de ladingsverschuiving in de holte zal het oorspronkelijke E-veld nagenoeg worden opgeheven. Als de spanning blijft toenemen of afnemen (bij een negatieve flank van de wisselspanning) wordt het veld in de holte opnieuw opgebouwd en zal het geheel zich herhalen. Meestal treden per periode van de 50 Hz spanning tientallen ontladingen op.

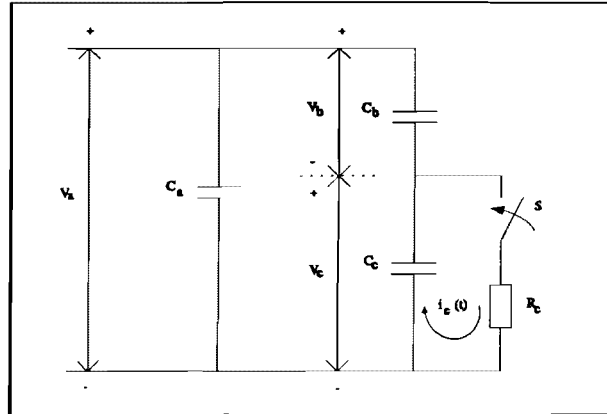
Veldlijnen die beginnen of eindigen bij de wand van de holte vormen twee capaciteiten nl. C_b' en C_b'' . Alle veldlijnen buiten de holte worden weergegeven door C_a ($C_a = C_a' + C_a''$). Door de dimensies en omdat er voor C_b geldt:

$$C_b = \frac{C_b' * C_b''}{C_b' + C_b''}$$

mag er voor de capaciteitsgrootheden het volgende gesteld worden:

$$C_a \gg C_c \gg C_b$$

Het equivalent elektrisch schema is gegeven in figuur 2.2.



figuur 2.2: Elektrisch vervangingschema pd

Schakelaar S wordt gecontroleerd door de spanning over de holte V_c . S is zeer kortstondig gesloten, waardoor de stroom $i_c(t)$ kan lopen. Weerstand R_c begrenst de grootte van $i_c(t)$.

Stel het systeem wordt geladen tot spanning V_a aan de klemmen staat. De aansluitingen op A en B worden losgekoppeld van de bron. Als schakelaar S wordt gesloten, zal er een ontladestroom $i_c(t)$ gaan lopen. Deze ladingverplaatsing (lading die overigens in het systeem verloren gaat) veroorzaakt een spanningsverandering over C_c : $\delta q_c = C_c \delta V_c$.

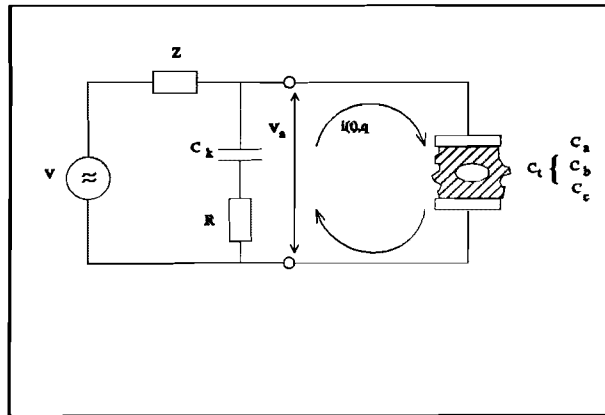
Wanneer de ladingen binnen het systeem voor en na de ontlading bekeken worden, geldt er voor de spanningsval over de aansluitingen A en B:

$$\delta V_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \delta V_c$$

Deze spanningsval bevat geen informatie over de lading δq_c , maar is evenredig met $C_b \delta V_c$. De waarde voor C_b is in de praktijk onbekend. δV_a is een grootheid die eventueel gemeten zou kunnen worden. Het is een negatieve spanningsstap met een stijgtijd die afhankelijk is van de tijd dat $i_c(t)$ in stand blijft. De grootte van de stap is vrij klein omdat, hoewel δV_c in de orde grootte is van 10^2 tot 10^3 V, de verhouding C_b/C_a zeer klein is ($< 10^{-3}$).

Omdat de aangelegde spanning V_a veel groter is dan δV_c , is de verhouding $\delta V_a/\delta V_c$ dusdanig klein dat het meten van ontladingen aan de klemmen zeer moeilijk wordt.

Detectiesystemen maken daarom gebruik van een koppelcondensator zoals in figuur 2.3.



figuur 2.3: Testobject met testcircuit

Het testmateriaal wordt aangesloten op een spanningsbron V . De impedantie Z ontkoppelt de bron van het testobject. C_k is een koppelcapaciteit. C_k levert de lading voor de stroom $i(t)$ tussen C_k en C_t . Deze stroom zal de spanningsval δV_a over $C_t \approx C_a + C_b$ opheffen.

Als $C_k \gg C_t$ dan zal δV_a volledig gecompenseerd worden en wordt de ladingverplaatsing weergegeven door:

$$q = \int i(t) dt = (C_a + C_b) \delta V_a$$

Als we de vergelijking:

$$\delta V_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \delta V_c$$

invullen krijgen we:

$$q = C_b \delta V_c$$

q is de 'schijnbare lading' van een pd. Via een shuntweerstand R (zie figuur 2.3) kan de stroom $i(t)$ (evenredig met q) gemeten worden. De schijnbare lading q is echter niet gelijk aan de hoeveelheid lading die lokaal aanwezig was op de plaats van de ontlading, maar het is een meer realistische waarde voor de pd dan δV_a uit voorgaande vergelijking, omdat C_a geen invloed heeft op het testobject.

De omstandigheden waaronder metingen naar pd's in generatoren gedaan worden zijn anders dan de hierboven gegeven situatie. Het is niet mogelijk om direct over het isolatiemateriaal te meten. Voor de detectie van pd's in generatoren moet een andere meetmethode gezocht worden.

3 PD'S IN TURBOGENERATOREN

3.1 Inleiding

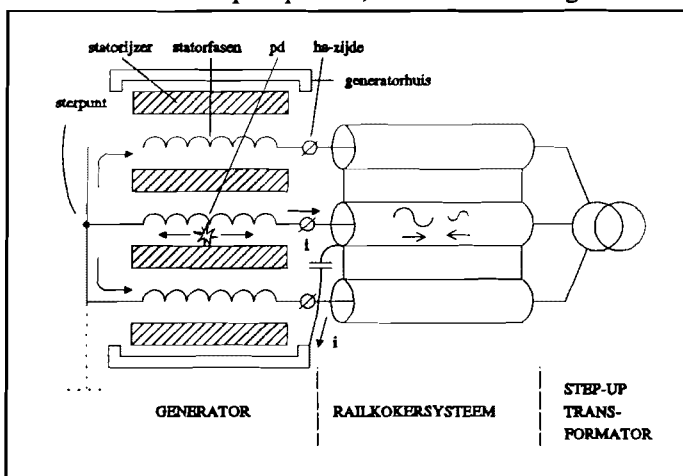
Al meer dan 30 jaar doet de KEMA metingen aan stilstaande generatoren om de kwaliteit van het isolatiemateriaal te onderzoeken. Dit gebeurt tijdens onderhoud, als de generator stilstaat, dus eens in de 5 tot 7 jaar.

De laatste tien jaar wordt er bij verschillende instituten onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om pd's te meten aan draaiende generatoren. Zo is er continu informatie beschikbaar over de toestand van het isolatiemateriaal. De huidige metingen zijn gericht op de toestand van het isolatiemateriaal in de stator, omdat er alleen aan de aansluitklemmen van een generator gemeten kan worden.

In de toekomst zullen er mogelijk metingen gedaan worden naar de toestand van het isolatiemateriaal in de rotor.

3.2 Partiele ontladingen in het statorisolatiemateriaal

Wanneer er in een van de statorfasen een pd optreedt, zal er een e.m.-golf ontstaan in de statorwikkeling (zie figuur 3.1).



figuur 3.1: pd in stator

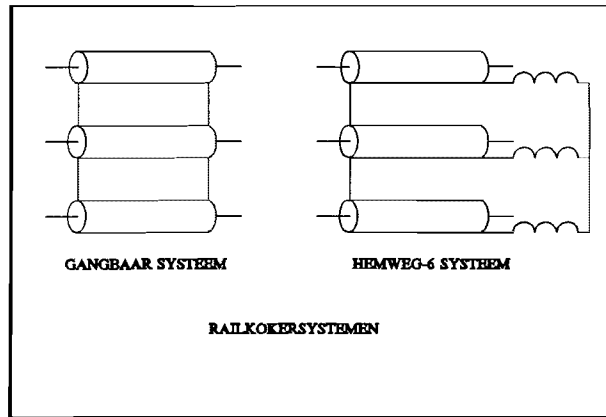
Een statorstaaf vormt samen met het statorijzer een transmissielijnstructuur waarover deze pulsvormige e.m.-golf zich kan voortplanten in de richting van de wikkelkopen. Door de capacatieve koppeling tussen de fasen zal er overspraak naar andere fasen ontstaan. De drie fasen zijn aan beide uiteinden zo verstrengeld dat ook daar een capacatieve/inductieve koppeling ontstaat. Tevens wordt aan beide uiteinden van het statorijzer de transmissielijnstructuur met de statorwikkeling verstoord, waardoor er reflecties ontstaan.

Samengevat;

De e.m.-golf die door de pd wordt veroorzaakt zal:

- deels geïnduceerd worden in beide andere fasen door:
 - * de verdeelde capacatieve koppeling tussen de statorwikkelingen (overspraak) en
 - * de capacatieve/inductieve koppeling tussen de statorfasen aan beide uiteinden van de generator en
- deels gereflecteerd worden door verstoring van de transmissielijnstructuur aan beide uiteinden van de statorwikkeling.

Het gevolg is dat de oorspronkelijke e.m.-golf (pulsvormig), sterk vervormd en gedempt (door de sprong in karakteristieke impedantie) als een 'extern stroompje' de hoogspanningsklemmen van de generator bereikt. Tussen de generator en de step-up-transformator bevindt zich het railkokersysteem (zie figuren 3.1 en 3.2).



figuur 3.2: railkokersystemen

De drie netstromen lopen door rails. Om deze rails bevinden zich kokers. De drie kokers liggen naast elkaar. In tabel 3.1 zijn de afmetingen van het railkokersysteem van de Hemweg-6 en de Amer-8 gegeven.

	Hemweg-6	Amer-8
Diameter koker	72 cm	150 cm
Hartafstand tussen kokers	1.05 m	1.8 m
Afstand tussen kokerwanden	± 28 cm	± 25 cm
Afstand tussen generator en step-up transformator gemeten over de middelste koker	± 34 m	± 17 m

tabel 3.1: Afmetingen railkokersystemen van Hemweg-6 en Amer-8

Deze coaxiale verbinding heeft een goede transmissielijnstructuur waardoor het extern signaal (t.g.v. de pd in de generator) de stepup-transformator kan bereiken. Bij de stepup-transformator wordt een deel van het signaal gereflecteerd in de richting van de generator, met als gevolg een verdere verstoring van het externe signaal. Het 'externe circuit' sluit zich via de grote capacatieve koppeling tussen de generator en de mantel van het railkokersysteem (zie figuur 3.1).

3.3 Registratie van pd's

De stromen t.g.v. een pd in de generator zijn gesuperponeerd op de 50 Hz stromen die vele factoren groter zijn. Eén van de eisen voor een meetsysteem, waarmee pd's geregistreerd kunnen worden, is dat het gevoeliger moet zijn voor de hoogfrequente pd stroompjes dan voor de grote 50 Hz stromen. Een andere eis is dat te installeren sensoren op geen enkele manier de juiste werking van de generator mogen beïnvloeden. Dit houdt in dat er niet direct aan de spanningsvoerende geleiders gemeten mag worden.

4 **SENSOREN VOOR HET REGISTREREN VAN PD'S**

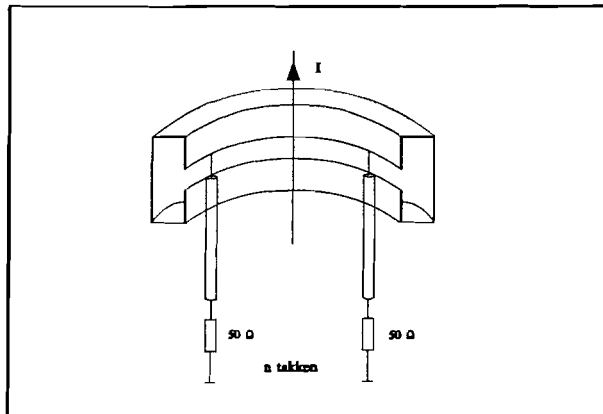
Gedurende het promotieonderzoek van ing. A.J.M. Pemen zijn drie typen sensoren ter registratie van pd's ontwikkeld, te weten:

- de meetlussen
- de Rogowski-spoelen
- en de capacitieve sensoren.

De methode van detectie verschilt in alle drie de gevallen. In dit hoofdstuk zal de meetlus uitvoerig behandeld worden. Allereerst zullen de Rogowski-spoel en de capacitieve sensor kort beschreven worden.

4.1 De eenwindings-Rogowski spoel

Een stroomsensor die gebruikt wordt voor de registratie van pd's is de eenwindings Rogowski spoel.

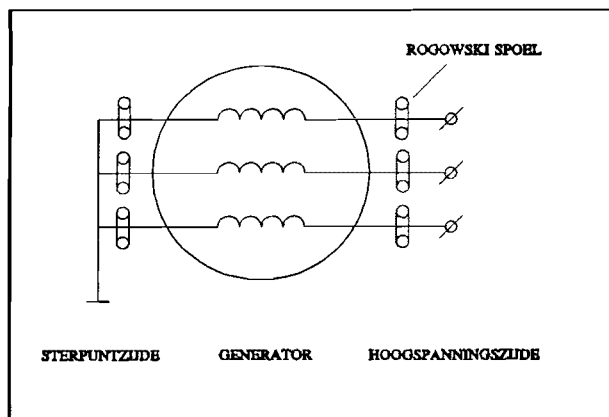


figuur 4.1: eenwindings Rogowski spoel

Figuur 4.1 toont de constructie van de eenwindings Rogowski spoel (één helft). De Rogowski spoel meet de afgeleide van de omsloten stroom I , waardoor hij gevoeliger is voor stromen met frequenties groter dan 50 Hz. De Rogowski spoel meet alleen de stromen die door de spoel omsloten worden, externe velden worden niet geregistreerd. De Rogowski spoel is daarom dus een selectieve sensor.

Door het hoogfrequente gedrag van signalen t.g.v. pd's is het van belang het frequentiebereik zo groot mogelijk te houden. De bandbreedte van de Rogowski spoel is omgekeerd evenredig met zijn zelfinductie. Om de zelfinductie van de spoel zo laag mogelijk te houden is er gekozen voor een eenwindings-Rogowski spoel ($L \sim n^2$). Door zijn luchtkern is de Rogowski spoel lineair.

