

MASTER

Het verlies In de koperen dempercilinder van een sneldraaiende generator bekrachtigd met permanente magneten

Kamerbeek, F.A.

Award date:
1995

[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

Afstudeerverslag

Het verlies in de koperen dempercilinder
van een sneldraaiende generator
bekrachtigd met permanente magneten

EMV 95-20

F.A.Kamerbeek

Hoogleraar: Prof.dr.ir. E.M.H Kamerbeek

Mentor(en): Ir. R.W.P. Kerkenaar
Dr.ir. L.J.J. Offringa
Ir. L.J.F. van der Veen

Eindhoven, 6 december 1995.

Samenvatting

De ontwikkeling van een sneldraaiende generator, bekrachtigd met permanente magneten, is voortgekomen uit de wens om een elektrische generator direct te koppelen met een gasturbine (1,4 MW, 18.000 omw/min). Vanwege het toepassen van permanente magneten in de rotor en het gebruik van een bandage van een composiet van epoxy en koolstofvezels dient de temperatuur van de rotor beperkt te blijven. Dit betekent (onder andere) dat het in de rotor gedissipeerde vermogen -voornamelijk als gevolg van inductiepulsaties- beperkt dient te worden. Dit wordt bereikt door concentrisch om de rotor en de magneten een koperen cilinder (demper) te plaatsen.

In dit afstudeerverslag wordt langs theoretische weg het in de demper gedissipeerde vermogen (of liever de dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen) in de stationaire toestand bepaald. Verder is een meetmethode aangegeven waarmee in de stationaire toestand het verlies voor afzonderlijke frequentiecomponenten wordt geverifieerd.

Een bestaand tweedimensionaal model is verder uitgewerkt waarmee de dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen berekend kan worden; de eindeffecten (de stromen in de tangentiële richting in de randen van de demper) blijven hierin buiten beschouwing. De berekende dichtheid van het gedissipeerde vermogen is geverifieerd door middel van het meten van temperatuurstijgingen; de via de metingen bepaalde verliesdichtheid is in het midden van de cilinder circa 8% lager dan de overeenkomstige berekende verliesdichtheid.

Inhoudsopgave

Voorwoord	v
Hoofdstukken	
1. Inleiding	1
1.1. Waarom een sneldraaiende generator?	1
1.2. Waarom een generator met permanente magneten?	2
1.3. Het lopende onderzoek	3
1.3.1. De opbouw van de generator	4
1.3.2. De opbouw van de vermogenselektronische omzetter	6
1.4. Het afstudeeronderzoek	7
2. Theoretische bepaling van het rotorverlies	9
2.1. Beschrijving van het rotorverliesmodel	9
2.1.1. Bepaling van de stroombelegging op de statorboring	9
2.1.2. Bepaling van de stroombelegging op de demper	16
2.1.3. Bepaling van het verlies van één harmonische combinatie	20
2.1.4. Bepaling van het verlies van alle harmonische combinaties	23
2.2. Bepaling van het rotorverlies	25
2.2.1. Algemene werkwijze bij de bepaling van het rotorverlies	25
2.2.2. Het verlies in de demper van een drie-fasige motor	27
2.2.3. Het verlies in de demper van een semi-18-fasige generator	30
3. Praktische verificatie van het rotorverlies	33
3.1. Theoretische bepaling van de temperatuurverdeling	34
3.2. Theoretische beschouwing over temperatuurmetingen	36
3.3. Praktische uitwerking van de temperatuurmetingen	39
3.3.1. De elektrische configuratie	39
3.3.2. De thermische configuratie	40
3.3.3. De procedure rond de metingen	40
3.3.4. Opmerking over de hier beschouwde configuratie	41
3.3.5. De metingen	42
3.3.6. Bepaling van de grootte van de axiale warmtestroom	49
3.4. Conclusies met betrekking tot de temperatuurmetingen	51
4. Conclusies en aanbevelingen	53
4.1. De conclusies	53
4.2. De aanbevelingen	53

Literatuurlijst	55
Symbolenlijst	57
Bijlagen	
1. Literatuuronderzoek	61
2. Gegevens van de machines	79
3. Afleidingen en berekeningen	83
4. Afdrukken van de gebruikte MathCad bestanden	103
5. Afdrukken van de gebruikte MatLab bestanden	109
6. Gegevens van de metingen	115
7. Gegevens van de gebruikte apparatuur	129
8. Gegevens van de gebruikte software	131
9. Beschrijving van de inhoud van de diskette's	133

Voorwoord

Het voor u liggende verslag is het resultaat van het afstudeeronderzoek bij de vakgroep Elektromechanica en vermogenselektronica van de Faculteit Elektrotechniek der Technische Universiteit Eindhoven.

De notaties zoals die in dit verslag gebruikt worden zijn zoveel mogelijk gelijk aan de gebruikelijk notaties, toch zijn er enkele afwijkingen. Hieronder volgen enkele aanwijzingen die van belang zijn voor het lezen van het verslag.

Verzamelingen:

Voor de verzamelingen van de *natuurlijke getallen*, *gehele getallen*, *rationale getallen*, *reële getallen* en *complexe getallen* worden de symbolen \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{Q} , \mathbb{R} en \mathbb{C} gebruikt. Verder wordt de ‘backslash’ ook gebruikt. De betekenis van $k \in \mathbb{N} \setminus \{0,1,2\}$ is ‘*k is element van de natuurlijke getallen uitgezonderd 0, 1 en 2.*’

Amplitudes:

Voor de amplitudes van periodieke functies wordt het ‘dakje’ gebruikt, bijvoorbeeld \hat{x} . Amplitudes kunnen (hier) ook negatief zijn, bijvoorbeeld bij Fourier-coëfficiënten.

Vectoren:

Voor vectoren wordt het ‘pijlte’ gebruikt, bijvoorbeeld \vec{X} . Voor het inwendig produkt van vectoren wordt de vermenigvuldigingssymbool gebruikt, bijvoorbeeld $\vec{X} \cdot \vec{Y}$, voor het uitwendige produkt van vectoren wordt een ‘kruis’ gebruikt, bijvoorbeeld $\vec{X} \times \vec{Y}$.

Plus-minus-tekens:

In tegenstelling tot wat gebruikelijk is wordt met een plus-minus-teken aangegeven dat er òf een plus òf een min moet staan. Er staat bijvoorbeeld $\cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$, voor bepaalde waarden van ν en κ moet er $\cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$ staan, voor andere waarden van ν en κ moet er $\cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$ staan. Als er binnen één vergelijking meerdere plus-minus-tekens staan dan gelden òf alle plus-tekens òf alle min-tekens.

Literatuur referenties:

Verwijzingen naar gebruikte literatuur worden aangegeven met behulp van de vierkante haken, bijvoorbeeld [1]. Binnen deze haken kan na het nummer van de referentie nog aanvullende informatie staan, bijvoorbeeld [1, hoofdstuk 1], een verwijzing naar [1], in het bijzonder hoofdstuk 1.

1. Inleiding

De vakgroep Elektromechanica en Vermogenselektronica (EMV) verricht sinds twee jaar onderzoek aan sneldraaiende generatoren. Dit onderzoek is voortgekomen uit de wens om een gasturbine direct (zonder tandwielkast) te koppelen aan een elektrische generator.

In paragraaf 1.1 en 1.2 wordt ingegaan op de redenen waarom voor een sneldraaiende generator met permanente magneten wordt gekozen. In die paragraaf wordt ook een aantal reeds gemaakte keuzes weergegeven. In paragraaf 1.3 wordt nader ingegaan op het lopende onderzoek. In paragraaf 1.4 wordt beschreven welk onderzoek aan dit verslag ten grondslag ligt.

1.1 Waarom een sneldraaiende generator?

De te ontwikkelen sneldraaiende generator is in het bijzonder bestemd om te worden toegepast in combinatie met een gasturbine van de firma HERON. Deze turbine is nu nog voorzien van een tandwielkast, waarmee het constante turbinetoerental van 18.000 omw/min wordt vertraagd tot 1.500 omw/min, zodat een conventionele generator gebruikt kan worden om elektrische spanning met een gebruikelijke frequentie van 50 Hz (of 60 Hz) op te wekken. De generator dient echter direct gekoppeld te worden aan de turbine, zodat de tandwielkast komt te vervallen. In plaats van de tandwielkast komt nu een 'elektronische tandwielkast', een vermogenselektronische omzetter. Deze bestaat uit een (gestuurde) gelijkrichter en een invertor. Het turbinetoerental hoeft nu niet meer constant te zijn en kan optimaal gekozen worden.

Er zijn meerdere redenen aan te voeren om de generator direct (dus niet via een tandwielkast) te koppelen aan een gasturbine. Enkele redenen zijn (zie ook [1]):

- de besparing van gewicht en volume;

Een sneldraaiende generator kan veel kleiner uitgevoerd worden dan een conventionele generator met hetzelfde vermogen; bovendien kan een omvangrijke en dure tandwielkast achterwege blijven.

- de besparing van onderhoud;

Een vermogenselektronische omzetter heeft nauwelijks of geen slijtage vergeleken met een tandwielkast. Een vermogenselektronische omzetter vergt bovendien minder onderhoud dan een tandwielkast.

- de besparing van kosten;

Als er eenmaal een ontwerp is van een sneldraaiende generator, is (op basis van het verschil in massa) de verwachting dat de produktiekosten van een sneldraaiende generator met vermogenselektronische omzetter aanzienlijk lager zijn dan die van een conventionele generator met een tandwielkast.

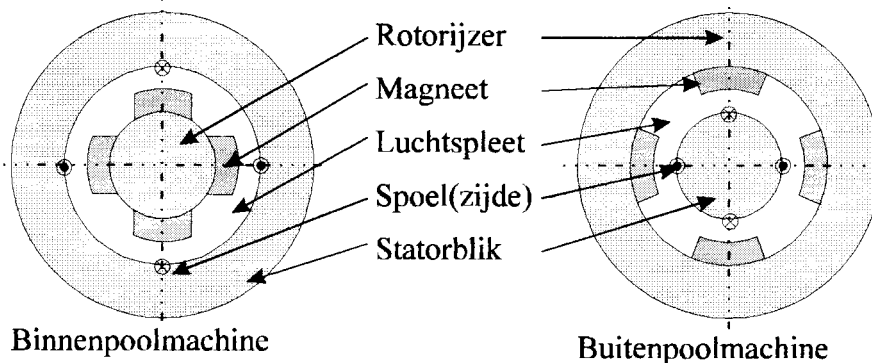
- de mogelijkheid om een elektrische spanning met een constante frequentie op te wekken, terwijl het turbinetoerental niet meer constant hoeft te zijn.

Een sneldraaiende generator met een vermogenselektronische omzetter heeft de eigenschap dat het toerental van de turbine geen vaste verhouding hoeft te hebben met de netfrequentie, dit in tegenstelling tot een conventionele generator met een tandwielkast. Hierdoor kan het deellastrendement van de turbine verbeterd worden.

1.2 Waarom een generator met permanente magneten?

Sneldraaiende generatoren vragen een ander ontwerp dan conventionele generatoren. Het hoge toerental stelt grenzen aan de rotordiameter. De diameter wordt voornamelijk begrensd door de materiaalspanningen tengevolge van de centrifugaalkrachten (evenredig met de hoeksnelheid in het kwadraat en evenredig met de straal van de rotor).

In [2, appendix Q] wordt ingegaan op de verschillende machinetypen die geschikt zijn voor het ontwerp van een sneldraaiende generator. Uiteindelijk is daar gekozen voor een synchrone machine met permanente magneten. Dit is gebaseerd op een afweging van voor- en nadelen, en de verwachting dat dit type machine bij de beoogde toepassing het kleinste aantal ontwerp-, constructie- en bedrijfsproblemen zal opleveren.



Figuur 1.1 Schematische voorstelling van een binnenpool- en een buitenpoolmachine.

De synchrone machine met permanente magneten bestaat in twee constructieve varianten, namelijk als buitenpoolmachine en als binnenpoolmachine. In figuur 1.1 is een binnenpoolmachine en een buitenpoolmachine geschetst. Bij een buitenpoolmachine worden de magneten aan de binnenzijde van het cilindrische buitendeel bevestigd, bij een

binnenpoolmachine aan de buitenzijde van het cilindrische binnendeel. Om elektrische verbindingen met draaiende delen te vermijden wordt het deel waarop de magneten gemonteerd zijn als roterend deel (de rotor) uitgevoerd en worden de wikkelingen op het stilstaande deel (de stator) aangebracht.

In [2] is voor een binnenpoolmachine gekozen. De rotor bestaat uit een massief stalen deel, met daarop aangebrachte magneten. Om de demper en de magneten is een dunwandige koperen dempercilinder aangebracht. Er is een constructie nodig om de centrifugaalkrachten op de magneten en de demper op te vangen. Er is gekozen voor een omspanning van de magneten en de demper met een bandage. De bandage bestaat uit een composiet van epoxy en koolstofvezels die gewikkeld is om de koperen cilinder.

De dunwandige koperen cilinder wordt toegepast om de magneten af te schermen van asynchrone componenten van het inductieveld in de luchtspleet. De stromen die de asynchrone componenten van het inductieveld in de luchtspleet veroorzaken lopen nu in de demper en niet in de magneten. Zodoende zal er nauwelijks vermogen gedissipeerd worden in de magneten als de koperen demper wordt toegepast. De functie van de koperen demper is dan ook het beperken van de dissipatie in de magneten en zodoende te voorkomen dat de magneten te heet worden. De stromen in de demper zorgen voor dissipatie in de demper. De opgewekte warmte moet worden afgevoerd omdat anders de temperatuur van de demper te hoog oploopt. De demper moet van materiaal met een relatieve permeabiliteit van ongeveer 1 gemaakt zijn omdat de magneten anders, in magnetisch opzicht, kortgesloten worden. Een geschikt materiaal voor een dempercilinder is koper, omdat de relatieve permeabiliteit van koper ongeveer 1 is, bovendien is de soortelijke weerstand van koper laag.

Een lage relatieve permeabiliteit zorgt er tevens voor dat het skin-effect weinig invloed heeft. Het skin-effect houdt in dat wisselstromen bij een toenemende frequentie in een steeds dunnere schil aan het oppervlakte van een geleider lopen. Een kleine invloed van het skin-effect en een lage soortelijke weerstand zorgen ervoor dat het opgewekte vermogen in de dempercilinder beperkt blijft.

1.3 Het lopende onderzoek

Het nu lopende onderzoek van de vakgroep EMV is voornamelijk gericht op het ontwerpen van een met permanente magneten bekrachtigde generator met een vermogen van circa 1,4 MW bij een toerental van circa 18.000 omw/min, zodat deze generator direct gekoppeld kan worden aan de voorgenoemde HERON-gasturbine.

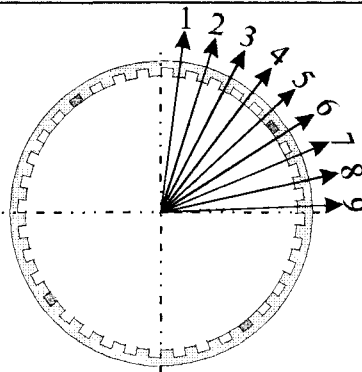
De hoofdafmetingen zoals de actieve statorlengte, de diameter van de statorboring en de diameter van de rotor en de demper zijn al bepaald, evenals het aantal polen, de wikkelconfiguratie en de aansluitwijze (zie onder andere [1] en [2]).

1.3.1 De opbouw van de generator

De generator is een vier-polige elektrische machine; het poolpaartal p is 2. De generator is een binnenpoolmachine zodat de rotor zich binnen de statorboring bevindt. De stator is voorzien van wikkelingen terwijl de rotor is voorzien van permanente magneten.

1.3.1.1 De opbouw van de stator

De stator is opgebouwd uit onder andere een statorblikpakket dat in een statorhuis wordt aangebracht. Een statorblik heeft een dikte van 0,35 mm (40 kW-machine) of 0,20 mm (1,4 MW-machine). Er zijn 36 gleuven, regelmatig verdeeld over de omtrek, in het statorblik aangebracht. Over deze 36 gleuven zijn negen spoelgroepen (wikkelingsfasen) verdeeld. Het wikkelschema is in bijlage 2 te vinden.



Figuur 1.2 Schematische voorstelling van de stand van magnetische assen ten opzichte van de statorboring.

De magnetische assen, zie figuur 1.2, van deze negen spoelgroepen zijn steeds over één gleuf verschoven en hebben dus een hoekverschil van $\frac{2\pi}{36}$ geometrische radialen. Er moet gelden dat $\frac{2\pi}{K \cdot p} = \frac{2\pi}{36}$ ofwel $K \cdot p = 36$ zodat hieruit volgt dat $K=18$. Het aantal fasen zou dus 18 moeten zijn maar er zijn slechts 9 spoelgroepen aanwezig. Het betreft hier dus een semi-18-fasige machine.

In dit verslag wordt afgeweken van de in de praktijk gebruikelijke aanduidingen. In de benoeming van een elektrische machine wordt hier aangegeven hoeveel spoelgroepen de machine bevat en wat de hoek tussen de magnetische assen van twee opeenvolgende wikkelingsfasen is.

Het hoekverschil tussen de magnetische assen van twee opeenvolgende wikkelingsfasen is gelijk aan $\frac{2\pi}{K \cdot p}$ geometrische radialen. K is hierin het aantal fasen en p het poolpaartal. Een dergelijk stel spoelgroepen is verbonden met een K -fasig elektrisch gebalanceerd spannings- of stroomsysteem.

Voor de spanningen of stromen in de k -de fase van een K -fasig systeem geldt:

$$\begin{cases} u_k(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}) \\ i_k(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K} + \varphi) \end{cases} \text{ met } k = 1, \dots, K. \quad (1.1)$$

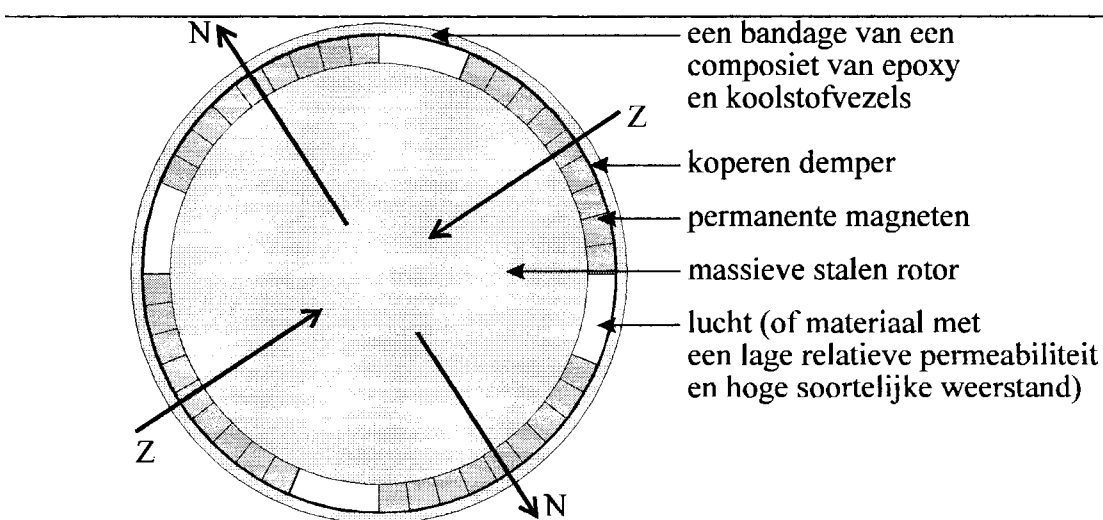
Als het aantal fasen K even is en $K \geq 4$ dan kan ook een zogenaamd semi- K -fasig systeem bestaan. In dat geval zijn er slechts $\frac{K}{2}$ wikkelfasen en slechts $\frac{K}{2}$ stromen en spanningen:

$$\begin{cases} u_k(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}) \\ i_k(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K} + \varphi) \end{cases} \text{ met } k = 1, \dots, \frac{K}{2}. \quad (1.2)$$

In de praktijk kent men alleen een semi-4-fasige machine. De reden dat men hier wel over spreekt is dat er met een zuiver twee-fasig systeem geen draaiveld kan opwekken. Voor $K > 4$ ziet men de noodzaak van de aanduiding 'semi' niet en halveert men het aantal fasen. Een semi-6-fasige machine zal in de praktijk, vanwege de drie-fasige aansluiting, aangeduid worden als een 3-fasige machine.

1.3.1.2 De opbouw van de rotor

De rotor is opgebouwd uit een massieve stalen cylinder, permanente magneten, een koperen dempercilinder en een bandage van een composiet van epoxy en koolstofvezels.



Figuur 1.3 De doorsnede van de rotor van de sneldraaiende generator.

In figuur 1.3 is een schematische voorstelling gegeven van de constructie van de rotor. Op de massieve stalen rotor zijn de permanente magneten bevestigd (gelijmd). Om de rotor en de magneten is een dunne koperen cylinder geplaatst. Deze cylinder wordt omspannen door een bandage van een composiet van epoxy en koolstofvezels. Dit is een constructie zoals het Centrum voor Constructie en Mechanisatie te Nuenen (CCM) ook heeft voorgesteld voor het voorontwerp voor 500 kW en 25.000 omw/min. De centrifugaalbelasting op de magneten wordt opgenomen door een bandage van een composiet van epoxy en koolstofvezels.

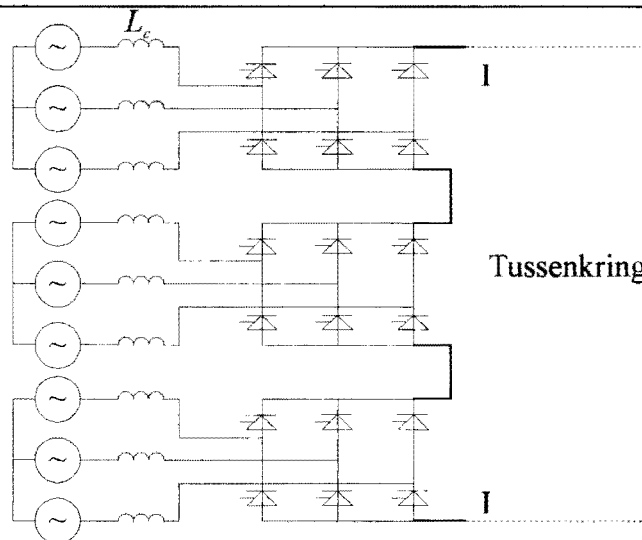
De koperen cylinder werkt als een demper en heeft voornamelijk als doel de verliezen in de rotor, met name in de magneten, te beperken. Omdat de wikkelingen niet sinusvormig verdeeld zijn en omdat de stromen niet sinusvormig in de tijd variëren wekken bepaalde combinaties van ruimte- en tijd-harmonischen stromen in de rotor op. Door deze stromen in een relatief dikke goed geleidende schil te laten lopen zal het verlies beperkt worden. De dikte van deze geleidende schil wordt voor hogere frequenties bepaald door de skin-dikte, voor lagere frequenties is de dikte van de geleidende schil begrensd op de dikte van de koperen dempercylinder.

De temperatuur van de koperen dempercylinder mag niet te hoog oplopen, omdat zowel de magneten als de bandage van koolstofvezel met composietmateriaal niet te warm mogen worden; maximaal 100 °C voor de magneten en maximaal 80 °C voor de bandage.

Een gevolg van het toepassen van een koperen cylinder en de bandage van een composiet van epoxy en koolstofvezels is dat de effectieve luchtspleet veel groter is dan gebruikelijk.

1.3.2 De opbouw van de vermogenselektronische-omzetter

De vermogenselektronische omzetter heeft als taak de wisselspanning met een frequentie van circa 600 Hz (circa 18.000 omw/min, $p=2$) om te zetten naar een andere (door de gebruiker te bepalen) vorm en frequentie. Er is gekozen voor een vermogenselektronische-omzetter met een stroom-tussenkring. Het ingangscircuit bestaat uit een (gestuurde) gelijkrichter. De tussenkring bestaat uit een inductiviteit zodat de stroom vrijwel constant is. Het uitgangscircuit kan bijvoorbeeld een invertor zijn, deze zet de gelijkstroom om in een wisselstroom van een bepaalde frequentie en met een bepaalde amplitude.



Figuur 1.4 De aansluiting van de negen spoelgroepen aan de gelijkrichter.

Het gelijkrichten gebeurt met drie (stuurbare) drie-fase volle-brug gelijkrichters zoals in figuur 1.4 is te zien. Elke drie-fase gelijkrichter wordt gevoed met drie fasen die elektrisch

gezien 120° ten opzichte van elkaar verschoven zijn. Drie spoelgroepen die elektrisch gezien 120° ten opzichte van elkaar verschoven zijn, vormen een zogenaamd deelsysteem. Drie van deze gelijkrichters worden in serie geschakeld.

De gelijkstroom wordt dan door het tweede deel van de vermogenselektronische omzetter, bijvoorbeeld een inverter, omgezet in stroom van een redelijk vrij te kiezen vorm. Zo kan bijvoorbeeld een 50 Hz (of 60 Hz) wisselspanning gegenereerd worden ten behoeve van netkoppeling met het openbare elektriciteitsnet of een 400 Hz wisselspanning voor maritieme toepassingen.

Het tweede deel van de vermogenselektronische omzetter, de inverter, is voorlopig voor het onderzoek nog niet van belang.

1.4 Het afstudeeronderzoek

Het afstudeeronderzoek, dat in dit verslag is beschreven, richt zich vooral op het berekenen van de verliezen in de demper van de generator. Aan de hand van de berekende verliezen en door middel van verschillende temperatuurmetingen kan een schatting gemaakt worden van het vermogensverlies in de demper, en dus ook van de temperatuur van de demper. De schatting van het verlies in de demper is tevens een indicatie voor het benodigde koelende vermogen.

De generator is geconstrueerd met een koperen demper. Het overgrote deel van het rotorverlies wordt hierin opgewekt. De demper heeft contact met zowel de magneten als de bandage van een composiet van epoxy en koolstofvezels. De temperatuur van de magneten en de bandage mag niet te hoog worden, dus mag de temperatuur van de demper eveneens niet te hoog worden.

Het maken van een schatting van de dissipatie in de demper gebeurt op drie manieren:

1. met berekeningen met behulp van een driedimensionaal-eindige-elementen programma pakket;

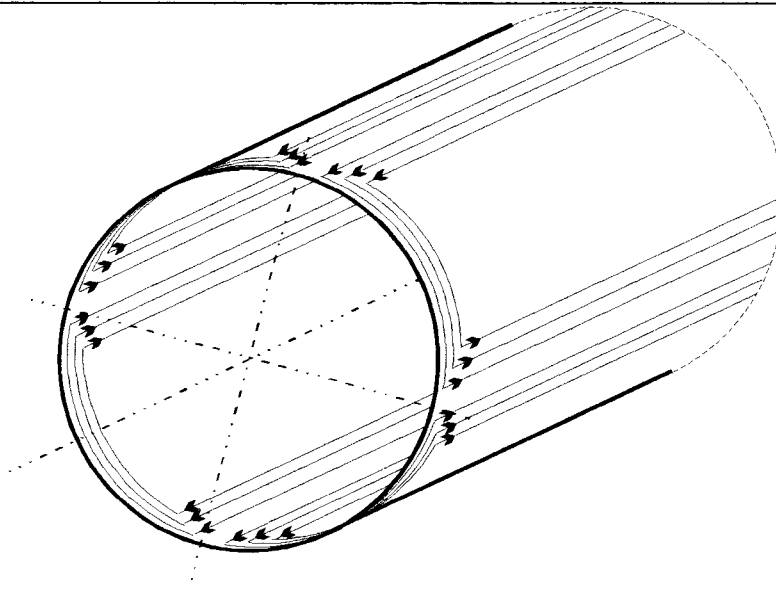
Hiermee kan, onder andere, de stroomdichtheid op elke plaats in de demper berekend worden, waaruit weer de optredende dissipatie berekend kan worden. Deze berekeningen worden door een medewerker van de vakgroep EMV uitgevoerd.

2. met berekeningen met behulp van een tweedimensionaal model voor de stroomdichtheid;

Hiermee kan de stroomdichtheid op een oneindig lange cylinder bepaald worden, waaruit weer de optredende dissipatie berekend kan worden. Dit model wordt in dit verslag beschreven. In [3] is het model beknopt weergegeven. Deze berekeningen worden uitgevoerd met behulp van MathCad (zie bijlage 8).

3. door middel van een aantal temperatuurmetingen.

Met behulp van een aantal temperatuurmetingen en een thermisch model van de demper en van de omgeving van de demper kan het gedissipeerde vermogen bepaald worden. Deze metingen worden in dit verslag beschreven en de resultaten ervan worden vergeleken met de onder punt 1 en punt 2 berekende verliezen.



Figuur 1.5 Vereenvoudigde weergave van de loop van de stromen in de demper. De stromen aan de rand van de demper (in tangentiële richting) worden bedoeld als er over eindeffecten gesproken wordt.

Onder het eindeffect worden de stromen in tangentiële richting op de randen (de uiteinden) van de dempercilinder verstaan. In de buurt van de randen neemt de stroom in axiale richting af en neemt de stroom in tangentiële richting toe. In figuur 1.5 zijn de eindeffecten getekend. Er dient opgemerkt te worden dat het berekende eindeffect in het driedimensionale model afhankelijk is van de modellering van de spoelkoppen. Het verschil tussen de verliesbepaling met het driedimensionale model en het tweedimensionale model is dat het driedimensionale model het eindeffect wel beschouwt en het tweedimensionale model niet.

In het vermogensverlies dat bepaald wordt met behulp van de temperatuurmetingen is het extra verlies dat veroorzaakt door de eindeffecten inbegrepen. Bij de verwerking van de temperatuurmetingen wordt geprobeerd het verlies volgens het tweedimensionale model, en het extra verlies tengevolge van de eindeffecten van elkaar te scheiden.

In eerste instantie worden de berekeningen en temperatuurmetingen toegespitst op een 40 kW-proefmodel. De constructie van dit proefmodel is dezelfde als de constructie van de 1,4 MW-generator. De met behulp van het proefmodel verkregen resultaten zullen worden gebruikt om het verlies in de rotor van de uiteindelijke 1,4 MW-generator te schatten. In bijlage 2 zijn verdere gegevens van het 40 kW-proefmodel en de 1,4 MW-generator afgedrukt.

2. Theoretische bepaling van het rotorverlies

In dit hoofdstuk wordt het rotorverlies-model beschreven, dat gehanteerd wordt om een schatting te maken van het rotorverlies. In paragraaf 2.1 wordt een afleiding van het model gegeven. Het rotorverlies-model is al eerder beknopt beschreven in [3]. In paragraaf 2.2 wordt het rotorverlies voor twee configuraties bepaald.

2.1 Beschrijving van het rotorverliesmodel

Het rotorverliesmodel is een tweedimensionaal model. Met het model kan het rotorverlies in een oneindig lange cylinder per lengte eenheid bepaald worden. In werkelijkheid is de dempercylinder niet oneindig lang en zal het eerder in hoofdstuk 1 genoemde eindeffect optreden.

Het rotorverlies-model is gebaseerd op de stroombelegging op de demper. Deze stroombelegging zal eerst bepaald worden. Het vermogensverlies wordt daarna bepaald aan de hand van de dissipatie tengevolge van de stromen in de demper.

Vanwege de cirkelcilindrische structuur zal hier een cirkelcilindrisch coördinatenstelsel (r, θ, z) gebruikt worden.

2.1.1 Bepaling van de stroombelegging op de statorboring

De stroombelegging op de statorboring wordt bepaald uit de dradenbelegging en de stromen die in de verschillende (wikkelings-)fasen lopen. Het is voor de verdere afleiding noodzakelijk om de dradenbelegging en de stroom met behulp van Fourier-analyse op te splitsen in harmonische componenten.