De spoel is opgebouwd uit twee helften zodat ze eenvoudig te monteren zijn om de uitgangsklemmen van de generator.



figuur 4.2: posities Rogowski spoelen (Hemweg-6)

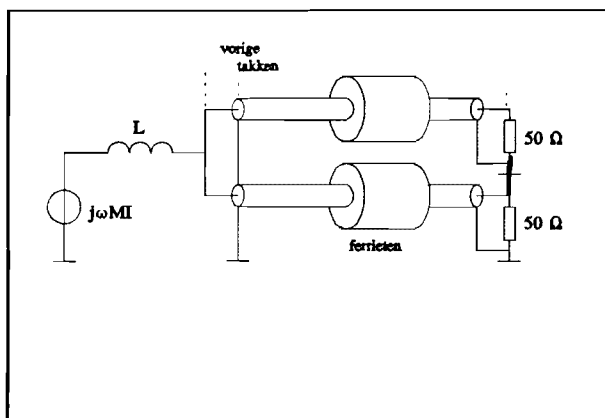
Momenteel is alleen de Hemweg-6 uitgerust met Rogowski spoelen. In figuur 4.2 zijn de plaatsen aangegeven waar de spoelen gemonteerd zijn.

Om overslag van geleider naar de spoel te voorkomen, moet de binnendiameter van de spoel voldoende groot zijn.

De uitgangsspanning van de Rogowski spoel is:

$$V_{\text{rog}} = j\omega MI.$$

De wederzijdse inductie wordt bepaald door de afmetingen van de spoel. Er zijn twee verschillende constructies, één voor de hoogspanningszijde en één voor de sterpuntszijde (zie figuur 4.2). De wederzijdse inductie voor beide is 5.4 nH en 3.2 nH [1]. Om de gevoeligheid van de sensor op te krikken zijn er vier coax-verbindingen aan de spleet van de spoel bevestigd. Elke tak is afgesloten met 50 Ω. Over iedere weerstand staat de uitgangsspanning van de spoel. Met behulp van balun-schakeling worden de spanningen opgeteld (zie figuur 4.3).



figuur 4.3: Balun-schakeling

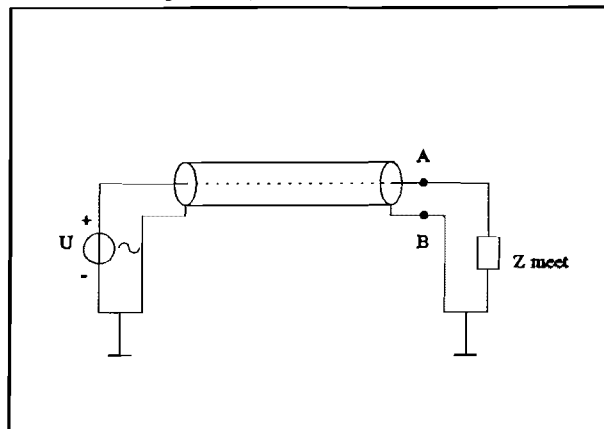
Voor een uitvoerige beschrijving van de Rogowski spoel en balun-schakeling verwijs ik naar het afstudeer-verslag van Johan Bogerd (HTS-Breda).

4.1.1 Splitter

Om de Rogowski spoel en de bijbehorende balun te kunnen testen zijn er vier identieke hoogfrequente stroompulsen nodig. Hiervoor is een bron beschikbaar, maar het uitgangssignaal moet via een 'splitter' aan vier tot vijf (bij een vijf-tak balun-schakeling) transmissielijnen worden aangeboden. Het ontwikkelen van deze splitter is een deeltaak van mijn afstudeeropdracht.

Tussen de punten A en B wordt de spanning U gemeten. Het signaal wordt belast met de ingangsimpedantie van het meetsysteem (zie fig. 4.4).

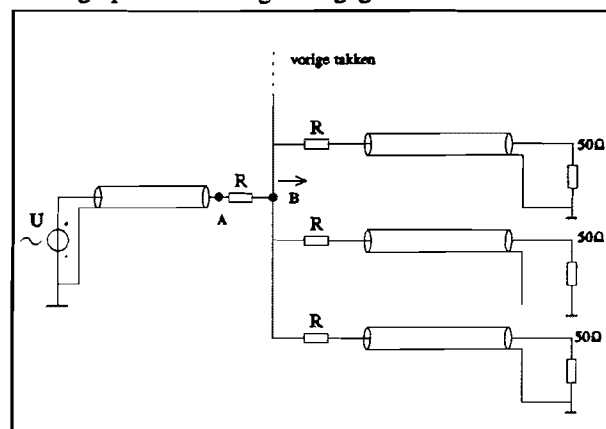
Dit is het uitgangspunt: spanning U moet karakteristiek afgesloten worden door de karakteristieke impedantie van de lijn (50Ω).



figuur 4.4: U belast met 1 meetsysteem

Indien de spanning U met twee meetsystemen tegelijk gemeten wordt, zal de impedantie tussen A en B ten gevolge van het parallel schakelen van twee 50Ω meetimpedanties gereduceerd worden tot 25Ω . Hierdoor zullen reflecties optreden.

Een aanpassing in de vorm van een splitter is noodzakelijk geworden. In totaal zijn er twee vierwegsplitters en twee vijfwegsplitters gebouwd. Het principe van de splitter zal in het volgende behandeld worden. Het vervangingschema voor de n-weg splitter is in fig. 4.5 gegeven.



figuur 4.5: n-weg splitter

Er zullen Surface Mounted Devices (S.M.D.) weerstanden gebruikt worden omdat deze zeer geschikt zijn voor hoge frequenties. Zaak is nu om R zo te dimensioneren dat de impedantie gezien vanaf punt A in de richting van de pijl 50Ω is.

De impedantie gezien vanaf punt B in de richting van de pijl is:

$$Z_B = (R+50) // (R+50) // (R+50) // (R+50) // \dots \quad (\text{totaal } n\text{-takken})$$

Vanaf punt A is dat:

$$Z_A = R + Z_B = 50\Omega$$

De aanpasweerstand vormen een spanningsdeler. Ieder meetsysteem meet daarom slechts een gedeelte van de spanning U . De verhouding k tussen ingangsspanning en de spanning over ieder meetsysteem laat zich eenvoudig berekenen:

$$U_B = \frac{Z_B}{Z_B + R} * U$$

$$U_{50 \Omega} = \frac{50}{R + 50} * U_B$$

$$k = \frac{U_{50 \Omega}}{U} = \frac{50 * Z_B}{(R + 50)(R + Z_B)}$$

Voor de vier- en vijfwegsplitter geldt:

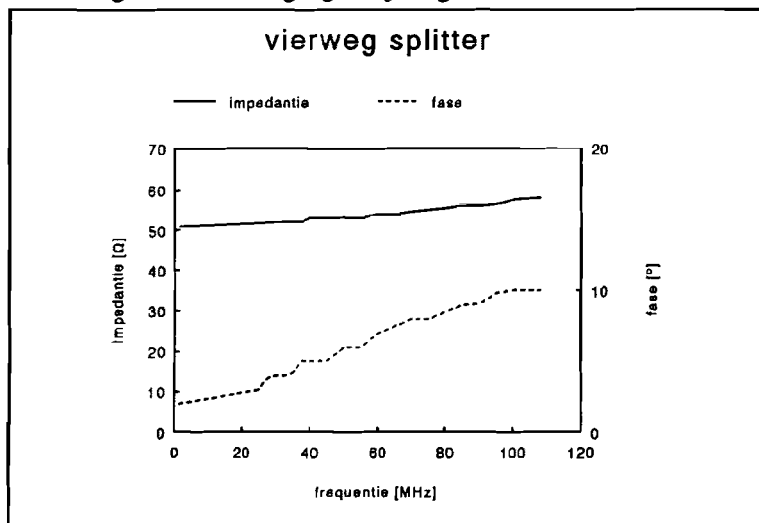
	vierwegsplitter	vijfwegsplitter
k	0.25	0.15
R	30 Ω	33 1/3 Ω

4.1.2 Metingen aan de splitters

Aan de splitters zijn metingen gedaan naar:

1. het constant blijven van 50 Ω ingangsafluitimpedantie als functie van de frequentie
2. de overdracht (faktor k) als functie van de frequentie
3. reflecties binnen de splitter

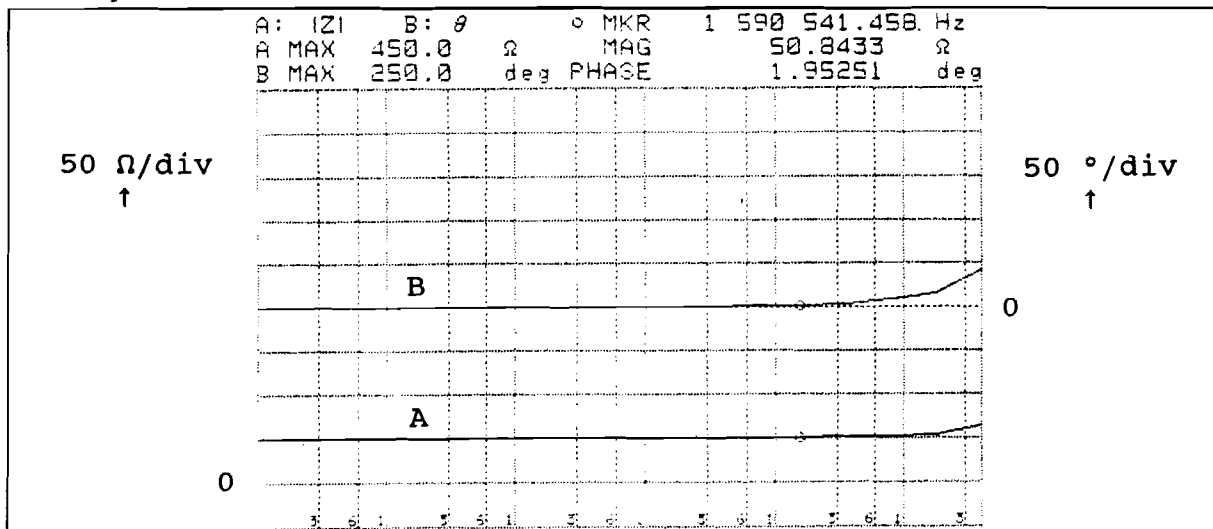
ad 1. De karakteristiek uit figuur 4.6 is bepaald met een vektorimpedantie meetbrug (Hewlett Packard HP4815A) van vakgroep EC. De ingangsimpedantie en fase worden gemeten als functie van de frequentie. Alle niet gebruikte in/uitgangen zijn afgesloten met 50 Ω .



figuur 4.6: impedantiemeting aan splitter met de HP4815A

Het is duidelijk dat de fase tussen ingangsspanning en ingangsstroom sterk toeneemt bij hogere frequenties. Uit eerdere metingen die gedaan zijn met de HP4815A is gebleken dat dit apparaat niet altijd even betrouwbaar is. Het apparaat is al lang niet meer in onderhoud waardoor de interne instellingen verlopen zijn. Deze meting is herhaald met de network analyser (Hewlett Packard

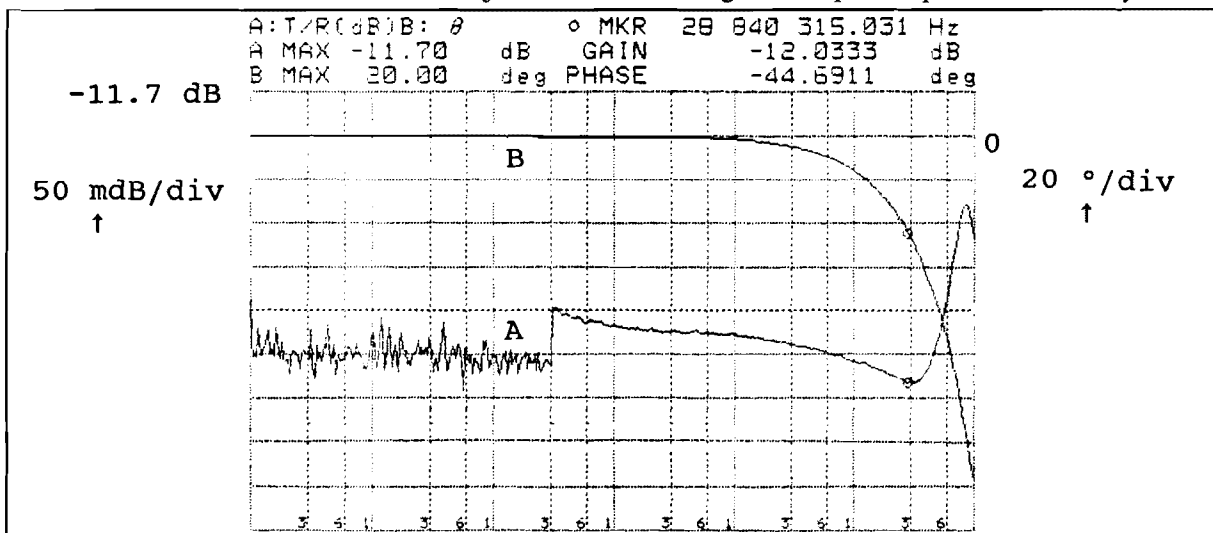
HP4194A) van vakgroep EMV. In figuur 4.7 is de ingangsimpedantie en fase uitgezet tegen de frequentie.



figuur 4.7: impedantiemeting aan splitter met de HP4194A

Ook hier is een kleine opslinging van de fase bij hogere frequenties waarneembaar. Dit is te wijten aan de aansluiting van de splitter op de network analyser. De 50 Ω ingangsimpedantie is nagenoeg stabiel over het gehele frequentiegebied (100 Hz - 40 MHz).

ad 2. De overdracht van de splitters is gemeten met dezelfde network analyser. Van splitter n°. 2 (vierweg) is de overdrachtskarakteristiek gegeven in figuur 4.8. Ook hier zijn alle niet gebruikte in/uitgangen afgesloten met 50 Ω. Het is duidelijk dat de overdracht van het systeem tot 100 MHz (max. frequentie network analyser) nagenoeg constant ($k = 0.25$) blijft. De opslinging in de fasekarakteristiek is ook hier te wijten aan de aansluiting van de splitter op de network analyser.