De dradendichtheid $Z(p \cdot \theta_s)$ (in [draden/rad]) van één wikkelings-fase wordt geschreven als een som van harmonische componenten. Als $Z(p \cdot \theta_s)$ een oneven functie is -met gemiddelde waarde nul- dan kan $Z(p \cdot \theta_s)$ geschreven worden als een som van sinussen met het argument $\kappa \cdot p \cdot \theta_s$. Hierin is κ het relatieve ranggetal (of ordetal) van de ruimte-harmonische, $\kappa = \frac{\kappa'}{p}$, $\kappa \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, κ' is het absolute rangtal van de ruimte-harmonische.

Voor de grootte van de harmonische componenten \hat{z}_κ in $Z(p \cdot \theta_s)$ geldt dan:

$$\hat{z}_\kappa = \frac{I}{\pi} \int_{p \cdot \theta_s = -\pi}^{\pi} Z(p \cdot \theta_s) \cdot \sin(\kappa \cdot p \cdot \theta_s) d(p \cdot \theta_s), \quad (2.1)$$

zodat voor $Z(p \cdot \theta_s)$ geldt:

$$Z(p \cdot \theta_s) = \sum_{\kappa=1}^{\infty} z_{\kappa}(p \cdot \theta_s) \quad (2.2)$$

met

$$z_{\kappa}(p \cdot \theta_s) = \hat{z}_{\kappa} \cdot \sin(\kappa \cdot p \cdot \theta_s). \quad (2.3)$$

Als $Z(p \cdot \theta_s)$ positief is dan loopt een positieve stroom in de positieve z-richting.

De stroom door een fase, $i(t)$, wordt geschreven als een som van harmonische componenten. Als $i(t)$ een oneven functie is -met gemiddelde waarde nul- dan kan $i(t)$ geschreven worden als een som van sinussen met het argument $\nu \cdot \omega_s \cdot t$. Hierin is ν het rangtal van de tijd-harmonische, $\nu \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, T is de periode van de grondharmonische, $T = \frac{2\pi}{\omega_s}$.

Voor de grootte van de harmonische componenten \hat{i}_{ν} geldt dan:

$$\hat{i}_{\nu} = \frac{2}{T} \int_{\tau=-T/2}^{T/2} i(\tau) \cdot \sin(\nu \cdot \omega_s \cdot \tau) d\tau, \quad (2.4)$$

zodat voor $i(t)$ geldt:

$$i(t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} i_{\nu}(t) \quad (2.5)$$

met

$$i_{\nu}(t) = \hat{i}_{\nu} \cdot \sin(\nu \cdot \omega_s \cdot t). \quad (2.6)$$

De stroombelegging op de statorboring wordt nu bepaald door voor alle fasen het product van stroom en dradenbelegging uit te rekenen, onder inachtneming van fase-verschuivingen, en deze producten bij elkaar op te tellen.

De stroombelegging op de statorboring wordt achtereenvolgens bepaald voor:

1. een K -fasig, symmetrisch draaistroomsysteem;
2. een semi- K -fasig, symmetrisch draaistroomsysteem;
3. een systeem dat bestaat uit L deelsystemen met elk K fasen.

Met de bepalingen onder punt 1 en punt 2 kan de stroombelegging op de statorboring voor alle symmetrische draaistroomsystemen bepaald worden. De bepaling van de stroombelegging onder punt 1 en punt 2 zijn vrijwel analoog. Onder punt 3 wordt de stroombelegging op de statorboring bepaald voor de configuratie die past bij de wijze waarop de sneldraaiende generator is aangesloten op de vermogenselektronische omzetter (zie ook 1.3.2).

2.1.1.1 Een K-fasig symmetrisch draaistroomsysteem

Een K -fasig symmetrisch draaistroomsysteem bestaat uit K wikkelingsfasen waarin K fasestromen vloeien, $K \in \mathbb{N} \setminus \{0,1,2\}$. De magnetische assen van twee opeenvolgende wikkelingsfasen hebben een hoekverschil van $\frac{2\pi}{K} \cdot \frac{1}{p}$ geometrische radialen. De stromen van twee opeenvolgende fasen hebben een faseverschil van $\frac{2\pi}{K} \cdot \frac{1}{\omega_s}$ seconden.

Een enkelvoudige harmonische stroom en een sinusvormig verdeelde dradendichtheid:

Voor de dradendichtheid van de k -de wikkelingsfase geldt:

$$z_k(p \cdot \theta_s) = \hat{z} \cdot \sin\left(p \cdot \theta_s - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right). \quad (2.7)$$

Voor de stroom in de k -de fase geldt:

$$i_k(t) = \hat{i} \cdot \sin\left(\omega_s \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right). \quad (2.8)$$

Voor het K -fasige systeem kan de stroombelegging, tengevolge van de K fasestromen door de K wikkelingsfasen, geschreven worden als:

$$\begin{aligned} A_s(t, \theta_s) &= \sum_{k=1}^K i_k(t) \cdot z_k(p \cdot \theta_s) \\ &= \sum_{k=1}^K \hat{i} \cdot \sin\left(\omega_s \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right) \cdot \hat{z} \cdot \sin\left(p \cdot \theta_s - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Niet-harmonische stroom en niet-sinusvormig verdeelde dradendichtheid:

Voor de κ -de harmonische van de dradendichtheid van de k -de wikkelingsfase geldt:

$$z_{k,\kappa}(p \cdot \theta_s) = \hat{z}_\kappa \cdot \sin\left(\kappa \cdot \left(p \cdot \theta_s - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right)\right). \quad (2.10)$$

Voor de ν -de harmonische van de stroom in de k -de fase geldt:

$$i_{k,\nu}(t) = \hat{i}_\nu \cdot \sin\left(\nu \cdot \left(\omega_s \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right)\right). \quad (2.11)$$

Voor het K -fasige systeem kan de stroombelegging, tengevolge van de ν -de harmonische en de κ -de harmonische van de dradendichtheid, geschreven worden als:

$$\begin{aligned} A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s) &= \sum_{k=1}^K i_{k,\nu}(t) \cdot z_{k,\kappa}(p \cdot \theta_s) \\ &= \sum_{k=1}^K \hat{i}_\nu \cdot \sin\left(\nu \cdot \left(\omega_s \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right)\right) \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \sin\left(\kappa \cdot \left(p \cdot \theta_s - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right)\right). \end{aligned} \quad (2.12)$$

De totale stroombelegging kan geschreven worden als som van stroombeleggingen van alle harmonische combinaties:

$$A_s(t, \theta_s) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s). \quad (2.13)$$

Vergelijking (2.12) kan nog anders geschreven worden door het product van twee sinusfuncties verder uit te werken. Vergelijking (2.9) gaat dan over in:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \sum_{k=1}^K \left(\begin{array}{l} \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ - \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) \end{array} \right). \quad (2.14)$$

Vergelijking (2.14) kan vereenvoudigd worden door afhankelijk van de waarde van v en κ te bepalen wat de stroombelegging oplevert.

De stroombelegging tengevolge van één harmonische combinatie kan vereenvoudigd worden tot de hieronder opgesomde drie deelgevallen. In bijlage 3.1, met name 3.1.1.1, wordt dit resultaat afgeleid. Er geldt $\kappa \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, $v \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ en $K \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1, 2\}$.

- Als $v - \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = -Z \cdot K + v$ met $Z \in \mathbb{Z}$, dan geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \quad (2.15)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{v,\kappa} = \frac{K}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- Als $v + \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = Z \cdot K - v$ met $Z \in \mathbb{Z}$, dan geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \quad (2.16)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{v,\kappa} = -\frac{K}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- In alle andere gevallen geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = 0. \quad (2.17)$$

2.1.1.2 Een semi-K-fasig symmetrische draaistroomsysteem

Voor een semi- K -fasig symmetrisch draaistroomsysteem geldt in grote lijnen hetzelfde als voor een K -fasig symmetrisch draaistroomsysteem. Het verschil is echter dat er geen K maar slechts $\frac{K}{2}$ fasestromen en wikkelingsfasen zijn.

Een semi- K -fasig systeem ontstaat uit een K -fasig systeem, waarin K even is en $K \geq 4$, door de fase k en de fase $\frac{K}{2} + k$ samen te nemen in de fase k ($k = 1, \dots, \frac{K}{2}$). Dat mag omdat de inductievelden veroorzaakt door fase k en fase $\frac{K}{2} + k$ dezelfde vorm en positie hebben. De stroom in de k -de fase van het semi- K -fasige systeem is gelijk aan de som van de stromen in de k -de fase en de $(\frac{K}{2} + k)$ -de fase in het K -fasige systeem. Hierbij dient het faseverschil in rekening gebracht te worden. De stroom in de k -de fase van het semi- K -fasige systeem is dus gelijk aan $i_k - i_{k+\frac{K}{2}}$.

Op een zelfde manier kan een semi- K -fasig systeem overgaan in een K -fasig systeem, waarin K even is en $K \geq 4$, door fase k te splitsen in een fase k en een fase $\frac{K}{2} + k$ ($k = 1, \dots, \frac{K}{2}$). De stroom in de k -de fase en de $(\frac{K}{2} + k)$ -de fase van K -fasige systeem is gelijk aan de helft van de stroom in de k -de fase van het semi- K -fasige systeem ($k = 1, \dots, \frac{K}{2}$). Hierbij dient het faseverschil in rekening gebracht te worden, er geldt $i_{k+\frac{K}{2}} = -i_k$.

Voor de stroombelegging op de statorboring geldt: (als (2.13))

$$A_s(t, \theta_s) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) \quad (2.18)$$

met

$$A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_{\nu} \cdot \hat{z}_{\kappa} \sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \left(\begin{array}{l} \cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (\nu - \kappa) \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ -\cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (\nu + \kappa) \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}) \end{array} \right) \quad (2.19)$$

Vergelijking (2.19) kan vereenvoudigd worden door afhankelijk van de waarde van ν en κ te bepalen wat de stroombelegging volgens vergelijking (2.19) oplevert.

De stroombelegging tengevolge van één harmonische combinatie kan, als $\hat{i}_{\nu} = \theta$ voor even waarden van ν en als $\hat{z}_{\kappa} = \theta$ voor even waarden van κ , vereenvoudigd worden tot de hieronder opgesomde drie deelgevallen. In bijlage 3.1, met name 3.1.1.2, wordt dit resultaat afgeleid. Er geldt $\kappa \in \mathbb{N}^{\{0\}}$, $\nu \in \mathbb{N}^{\{0\}}$, $K \in \mathbb{N}^{\{0,1,2\}}$ en K is even.

- Als $\nu - \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = -Z \cdot K + \nu$ met $Z \in \mathbb{Z}$, dan geldt:

$$A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{\nu, \kappa} \cdot \cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \quad (2.20)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{\nu, \kappa} = \frac{K}{4} \cdot \hat{i}_{\nu} \cdot \hat{z}_{\kappa}.$$

- Als $\nu + \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = Z \cdot K - \nu$ met $N \in \mathbb{N}$, dan geldt:

$$A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{\nu, \kappa} \cdot \cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \quad (2.21)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{\nu, \kappa} = -\frac{K}{4} \cdot \hat{i}_{\nu} \cdot \hat{z}_{\kappa}.$$

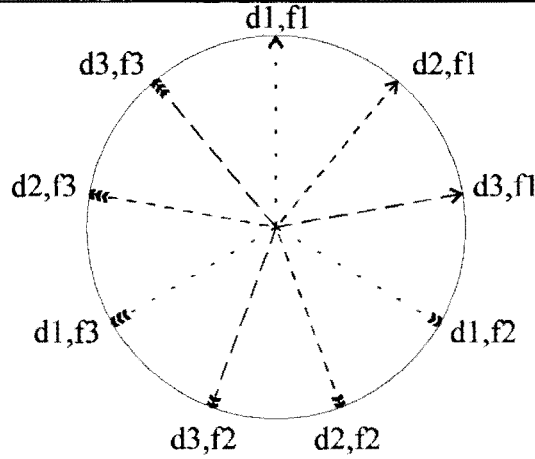
- In alle andere gevallen geldt:

$$A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) = 0. \quad (2.22)$$

2.1.1.3 Een draaistroomsysteem bestaande uit L deelsystemen met elk K fasen

Het statorstelsel wordt opgesplitst in L deelsystemen ($L \in \mathbb{N}^{\{0\}}$) met elk K fasen ($K \in \mathbb{N}^{\{0,1,2\}}$). Onder een deelsysteem wordt hier een verzameling van K wikkelingsfasen verstaan.

Er zijn meerdere mogelijkheden waarop een systeem bestaande uit L deelsystemen met elk K fasen beschreven kan worden. Een mogelijkheid is dat alle eerste fasen van een deelsysteem binnen alle fasen van het eerste deelsysteem liggen. De hoek tussen de fasen van een deelsysteem is $\frac{2\pi}{K} \cdot \frac{1}{p}$ geometrische radialen, hierbinnen liggen dus de L eerste fasen van de deelsystemen met een onderlinge hoek van $\frac{2\pi}{K \cdot L} \cdot \frac{1}{p}$ geometrische radialen.



Figuur 2.1 Weergave van de spanningsvectoren van een draaistroomsysteem bestaande uit 3 deelsystemen ($L=3$) met elk 3 fasen ($K=3$).

In figuur 2.1 ziet u de spanningen in de 3 deelsystemen ($L=3$) met elk 3 fasen ($K=3$) weergegeven als vector. Elk deelsysteem bestaat uit drie fase-spanningen die een hoek van 120° met elkaar hebben.

De magnetische assen van de wikkelingsfasen van twee opeenvolgende fasen van eenzelfde deelsysteem hebben een hoekverschil van $\frac{2\pi}{K} \cdot \frac{1}{p}$ geometrische radialen. De magnetische assen van fasen met hetzelfde nummer van twee opeenvolgende deelsystemen hebben een fasehoek van $\frac{2\pi}{K \cdot L} \cdot \frac{1}{p}$ geometrische radialen, omdat alle eerste fasen van elk deelsysteem tussen de eerste en de tweede fase van het eerste deelsysteem liggen.

De stromen van twee opeenvolgende fasen van eenzelfde deelsysteem hebben een faseverschil van $\frac{2\pi}{K} \cdot \frac{1}{\omega_s}$ seconden. De stromen van dezelfde fasen van twee opeenvolgende deelsystemen hebben een faseverschil van $\frac{2\pi}{K \cdot L} \cdot \frac{1}{\omega_s}$ seconden.

Voor de stroombelegging op de statorboring geldt algemeen:

$$A_s(t, \theta_s) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) \quad (2.23)$$

nu met

$$A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) = \sum_{\ell=1}^L \sum_{k=1}^K \left(\begin{array}{l} \hat{i}_\nu \cdot \sin\left(\nu \cdot (\omega_s \cdot t - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K} - (\ell-1) \cdot \frac{2\pi}{K \cdot L})\right) \cdot \\ \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \sin\left(\kappa \cdot (p \cdot \theta_s - (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K} - (\ell-1) \cdot \frac{2\pi}{K \cdot L})\right) \end{array} \right) \quad (2.24)$$

De stroombelegging van vergelijking (2.24) kan nog anders geschreven worden door het product van twee sinus-functie verder uit te werken. Er volgt dan:

$$A_s^{\nu, \kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_\nu \cdot \hat{z}_\kappa \sum_{\ell=1}^L \sum_{k=1}^K \left(\begin{array}{l} \cos\left(\nu \omega_s t - \kappa p \theta_s - (\nu - \kappa) \cdot \left((k-1) \cdot \frac{2\pi}{K} + (\ell-1) \cdot \frac{2\pi}{K \cdot L} \right) \right) + \\ - \cos\left(\nu \omega_s t + \kappa p \theta_s - (\nu + \kappa) \cdot \left((k-1) \cdot \frac{2\pi}{K} + (\ell-1) \cdot \frac{2\pi}{K \cdot L} \right) \right) \end{array} \right) \quad (2.25)$$

De dubbelsom wordt teruggebracht naar een enkele som (met $M = K \cdot L$):

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \sum_{m=1}^M \left(\begin{array}{l} \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v - \kappa) \cdot (m-1) \cdot \frac{2\pi}{M}) + \\ - \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v + \kappa) \cdot (m-1) \cdot \frac{2\pi}{M}) \end{array} \right). \quad (2.26)$$

De uitdrukking voor de stroombelegging volgens vergelijking (2.26) is gelijk aan die voor het K' -fasige systeem, waarin $K' = K \cdot L$.