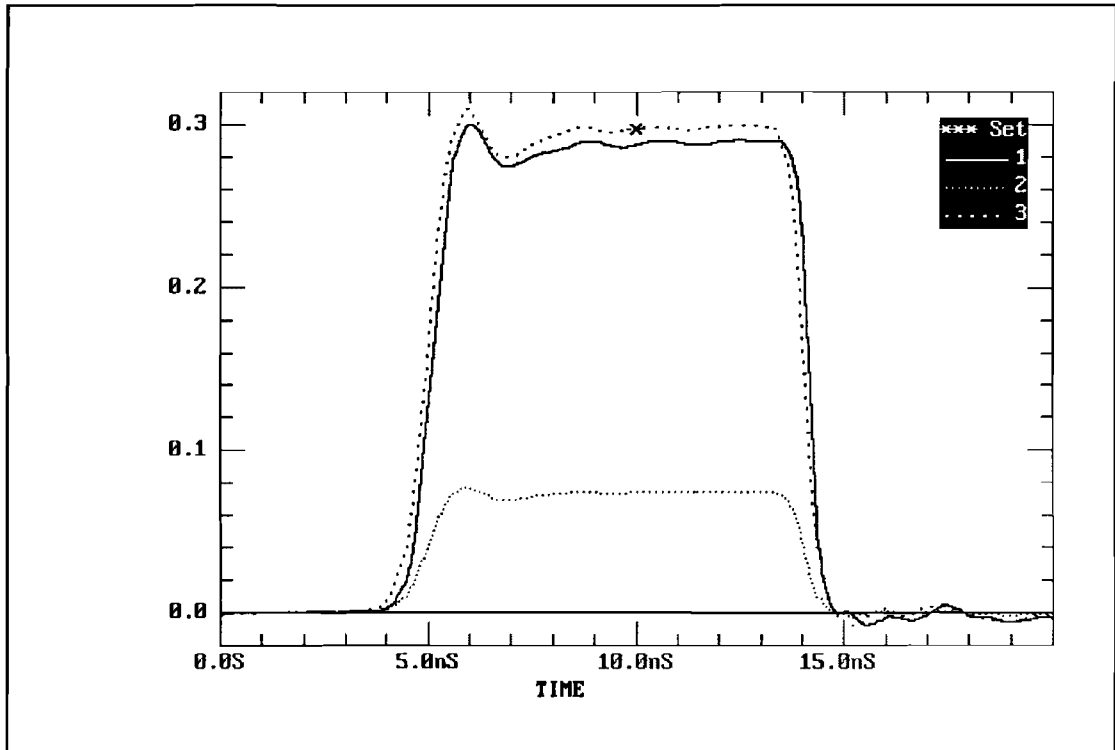


figuur 4.8: overdrachtskarakteristiek vierwegsplitsler gemeten met HP4194A

ad 3. De vierweg splitter is getest op reflecties. Een pulsbrongenerator zorgt voor een puls met flank van 640 ps die aan een van de ingangen aangeboden wordt. M.b.v. een digitale oscilloscoop wordt het signaal, aan een van de uitgangen van de vierweg splitter, gemeten. De niet gebruikte uitgangen zijn weer met 50 Ω afgesloten.

In figuur 4.9 zijn drie signalen gegeven. Set 1 is de puls gemeten aan de pulsbrongenerator. Deze puls dient alsingangssignaal voor de splitter. Set 2 is gemeten aan een van de uitgangen van de

vierweg splitter. Dit signaal wordt vermenigvuldigd met een factor $k^1 = 4$. Het resultaat is set 3. Uit deze meting blijkt dat er geen reflecties optreden. Tevens wordt nog eens bewezen dat de waarde van k voor een vierweg splitter 0.25 is.

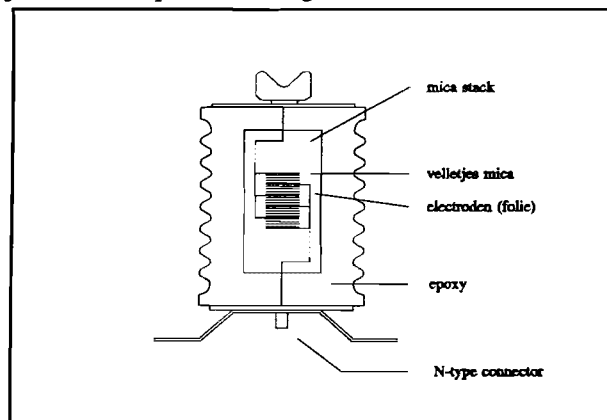


figuur 4.9: reflectiemeting aan vierweg splitter

4.2 De capacitieve sensor

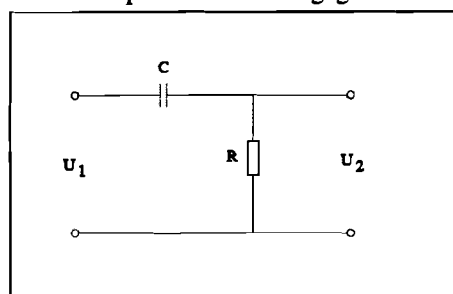
Een capacitieve sensor is ontwikkeld om direct aan de rails van het railkokersysteem te meten. De sensor is zo geconstrueerd dat deze eenvoudig op de plaats van standaard isolatoren in het railkokersysteem gemonteerd kan worden. De sensor heeft dezelfde specificaties als een standaard isolator.

Aan de bovenzijde van de isolator bevindt zich een schoen-vormige elektrode die tegen de faserail van het railkokersysteem geplaatst wordt (zie figuur 4.10). In de epoxy behuizing zit een Mica capaciteit C van 500 pF ($\pm 10\%$). De andere zijde van de capaciteit is uitgevoerd naar een N-connector.



figuur 4.10: capacitieve sensor

Bij metingen met de capacitieve sensor wordt de connector-zijde afgesloten met de ingangsimpedantie van het meetsysteem (50 Ω) waardoor de spanning op de connector aanzienlijk daalt. Zonder afsluiting is de spanning op de connector nl. gelijk aan de fasespanning op de rail (9 kV). In figuur 4.11 is het meetschema voor de capacitieve sensor gegeven. Voor de overdracht van het systeem geldt:



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

Omdat de waarden voor R en C vastliggen, ligt ook de overdrachtskarakteristiek vast. Door parasitaire capaciteiten en de zelfinductie van de sensor zal de werkelijke overdrachtskarakteristiek afwijken van de theoretische.

In de tabel 4.1 zijn de specificaties van de capacitieve sensoren gegeven [1]:

figuur 4.11: Meetschema capacitieve sensor

capaciteit:	500 pF ± 10%
nominale spanning:	9 kV / 50 Hz
maximale piekspanning:	95 kV
dissipatie faktor:	< 0.01

tabel 4.1: specificaties capacitieve sensor

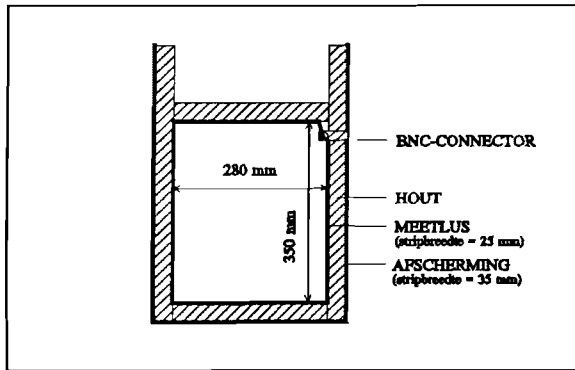
In totaal zullen er zes capacitieve sensoren geïnstalleerd worden in het railkokersysteem van de Hemweg-6. Twee sensoren per fase, een dicht bij de generator en een bij de step-up transformator, maken het mogelijk om o.a. looptijden te meten. De sensoren hebben reeds de testen van KEMA doorstaan en zullen eind juni 1993 geplaatst worden tijdens een 8-uurs stop van de Hemweg-6.

4.3 De meetlus

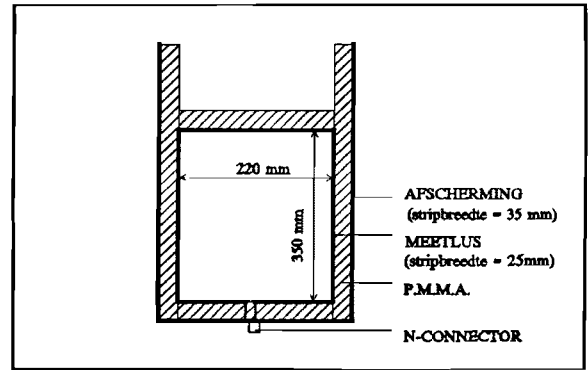
4.3.1 Inleiding

De externe stromen t.g.v. een pd in de generator kunnen gemeten worden ter hoogte van het railkokersysteem. De meetlus is een sensor die veilig en eenvoudig tussen de kokers van het railkokersysteem geplaatst kan worden. Bij aanvang van mijn afstudeeropdracht zijn prototypen van meetlussen voorhanden. De meetlus is een eenwindingsspool in de vorm van een raam. Om dit raam is een afscherming voor E-velden geplaatst. Na het meten met deze experimentele lussen in de Hemweg-centrale concludeerde mijn voorganger, G. Poorter, dat de positie van de afscherming t.o.v. de meetlus en de koppeling van beiden veranderd moesten worden (zie ook hoofdstuk 6). Deze wijzigingen heb ik doorgevoerd in de meetlussen voor de Amer-centrale waarvan ik de bouwtekeningen heb gemaakt. Met deze lussen zijn in april '93 de eerste metingen uitgevoerd. In totaal zijn er twee meetlussen voor de Hemweg-centrale (nr. 3 en 4) en vier voor de Amer-centrale (nr. 5 t/m 8). De constructie en afmetingen van de meetlussen voor Hemweg-6 (125 MW generator) en voor Amer-8 (625 MW generator) zijn gegeven in figuur 4.12a en 4.12b.

Voor de lus is geen draad maar een strip gebruikt om de zelfinductie ervan laag te houden. Een brede strip is om de meetlus geplaatst om deze af te schermen voor de E-velden tussen de railkokers. Deze afscherming is capacitief gekoppeld met het railkokersysteem. De stroom t.g.v. deze koppeling is in figuur 4.13 aangegeven (situatie Hemweg-6). Het H-veld van deze capacitieve stroom wordt deels omvat door de meetlus. Als echter de afschermingsstrip breed genoeg gekozen wordt, zal er geen magnetisch flux t.g.v. deze capacitieve

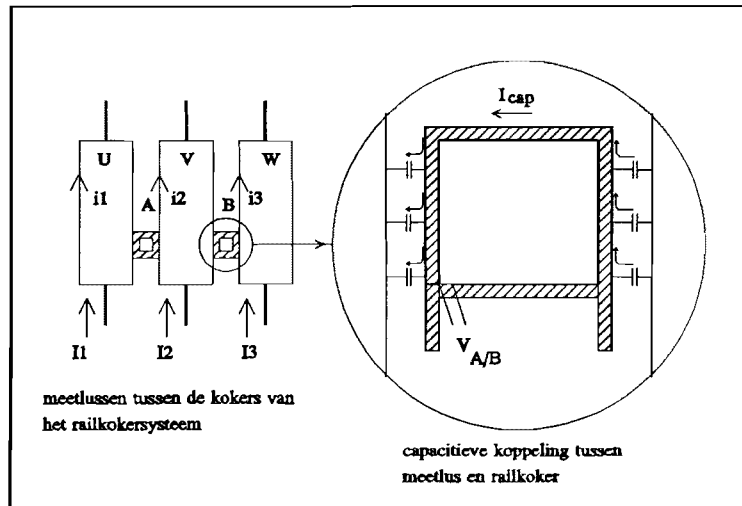


figuur 4.12a: meetlus voor Hemweg-6



figuur 4.12b: meetlus voor Amer-8

stroom met de meetlus gekoppeld zijn. De lus wordt tussen de kokers van het railkokersysteem geplaatst (zie figuur 4.13).



figuur 4.13: meetlus geplaatst in railkokersysteem

De werking van deze lussen berust op inductiespanningen t.g.v. wisselende magneetvelden van stromen die door de rails en kokerwanden van het railkokersysteem lopen.

De railstromen I_1 , I_2 en I_3 veroorzaken werkelstromen i_1 , i_2 en i_3 over de wanden van de kokers. Indien we te maken hebben met het gangbaar railkokersysteem (zie figuur 3.2, situatie Amer-8), dan zullen de stromen i_1, i_2 en i_3 nagenoeg gelijk maar tegengesteld zijn aan de railstromen. Het gevolg is dat buiten het railkokersysteem nauwelijks een resulterend veld aanwezig is. In de Hemweg-6 zijn de kokers doorverbonden via spoelen om de kokerstromen te onderdrukken. Dit is gedaan om de warmteontwikkeling t.g.v. de grote kokerstromen tegen te gaan. Het gevolg is een resulterend magneetveld buiten het railkokersysteem. Eerdere metingen hebben aangetoond dat voor 50 Hz railstromen ongeveer 60 % van het betreffende elektromagnetisch veld nog buiten de afscherming aanwezig is [2]. Bij een gangbaar railkokersysteem is dat 5%.

De meetlus zal veldlijnen van het resulterend magneetveld buiten de mantel omsluiten. De omvatte flux veroorzaakt een spanning $V_{A \text{ of } B}$ (zie figuur 4.13) aan de klemmen van het raam van de meetlus met een grootte van [1]:

$$V_A = j\omega M(I_1 + i_1) - j\omega M(I_2 + i_2)$$

$$V_B = j\omega M(I_2 + i_2) - j\omega M(I_3 + i_3)$$

met:	$V_{A \text{ of } B}$	=	klemspanning lus A of B
	I_x	=	railstroom
	i_x	=	stroom door mantel van de railkoker
	M	=	wederzijdse inductie

Uit de formule blijkt een belangrijk voordeel van de meetlus; de gevoeligheid neemt toe naarmate de frequentie stijgt. De 50 Hz stromen zullen nauwelijks invloed hebben op de metingen van de hoogfrequente stroompjes t.g.v. pd's.

De gevoeligheid van de lus wordt bepaald door het magnetisch veld tussen de kokers en het oppervlak van de lus. De magnetisch flux tussen de kokers is de zelfinductie van het railkokersysteem, en is afhankelijk van de straal van de kokers en de afstand ertussen. Voor de Hemweg-6 is de zelfinductie van het railsysteem 360 nH/m [1]. Voor de meetlus van 35 cm lang is de wederzijdse inductie $M = 126$ nH.

Aan de meetlussen zijn metingen en berekeningen gedaan waarover meer in de volgende paragrafen. De resultaten van metingen met de meetlussen aan generatoren zijn gegeven in hoofdstuk 5.

4.3.2 Berekeningen aan de meetlussen

Bij het verwerken van de meetresultaten, moet er rekening gehouden worden met meetfouten, toleranties, invloeden van apparatuur in de omgeving van de meetopstelling en de invloed van de meetlus zelf. Het laatste wordt in deze paragrafen behandeld.