Vergelijking (2.26) kan vereenvoudigd worden door afhankelijk van de waarde van v en κ te bepalen wat de stroombelegging volgens vergelijking (2.26) oplevert.

Er geldt $\kappa \in \mathbb{N}^{(0)}$, $v \in \mathbb{N}^{(0)}$ en $K \in \mathbb{N}^{(0,1,2)}$.

- Als $v - \kappa = Z \cdot K \cdot L$, ofwel als $\kappa = -Z \cdot K \cdot L + v$ dan geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \quad (2.27)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{v,\kappa} = \frac{K \cdot L}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- Als $v + \kappa = Z \cdot K \cdot L$, ofwel als $\kappa = Z \cdot K \cdot L - v$ dan geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \quad (2.28)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{v,\kappa} = -\frac{K \cdot L}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- In alle andere gevallen geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = 0. \quad (2.29)$$

2.1.1.4 Resumé meergefasige systemen

Het frequentie- en poolpaartspectrum van het semi- K -fasige, symmetrische draaistroomsysteem komt, als $\hat{i}_v = 0$ voor even waarden van v en als $\hat{z}_\kappa = 0$ voor even waarden van κ , overeen met het spectrum van het K -fasige, symmetrische draaistroomsysteem.

Een andere beschrijving van meergefasige draaistroomsystemen is de beschrijving van een draaistroomsysteem dat bestaat uit L deelsystemen met elk K fasen, dit is op meerdere manieren mogelijk.

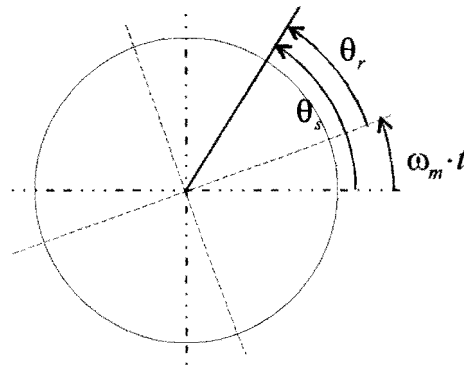
Het frequentie- en poolpaartspectrum van het systeem dat bestaat uit L deelsystemen met elk K fasen, zoals beschreven in 2.1.1.3, komt overeen met het frequentie- en poolpaartspectrum van het K' -fasige, symmetrische draaistroomsysteem. Hierin geldt $K' = K \cdot L$.

2.1.2 Bepaling van de stroombelegging op de demper

De stroombelegging op de demper wordt bepaald aan de hand van de stroombelegging op de statorboring en de voorwaarden voor de fluxdichtheid (het inductie- of B-veld) in de luchtspleet.

2.1.2.1 Coördinatentransformatie

De stroombelegging op de statorboring is uitgedrukt in coördinaten van het statorcoördinatenstelsel en moet uitgedrukt worden in coördinaten van het rotorcoördinatenstelsel.



Figuur 2.2 Weergave van het te gebruiken coördinatenstelsel.

Dit gebeurt met behulp van een coördinatentransformatie volgens de coördinatenstelsels van figuur 2.2. De magnetische as van de eerste fase ligt op $\theta_s = \frac{\pi}{2}$. Er wordt verondersteld dat de rotor met een constante hoeksnelheid ω_m beweegt. Voor θ_s geldt:

$$\theta_s = \theta_r + \omega_m \cdot t \quad (2.30)$$

zodat

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \quad (2.31)$$

overgaat in

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot (\theta_r + \omega_m \cdot t)). \quad (2.32)$$

De mechanische hoeksnelheid (ω_m) is uit te drukken in de grondcirkelfrequentie van het statorveld (ω_s). Deze uitdrukking luidt:

$$\omega_m = (1 - s) \cdot \frac{\omega_s}{p}. \quad (2.33)$$

Hierin is s de slip. Als $s=0$ dan draait de rotor synchroon met het (grondharmonische) statorveld, als $s=1$ dan staat de rotor stil ten opzichte van de stator (geblokkeerd).

Met behulp van vergelijking (2.33) gaat de stroombelegging van vergelijking (2.32) over in

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos\left((v \pm \kappa \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r\right). \quad (2.34)$$

Voor $s=0$, als de rotor synchroon met het (grondharmonische) statorveld draait, geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos\left((v \pm \kappa) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r\right). \quad (2.35)$$

Voor $s=1$, als de rotor geblokkeerd is, geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos\left(v \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r\right). \quad (2.36)$$

2.1.2.2 Het luchtspleetveld

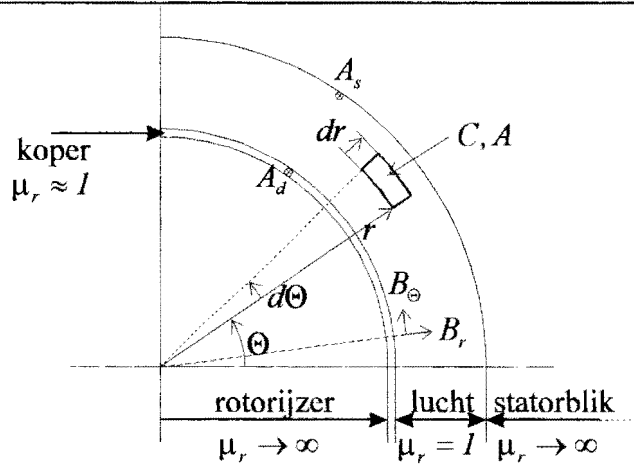
Het tweedimensionale luchtspleetveld wordt bepaald met behulp van de wetten van Maxwell en de randvoorwaarden die horen bij de in de configuratie beschouwde veldruimte (de luchtspleet). Een volledige afleiding staat in bijlage 3.2.

De aannamen die gebruikt worden bij de afleiding van het luchtspleetveld zijn:

1. Er wordt een glad statoroppervlak verondersteld;
2. Er wordt ideaal blik verondersteld;
3. Er wordt een dunne stroombelegging op de demper verondersteld, zodat de demper volledig afschermt.

De hier te gebruiken wetten van Maxwell (geldig in de luchtspleet) luiden:

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_C (\vec{H} \cdot \vec{\tau}) \cdot d\ell = 0 \\ \oiint_A (\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot dA = 0. \end{array} \right. \quad (2.37)$$



Figuur 2.3 Plaatje van de configuratie voor de Maxwell-integralen.

Het toepassen van de wetten van Maxwell, vergelijking (2.37), op de kring C en het gesloten axiale oppervlak A , zie figuur 2.3, geeft na enig uitwerken een stelsel gekoppelde differentiaalvergelijkingen:

$$\begin{cases} r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta - \frac{\partial B_r}{\partial \theta} = 0 \\ r \frac{\partial B_r}{\partial r} + B_r + \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} = 0. \end{cases} \quad (2.38)$$

Het stelsel gekoppelde differentiaalvergelijkingen wordt ontkoppeld en daarna opgelost met behulp van scheiding van variabelen. De algemene oplossing van de differentiaalvergelijkingen van vergelijking (2.38) luidt:

$$\begin{cases} B_r(r, \theta_r) = (R_{1r} \cdot r^{-1+Z} + R_{2r} \cdot r^{-1-Z}) \cdot (T_{1r} \cdot \cos(Z \cdot \theta_r) + T_{2r} \cdot \sin(Z \cdot \theta_r)) \\ B_\theta(r, \theta_r) = (R_{1\theta} \cdot r^{-1+Z} + R_{2\theta} \cdot r^{-1-Z}) \cdot (T_{1\theta} \cdot \cos(Z \cdot \theta_r) + T_{2\theta} \cdot \sin(Z \cdot \theta_r)) \end{cases} \quad (2.39)$$

waarin Z een (scheidings)constante is, bepaald door de periodiciteit van de stroombelegging.

De randvoorwaarden die horen bij het hier gestelde probleem luiden:

$$1. \lim_{r \uparrow r_s} B_\theta^{v,k}(r, t, \theta_r) = \mu_0 \cdot A_s^{v,k}(t, \theta_r) \quad (2.40)$$

$$\text{met } A_s^{v,k}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,k} \cdot \cos((v \pm \kappa \cdot (l-s)) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r)$$

$$2. \lim_{r \downarrow r_d} B_r^{v,k}(r, t, \theta_r) = 0 \quad (2.41)$$

De eerste randvoorwaarde komt voort uit de gegeven stroombelegging op de statorboring. Deze gegeven stroombelegging zorgt voor een tangentiële inductie in de luchtspleet.

De tweede randvoorwaarde komt voort uit de veronderstelling van een volledige afscherming van de radiale luchtspleetinductie ter hoogte van de koperen dempercilinder. Deze veronderstelling is geoorloofd vanwege het grote snelheidsverschil tussen de koperen demper en het inductieveld.

Uiteindelijk wordt er voor het radiale en tangentiële veld ter plaatse van de demper gevonden:

$$\begin{cases} B_r^{\nu,\zeta}(r,t,\theta_r) = \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{\nu,\zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \cdot \left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1+\zeta p} - \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p} \cdot \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1-\zeta p} \right) \cdot \sin\left(\begin{matrix} (\nu + \zeta \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t + \\ \zeta \cdot p \cdot \theta_r \end{matrix} \right) \\ B_\theta^{\nu,\zeta}(r,t,\theta_r) = \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{\nu,\zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \cdot \left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1+\zeta p} + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p} \cdot \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1-\zeta p} \right) \cdot \cos\left(\begin{matrix} (\nu + \zeta \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t + \\ \zeta \cdot p \cdot \theta_r \end{matrix} \right) \end{cases} \quad (2.42)$$

Hierin is $\zeta = \pm\kappa$ met $\zeta \in \mathbb{Z}^{(\neq 0)}$, zodat voor de statorstroombelegging (2.34) geschreven kan worden:

$$A_s^{\nu,\zeta}(t,\theta_r) = \hat{A}_s^{\nu,\zeta} \cdot \cos\left((\nu + \zeta \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t + \zeta \cdot p \cdot \theta_r \right). \quad (2.43)$$

2.1.2.3 De stroombelegging

Met behulp van (2.42) kan de stroombelegging op de demper bepaald worden.

De oppervlaktestroomdichtheid van één harmonische combinatie (ν, κ) op de demper wordt bepaald uit de tangentiële component van de luchtspleetinductie ter hoogte van de demper. In de demper zelf is geen inductieveld vanwege de veronderstelde volledige afscherming. Voor deze oppervlaktestroomdichtheid geldt:

$$A_d^{\nu,\kappa}(t,\theta_r) = \frac{B_\theta^{\nu,\kappa}(r_d, t, \theta_r)}{\mu_0}. \quad (2.44)$$

Voor de oppervlaktestroomdichtheid op de demper geldt, na enig rekenwerk (zie bijlage 3.2):

$$A_d^{\nu,\kappa}(t,\theta_r) = A_s^{\nu,\kappa}(t,\theta_r) \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{-1+\kappa p}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\kappa p}}. \quad (2.45)$$

De totale stroombelegging aan het oppervlak van de demper wordt verkregen door de stroombeleggingen van alle harmonische componenten bij elkaar te tellen. Voor de totale stroombelegging op de demper geldt:

$$A_d(t,\theta_r) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu,\kappa}(t,\theta_r) \quad (2.46)$$

2.1.3 Bepaling van het verlies van één harmonische combinatie

In deze paragraaf wordt het vermogensverlies in de demper tengevolge van één harmonische combinatie bepaald. De stroombelegging op de demper dient als uitgangspunt.

$$A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_d^{v,\kappa} \cdot \cos((v \pm \kappa \cdot (l-s)) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r). \quad (2.47)$$

Voor de lokale vermogensstroom (verliesdichtheid), \vec{P} , wordt bepaald met behulp van de vector van Poynting:

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}. \quad (2.48)$$

Het totale vermogensverlies in een volume wordt nu bepaald met behulp van een oppervlakteintegraal over een gesloten oppervlak die dat volume insluit:

$$P = \oiint_A (\vec{P} \cdot \vec{n}) \cdot dA. \quad (2.49)$$

Het gesloten oppervlak, A , is gelijk aan het oppervlak van de dempercilinder en de beide uiteinden van die cilinder.

In het cirkelcilindrische coördinatenstelsel, (r, θ, z) wordt zijn de eenheidsvectoren in radiale, tangentiële en axiale richting \vec{u}_r , \vec{u}_θ en \vec{u}_z . De eenheidsvector \vec{u}_r is naar buiten gericht.

Het uitwerken van de vector van Poynting voor de verliesdichtheid geeft:

$$\vec{P}^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \vec{E}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) \times \vec{H}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r). \quad (2.50)$$

Voor $\vec{E}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r)$ geldt:

$$\vec{E}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \frac{\vec{J}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r)}{\sigma} = \frac{A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r)}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \cdot \vec{u}_z, \quad (2.51)$$

hierin is σ de soortelijke geleiding en $\delta^{v,\kappa}$ de dikte van de geleidende laag, voor de beschouwde harmonische combinatie. De stroomdichtheid wordt hier constant verondersteld over de dikte van de geleidende laag.

Voor $\vec{H}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r)$ geldt:

$$\vec{H}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) \cdot \vec{u}_\theta. \quad (2.52)$$

Vergelijking (2.50) gaat over in:

$$\vec{P}^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \frac{I}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \cdot (A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r))^2 \cdot -\vec{u}_r. \quad (2.53)$$

Voor het totale vermogensverlies tengevolge van één harmonische combinatie $P_v^{v,\kappa}(t)$ geldt:

$$P_v^{v,\kappa}(t) = \oiint_A (\vec{P}_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) \cdot -\vec{n}) \cdot dA \quad (2.54)$$

De integraal van de vermogensdichtheid over het gesloten oppervlak is gelijk aan de oppervlakte-integraal over de cilindermantel van de vermogensdichtheid als de vermogensdichtheid op de ‘koppen’ (‘deksels’) gelijk is aan nul. De vector \vec{n} is de normaalvector, deze is naar buiten gericht. Voor een cylinder is \vec{n} gelijk aan \vec{u}_r .

Voor $P_v^{v,\kappa}(t)$ geldt nu:

$$P_v^{v,\kappa}(t) = \int_{z=0}^{\ell} r_d \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \frac{I}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \cdot (A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r))^2 \cdot -\vec{u}_r \cdot -\vec{u}_r \cdot d\theta_r \cdot dz \quad (2.55)$$

$$P_v^{v,\kappa}(t) = \frac{r_d}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \int_{z=0}^{\ell} \int_{\theta_r=0}^{2\pi} (A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r))^2 \cdot d\theta_r \cdot dz \quad (2.56)$$

$$P_v^{v,\kappa}(t) = \frac{r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} (A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r))^2 \cdot d\theta_r \quad (2.57)$$

Wordt in vergelijking (2.57) de stroombelegging volgens vergelijking (2.47) gesubstitueerd dan wordt voor het verliesvermogen tengevolge van één harmonische combinatie gevonden:

$$P_v^{v,\kappa}(t) = \frac{r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \left(\hat{A}_d^{v,\kappa} \cdot \cos\left((v \pm \kappa \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r \right) \right)^2 \cdot d\theta_r \quad (2.58)$$

Uitwerken hiervan geeft (omdat $\kappa \in \mathbb{N}^{\setminus \{0\}}$):

$$P_v^{v,\kappa} = \frac{\pi \cdot r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \cdot \left(\hat{A}_d^{v,\kappa} \right)^2 \quad (2.59)$$

zodat het verlies van één harmonische combinatie onafhankelijk is van de tijd.