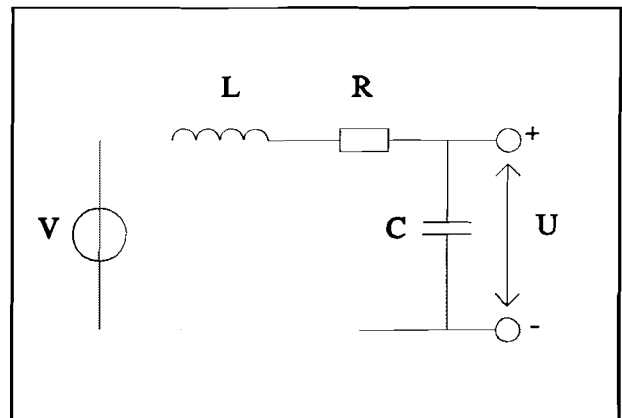
Door zijn constructie (zie figuren 4.12a/b) is het elektrisch vervangingschema van de meetlus voor te stellen als een RLC-kring (zie figuur 4.14).

De geïnduceerde spanning wordt voorgesteld door de spanningsbron V . R is de weerstand van de meetlusstrip. C is de parasitaire capaciteit tussen de meetlus en de E-veld afscherming. L_{lus} is de zelfinductie van de meetlus.

De oscillatiefrequentie van dit RLC-circuit is gelijk aan:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Om de oscillatiefrequentie te kunnen bepalen moeten de waarden voor L_{lus} en C bepaald worden.



figuur 4.14: vervangingschema meetlus

Berekenen van de parasitaire capaciteit

De capaciteit tussen de beide strips wordt bepaald. Hierbij is een vereenvoudigd model gebruikt, namelijk het platte condensator-model. Voor de platte condensator geldt:

$$C = \frac{A \cdot \epsilon}{d} \quad \text{met} \quad \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Oppervlak A is de strijdbreedte van de meetlus maal de striplengte, waarover beide een capaciteit vormen. De dikte d is de afstand tussen beide strips. In tabel 4.2 zijn de constanten en de berekende waarden voor C van beide meetlussen gegeven.

	Meetlus:	
	Hemweg	Amer
Oppervlak A [m ²]:	0.0245	0.023
Gebruikt diëlektrikum:	hout	P.M.M.A.
Relatieve permeabiliteit ϵ_r :	5	2.55
Dikte d [m]:	0.03	0.03
Capaciteit C [pF]:	36	17

tabel 4.2: constanten voor berekenen van capaciteit C

Er is ook een parasitaire capaciteit aanwezig tussen connector en afscherming. Deze is echter klein en kan worden verwaarloosd.

Berekenen van de zelfinductie

Voor het bepalen van het inductief gedrag van de meetlus moet er eerst een afleiding gevonden worden voor de door de meetlus omvatte flux ϕ . Deze afleiding is gegeven in bijlage 1.

In tabel 4.3 zijn de afmetingen voor de beide lussen gegeven en is de zelfinductie uitgerekend:

	Meetlus	
	Hemweg-6	Amer-8
lengte lus (l)	0.35 m	0.35 m
breedte lus (b)	0.28 m	0.22 m
halve hoogte lus (b ₁)	0.5 * 0.025 m	0.5 * 0.025 m
halve dikte lus (d)	0.5 * 0.001 m	0.5 * 0.001 m
L_{lus}	940 nH	850 nH

tabel 4.3: afmetingen van de meetlussen met de berekende zelfinductie

De weerstand van de meetlus is:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \text{met: } \rho = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega m$$

$$l = 1.223 \text{ m}$$

$$A = 25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$= 0.03 \text{ } \Omega$$

Omdat de weerstand R zoveel kleiner is dan de inductieve impedantie, wordt R in verdere berekeningen weggelaten.

De overdracht van het systeem uit figuur 4.14 is:

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}$$

De oscillatiefrequentie f_0 is:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Uit de berekende L_{lus} en C volgen de oscillatiefrequenties van beide meetlussen:

Meetlus Hemweg: $f_0 = 27$ MHz
 Meetlus Amer: $f_0 = 42$ MHz

4.3.3 Metingen aan de meetlussen

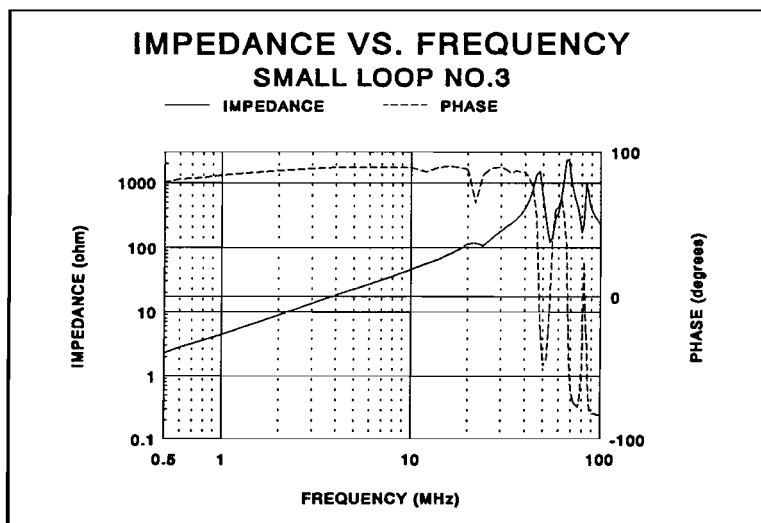
Drie verschillende metingen worden gedaan om de oscillatiefrequentie f_0 van de meetlussen te bepalen. De eerste en eenvoudigste meting is gedaan met een Wayne-Kerr RLC-brug. De zelfinductie L_{lus} kan direct, aan de klemmen van de meetlus, gemeten worden. Voor het meten van de parasitaire capaciteit dient de verbinding tussen de meetlus en afscherming weggenomen te worden. De waarden voor L_{lus} en C van de verschillende lussen zijn in tabel 4.4 gegeven.

	Meetlus 3 (Hemweg)	Meetlus 5 (Amer)
L_{lus}	1.2 μ H	1 μ H
C_{par}	39 pF	36 pF
Oscillatiefrequentie f_0	23.3 MHz	26.5 MHz

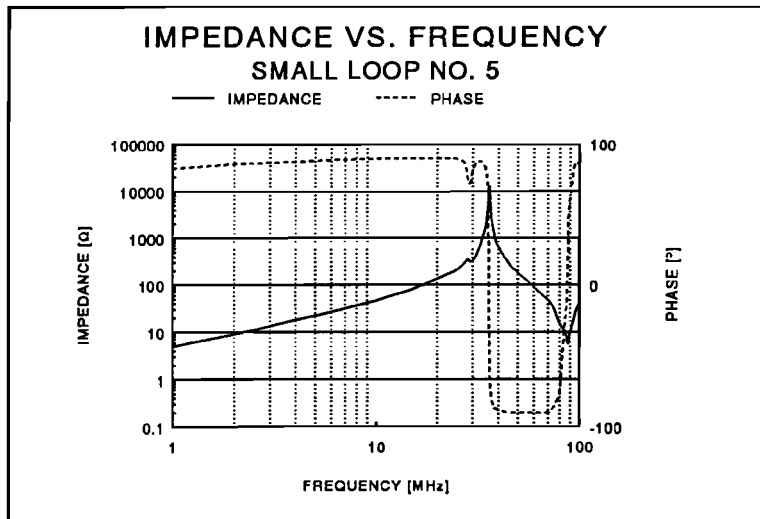
tabel 4.4: zelfinductie en parasitaire capaciteit van meetlussen bepaald met Wayne-Kerr brug

Deze vierpuntsmeting is over het algemeen vrij betrouwbaar voor kleinere objecten met goede aansluitmogelijkheden. De meetlus is echter via krokodillenklemmen aangesloten op de Wayne-Kerr brug. Het verschil tussen gemeten en berekende waarde wordt veroorzaakt door deze slechte aansluiting.

Een tweede meting is gedaan met een vektorimpedantie meetbrug van Hewlett Packard (HP4815A) van vakgroep EC. Gedurende deze meting wordt de ingangsspanning van de meetlus tijdens een frequentiesweep constant gehouden en wordt de stroom gemeten. De overdracht $|U_i/I_i|$ en de fase $\varphi(U_i/I_i)$ zijn in figuur 4.15 uitgezet als functie van de frequentie voor meetlus 3. Hetzelfde is gedaan voor meetlus 5 (zie figuur 4.16).



figuur 4.15: impedantiemeting meetlus 3



figuur 4.16: impedantiemeting meetlus 5

De impedantie van de meetlus wordt bij lage frequenties voornamelijk bepaald door zijn zelfinductie L . Er geldt:

$$\Delta Z_{lus} \approx \omega L_{lus} \Rightarrow L_{lus} \approx \Delta Z_{lus} / \Delta \omega$$

Met deze formule is het mogelijk om de zelfinductie van beide lussen te bepalen. In de grafieken (4.15 en 4.16) zijn duidelijk oscillatieverschijnselen waar te nemen. De oscillatiefrequentie van lus 3 is bepaald op 25 MHz, die van lus 5 op 35 MHz. De waarde voor de parasitaire capaciteit C_{par} is nu te berekenen (zie tabel 4.5):

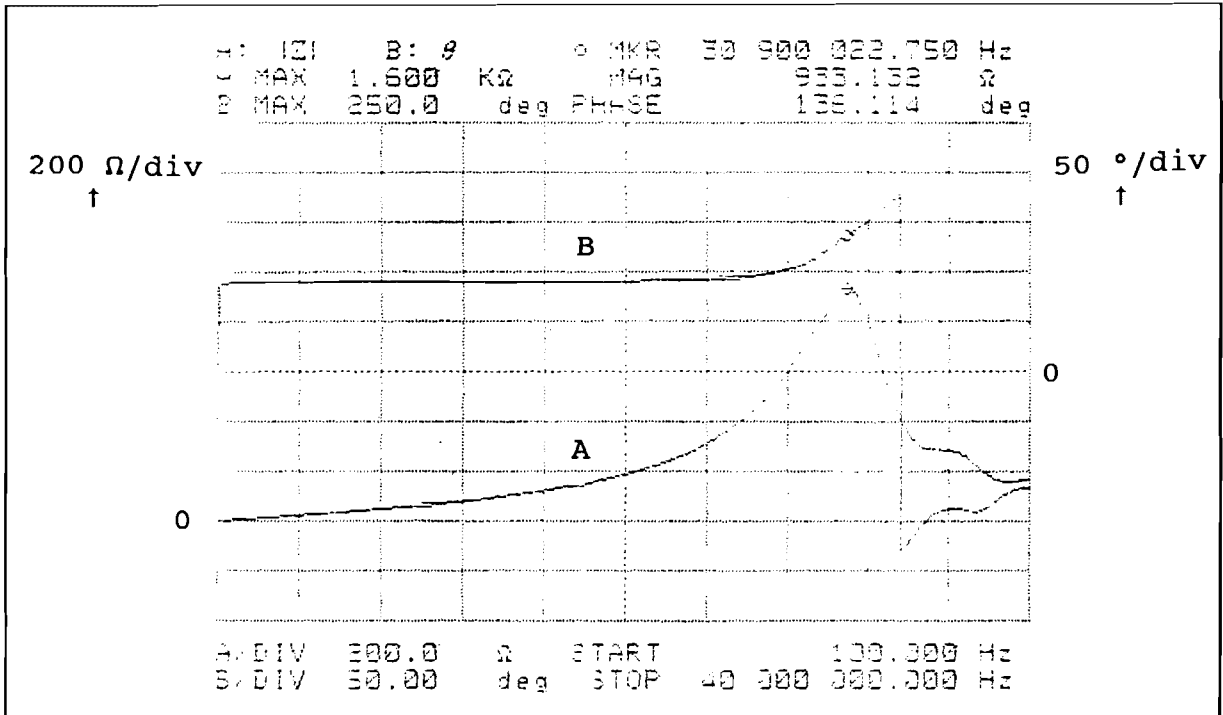
	Meetlus 3	Meetlus 5
L_{lus}	850 nH	805 nH
oscillatiefrequentie	25 MHz	35 MHz
$C_{par} = 1/((2\pi f_0)^2 L_{lus})$	48 pF	26 pF

tabel 4.5: bepalen van de parasitaire capaciteit

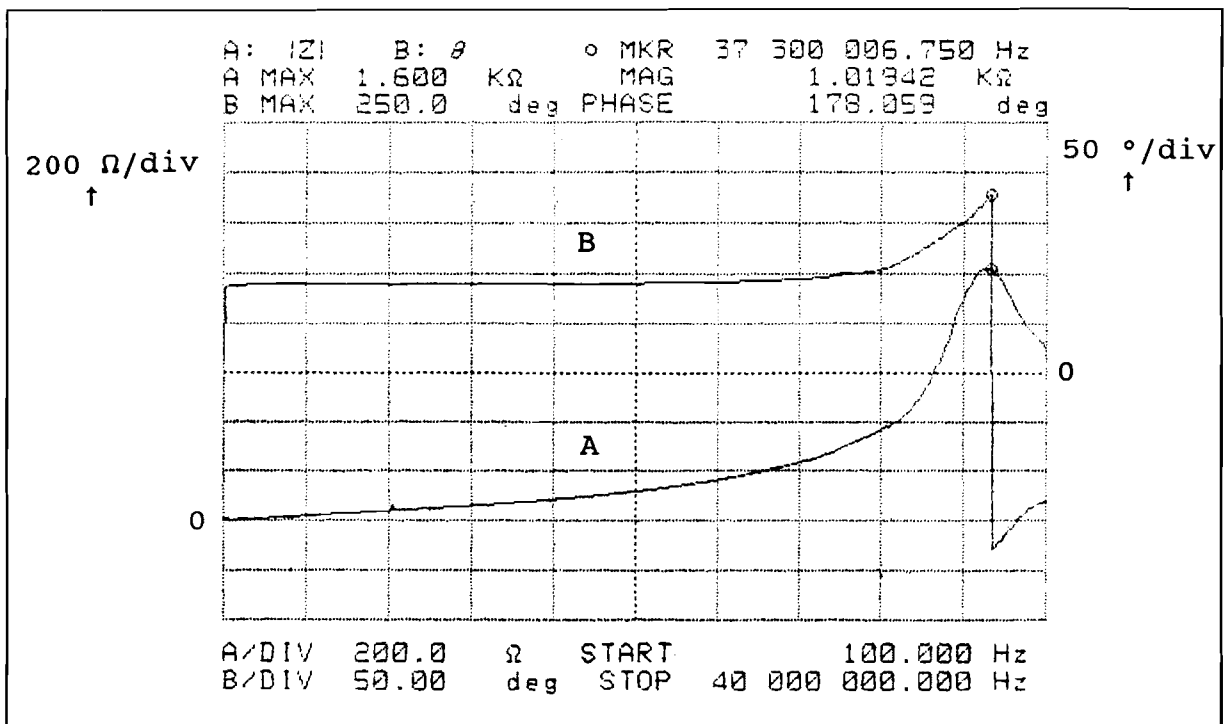
In figuur 4.15 zijn drie oscillaties waar te nemen. De frequentie van 25 MHz hoort bij de berekende oscillatiefrequentie. De waarden voor L_{lus} en C wijken wat af. Een verklaring hiervoor is de benadering van L_{lus} die gedaan is uit het 'laagfrequent' deel van de impedantiegrafiek.