De uitdrukking voor het verlies, (2.59), is fysisch interpreteerbaar. Voor het verlies in een balk, met lengte ℓ , breedte b en hoogte h , tengevolge van een stroom I (effectieve waarde) in lengterichting, ofwel oppervlakte stroomdichtheid A (effectieve waarde) geldt:

$$P = I^2 \cdot R = (A \cdot b)^2 \cdot \frac{\ell}{b \cdot h} \cdot \frac{1}{\sigma} = A^2 \cdot \frac{b \cdot \ell}{h} \cdot \frac{1}{\sigma} \quad (2.60)$$

Als de balk nu wordt omgerekend naar een cylinder dan geldt:

$$b \cdot \ell \hat{=} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \ell \text{ en } h \hat{=} d, \quad (2.61)$$

waarin r de straal van de cylinder is en d de dikte van de cylinder.

Voor het verlies geldt nu:

$$P = A^2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \ell}{d \cdot \sigma} = A^2 \cdot \frac{\text{Oppervlak cylinder}}{\text{Dikte cylinder}} \cdot \frac{1}{\sigma} \quad (2.62)$$

Met $A = \frac{\hat{A}}{\sqrt{2}}$ wordt dit:

$$P = \hat{A}^2 \cdot \frac{\pi \cdot r \cdot \ell}{d \cdot \sigma} \quad (2.63)$$

De dikte, $\delta^{v,\kappa}$, van de geleidende laag wordt gesteld op de skin-dikte, $d_{skin}^{v,\kappa}$, maar maximaal gelijk aan de dikte van de demper, d_d . Binnen deze geleidende laag wordt de stroom uniform verondersteld. Deze veronderstelling is niet juist voor het geval dat de skin-dikte kleiner is dan de dikte van de demper, het met behulp van het theoretische model berekende verlies in de demper is dan ook niet geheel juist.

Voor $\delta^{v,\kappa}$ geldt dus:

$$\begin{aligned} \delta^{v,\kappa} &= d_{skin}^{v,\kappa} \quad \text{als} \quad d_{skin}^{v,\kappa} \leq d_d, \\ \delta^{v,\kappa} &= d_d \quad \text{als} \quad d_{skin}^{v,\kappa} \geq d_d. \end{aligned} \quad (2.64)$$

Voor de skin-dikte, $d_{skin}^{v,\kappa}$, geldt:

$$d_{skin}^{v,\kappa} = \sqrt{\frac{2}{\omega_r^{v,\kappa} \cdot \sigma \cdot \mu}}. \quad (2.65)$$

Hierin is $\omega_r^{v,\kappa}$ de cirkelfrequentie van de E- en H-velden bij de demper, μ is de permeabiliteit van het materiaal, hier geldt $\mu = \mu_0$. Voor een afleiding van de skin-dikte wordt verwezen naar [5].

Voor de stroombelegging op de demper geldt:

$$A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_d^{v,\kappa} \cdot \cos\left((v \pm \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r\right) \quad (2.66)$$

Een waarnemer op de rotor ($\theta_r = \text{constant}$) ziet de E- en H-velden (de stroombelegging) met een frequentie $(v \pm \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s$. Voor ω_r geldt dus:

$$\begin{aligned} \omega_r^{v,\kappa} &= (v + \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s \quad \text{als} \quad A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_d^{v,\kappa} \cdot \cos\left((v + \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_r\right), \\ \omega_r^{v,\kappa} &= (v - \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s \quad \text{als} \quad A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_d^{v,\kappa} \cdot \cos\left((v - \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_r\right). \end{aligned} \quad (2.67)$$

2.1.4 Bepaling van het verlies van alle harmonische combinaties

Het in de demper gedissipeerde vermogen tengevolge van de totale rotorstroombelegging is te bepalen door de verliesdichtheid tengevolge van de totale stroombelegging te bepalen en hieruit het vermogensverlies te bepalen. Vervolgens moet het tijdgemiddelde vermogensverlies bepaald worden.

De berekening van het totale vermogensverlies verloopt als volgt:

1. Bepaal de verliesdichtheid van de totale stroombelegging op de demper:

$$\vec{P}(t, \theta_r) = \vec{E}_d(t, \theta_r) \times \vec{H}_d(t, \theta_r) \quad (2.68)$$

met

$$\vec{E}_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\sigma \cdot \delta^{\nu, \kappa}} \cdot A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \cdot \vec{u}_z \right) = \frac{I}{\sigma} \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r)}{\delta^{\nu, \kappa}} \right) \right) \cdot \vec{u}_z \quad (2.69)$$

$$\vec{H}_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \cdot \vec{u}_\theta \right)$$

2. Bepaal het vermogensverlies met behulp van de kringintegraal over het gesloten oppervlak A , de dempercilinder met beide uiteinden:

$$P_v(t) = \oiint_A \left(\vec{P}(t, \theta_r) \cdot -\vec{n} \right) \cdot dA \quad (2.70)$$

Het substitueren van vergelijking (2.68) en $\vec{n} = \vec{u}_r$ geeft:

$$P_v(t) = \oiint_A \left(\frac{I}{\sigma} \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu, \kappa}} \cdot A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \cdot (\vec{u}_z \times \vec{u}_\theta) \cdot -\vec{u}_r \right) \cdot dA, \quad (2.71)$$

verder uitwerken hiervan geeft dan:

$$P_v(t) = \frac{I}{\sigma} \cdot \oiint_A \left(\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu, \kappa}} \cdot A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot dA. \quad (2.72)$$

De oppervlakte-integraal is uit te werken tot (zie vergelijking (2.54) en (2.55)):

$$P_v(t) = \frac{I}{\sigma} \cdot \int_{z=0}^{\ell} r_d \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \left(\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu, \kappa}} \cdot A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot d\theta_r \cdot dz. \quad (2.73)$$

Het uitwerken van de integratie over z geeft dan:

$$P_v(t) = \frac{r_d \cdot \ell}{\sigma} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \left(\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu, \kappa}} \cdot A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu, \kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot d\theta_r. \quad (2.74)$$

3. Bepaal het tijdgemiddelde over één periode T van de grondharmonische van de stroom:

$$P_v = \frac{I}{T} \cdot \int_{t=0}^T P_v(t) \cdot dt, \quad (2.75)$$

met behulp van het vermogensverlies volgens vergelijking (2.74) is dit te schrijven als:

$$P_v = \frac{I}{T} \cdot \int_{t=0}^T \frac{r_d \cdot \ell}{\sigma} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \left(\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu,\kappa}} \cdot A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot d\theta_r \cdot dt. \quad (2.76)$$

Het totale verlies bestaat uit een integraal over de tijd en een integraal over de radiale coördinaat van het product van twee rijen cosinusfuncties met de tijd en de radiale coördinaat als argument. Vanwege de orthogonaliteit van cosinussen met verschillende argumenten zullen deze kruisproducten na integratie een waarde gelijk aan nul geven.

In bijlage 3.3 wordt aangetoond dat vergelijking (2.76) gelijk is aan:

$$P_v = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} P_v^{\nu,\kappa} \quad (2.77)$$

met

$$P_v^{\nu,\kappa} = \frac{\pi \cdot r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{\nu,\kappa}} \cdot (\hat{A}_d^{\nu,\kappa})^2 \quad (2.78)$$

De berekening van het totale vermogensverlies verloopt nu als volgt:

1. Bepaal het tijdgemiddelde vermogensverlies van elke harmonische combinatie:

$$P_v^{\nu,\kappa} = \frac{\pi \cdot r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{\nu,\kappa}} \cdot (\hat{A}_d^{\nu,\kappa})^2 \quad (2.79)$$

met $\delta^{\nu,\kappa}$, van de geleidende laag is gelijk aan de indringdiepte, d_{skin} , maar maximaal gelijk aan de dikte van de demper, d_d (zie 2.1.3, vergelijking (2.64) tot en met (2.67)).

2. Bepaal het totale vermogensverlies door het vermogensverlies van alle harmonische combinaties op te tellen:

$$P_{v,gem} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} P_v^{\nu,\kappa} \quad (2.80)$$

2.2 Bepaling van het rotorverlies

De in paragraaf 2.1 beschreven methode om het verlies in de koperen demper te bepalen wordt in deze paragraaf uitgewerkt tot een praktisch te hanteren methode. Tevens wordt voor twee verschillende configuraties het in de demper gedissipeerde vermogen bepaald.

2.2.1 Algemene werkwijze bij de bepaling van het rotorverlies

In paragraaf 2.1 is al aangegeven hoe het verlies in de koperen demper bepaald wordt, hier wordt de methode puntsgewijs weergegeven.

1. Bepaal de uitdrukkingen voor de amplitudes van de harmonischen in de stroom (\hat{i}_v) en de dradendichtheid (\hat{z}_κ).

Dit wordt voor elke configuratie (type machine, belasting en aansluitwijze) afzonderlijk bepaald.

2. Bepaal de stroombelegging op de statorboring aan de hand van de elektromechanische configuratie (wikkelschema), de aansluitwijze en de elektrische configuratie (voeding/belasting).

Bepaal de vereenvoudigde uitdrukkingen voor stroombelegging op de statorboring, de stroombelegging per harmonische combinatie (ν, κ) op de statorboring aan de hand van 2.1.1.1, 2.1.1.2 of 2.1.1.3.

Bepaal de amplitudes van de stroombelegging op de statorboring voor elke harmonische combinatie.

Dit wordt voor elke configuratie (type machine, belasting en aansluitwijze) afzonderlijk bepaald.

3. Bepaal de amplitudes van de stroombelegging op de demper voor elke harmonische combinatie aan de hand van 2.1.2.3 vergelijking (2.45).

Voor de amplitudes van de stroombelegging op de demper geldt:

$$\hat{A}_d^{\nu, \kappa} = \hat{A}_s^{\nu, \kappa} \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{r_d}{r_s} \right)^{-1 + \kappa \cdot p}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s} \right)^{2 \cdot \kappa \cdot p}} \quad (2.81)$$

4. Bepaal de frequentie (in rotorcoördinaten) van het luchtspleet-inductieveld nabij de demper voor elke harmonische combinatie aan de hand van 2.1.3 vergelijking (2.67).

Dit wordt voor elke configuratie (type machine, belasting en aansluitwijze) afzonderlijk bepaald.

5. Bepaal de dikte van de geleidende laag voor elke harmonische combinatie aan de hand van de skin-dikte die hoort bij de beschouwde harmonische combinatie volgens vergelijking (2.65) en de begrenzing van de geleidende laag tot maximaal de dikte van de demper volgens vergelijking (2.64).

Voor de dikte van de geleidende laag, $\delta^{v,\kappa}$, geldt:

$$\delta^{v,\kappa} = d_{skin}^{v,\kappa} \text{ als } d_{skin}^{v,\kappa} \leq d_d \text{ (in dit geval is het berekende verlies niet geheel juist)}$$

$$\delta^{v,\kappa} = d_d \text{ als } d_{skin}^{v,\kappa} \geq d_d$$

Voor de skin-dikte, $d_{skin}^{v,\kappa}$, geldt:

$$d_{skin}^{v,\kappa} = \sqrt{\frac{2}{\omega_r^{v,\kappa} \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (2.82)$$

waarin σ de soortelijke geleiding en μ de permeabiliteit van het dempermateriaal is.

6. Bepaal het verlies in de demper voor elke harmonische combinatie aan de hand van vergelijking (2.78).

Voor het verlies in de demper tengevolge van één harmonische combinatie geldt:

$$P_v^{v,\kappa} = \frac{\pi \cdot r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{v,\kappa}} \cdot (\hat{A}_d^{v,\kappa})^2 \quad (2.83)$$

7. Bepaal het totale verlies in de demper door het verlies van alle harmonische combinaties bij elkaar te tellen volgens vergelijking (2.80).

Voor het totale verlies in de demper geldt:

$$P_{v,gem} = \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} P_v^{v,\kappa} \quad (2.84)$$

In de volgorde van de bovenstaande zeven punten kunnen programma's worden opgezet om het verlies in de demper voor een bepaalde configuratie (type machine, belasting en aansluitwijze) te bepalen. Alleen de uitkomsten onder de punten 1, 2 en 4 moeten per configuratie opnieuw bepaald worden. Voor de configuraties zoals die beschreven worden in 2.2.2 en 2.2.3 is dit gedaan. De volledige programma's zijn in bijlage 4 te vinden.

2.2.2 Het verlies in de demper van een drie-fasige motor

Het verlies in de demper van een drie-fasige motor wordt bepaald voor het geval dat de motor geblokkeerd is. Dit wordt gedaan omdat een verificatie van het verlies in de demper alleen eenvoudig is met een temperatuurmeting. De temperatuurmeting is alleen eenvoudig als de rotor stilstaat.

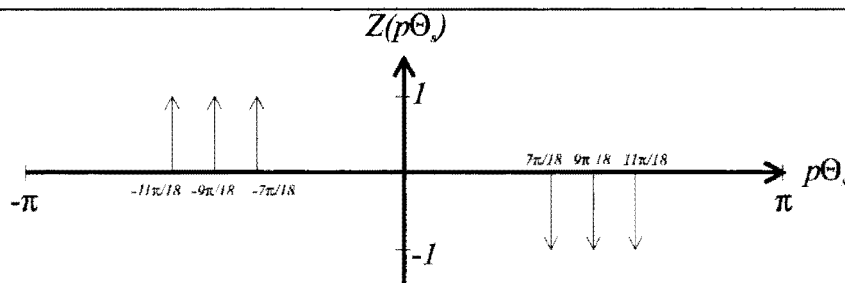
De (geblokkeerde) motor wordt gevoed door een symmetrisch gebalanceerd draaistroomsysteem waarvan de stromen sinusvormig in de tijd variëren. In bijlage 2 is het wikkelschema afgedrukt.

Om de berekening van het verlies volledig te maken worden de punten 1, 2 en 4 verder uitgewerkt.

1. Bepaal de amplitudes van de harmonische in de stroom en de dradendichtheid.

De stroom in een fase-wikkeling varieert sinus-vormig in de tijd zodat \hat{i}_v alleen voor $v = I$ ongelijk aan nul is.

De dradendichtheid wordt gemodelleerd met behulp van Dirac-functies (delta-pulsen). De invloed van de gleufbreedte en de vertanding wordt dus buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2.4 De dradendichtheid als functie van $p \cdot \theta_s$ van één fase.

In figuur 2.4 is de functie van de dradendichtheid geschetst. Het functievoorschrift luidt:

$$Z(p \cdot \theta_s) = \left(\begin{array}{l} \delta(p \cdot \theta_s + \frac{11\pi}{18}) + \delta(p \cdot \theta_s + \frac{9\pi}{18}) + \delta(p \cdot \theta_s + \frac{7\pi}{18}) \\ + \delta(p \cdot \theta_s - \frac{7\pi}{18}) + \delta(p \cdot \theta_s - \frac{9\pi}{18}) + \delta(p \cdot \theta_s - \frac{11\pi}{18}) \end{array} \right) \quad (2.85)$$

De functie van de dradendichtheid moet oneven zijn en een gemiddelde waarde nul hebben; de functie van vergelijking (2.85) (figuur 2.4) voldoet hieraan.

Voor de amplitudes van de harmonischen in de dradendichtheid geldt volgens (2.1):

$$\hat{z}_\kappa = \frac{I}{\pi} \int_{p\theta_s=-\pi}^{\pi} Z(p\cdot\theta_s) \cdot \sin(\kappa \cdot p \cdot \theta_s) d(p\cdot\theta_s). \quad (2.86)$$

Uitwerken hiervan geeft:

$$\begin{aligned} \hat{z}_\kappa &= \frac{P}{\pi \cdot r_s} \cdot \left(\sin\left(\frac{-11\kappa\pi}{18}\right) + \sin\left(\frac{-9\kappa\pi}{18}\right) + \sin\left(\frac{-7\kappa\pi}{18}\right) - \sin\left(\frac{7\kappa\pi}{18}\right) - \sin\left(\frac{9\kappa\pi}{18}\right) - \sin\left(\frac{11\kappa\pi}{18}\right) \right) \\ &= \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot r_s} \cdot \left(-\sin\left(\frac{7\kappa\pi}{18}\right) - \sin\left(\frac{9\kappa\pi}{18}\right) - \sin\left(\frac{11\kappa\pi}{18}\right) \right) \end{aligned} \quad (2.87)$$

De factor p die in vergelijking (2.87) te zien is komt voort uit de toegepaste schaaltransformatie. In plaats van over $\theta_s = 0 \dots 2 \cdot \pi$ te integreren wordt over $p \cdot \theta_s = 0 \dots 2 \cdot \pi$ geïntegreerd, de Dirac-pulsen moeten nu p maal zo groot worden.