Ook bij 52 en 82 MHz treden oscillatieverschijnselen op. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat $\frac{1}{4}$ x de golflengte van het signaal resp. 1.44 m en 0.915 m dicht in de buurt komt van de lengte van de lus (1.22 m), waardoor staande golven over de meetlus ontstaan.

De derde en meest betrouwbare meting is gedaan met de network analyser (HP4194A) van vakgroep EMV. Met de network analyser wordt, net als bij de vektorimpedantie meetbrug, deingangsimpedantie als functie van de frequentie gemeten. Ook de fase tussen ingangsspanning en -stroom wordt geregistreerd. In de figuren 4.17 en 4.18 zijn de resultaten van deze metingen aan resp. lus 3 en 5 gegeven.



figuur 4.17: impedantiemeting meetlus 3 (HP4194A)



figuur 4.18: impedantiemeting meetlus 5 (HP4191A)

De network analyser biedt ook de mogelijkheid om de waarde voor L_{hs} direct te meten. De gemeten waarden voor L van beide lussen zijn: $1.01 \mu\text{H}$ voor lus 3 en 940 nH voor lus 5. Met deze informatie over oscillatiefrequentie en zelfinductie kan de waarde voor de parasitaire capaciteit berekend worden (zie tabel 4.6).

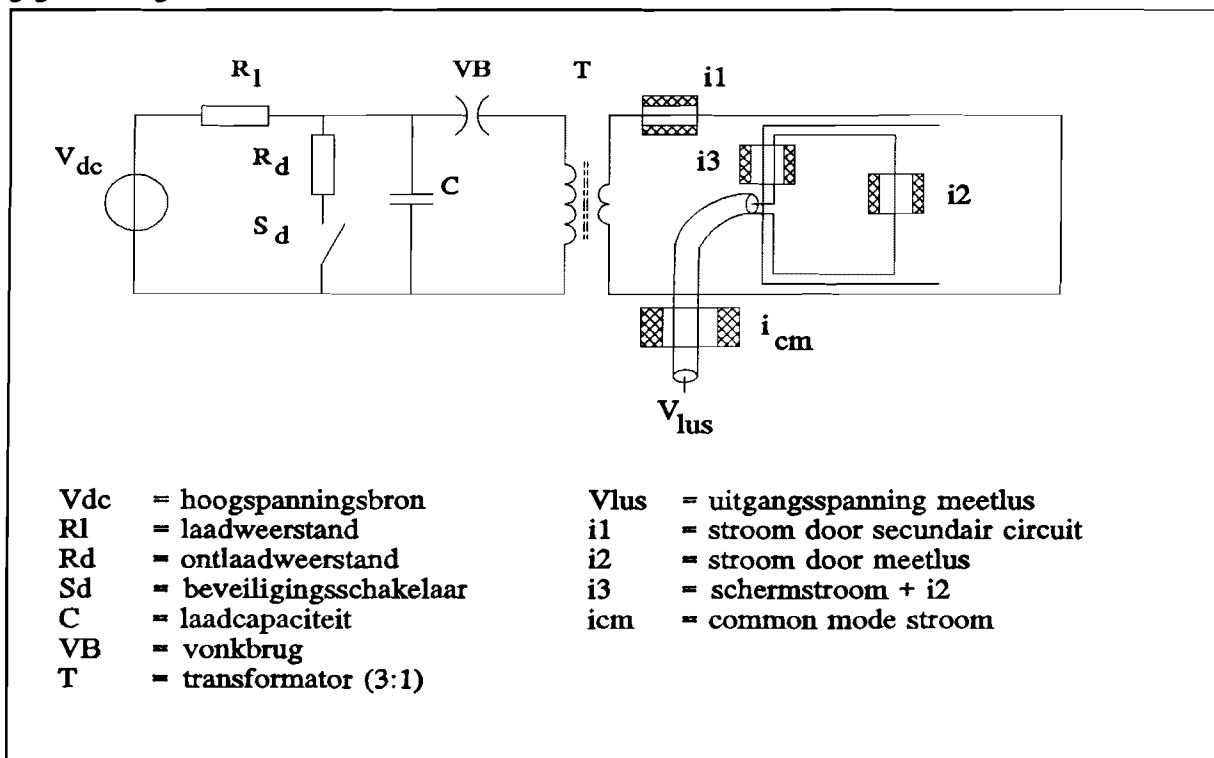
	Meetlus 3	Meetlus 5
L_{hs}	$1.01 \mu\text{H}$	940 nH
Oscillatiefrequentie	33 MHz	37.8 MHz
Berekende capaciteit C_{par}	23 pF	19 pF

tabel 4.6: bepalen van de parasitaire capaciteit met de network analyser

Deze meting mag de meest betrouwbare van de drie genoemd worden, omdat de aansluitingen van testobject op meetapparatuur het best verzorgd is waardoor de meetresultaten goed overeen komen met de berekende waarden uit 5.2.

Metingen aan meetlusnummer 5 in het laboratorium

In het hoogspanningslaboratorium van vakgroep EHC zijn metingen verricht aan meetlusnummer 5 (Amer-8). Met deze metingen wordt o.a. de stroomhuishouding in de lus onderzocht. De meetlus wordt in een grote lus geplaatst (zie figuur 4.19). In deze lus wordt een gedempte sinusvormige stroom geïnjecteerd. De meetlus zal het E/H-veld behorende bij deze stroom oppikken. De diverse stromen en spanningen zullen worden geregistreerd met een Digital Signal Analyser (DSA) van Tektronix (type 602A). Het meetschema is gegeven in figuur 4.19.



figuur 4.19: meetschema voor metingen aan meetlusnummer 5

Het primaire gedeelte van het testcircuit bestaat uit een hoogspanningsbron, waarmee, via een laadweerstand, een capaciteit van $0.5 \mu\text{F}$ geladen wordt. In de capaciteit is een instelbare vonkbrug ingebouwd. De

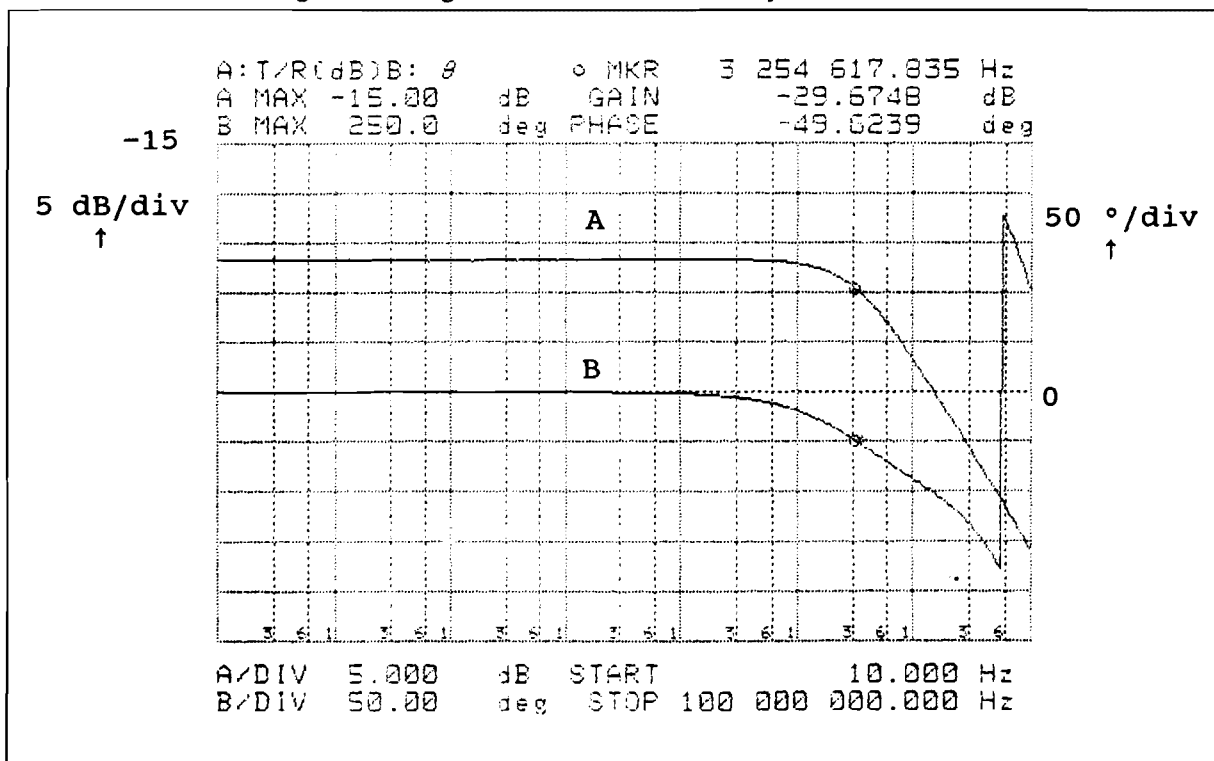
afstand tussen de elektroden wordt zo ingesteld dat de vonkbrug doorslaat bij ± 2 kV. Via een 3:1 transformator wordt de primaire stroompuls in het secundaire circuit geïnjecteerd. Het secundaire circuit is een stripvormige lus waarin onze meetlus geplaatst wordt. Een gedeelte van het E/H-veld van de secundaire stroom zal gekoppeld zijn met de meetlus waardoor er een spanning ontstaat over de klemmen van de meetlus. De te meten signalen zijn:

- * de stroom door het secundaire circuit (i_1),
- * de stroom door de meetlus (i_2),
- * de stroom door de meetlus + afscherming (i_3),
- * de spanning over de meetlus (V_{hm})
- * en de common-mode stroom (i_{cm}).

De stromen i_2 , i_3 en i_{cm} worden gemeten met Ailtech stroomprobes, stroom i_1 met een Pearson probe.

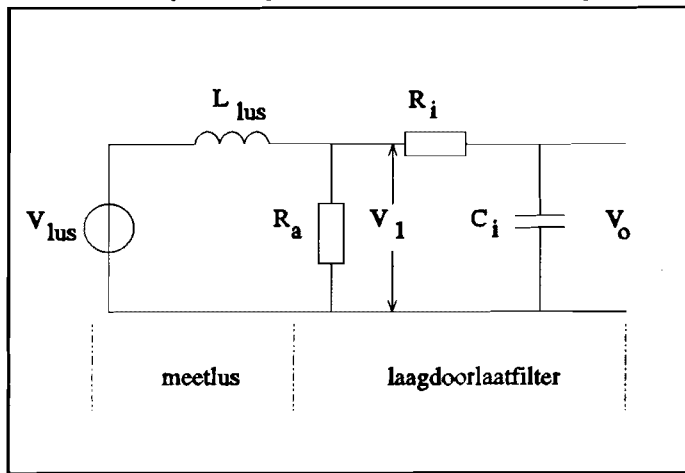
Dit testcircuit is reeds gebruikt voor eerdere experimenten. Uit deze meetresultaten [3] blijkt dat de sinusvormige secundaire stroom een frequentie van ongeveer 130 kHz heeft.

Na een eerste meting gedaan te hebben blijkt een beveiliging van een ingang in de DSA te zijn aangesproken. De oorzaak hiervan ligt bij de vonkbrug. Wanneer deze doorslaat ontstaat er ter plaatste van de doorslag een zeer sterk veld. Dit veld is evenredig met de primaire stroom. De meetlus, die relatief dicht bij de vonkbrug is opgesteld pikt dit veld op. Resultaat is een 'te' hoge spanning aan de klemmen van de meetlus. Omdat deze inschakelverschijnselen een hoog-frequentkarakter hebben, is er gekozen voor meten via een laagdoorlaatfilter, waardoor de invloed van het schakelen wordt onderdrukt. Het laagdoorlaatfilter is een passief RC-netwerk. De waarden voor R en C zijn zo gekozen dat het 3 dB-punt ligt bij een frequentie van 1 MHz. In totaal zijn er vier laagdoorlaatfilters gemaakt. Wanneer het laagdoorlaatfilter afgesloten wordt met een 50Ω ingangsimpedantie van de DSA, verplaatst het 3 dB-punt naar 3.3 MHz. De overdrachtskarakteristiek uit figuur 4.20 is gemeten met de network analyser van EMV.



figuur 4.20: Overdrachtskarakteristiek laagdoorlaatfilter

Het meetschema van de lus met daarbij het laagdoorlaatfilter ziet er als volgt uit:



figuur 4.21: meetlus met laagdoorlaatfilter

De spanning over de meetlus is $V_{lus} = j\omega MI_1$. Als $R_a \ll R_i$ dan geldt voor V_1 :

$$V_1 = \frac{R_a}{j\omega L + R_a} j\omega MI$$

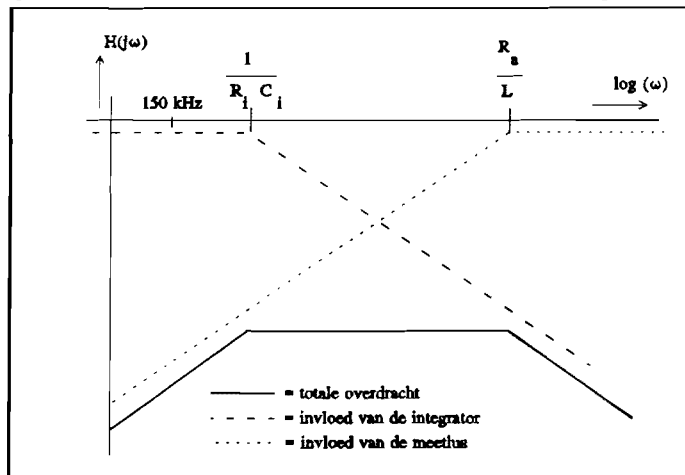
en voor V_o :

$$V_o = \frac{1}{1 + j\omega R_i C_i} V_1$$

Voor de totale overdracht geldt:

$$\frac{V_o}{I} = j\omega M \cdot \frac{R_a}{R_a + j\omega L} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_i C_i}$$

In het volgende bodediagram wordt de totale overdracht van meetlus met laagdoorlaatfilter weergegeven:



figuur 4.22: Overdracht meetlus + integrator

In tabel 4.7 zijn de verschillende componentwaarden gegeven:

Component	Waarde
R_a	50 Ω
R_i	1000 Ω
C_i	1 nF

tabel 4.7: componentwaarden integrator

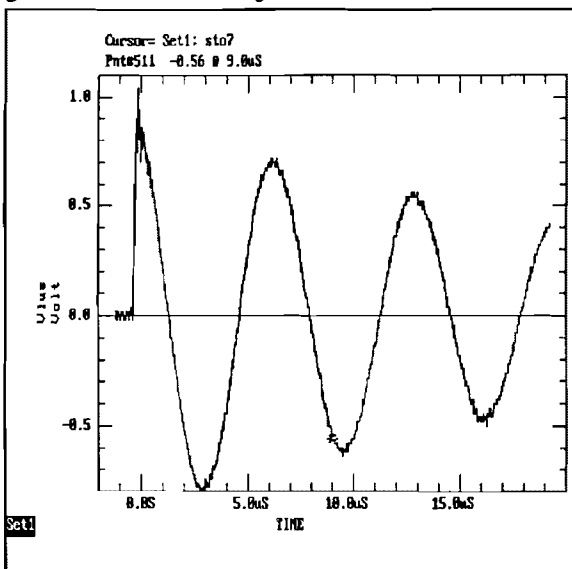
Het laagkantelpunt was al bekend (3.3 MHz), het hoogkantelpunt ligt bij 58.8 MHz ($L_{lus} = 850$ nH, $R_a = 50 \Omega \Rightarrow R/L = 58.8$ MHz).