Dit is eenvoudig in te zien door in plaats van Dirac-pulsen blokken te nemen met breedte b en hoogte $1/b$. De oppervlakte onder een blok is 1. Door de breedte tot nul te laten naderen gaat het blok over in een Dirac-puls met amplitude 1, de oppervlakte van het blok. Bij de schaalverandering is de breedte (relatief) toegenomen met een factor p , terwijl de hoogte gelijk is gebleven. De oppervlakte is dus een factor p vergroot. Bij de overgang van blokken naar Dirac-pulsen is de schaalverandering terug te vinden in de met een factor p vergrootte amplitude van de Dirac-puls.

2. Bepaal de stroombelegging op de statorboring.

Het betreft hier een drie-fasige machine, zodat volgens 2.1.1.1 formule (2.14) voor de stroombelegging op de statorboring geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \sum_{k=1}^3 \left(\begin{array}{c} \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{3}) \\ - \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{3}) \end{array} \right) \quad (2.88)$$

Voor de stroombelegging geldt met (2.15), (2.16) en (2.17):

- $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{3}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$ als $v - \kappa = Z \cdot 3$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{3}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$ als $v + \kappa = Z \cdot 3$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = 0$ in alle andere gevallen

Voor de amplitudes van de stroombelegging op de statorboring geldt:

- $\hat{A}_s^{v,\kappa} = \frac{3}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa$ als $v - \kappa = Z \cdot 3$ of $v + \kappa = Z \cdot 3$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $\hat{A}_s^{v,\kappa} = 0$ in alle andere gevallen

4. Bepaal de frequentie van het luchtspleetinductieveld nabij de demper.

De frequentie van het inductieveld nabij de demper tengevolge van een bepaalde harmonische combinatie wordt bepaald met behulp van vergelijking (2.66):

- $\omega_r^{v,\kappa} = (v - \kappa \cdot (1 - s)) \cdot \omega_s$ als $v - \kappa = Z \cdot 3$ ($Z \in \mathbb{Z}$)

- $\omega_r^{v,\kappa} = (v + \kappa \cdot (1 - s)) \cdot \omega_s$ als $v + \kappa = Z \cdot 3$ ($Z \in \mathbb{Z}$)

In dit geval geldt dat de rotor geblokkeerd is, dus dat $s=1$, zodat voor de frequentie van de inductievelden nabij de demper geldt:

$$\omega_r^{v,\kappa} = v \cdot \omega_s.$$

In bijlage 4.1 is het bestand afgedrukt waarmee in MathCad (zie bijlage 8) het verlies in de demper berekend wordt voor deze drie-fasige configuratie.

2.2.3 Het verlies in de demper van een semi-18-fasige generator

Het verlies in de demper van een semi-18-fasige generator wordt bepaald voor het geval dat de generator aangesloten is op een gelijkrichter. De gelijkrichter bestaat uit drie in serie geschakelde drie-fasige volle-brug-gelijkrichters zoals afgebeeld in figuur 1.4 van hoofdstuk 1. De stroom die de gelijkrichter levert wordt constant verondersteld.

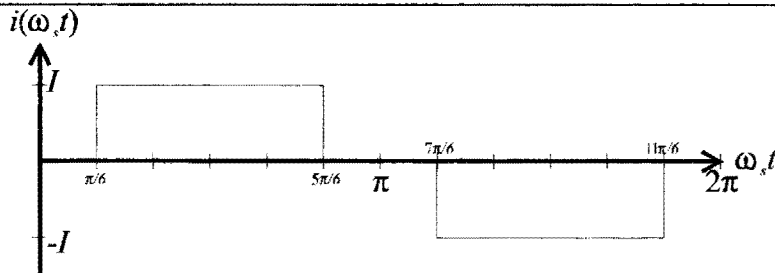
De hiervoor beschreven configuratie is gelijk aan de geplande configuratie voor de uiteindelijk 1,4 MW-generator.

In bijlage 2 is het wikkelschema afgedrukt.

Om de berekening van het verlies volledig te maken worden de punten 1, 2 en 4 verder uitgewerkt.

1. Bepaal de amplitudes van de harmonische in de stroom en de dradendichtheid.

De stroom in een fase-wikkeling wordt bepaald door de belasting. In dit geval bestaat de belasting uit drie in serie geschakelde drie-fasige volle-brug-gelijkrichters, zodat de stroom bestaat uit 'blokken'. De commutatie in de gelijkrichter is hier buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2.5 De stroom in één fase als functie van $\omega_s \cdot t$.

In figuur 2.5 is de functie van de stroom geschetst. Het functievoorschrift luidt:

$$i(\omega_s \cdot t) = \begin{cases} I, & \text{als } \frac{\pi}{6} < \omega_s \cdot t < \frac{5\pi}{6} \\ 0, & \text{als } 0 < \omega_s \cdot t < \frac{\pi}{6} \text{ of } \frac{5\pi}{6} < \omega_s \cdot t < \frac{7\pi}{6} \text{ of } \frac{11\pi}{6} < \omega_s \cdot t < 2 \cdot \pi \\ -I, & \text{als } \frac{7\pi}{6} < \omega_s \cdot t < \frac{11\pi}{6} \end{cases} \quad (2.89)$$

De functie voor de stroom moet oneven zijn en een gemiddelde waarde nul hebben; de functie van vergelijking (2.89) (figuur 2.5) voldoet hieraan.

Voor de amplitudes van de harmonischen in de stroom geldt:

$$\hat{i}_v = \frac{I}{\pi} \int_{\omega_s \cdot t=0}^{2\pi} i(\omega_s \cdot t) \cdot \sin(v \cdot \omega_s \cdot t) d(\omega_s \cdot t) \quad (2.90)$$

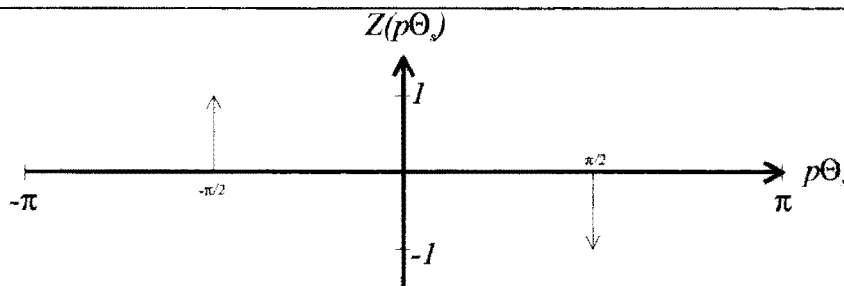
Uitwerken hiervan geeft:

$$\hat{i}_v = \frac{I}{\pi} \cdot \left(\int_{\omega_s t = \pi/6}^{5\pi/6} \sin(v \cdot \omega_s \cdot t) d(\omega_s \cdot t) - \int_{\omega_s t = 7\pi/6}^{11\pi/6} \sin(v \cdot \omega_s \cdot t) d(\omega_s \cdot t) \right) \quad (2.91)$$

ofwel

$$\hat{i}_v = \frac{I}{v \cdot \pi} \cdot \left(\cos\left(\frac{v \cdot \pi}{6}\right) - \cos\left(\frac{5 \cdot v \cdot \pi}{6}\right) - \cos\left(\frac{7 \cdot v \cdot \pi}{6}\right) + \cos\left(\frac{11 \cdot v \cdot \pi}{6}\right) \right) \quad (2.92)$$

De dradendichtheid wordt gemodelleerd met behulp van Dirac-functies (delta-pulsen). De invloed van de gleufbreedte en de vertanding wordt dus buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2.6 De dradendichtheid als functie van $p \cdot \theta_s$.

In figuur 2.6 is de functie van de dradendichtheid geschetst. Het functievoorschrift luidt:

$$Z(p \cdot \theta_s) = \delta\left(p \cdot \theta_s + \frac{\pi}{2}\right) + \delta\left(p \cdot \theta_s - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.93)$$

De functie van de dradendichtheid moet oneven zijn en een gemiddelde waarde nul hebben; de functie van vergelijking (2.93) (figuur 2.6) voldoet hieraan.

Voor de amplitudes van de harmonische in de dradendichtheid geldt:

$$\hat{z}_\kappa = \frac{I}{\pi} \int_{p \cdot \theta_s = -\pi}^{\pi} Z(p \cdot \theta_s) \cdot \sin(\kappa \cdot p \cdot \theta_s) d(p \cdot \theta_s). \quad (2.94)$$

Uitwerken hiervan geeft:

$$\begin{aligned} \hat{z}_\kappa &= \frac{I}{\pi \cdot r_s} \cdot \left(\sin\left(\frac{-\kappa \cdot \pi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\kappa \cdot \pi}{2}\right) \right) \\ &= \frac{2 \cdot I}{\pi \cdot r_s} \cdot \left(-\sin\left(\frac{\kappa \cdot \pi}{2}\right) \right) \end{aligned} \quad (2.95)$$

De factor p wordt ook hier veroorzaakt door de schaaltransformatie van de Dirac-pulsen, zie 2.2.2, punt 1.

2. Bepaal de stroombelegging op de statorboring.

Het betreft hier een semi-18-fasige machine, zodat volgens 2.1.1.2 voor de stroombelegging op de statorboring geldt:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \sum_{k=1}^{18/2} \left(\begin{array}{c} \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{18}) \\ - \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{18}) \end{array} \right). \quad (2.96)$$

Voor de vereenvoudigde stroombelegging geldt met (2.20), (2.21) en (2.22):

- $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{18}{4} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$ als $v - \kappa = Z \cdot 18$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{18}{4} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$ als $v + \kappa = Z \cdot 18$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = 0$ in alle andere gevallen.

Voor de amplitudes van de stroombelegging op de statorboring geldt:

- $\hat{A}_s^{v,\kappa} = \frac{18}{4} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa$ als $v - \kappa = Z \cdot 18$ of $v + \kappa = Z \cdot 18$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $\hat{A}_s^{v,\kappa} = 0$ in alle andere gevallen.

4. Bepaal de frequentie van het inductieveld nabij de demper.

De frequentie van het inductieveld nabij de demper tengevolge van een bepaalde harmonische combinatie wordt bepaald met behulp van vergelijking (2.66):

- $\omega_r^{v,\kappa} = (v - \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s$ als $v - \kappa = Z \cdot 18$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $\omega_r^{v,\kappa} = (v + \kappa \cdot (I - s)) \cdot \omega_s$ als $v + \kappa = Z \cdot 18$ ($Z \in \mathbb{Z}$)

In dit geval draait de rotor synchroon met het grondharmonische statorveld, dus dat $s=0$, zodat voor de frequentie van de inductievelden nabij de demper geldt:

- $\omega_r^{v,\kappa} = (v - \kappa) \cdot \omega_s$ als $v - \kappa = Z \cdot 18$ ($Z \in \mathbb{Z}$)
- $\omega_r^{v,\kappa} = (v + \kappa) \cdot \omega_s$ als $v + \kappa = Z \cdot 18$ ($Z \in \mathbb{Z}$)

In bijlage 4.2 is het bestand afgedrukt waarmee in MathCad (zie bijlage 8) het verlies in de demper berekend wordt voor deze semi-18-fasige configuratie.

3. Praktische verificatie van het rotorverlies

In hoofdstuk 2 is het verlies in de demper theoretisch bepaald aan de hand van een tweedimensionaal model. In dit hoofdstuk wordt het in hoofdstuk 2 bepaalde verlies in de demper geverifieerd door middel van een temperatuurmeting. Ten behoeve van deze temperatuurmeting is een proefmodel gerealiseerd. Met dit proefmodel kan, omdat de rotor geblokkeerd is, op een eenvoudige wijze de temperatuur van een plaats op de demper bepaald worden; er kan 'lokaal' gemeten worden.

De temperatuurstijging van de demper wordt veroorzaakt door het vermogen dat in de demper wordt gedissipeerd. De axiale stromen in de demper wekken een vermogen op zoals dat bepaald is in hoofdstuk 2. De stromen in de randen van de demper (het eindeffect) wekken extra vermogen op.

Het bepalen van het in de demper gedissipeerde vermogen met behulp van een temperatuurmeting is op verschillende manieren mogelijk. Twee mogelijke methodes zijn:

1. Het bepalen van het gedissipeerde vermogen uit de snelheid van de initiële temperatuurstijging.
2. Het bepalen van het gedissipeerde vermogen uit het verschil tussen de (stabiele) eindtemperatuur en de omgevingstemperatuur.

De eerste methode houdt in dat de temperatuur als functie van de tijd wordt geregistreerd gedurende de eerste momenten vanaf het begin van de meting. Praktisch gezien betekent dit dat de demper op het aanvangstijdstip van de meting, op $t=0$, in thermisch evenwicht dient te zijn met de omgeving en dat er tijdens de meting geen vermogen wordt afgestaan aan de omgeving (een adiabatisch proces). In het ideale geval, als de vermogensdichtheid over de hele demper gelijk is en als er geen warmte wordt afgestaan aan de omgeving, zal de temperatuur van de demper overal gelijk zijn en een lineair verband vertonen met de tijd. Uit de snelheid waarmee de temperatuur stijgt kan dan de vermogensdichtheid bepaald worden.

De tweede methode gaat ervan uit dat zowel de begin- als de eindtoestand thermische evenwichten zijn. De begintoestand houdt in dat de demper de temperatuur van de omgeving heeft terwijl er in de demper geen vermogen wordt gedissipeerd. De eindtoestand houdt in dat de demper een constante eindtemperatuur heeft bereikt (in het geval dat de demper overal dezelfde temperatuur heeft) of een constante temperatuurverdeling heeft terwijl er in de demper vermogen wordt gedissipeerd. De omgeving van de demper dient hierbij geconditioneerd te zijn. Dat wil zeggen dat de temperatuur van de omgeving en de stroming van de lucht constant dienen te zijn. De grootte van het vermogen dat de demper afstaat aan de omgeving hangt dan alleen af van het temperatuurverschil tussen de demper en de omgeving. Door middel van een aantal ijkingen, waarbij een exact bekend vermogen in de demper wordt gedissipeerd, kan een verband worden bepaald tussen het verschil van begin- en eindtemperatuur en het in de demper gedissipeerde vermogen. Zodoende is een gemeten verschil van begin- en eindtemperatuur een maat voor het gedissipeerde vermogen.

De dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen wordt in dit verslag bepaald volgens de eerste methode, dus uit de snelheid van de initiële temperatuurstijging. De reden voor deze keuze is dat de metingen betrekkelijk eenvoudig zijn uit te voeren. De bepaling van het in de demper gedissipeerde vermogen volgens de tweede methode is moeilijker vanwege de conditionering van de omgeving en het in rekening moeten brengen van de axiale warmtestroom.

In paragraaf 3.1 wordt de temperatuurverdeling in de dempercilinder afgeleid. In paragraaf 3.2 wordt een beschouwing gegeven over het meten van temperaturen, in het bijzonder over de metingen ten behoeve van het onderzoek in dit rapport. In paragraaf 3.3 worden de temperatuurmetingen ten behoeve van het onderzoek in dit rapport beschreven en uitgewerkt. In paragraaf 3.4 worden er conclusies verbonden aan de metingen van paragraaf 3.3.

3.1 Theoretische bepaling van de temperatuurverdeling

Voor de modellering van de temperatuurverdeling in de demper wordt een vereenvoudiging ingevoerd. In plaats van de temperatuur in de demper als functie van de tijd en de plaats op de demper te beschrijven wordt de temperatuur als functie van de tijd en de axiale-coördinaat beschouwd. De temperatuur is in de tangentiële richting uniform verdeeld omdat alleen asynchrone componenten van het luchtspleetveld stromen in de demper opwekken.

Als het eindeffect (de stromen op de randen van de dempercilinder) verwaarloosd wordt, zoals bij de berekening van het verlies in de demper in paragraaf 2.2 is gedaan, dan zal de temperatuur op de demper overal gelijk zijn en gelijk stijgen. Er is dan geen axiale warmtestroom.