In deze situatie meten we echter in het differentiërend gebied bij een frequentie van 150 kHz. De lus is door de integrator minder gevoelig voor frequenties boven ± 3.3 MHz.

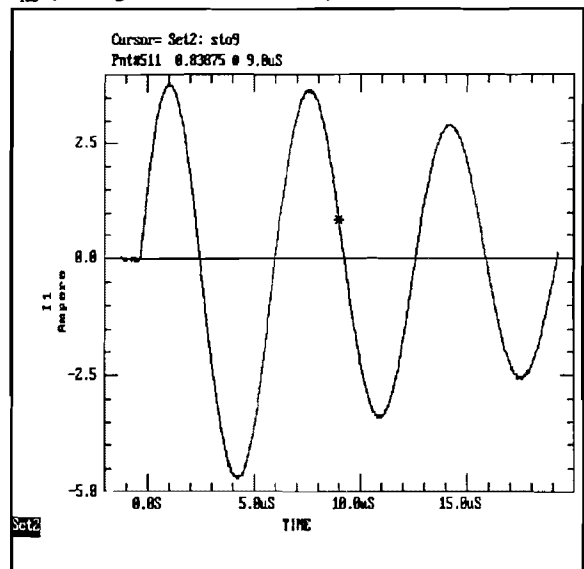
De gevoeligheid van de lus wordt mede bepaald door de wederzijdse inductie M (grote lus met kleine lus). In bijlage 2 is de afleiding voor M gegeven. M wordt bepaald op 314 nH. Voor de amplitude van V_{lus} geldt:

$$\begin{aligned} |V_{lus}| &= 2\pi f M \cdot |I_1| & \text{met: } f &= 150 \text{ kHz} \\ &= 0.29 \cdot |I_1| & M &= 314 \text{ nH} \end{aligned}$$

Dat deze afleiding juist is blijkt uit de volgende meting. In de linkergrafiek (figuur 4.23) is V_{lus} gegeven, in de rechter (figuur 4.24) i_1 . De amplitudeverhouding ($|V_{lus}|/|i_1|$) blijkt inderdaad 0.28 te zijn. De uitgangsspanning van de meetlus is evenredig met de afgeleide van stroom i_1 . Stroom i_1 is sinus-vormig, gedifferentieerd naar tijd levert dit de cosinusvorm voor V_{lus} (zie figuren 4.23 en 4.24).

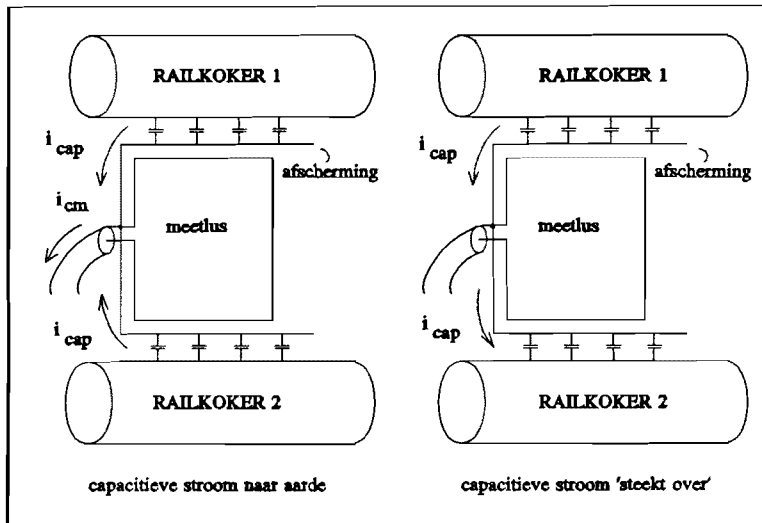


figuur 4.23: V_{lus}



figuur 4.24: i_1

Waarom zijn we geïnteresseerd in de stroomhuishouding in de meetlus? Een aanname, die al bestond sinds de ontwikkeling van de experimentele meetlussen, was dat de stroom t.g.v. de capacatieve koppeling tussen afscherming en railkokersysteem, via de mantel van de meetkabel (van V_{lus}), als een common-mode stroom (i_{cm}) naar aarde afvloeide (links in figuur 4.25). Gedurende het onderzoek is er twijfel ontstaan over deze koppelweg.

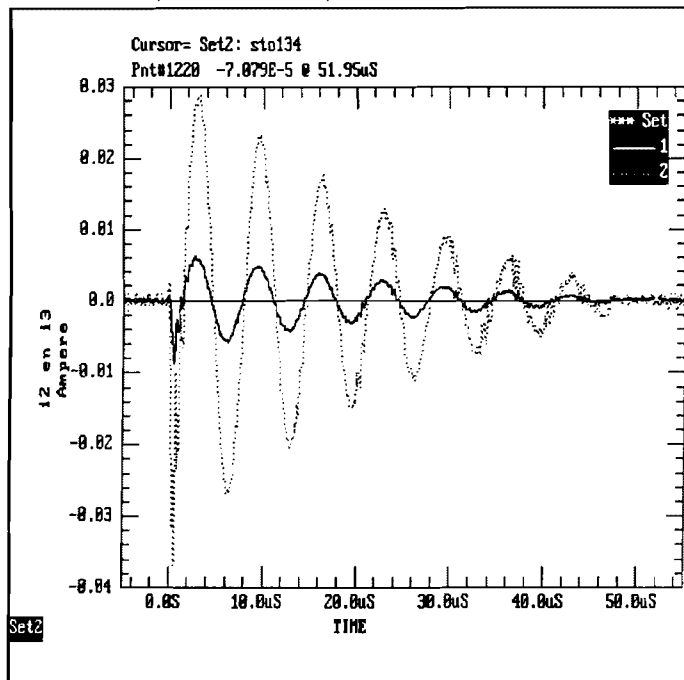


figuur 4.25: stroomweg capacitieve stromen

Voor de hoogfrequente pd-signalen is de impedantie tussen railkoker en afscherming laag. De veronderstelling dat de koppelweg gevormd wordt door railkoker 1 → afscherming → railkoker 2 lijkt beter.

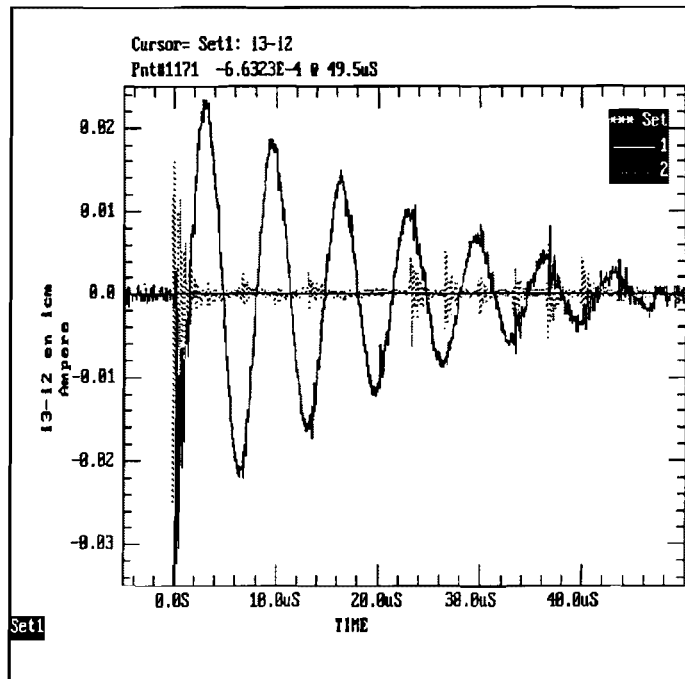
De volgende meting toont aan dat de stroom niet naar aarde (i_{cm}) afvloeit maar oversteekt via de afscherming (rechts in bovenstaande figuur).

Bij deze meting worden de stromen i_2 (meetus) en i_3 (meetus + afscherming) gemeten (zie figuur 4.26).



figuur 4.26: stroom i_2 en i_3

In de bovenstaande figuur staat set 1 voor de meetlusstroom i_2 en set 2 voor de meetlusstroom + schermstroom i_3 . Wanneer we beide stromen van elkaar aftrekken ($i_3 - i_2$) blijft de schermstroom over. In figuur 4.27 wordt de schermstroom vergeleken met de common-mode stroom i_{cm} . Als de capacitieve stroom inderdaad naar 'aarde' zou afvloeien dan zou i_{cm} ongeveer twee maal i_{scherm} moeten zijn. Uit de figuur blijkt dat de schermstroom veel groter is dan de common-mode stroom. De aanname dat de schermstroom 'oversteekt' over de afscherming is bewezen.



figuur 4.27: schermstroom en common-mode stroom

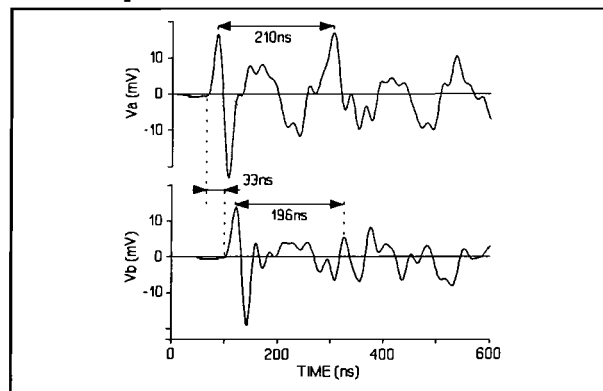
De metingen aan de meetlussen in het laboratorium zijn tot nu toe gedaan bij 'lage' frequenties (ongeveer 150 kHz). Deze metingen zullen in de toekomst herhaald worden bij vele hogere frequenties (> 1 MHz). Het injectiecircuit zal dan anders zijn. Met een pulsbron worden in de 'grote' lus pulsen geïnjecteerd met een duur van 20 ns en zeer steile flanken van 0.5 ns. Op deze manier wordt de werkelijkheid van een meetlus tussen de kokers van een railkokersysteem beter benaderd. De bandbreedte van de lussen kan dan bepaald worden.

5 METINGEN MET MEETLUSSEN IN CENTRALES

Met de meetlussen 3 en 4 zijn verschillende meetsessies uitgevoerd aan de Hemweg-6. Met de lussen 5 tot en met 8 is één meetsessie gedaan aan de Amer-8. De samenwerking tussen de elektriciteitsproducent UNA (Hemweg-centrale) en de T.U.E. op het gebied van registratie van pd's bestaat langer dan die tussen het EPZ (Amer-centrale) en de T.U.E. De metingen aan de Hemweg-6 zijn door deze extra ervaring in een verder gevorderd stadium dan de metingen aan de Amer-8. Mede hierdoor en het verschil in constructie van het railkokersysteem tussen beide eenheden worden de meetresultaten apart behandeld.

5.1 Metingen aan Hemweg-6

Voor metingen aan de Hemweg-6 zijn twee meetlussen beschikbaar (in de toekomst zullen ook de lussen van Amer-8 gebruikt worden). Met deze twee lussen zijn er verschillende meetconfiguraties te bedenken. De lussen worden op een onderlinge afstand tussen gelijke fasen gelegd. Wanneer er een pd optreedt in de generator, zal de lus het dichtst bij de generator als eerste de pd registreren. Na een bepaalde looptijd, evenredig met de afstand tussen de lussen, zal de tweede lus dezelfde pd waarnemen. Op deze manier kan bepaald worden of de oorsprong van een pd in de generator ligt of niet. Het is nl. ook mogelijk dat een pd optreedt in het isolatiemateriaal van de step-up transformator. In dit geval zal eerst de lus het verst van de generator verwijderd de pd registreren. In figuur 5.1 is een meting gegeven waarmee aangetoond wordt dat op deze manier de herkomst van een pd is te achterhalen.



figuur 5.1: bepalen herkomst pd en reflectietijd

De meetlussen zijn geplaatst tussen de fasen W en V op een onderlinge afstand van 1.89 m. Het signaal a (uit bovenstaande figuur) is van de lus het dichtst bij de generator. Een e.m.-golf verplaatst zich met een snelheid $v = 3 \cdot 10^8$ m/s. De looptijd t_v is:

$$t_v = \frac{1}{v} \cdot l = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 1.89 = 6.3 \text{ ns}$$

Het kabellengteverschil tussen de meetkabels is 5.14 m. Voor dit lengteverschil moet gecorrigeerd worden. De snelheid van een e.m.-golf over de coax meetkabel is $2 \cdot 10^8$ m/s. De extra vertragingstijd is:

$$t_{v,coax} = \frac{1}{2 \cdot 10^8} \cdot 5.14 = 25.7 \text{ ns}$$

De totale looptijd is:

$$t_{tot} = t_v + t_{v,coax} = 32 \text{ ns}$$

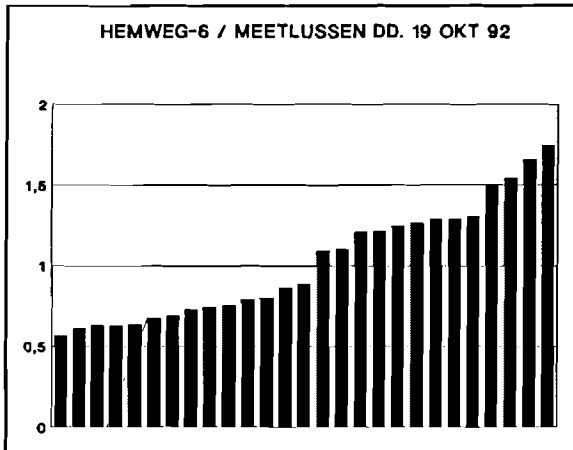
De gemeten vertragingstijd is 33 ns (zie figuur 5.1). In dit geval is de gemeten pd afkomstig uit de generator.

Bij de step-up transformator zal het signaal gedeeltelijk reflecteren omdat de transmissielijnstructuur van het railkokersysteem verstoord wordt. Ook deze gereflecteerde golf zal geregistreerd worden door de lussen. De afstand tussen de lus en de step-up transformator is ongeveer 30 m. De reflectietijd is:

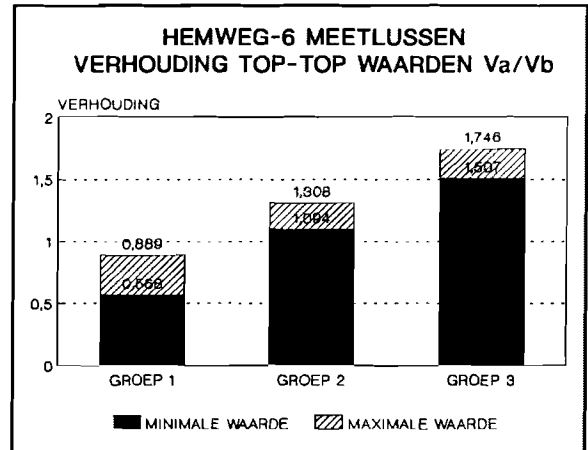
$$t_{refl} = \frac{1}{v} \cdot 2l = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 2 \cdot 30 = 200 \text{ ns}$$

Deze waarde is nagenoeg gelijk aan de gemeten waarde (zie figuur 5.1).

Er kan ook met twee meetlussen gelijktijdig tussen de fasen U-W en W-V gemeten worden. Deze meting wordt meerdere malen uitgevoerd, zodat er wat meer gezegd kan worden over de metingen m.b.t. ruis en betrouwbaarheid. Na iedere meting wordt de top-top waarde van de uitgangsspanning van elke lus genoteerd. De verhouding tussen deze waarden wordt bepaald door ze op elkaar te delen: U-W/W-V. In figuur 5.2 is een overzicht gegeven van de verhouding U-W/W-V als functie van de metingen.



figuur 5.2: verhoudingen U-W/W-V (gesorteerd)



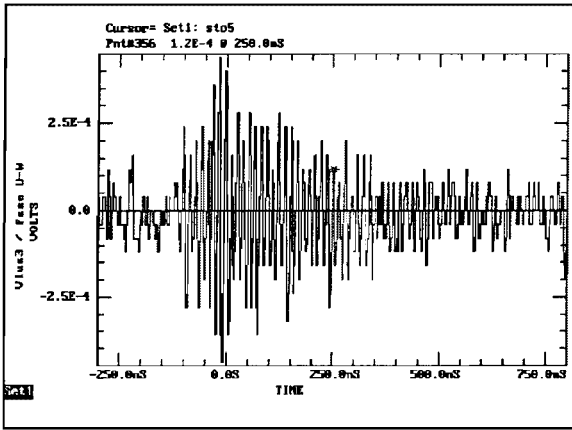
figuur 5.3: diverse groepen

De verhouding U-W/W-V is gesorteerd op grootte. Er zijn drie groepen te herkennen:

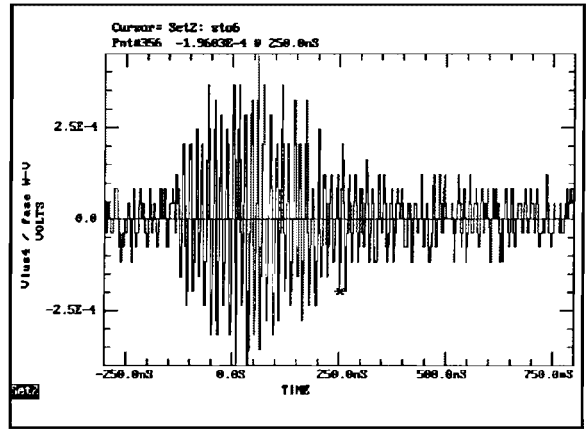
- groep 1 U-W/W-V < 1
- groep 2 U-W/W-V ≈ 1
- groep 3 U-W/W-V > 1

Wanneer de signalen uit de drie groepen afzonderlijk bekeken worden blijkt dat groep 1 de meest betrouwbare groep is. Van de 14 metingen zijn 12 signalen betrouwbaar en slechts 2 onbetrouwbaar (veel ruis). De in totaal 13 metingen uit de groepen 2 en 3 bevatten veel ruis en zijn van een lage amplitude. Alle betrouwbare metingen met tegengestelde polariteit zijn langzaam ($f < 10 \text{ MHz}$) en komen voor in groep 1. Metingen uit groep 2 en 3 zijn van gelijke polariteit. In figuur 5.3 is een overzicht gegeven van de spreiding in elke groep. Uit deze figuur blijkt dat groep 1 ongeveer de reciproke is van groep 3. In totaal zijn er 27 metingen gedaan. Er zijn echter veel meer goede metingen nodig om een goede uitspraak over deze meting te kunnen doen. Met name het triggerniveau moet gevarieerd worden tijdens deze metingen om zo het hele spectrum aan signalen binnen te halen.

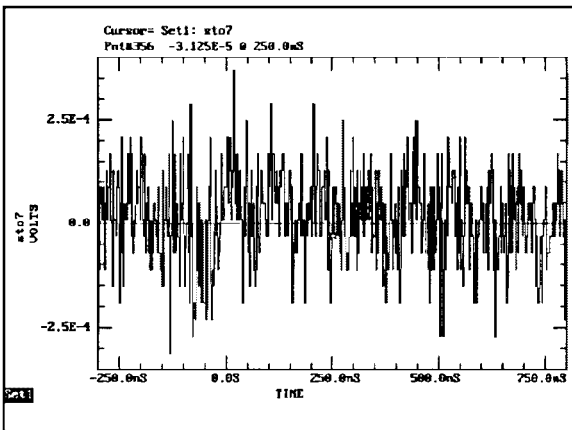
Een nulmeting is uitgevoerd om aan te tonen dat de met de meetlus geregistreerde signalen geen stoorsignalen zijn. De lus wordt op de BNC-aansluiting kortgesloten. Er wordt verder onder normale omstandigheden gemeten. De lusspanningen van de lussen 3 en 4 tussen de railkokers van fasen U-W en W-V en de common-mode stroom worden geregistreerd (zie figuur 5.4 t/m 5.6).



figuur 5.4: uitgangsspanning lus 3



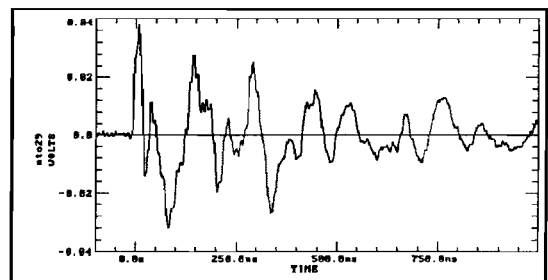
figuur 5.5: uitgangsspanning lus 4



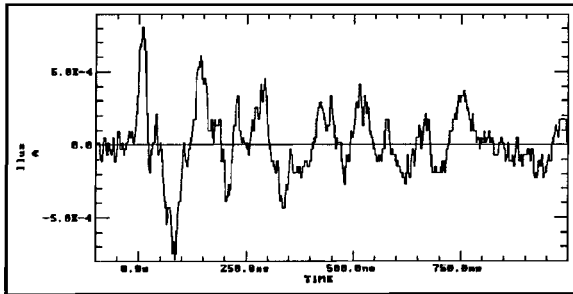
figuur 5.6: common-mode stroom van lus 3

Vanwege een foute configuratie van de gebruikte digitale scoop (DSA 602A) mogen er geen conclusies t.a.v. tijdsverschillen getrokken worden. Bij het meten zijn we er van uitgegaan dat de vier gemeten signalen gelijktijdig geregistreerd en vastgelegd worden. Dit was niet zo. Soms zijn er twee en soms drie signalen gelijktijdig gemeten. Uit de amplituden van de signalen kan afgeleid worden dat de uitgangsspanning van een kortgesloten meetlus V_{lus} kleiner is dan 0.5 mV (te verwaarlozen). De common-mode stroom is nagenoeg nul. Tijdens het meten met de meetlussen koppelen er dus geen stoorsignalen in op de lus of meetkabel.

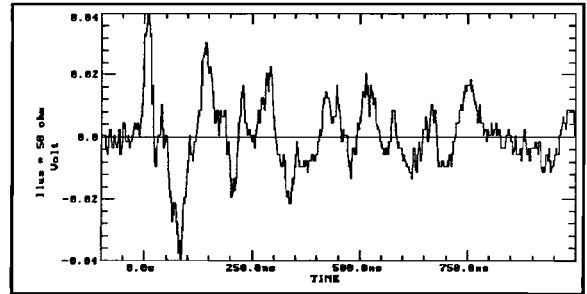
De ingangsimpedantie van de DSA is tijdens de metingen met de meetlus altijd 50Ω . In de volgende meting wordt nagegaan of de uitgangsspanning van de lus inderdaad gelijk is aan de stroom door de lus maal 50Ω . De gemeten signalen in de figuren 5.7 t/m 5.9 tonen dit aan. In figuur 5.7 is de uitgangsspanning van een meetlus gegeven. Op de volgende pagina is, in figuur 5.8 de gemeten stroom door de lus gegeven. Deze is gemeten met een Ailtech stroomprobe. Wanneer we het signaal uit figuur 5.7 vergelijken met dat uit figuur 5.9 (lusstroom maal 50Ω), dan is er duidelijk uit op te maken dat V_{lus} inderdaad gelijk is aan i_{lus} maal 50Ω .



figuur 5.7: uitgangsspanning meetlus



figuur 5.8: stroom door lus



figuur 5.9: stroom door lus * 50 ohm

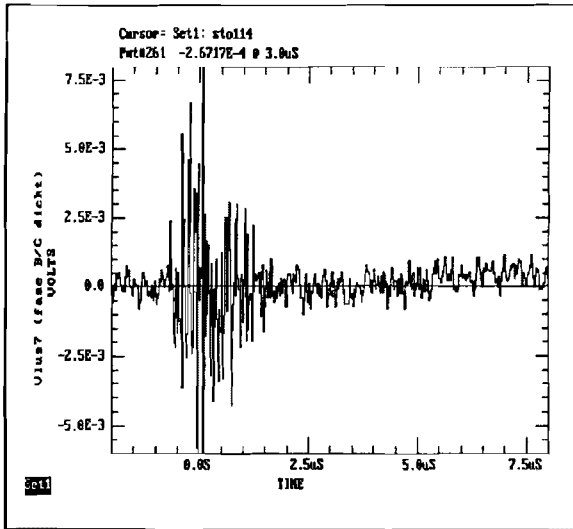
In 4.3.3 is de stroomhuishouding in de meetlus onderzocht. Daarbij werden de schermstromen en common-mode stroom nader bekeken. Het meten van deze stromen is ook gedaan bij een meetlus 'in bedrijf'. De resultaten van deze metingen zijn echter onbruikbaar omdat er voor een verkeerde configuratie van de DSA is gekozen. Deze metingen dienen daarom herhaald te worden.

5.2 Metingen aan Amer-8

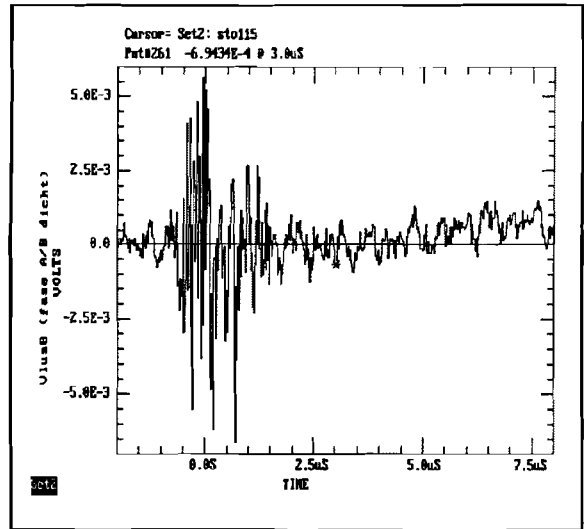
In totaal vier meetlussen zijn gebruikt bij metingen aan Amer-8. Twee lussen worden op een onderlinge afstand tussen de kokers van fasen U-W gelegd. De andere twee tussen de fasen W-V. Omdat er geen fasenaanduiding op het railkokersysteem aangebracht was, hebben we een eigen code ingevoerd, fase A, B en C. Bij de meeste metingen werden er vier signalen gelijktijdig gemeten. Naderhand blijkt dat hierbij een meetfout is gemaakt. Door een foute configuratie van de DSA worden niet alle vier signalen gelijktijdig geregistreerd. Dit houdt in dat er telkens maar twee of drie signalen gelijktijdig gemeten zijn. De resterende signalen worden bij een volgende triggerpuls gemeten.

Zoals al eerder vermeld is, is de constructie van het railkokersysteem van Amer-8 anders dan van Hemweg-6. Van het H-veld van de railsstroom zal uiteindelijk 5 % buiten de kokers aanwezig zijn (Hemweg-6: 60 %). Dat de veldsterkte buiten de kokers te zwak is om daarin partiële ontladingen te ontdekken blijkt uit de metingen. Omdat de lussen op een onderlinge afstand van elkaar lagen zou het ook mogelijk moeten zijn om looptijden te meten. Met deze meting kan aangetoond worden of een pd-sigitaal uit de generator komt of niet (zie vorige paragraaf). Ook deze looptijden konden niet uit de metingen afgeleid worden. Vaak was het zo dat twee lussen gelijktijdig hetzelfde signaal oppikten.

Uit de volgende meting blijkt dat de lussen inderdaad soms hetzelfde signaal oppikken.



figuur 5.10: uitgangsspanning lus 7

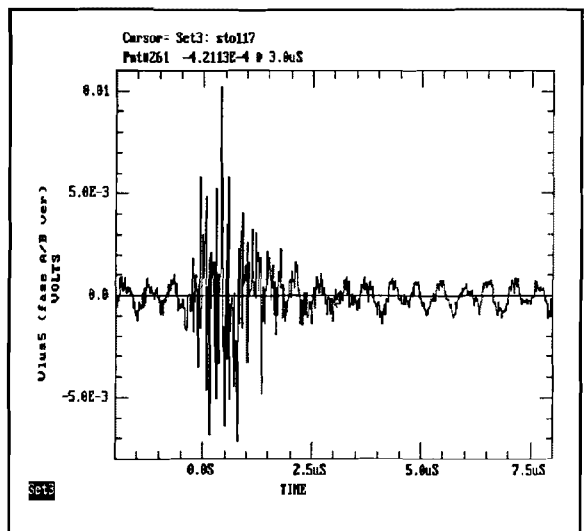


figuur 5.11: uitgangsspanning lus 8

De signalen uit de figuren 5.10, 5.11 en 5.12 zijn gelijktijdig gemeten met meetlussen. De lokatie van de meetlussen en de fasen waartussen ze geplaatst zijn is verschillend:

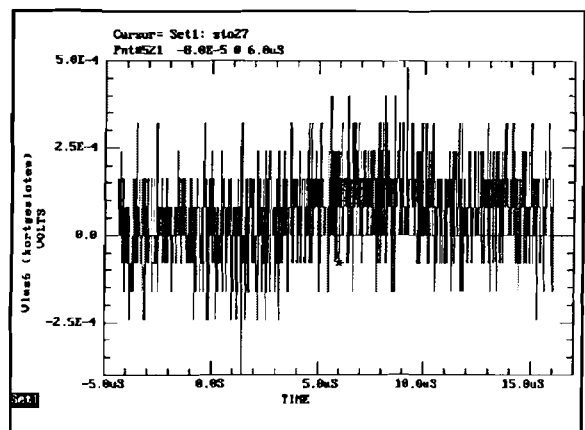
figuur:	lokatie lus:	lusnr.:	fasen:
5.10	dicht bij generator	7	B/C
5.11	dicht bij generator	8	A/B
5.12	ver van generator	5	A/B

De vorm van de signalen is voor allen gelijk. Verder zijn er in de figuren geen onderlinge looptijden te ontdekken, terwijl de afstand tussen lus 5 en 8 ongeveer 10 meter (komt overeen met 33 ns) bedroeg.