Als het eindeffect niet verwaarloosd wordt dan zal, omdat de gemiddelde stroomdichtheid op de randen hoger is dan de gemiddelde stroomdichtheid in axiale richting, op de randen van de demper een extra vermogen gedissipeerd worden. De grootte van het gebied waarin dit gebeurt is met behulp van het in hoofdstuk 1 genoemde drie-dimensionale-eindige-elementen programma-pakket te bepalen. Met behulp van dit pakket is ook de dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen te bepalen als functie van de plaats op de demper.

Bij de bepaling van de temperatuurverdeling op de demper zal in dit rapport het eindeffect niet verwaarloosd worden, maar de axiale warmtestroom wel. Dit wordt verondersteld omdat slechts de initiële temperatuurstijging geregistreerd wordt, zodat de temperatuur van de demper slechts weinig stijgt. Zodoende wordt het temperatuurverschil tussen de randen van de demper en het midden van de demper klein verondersteld. Omdat verwacht wordt dat het temperatuurverschil tussen de verschillende plaatsen op de demper klein blijft wordt de axiale warmtestroom klein verondersteld. In paragraaf 3.3.6 zal gecontroleerd worden of de gemaakte veronderstelling juist is.

Dankzij de gemaakte veronderstellingen kan de temperatuur op elke plaats van de demper op een eenvoudige wijze bepaald worden uit de dichtheid van het gedissipeerde vermogen aldaar. Het is tevens mogelijk om, als aan de gemaakte veronderstellingen voldaan wordt, uit de meting van de temperatuur op een plaats op de demper de dichtheid van het gedissipeerde vermogen daar te bepalen.

De veronderstelling betreffende de temperatuurverdeling in de demper luiden:

- adiabatische situatie;
- geen axiale warmtestroom;
- temperatuurverdeling in tangentiële richting uniform;
- stroom uniform verdeeld over de dikte van de demper en daarom geen radiale warmtestroom.

De dichtheid van het gedissipeerde vermogen is alleen afhankelijk van de axiale-coördinaat, zodat de vermogensdichtheid (de dichtheid van het gedissipeerde vermogen) uitgedrukt wordt in Watts per meter, [W/m].

Voor het vermogen dat aan een lichaam wordt toegevoerd geldt (in het adiabatische geval):

$$P = \rho \cdot V \cdot \sigma \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (3.1)$$

waarin ρ de dichtheid, V het volume en σ de soortelijke warmte is. De snelheid waarmee de temperatuur stijgt is dT/dt .

Voor het verloop van de temperatuur van het lichaam als functie van de tijd geldt (in het adiabatische geval):

$$T(t) = \frac{P}{\rho \cdot V \cdot \sigma} \cdot t + T(0), \quad (3.2)$$

waarin $T(0)$ de temperatuur van het lichaam is op het tijdstip $t=0$.

Voor de dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen (als functie van de axiale coördinaat) geldt:

$$Q(z) = \frac{m}{\ell} \cdot \sigma \cdot \frac{dT(t,z)}{dt}, \quad (3.3)$$

waarin m de massa en ℓ de lengte van de demper is en σ de soortelijke warmte is. De snelheid waarmee de temperatuur stijgt is $dT(z)/dt$.

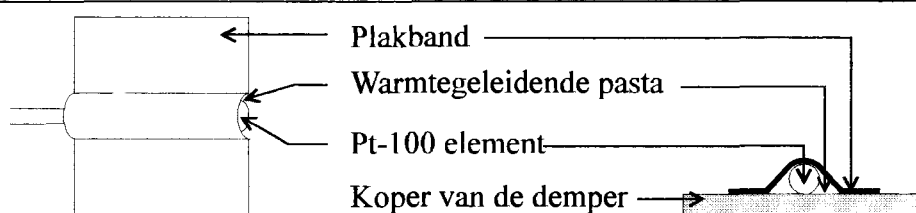
Voor het verloop van de temperatuur als functie van de tijd en de axiale coördinaat geldt:

$$T(t,z) = \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot t + T(0,z), \quad (3.4)$$

waarin $T(0,z)$ de temperatuur is op het tijdstip $t=0$ voor een willekeurige plaats (axiale coördinaat).

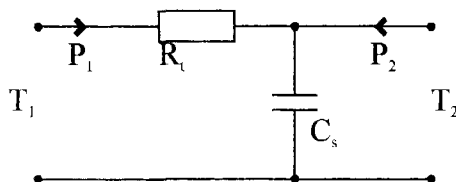
3.2 Theoretische beschouwing over temperatuurmetingen

Voor de temperatuurmetingen die beschreven worden in dit rapport zijn Pt-100 elementen gebruikt. Dit zijn elementen waarvan de weerstand een lineair verband vertoont met de temperatuur. De Pt-100 elementen zoals die voor de metingen in dit rapport zijn gebruikt zijn circa 25 mm lang (actieve lengte) en hebben een diameter van circa 2 mm. De Pt-100 elementen zijn gemaakt van een platina draad die in glas gegoten is. De weerstand van een Pt-100 element is 100,00 Ω bij een temperatuur van 0 °C en 138,50 Ω bij een temperatuur van 100 °C. De betrekkelijk grote afmetingen van de Pt-100 elementen maken ze ongeschikt om zeer lokaal te meten.



Figuur 3.1 De montage van een Pt-100 element.

Een Pt-100 element wordt met behulp van een stukje plakband aangebracht op de plaats waar de temperatuur gemeten dient te worden (zie figuur 3.1). Onder het plakband wordt warmtegeleidende pasta gespoten zodat het Pt-100 element een goed thermisch contact maakt met de meetplaats.



Figuur 3.2 Het vervangingschema van de meetplaats en een Pt-100 element.

In figuur 3.2 is het vervangingschema geschetst. In het schema is T_1 de temperatuur van de meetplaats en T_2 de temperatuur van de sensor. Een Pt-100 element heeft een thermische capaciteit. In het schema wordt de thermische capaciteit van het Pt-100 element en de warmtegeleidende pasta weergegeven met C_s . De overgang tussen de meetplaats en het Pt-100 element is een thermische weerstand. In het schema wordt dit weergegeven met R_t . P_1 is het vermogen dat de demper aan de sensor toevoert. P_2 is gelijk aan nul.

Het blijkt dus dat de geregistreerde temperatuur T_2 in het algemeen niet gelijk is aan de werkelijke temperatuur T_1 .

Bij een temperatuurmeting mag de temperatuursensor geen effect hebben op de temperatuur van de meetplaats. Dit is wel het geval als de thermische capaciteit van het meetobject vele malen groter is dan de thermische capaciteit van de temperatuursensor.

Met behulp van figuur 3.2 kan het verloop van $T_2(t, z)$ bepaald worden voor een gegeven $T_1(t, z)$ en gegeven beginvoorwaarden.

Voor $T_1(t, z)$ geldt:

$$T_1(t, z) = \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot t + T_{omgeving}. \quad (3.5)$$

De beginvoorwaarde luidt:

$$\begin{aligned} T_2(0, z) &= T_{omgeving} \\ T_1(0, z) &= T_{omgeving}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

In het Laplace-domein luidt vergelijking (3.5):

$$T_1(s, z) = \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot \frac{1}{s^2} + T_{omgeving} \cdot \frac{1}{s} \quad (3.7)$$

Voor het schema van figuur 3.2. kan een differentiaalvergelijking opgesteld worden. Er geldt:

$$P_1(t, z) = C_t \cdot \frac{dT_2(t, z)}{dt} \quad (3.8)$$

en

$$T_1(t, z) = P_1(t, z) \cdot R_t + T_2(t, z). \quad (3.9)$$

Het substitueren van vergelijking (3.7) in vergelijking (3.8) levert:

$$T_1(t, z) = R_t \cdot C_t \cdot \frac{dT_2(t, z)}{dt} + T_2(t, z). \quad (3.10)$$

Deze differentiaalvergelijking wordt getransformeerd naar het Laplace-domein:

$$T_1(s, z) = R_t \cdot C_t \cdot [s \cdot T_2(s, z) - T_2(0, z)] + T_2(s, z). \quad (3.11)$$

Het substitueren van vergelijking (3.7) en (3.6) geeft nu:

$$\frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot \frac{1}{s^2} + \frac{T_{omgeving}}{s} = R_t \cdot C_t \cdot [s \cdot T_2(s, z) - T_{omgeving}] + T_2(s, z), \quad (3.12)$$

ofwel

$$\frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot \frac{1}{s^2} + \frac{T_{omgeving}}{s} = (1 + s \cdot R_t \cdot C_t) \cdot T_2(s, z) - T_{omgeving} \cdot R_t \cdot C_t. \quad (3.13)$$

Dit is uit te werken tot

$$T_2(s, z) = \frac{\frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma}}{s^2 \cdot (I + s \cdot R_t \cdot C_t)} + \frac{T_{omgeving}}{s}. \quad (3.14)$$

Met behulp van breuksplitsing geeft dit:

$$T_2(s, z) = \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot \left(\frac{I}{s^2} - \frac{R_t \cdot C_t}{s} + \frac{R_t \cdot C_t}{s + \frac{I}{R_t \cdot C_t}} \right) + \frac{T_{omgeving}}{s}. \quad (3.15)$$

Deze uitdrukking wordt getransformeerd naar het tijd-domein:

$$T_2(t, z) = \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot t + \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot \left(e^{\frac{-t}{R_t \cdot C_t}} - 1 \right) \cdot R_t \cdot C_t + T_{omgeving}. \quad (3.16)$$

Voor de temperatuur van de meetplaats en de temperatuur van de meetsensor geldt (als functie van de tijd):

$$\begin{cases} T_1(t, z) = \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot t + T_{omgeving} \\ T_2(t, z) = \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot t + \frac{\ell}{m} \cdot \frac{Q(z)}{\sigma} \cdot \left(e^{\frac{-t}{R_t \cdot C_t}} - 1 \right) \cdot R_t \cdot C_t + T_{omgeving} \end{cases} \quad (3.17)$$

Met behulp van de functievoorschriften van vergelijking (3.17) is het mogelijk met een set gemeten temperaturen $T_2(t, z)$ de werkelijke temperaturen $T_1(t, z)$ te reconstrueren. Daartoe wordt regressie ('curve-fitting') toegepast. Onder 'curve-fitting' wordt het bepalen van de parameters van een functievoorschrift verstaan, zodanig dat de curve die beschreven wordt door het functievoorschrift zo goed mogelijk lijkt op de te benaderen curve. Het minimaliseren gebeurt volgens de kleinste-kwadraten-methode.

Als de waarden van de parameters van de vergelijking voor $T_2(t, z)$ bepaald zijn met behulp van 'curve-fitting', dan is het temperatuurverloop $T_1(t, z)$ uit te rekenen. De 'curve-fitting' wordt gedaan met behulp van MatLab (zie bijlage 8). Het MatLab-programma waarin de 'curve-fitting' wordt uitgevoerd bepaalt tevens de grootte van het in de demper gedissipeerde vermogen.

De 'gefitte' temperatuurcurve $T_2(t, z)$ wordt samen met de curve van de temperatuur $T_1(t)$ direct na de berekening afgebeeld op het scherm. De gebruiker kan dan onmiddellijk bepalen of de 'curve-fitting' gelukt is. In bijlage 6.1 is een voorbeeld opgenomen van een figuur zoals MatLab die afbeeldt na de berekening.

De MatLab-programma's voor de verwerking van de temperatuurmetingen zijn opgenomen in bijlage 5.1.

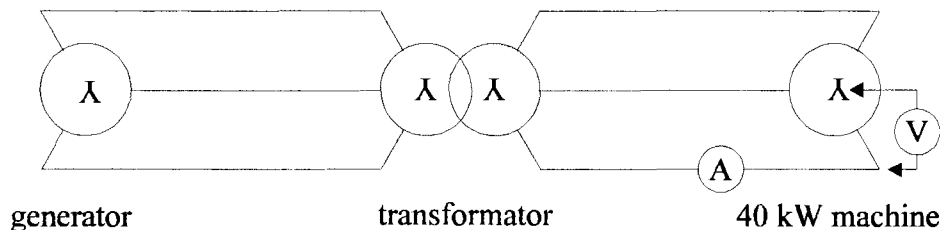
3.3 Praktische uitwerking van de temperatuurmetingen

Het doel van de temperatuurmeting is het bepalen van de grootte van het in de demper gedissipeerde vermogen. Dit wordt vergeleken met het theoretisch bepaalde gedissipeerde vermogen. Alle aspecten die bij de meting naar voren komen worden één voor één belicht in de volgende subparagrafen.

3.3.1 De elektrische configuratie

Ten behoeve van de verificatie van het rotorverliesmodel is een proefmodel ontwikkeld. Dit proefmodel bestaat uit een stator met wikkelingen en een massieve stalen rotor waar een koperen dempercilinder om gemonteerd kan worden. Deze dempercilinder wordt met behulp van kunststof blokjes op afstand van de stalen rotor gehouden. De dempercilinder en de stalen rotor zijn concentrisch om elkaar geplaatst. De gegevens van deze 40 kW-proef-machine zijn te vinden in bijlage 2.

Omdat de rotor van het proefmodel geblokkeerd is kan de machine niet als generator werken. De machine wordt gevoed door een 3-fasige generator. Het betreft motorbedrijf met een geblokkeerde rotor ($s=1$). De machine wordt met behulp van een transformator aangesloten op een drie-fasige generator zodat deze uiteindelijk gevoed kan worden met stromen (die sinusvormig variëren in de tijd) tot ongeveer 100 A (effectieve waarde) met een frequentie variërend van circa 1200 Hz tot circa 3300 Hz.

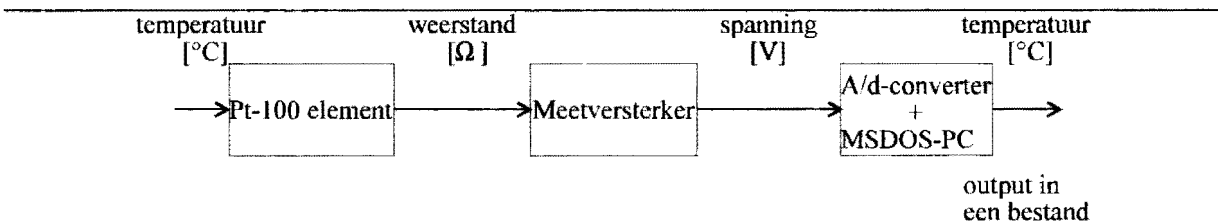


Figuur 3.3 Het elektrische schema.

In figuur 3.3 is een vereenvoudigd elektrisch schema weergegeven van de aansluiting van de generator op het proefmodel. Van de spanning (V) en de stroom (A) wordt met behulp van een digitale geheugenoscilloscoop één periode geregistreerd. In bijlage 6.2 is een uitgebreid elektrisch schema weergegeven van de aansluiting van de generator op het proefmodel.

3.3.2 De thermische configuratie

De Pt-100 elementen worden (zoals beschreven is in paragraaf 3.2) aangebracht op de gewenste meetplaats. De plaats van de Pt-100 elementen is niet steeds dezelfde. Bij elke meting zal worden aangegeven waar de Pt-100 elementen zijn bevestigd. Voor de metingen van dit onderzoek zijn steeds zes Pt-100 elementen gebruikt.



Figuur 3.4. Het meetsysteem van de temperatuurmetingen.

In figuur 3.4 is het 'meetsysteem' afgebeeld. De Pt-100 elementen zijn aangesloten op een meetversterker. Op deze meetversterker kunnen maximaal tien Pt-100 elementen worden aangesloten. De meetversterker is aangesloten op een a/d-converter. Deze a/d-converter wordt door een computer uitgelezen, waarna de computer de temperaturen naar een bestand schrijft. De totale nauwkeurigheid is circa ± 1 °C. Zie bijlage 7 voor de gebruikte apparatuur.