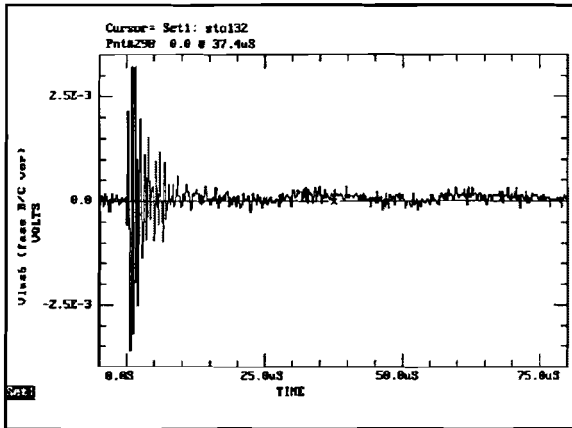
figuur 5.12: uitgangsspanning lus 5

Om aan te tonen dat er geen storingen gemeten zijn die inkoppelen via de meetkabels van de meetlussen, is een kortsluitmeting uitgevoerd. Een kortsluitstukje wordt gemonteerd op de connector van de meetlus. Het gemeten signaal is in figuur 5.13 gegeven. Dit is enkel bitruis, zodat aangenomen mag worden dat er geen storing inkoppelt via meetkabels.

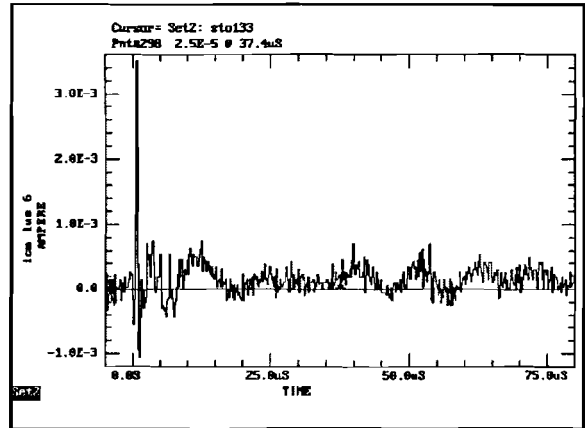


figuur 5.13: V_{bus6} (kortgesloten)

Een meting, waarvan hieronder de resultaten gegeven zijn, is uitgevoerd om aan te tonen dat de schermstroom (zie ook 4.3.3) van de ene koker 'oversteekt' via het E-veld scherm naar de overliggende koker.



figuur 5.14: uitgangsspanning lus 6



figuur 5.15: i_{cm} meetlus 6

De vorm van de common-mode stroom (zie figuur 5.15) komt niet overeen met die van de bijbehorende lusspanning (figuur 5.14). Ook de amplitude van de common-mode stroom toont aan dat er nauwelijks een stroom loopt via de afscherming van de meetkabel. Hiermee wordt opnieuw bovenvermelde stelling bewezen.

De meetlussen, die gebruikt zijn voor de Hemweg-6, zijn verbeterd en aangepast op de afmetingen van het railkokersysteem van de Amer-8. De mechanische constructie is sterker en de bandbreedte is toegenomen (van ± 27 MHz voor de meetlussen van de Hemweg-6 naar ± 35 MHz voor de nieuwe lussen). Met diverse metingen, in het laboratorium en in centrales, is aangetoond dat de capacatieve stroom, ten gevolge van de capacatieve koppeling tussen kokerwand en E-veld afscherming van de meetlus, niet via de mantel van de meetkabel naar 'aarde' afvloeit, maar oversteekt van de ene kokerwand via de afscherming naar de andere kokerwand. De positie van de koppeling tussen de mantel van de meetkabel en E-veld afscherming is daardoor niet van belang voor een juiste werking van de meetlus.

Na verschillende metingen gedaan te hebben met de meetlus blijkt dat het een geschikte sensor is voor het registreren van pd's mits het veld buiten de kokers van het railkokersysteem t.g.v. de railsstroom sterk genoeg is, zoals bij Hemweg-6.

Aan de meetlus zijn echter enkele nadelen verbonden, zo is het niet mogelijk om goed te kunnen bepalen in welke fase de pd optreedt. Verder kan met deze lussen niet aangetoond worden waar in de generator de pd zich voordoet, wat toch een uitgangspunt is van het onderzoek. Er is bijvoorbeeld geen indicatie mogelijk van de afstand die een lopende golf heeft afgelegd vóór deze gedetecteerd wordt, omdat bij voortplanting van de golf in de statorwikkelingen, overspraak naar andere fasen optreedt, die ook gemeten wordt. De richting van een golf ten gevolge van een pd kan met de meetlussen overigens wel bepaald worden door twee meetlussen op een onderlinge afstand tussen gelijke fasen te plaatsen. Het signaal wordt eerst geregistreerd door de dichtst bij de generator geplaatste meetlus, daarna, na een bepaalde looptijd (evenredig met de onderlinge afstand), door de tweede lus.

De meetlus heeft het E.M.C.-technische nadeel dat ze gevoelig zijn voor alle hoogfrequente externe magnetische velden. Dit levert bij metingen in elektriciteitscentrales nogal wat problemen op, omdat daar allerlei hoogfrequente 'stoor'-signalen aanwezig zijn. Deze zijn bijvoorbeeld afkomstig van:

- regel- en bewakingsleidingen
- vonkende borstels van machines en pompen
- thyristoren die gebruikt worden voor de bekrachtiging van de rotor
- radiografisch bestuurde kranen in de omgeving van de generator.

In de toekomst zullen er meer metingen aan de Hemweg-6 gedaan moeten worden, waarbij het triggerniveau varieert. Op deze manier kan een beter overzicht verkregen worden van amplitudeverhoudingen van pd's in verschillende fasen. De meetlussen van de Amer-8 kunnen eventueel gebruikt worden. Met een juiste configuratie van de DSA is het mogelijk om met vier kanalen (lees: lussen) gelijktijdig te meten.

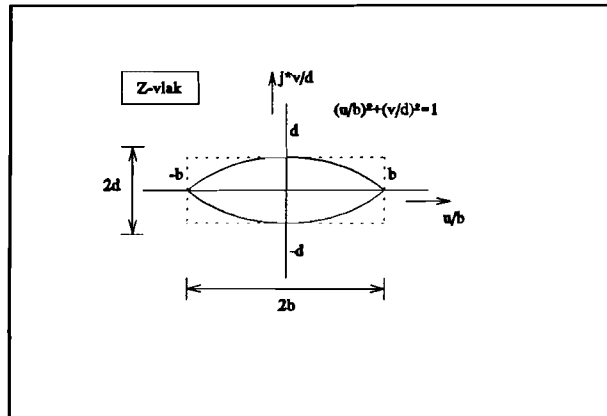
De metingen in het laboratorium aan de meetlussen zullen voortgezet moeten worden. Het injectiecircuut zal veranderd moeten worden om metingen uit te kunnen voeren bij hogere frequenties. De lussen kunnen getest worden op bijvoorbeeld oscillatieverschijnselen en ook de stroomhuishouding in de meetlus kan onderzocht worden.

Geraadpleegde literatuur

- [1] Pemen, A.J.M., *Sensors for partial discharge monitoring of turbo generators*, Eindhoven, mei 1993
- [2] Senff, J.J., van der Laan, P.C.T., Antonides, H., Hosselet, L.M.L.F., *Shielding properties of isolated-phase bussystems*, I.E.E.E. Transactions on Power, Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, pp. 2231-2238, 1983
- [3] van Houten, M.A., *Electromagnetic compatibility in high-voltage engineering*, p. 70, oktober 1990
- [4] Kaden, H., *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik*, 2^e druk, Springer, Berlin/Heidelberg/Göttingen/München, 1959

BIJLAGE 1: AFLEIDING ZELFINDUCTIE LUS

Bij deze afleiding wordt het veld rond een strip berekend door de stripvorm (rechthoekig) te benaderen door een ellips (zie figuur A.1).



figuur A.1: Benadering rechthoekige strip

Door deze benadering, waarbij de doorsnede van de strip in het complexe z-vlak is afgebeeld, zoals in figuur A.1 is weergegeven, is het mogelijk met behulp van een conforme afbeelding het magneetveld om de strip te berekenen [4]. De magnetische veldsterkte als functie van z is dan:

$$H(z) = \frac{I}{2\pi \sqrt{z^2 - c^2}} \quad \text{met } c = \sqrt{b^2 - d^2}$$

Substitutie van $z = u + jv$ levert:

$$H(u+jv) = \frac{I}{2\pi \sqrt{(u+jv)^2 - c^2}}$$

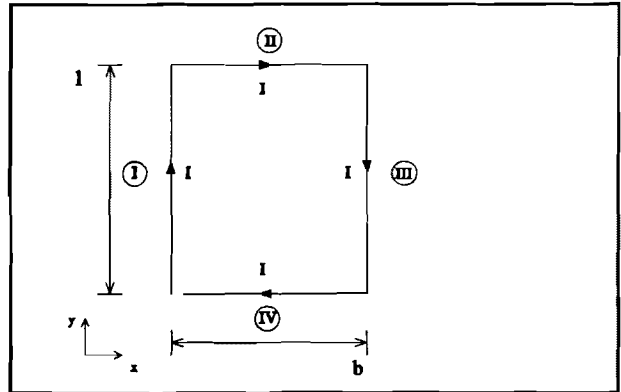
Als nu het veld op de v-as beschouwd wordt dan kan voorgaande formule vereenvoudigd worden door de substitutie $u=0$.

$$\begin{aligned} H(jv) &= \frac{I}{2\pi \sqrt{(jv)^2 - c^2}} = \frac{I}{2\pi \sqrt{-v^2 - c^2}} = \frac{I}{2\pi \sqrt{-1(v^2 + c^2)}} \\ &= \frac{I}{2\pi j \sqrt{v^2 + c^2}} \end{aligned}$$

Voor de modulus van de magnetische inductie geldt dan:

$$B(v)|_{u=0} = \mu_0 \cdot H(v) = \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{v^2 + c^2}}$$

Met deze afleiding is het mogelijk om de totale magnetische flux door de lus te bepalen. De lus wordt opgedeeld in vier draadstukken (zie figuur A.2) genummerd I t/m IV.



figuur A.2: Integratiegebieden voor meetlus

Door de strip loopt overal dezelfde stroom I, zodat de bijdrage van de stroom, aan de totale flux, in gebied I hetzelfde is als in gebied III. Hetzelfde geldt voor de gebieden II en IV.

De totale flux ten gevolge van stroom I wordt dan:

$$\phi_{\text{tot}} = \sum_{i=I}^{IV} \phi_i = B_i \cdot A = 2(\phi_I + \phi_{II}) \quad \text{immers } \phi_I = \phi_{III} \text{ en } \phi_{II} = \phi_{IV}$$

Voor ϕ_I geldt:

$$\phi_I = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot l}{2\pi} \cdot \int_0^b \frac{1}{\sqrt{x^2 + c^2}} dx = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot l}{2\pi} \cdot \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + c^2}}{c}$$

en voor ϕ_{II} :

$$\phi_{II} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot b}{2\pi} \cdot \int_0^l \frac{1}{\sqrt{y^2 + c^2}} dy = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot b}{2\pi} \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + c^2}}{c}$$

De inductiviteit van de lus is:

$$L_{\text{lus}} = \frac{2(\phi_I + \phi_{II})}{I}$$

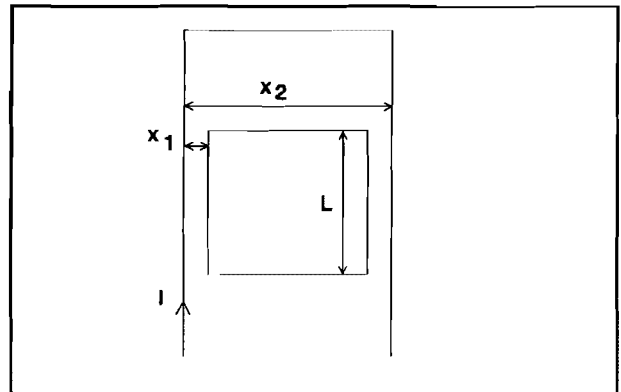
BIJLAGE 2: AFLEIDING WEDERZIJDSE INDUCTIE TUSSEN MEETLUS EN MEETCIJCUIT

De methode waarop de wederzijdse inductie tussen meetlus en meetcircuit wordt bepaald is dezelfde als in bijlage 1. De flux die door de meetlus wordt omvat is:

$$\phi_{luc} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot I}{2\pi} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{x^2 + c^2}} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot I}{2\pi} \cdot \ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + c^2}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + c^2}} \quad \text{met } c = \sqrt{b_1^2 - d^2}$$

met:

- l = lengte lange zijde lus
(0.35 m)
- x1 = afstand tussen meetlus en grote lus
(0.05 m)
- x2 = afstand tussen de strips grote lus
(0.48 m)
- b1 = de halve hoogte van de lus
(0.0125 m)
- d = de halve dikte van de lus
(0.0005 m)



figuur B.1: meetlus in meetcircuit

De wederzijdse inductie M is dan:

$$M = \frac{\phi_{luc}}{I} = 314 \text{ nH}$$

Lijst van gebruikte symbolen

A	=	oppervlak
B	=	magnetische inductie
b	=	breedte
C	=	capaciteit
d	=	afstand
ϵ_0	=	permittiviteit van vacuüm
ϵ_r	=	relatieve permeabiliteit
ϕ	=	magnetische flux
f	=	frequentie
H	=	magnetische veldsterkte
I, i	=	stroom
j	=	imaginaire eenheid
λ	=	golflengte
L	=	zelfinductie
l	=	lengte
M	=	coëfficiënt van wederzijdse inductie
ω	=	hoekfrequentie
R	=	weerstand
U, V	=	spanning
Z	=	impedantie
Z_0	=	karakteristieke impedantie