3.3.3 De procedure rond de metingen

De metingen worden steeds volgens de volgende vaste procedure afgewerkt:

1. De meting van zowel de temperatuur als van de spanning en de stroom wordt verricht.
2. Uit de gegevens van de elektrische meting wordt de effectieve waarde van de stroom door één statorfase bepaald, evenals de frequentie.

De verwerking van de elektrische meting gebeurt met behulp van MatLab (zie bijlage 8). De te gebruiken MatLab-programma's zijn afgedrukt in bijlage 5.2.

3. Uit de gegevens van de temperatuurmeting wordt voor elk Pt-100 element bepaald hoe snel de temperatuur stijgt tijdens de initiële fase. Hieruit wordt de lokale dichtheid van het gedissipeerde vermogen bepaald.
4. De met behulp van de temperatuurmeting bepaalde vermogensdichtheid wordt genormeerd op de streefstromen en vergeleken met de vermogensdichtheid die berekend is met behulp van het theoretische verliesmodel.

3.3.4 Opmerking over de hier beschouwde configuratie

De metingen worden uitgevoerd aan een machine met een geblokkeerde rotor. De machine wordt gevoed met een in de tijd sinusvormig variërende stroom. De frequentie van de stroom in de demper is gelijk aan de frequentie van de statorstroom, ofwel $\omega_r = \omega_s$.

In het verliesmodel wordt gebruik gemaakt van de skindikte. De skindikte is afhankelijk van de frequentie van de stromen. Als de skindikte kleiner is dan de dikte van de demper dan zal de dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen zoals het berekend wordt aan de hand van het verliesmodel een benadering zijn. In hoofdstuk 2 is hier al op gewezen.

Voor de hier beschouwde machines geldt dat de dikte van de demper 1 mm is. De frequentie waarbij de skindikte gelijk is aan 1 mm wordt bepaald. Voor de skindikte geldt:

$$d_{skin} = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \mu \cdot \omega}}, \quad (3.18)$$

waarin σ de soortelijke geleiding (hier $50 \cdot 10^6$ bij $50 \text{ }^\circ\text{C}$), μ de permeabiliteit (hier $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$) en ω de hoekfrequentie is. Voor ω geldt:

$$\omega = \frac{2}{\sigma \cdot \mu \cdot d_{skin}^2} = 31831 \text{ [rad/s]}, \quad (3.19)$$

ofwel 5066 Hz. Bij lagere frequenties is de skindikte groter dan 1 mm.

De dikte van de demper is dus voor de hier beschouwde frequenties (1200 Hz tot 3300 Hz) altijd kleiner dan de skindikte. Het theoretische verliesmodel zal een redelijk betrouwbare uitkomst geven van de dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen, zolang de eindeffecten buiten beschouwing blijven.

3.3.5 De metingen

Er zijn in totaal zes metingen verricht met drie verschillende configuraties van de Pt-100 elementen. Per configuratie van de Pt-100 elementen zijn er twee metingen verricht. Eén meting bij een frequentie van de statorstroom van circa 2250 Hz en één meting bij een frequentie van de statorstroom van circa 3250 Hz.

Omdat alleen de configuratie van de Pt-100 elementen en de frequentie van de statorstroom per meting verschillend zijn zal eerst het algemene deel van de metingen in 3.3.5.1 beschreven worden. In 3.3.5.2 tot en met 3.3.5.4 zullen de resultaten van de verschillende metingen beschreven worden. Als daar gesproken wordt over een gemiddelde, dan wordt bedoeld het gemiddelde over de niet verworpen metingen, zie ook bijlage 6.3 en bijlage 6.4.

3.3.5.1 Algemene beschrijving van de metingen

Alle metingen worden op dezelfde manier verricht. Eerst wordt de 40 kW-machine aan de generator gekoppeld (met behulp van een schakelkast) en worden de stroom en de frequentie ervan ingesteld. Dit moet vlug gebeuren omdat de demper anders al teveel in temperatuur stijgt. Als de stroom en frequentie juist zijn ingesteld wordt de verbinding tussen de generator en de 40 kW-machine verbroken. De generator blijft ingeschakeld. De demper wordt nu afgekoeld door middel van een ventilator. Zodra de temperatuur van de demper gelijk is aan de omgevingstemperatuur kan de meting gestart worden.

Het registratieprogramma (het programma dat de temperaturen als functie van de tijd registreert, zie bijlage 8) wordt opgestart en de benodigde gegevens worden ingevoerd. Er wordt gekozen voor 600 samples en een sample-tijd van 1 seconde.

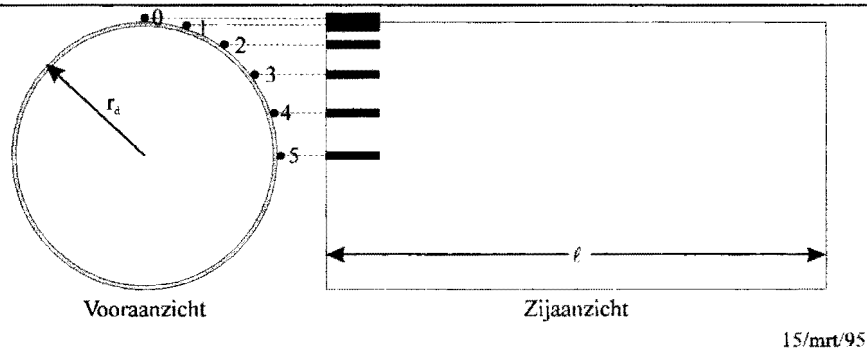
De meting wordt gestart door zowel het registratieprogramma te starten als de 40 kW machine aan de generator te koppelen. De generator zal nu direkt de ingestelde stroom en frequentie leveren. Het registratieprogramma beeldt nu op het scherm de waarden van de a/d-converteren af. Zodra de temperatuur van de demper rond de 100 °C komt wordt de verbinding tussen de generator en de 40 kW-machine verbroken en wordt de generator uitgeschakeld. De meting is dan ten einde.

In de tijd die ligt tussen het begin en het einde van de meting moeten de stroom en de spanning geregistreerd worden. Hiermee wordt bedoeld dat ten minste één periode van de stroom en de spanning vastgelegd dient te worden door een digitale geheugenoscilloscoop (zie bijlage 7). De stroom blijft gedurende de meting (nagenoeg) constant, $\pm 2\%$. De stroom wordt indien nodig geregeld. Uit deze elektrische meting kan dan (onder andere) de frequentie en de effectieve waarde van de stroom bepaald worden.

Bij de verwerking van de temperatuurmetingen is de duur van de initiële fase op 30 seconden gesteld. Na 30 seconden is de invloed van de omgeving nog gering. Dat wil zeggen dat de temperatuur nog bijna lineair oploopt, er wordt nog weinig warmte aan de omgeving afgestaan.

3.3.5.2 Beschrijving van de metingen d.d. 15 maart 1995

Plaatsing van de Pt-100 elementen:



Figuur 3.5. De locatie van de Pt-100 elementen bij de meting van 15 maart 1995.

De locatie van de Pt-100 elementen is weergegeven in figuur 3.5. De Pt-100 elementen zijn aan de buitenkant op de rand van de demper aangebracht. Het Pt-100 element met nummer n is aangesloten op meetkanaal n van de meetversterker. De demper is zodanig in de machine aangebracht dat het Pt-100 element met nummer 0 boven ligt.

Op 15 maart zijn er twee metingen verricht: één meting met een streefstroom van 100 A en een streeffrequentie van 2,25 kHz en één meting met eveneens een streefstroom van 100 A maar met een streeffrequentie van 3,25 kHz. De met behulp van het theoretische verliesmodel berekende vermogensdichtheid is 581 W/m voor beide frequenties en een stroom van 100 A.

Omdat de Pt-100 elementen op de rand van de demper geplaatst zijn is het, vanwege de dissipatie die het eindeffect veroorzaakt, te verwachten dat de uit de meting bepaalde dichtheid van het gedissipeerde vermogen beduidend hoger is dan volgens het theoretische verliesmodel verwacht wordt.

Gegevens en resultaten van de eerste meting:

Frequentie	2,20	[kHz]
Stroom	102,4	[A]
Gemiddelde vermogensdichtheid	912	[W/m]
Standaarddeviatie vermogensdichtheid	83	[W/m]

Gegevens en resultaten van de tweede meting:

Frequentie	3,04	[kHz]
Stroom	108,3	[A]
Gemiddelde vermogensdichtheid	919	[W/m]
Standaarddeviatie vermogensdichtheid	93	[W/m]

Gegevens en resultaten van de beide metingen:

Gemiddelde vermogensdichtheid	916	[W/m]
Standaarddeviatie vermogensdichtheid	88	[W/m]

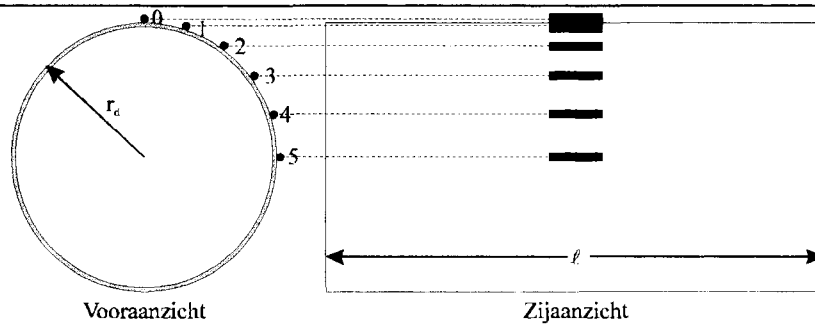
In bijlage 6.3.1 en bijlage 6.4.1 staan alle resultaten van de metingen van 15 maart vermeld.

Uit de metingen blijkt duidelijk dat de uit de meting bepaalde dichtheid van het gedissipeerde vermogen een factor 1,6 groter is dan met behulp van het theoretische model berekend is.

Verder blijkt dat de standaarddeviatie vrij groot is: 9,6% van het gemiddelde. Dit wil zeggen dat de verschillende Pt-100 elementen nogal verschillende temperatuurstijgingen registreren. Dit kan onder andere veroorzaakt worden doordat niet alle Pt-100 elementen een even goed thermisch contact met de demper maken en/of omdat niet alle Pt-100 elementen op exact dezelfde axiale positie gemonteerd zijn.

3.3.5.3 Beschrijving van de metingen d.d. 17 maart 1995

Plaatsing van de Pt-100 elementen:



17/mrt/95

Figuur 3.6. De locatie van de Pt-100 elementen bij de meting van 17 maart 1995.

De locatie van de Pt-100 elementen is weergegeven in figuur 3.6. De Pt-100 elementen zijn aan de buitenkant in het midden van de demper aangebracht. Het Pt-100 element met nummer n is aangesloten op meetkanaal n van de meetversterker. De demper is zodanig in de machine aangebracht dat het Pt-100 element met nummer 0 boven ligt.

Op 17 maart zijn er twee metingen verricht: één meting met een streefstrom van 100 A en een streeffrequentie van 2,25 kHz en één meting met eveneens een streefstrom van 100 A maar met een streeffrequentie van 3,25 kHz. De met behulp van het theoretische verliesmodel berekende vermogensdichtheid is 581 W/m voor beide frequenties en een stroom van 100 A.

Omdat de Pt-100 elementen in het midden van de demper geplaatst zijn is het te verwachten dat de uit de meting bepaalde dichtheid van het gedissipeerde vermogen kleiner is dan volgens het theoretische verliesmodel verwacht wordt.

Gegevens en resultaten van de eerste meting:

Frequentie	2,21	[kHz]
Stroom	100,5	[A]
Gemiddelde vermogensdichtheid	521	[W/m]
Standaarddeviatie vermogensdichtheid	9	[W/m]

Gegevens en resultaten van de tweede meting:

Frequentie	3,21	[kHz]
Stroom	103,8	[A]
Gemiddelde vermogensdichtheid	557	[W/m]
Standaarddeviatie vermogensdichtheid	16	[W/m]

Gegevens en resultaten van de beide metingen:

Gemiddelde vermogensdichtheid	537	[W/m]
Standaarddeviatie vermogensdichtheid	22	[W/m]

In bijlage 6.3.2 en bijlage 6.4.2 staan alle resultaten van de metingen van 17 maart vermeld.

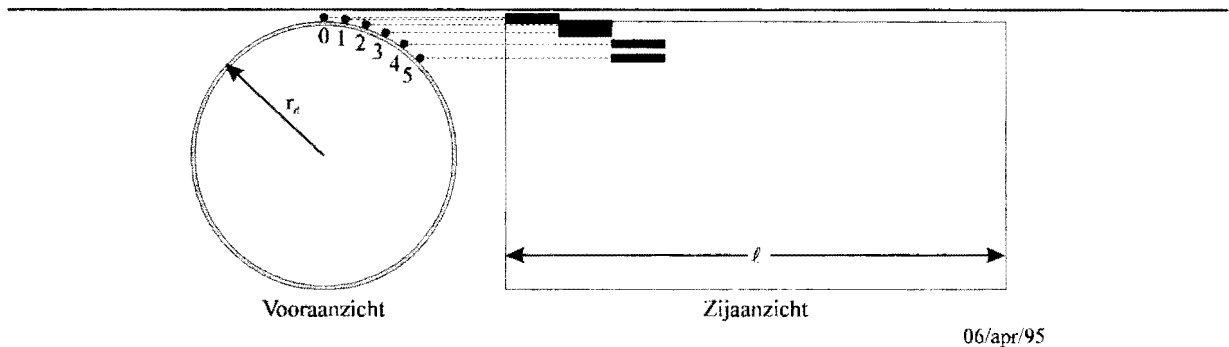
Uit de metingen blijkt duidelijk dat de uit de meting bepaalde dichtheid van het gedissipeerde vermogen slechts weinig lager (8%) is dan met behulp van het theoretische model berekend is.

Verder blijkt dat de standaarddeviatie groot is: 4,1% van het gemiddelde. Dit wil zeggen dat de verschillende Pt-100 elementen nogal verschillende temperatuurstijgingen registreren. Dit kan onder andere veroorzaakt worden doordat niet alle Pt-100 elementen een even goed thermisch contact met de demper maken en/of omdat niet alle Pt-100 elementen op exact dezelfde axiale positie gemonteerd zijn.

Met behulp van deze meting is het theoretische model geverifieerd. Het feit dat de uit de meting bepaalde vermogensdichtheid lager is dan op grond van de theorie verwacht wordt is (gedeeltelijk) te verklaren aan de hand van de bij de afleiding van het theoretische verliesmodel gedane veronderstellingen. Zo wordt de dradendichtheid gemodelleerd door Dirac-functies, gleueffecten worden buiten beschouwing gelaten (gladde luchtspleet) en wordt een volledige afscherming verondersteld. Al deze veronderstellingen betekenen dat de theoretisch bepaalde waarde voor de dichtheid van het gedissipeerde vermogen (iets) te hoog berekend wordt.

3.3.5.4 Beschrijving van de metingen d.d. 6 april 1995

Plaatsing van de Pt-100 elementen:



06/apr/95

Figuur 3.7. De locatie van de Pt-100 elementen bij de meting van 6 april 1995.

De locatie van de Pt-100 elementen is weergegeven in figuur 3.7. De Pt-100 elementen zijn aan de buitenkant aan de rand van de demper en meer naar het midden van de demper toe aangebracht. Het Pt-100 element met nummer n is aangesloten op meetkanaal n van de meetversterker. De demper is zodanig in de machine aangebracht dat het Pt-100 element met nummer 0 boven ligt. Met locatie 1 wordt de plaats van de Pt-100 elementen 0 en 1 bedoeld, met locatie 2 die van de elementen 2 en 3 en met locatie die van de elementen 4 en 5.

Op 6 april zijn er twee metingen verricht: één meting met een stroom van 100 A en een streeffrequentie van 2,25 kHz en één meting met eveneens een stroom van 100 A maar met een streeffrequentie van 3,25 kHz. De met behulp van het theoretische verliesmodel berekende vermogensdichtheid is 581 W/m voor beide frequenties en een stroom van 100 A.

Omdat de Pt-100 elementen verspreid over de demper geplaatst zijn kan met behulp van deze meting iets over de grootte van de axiale warmtestroom gezegd worden. Dit zal in 3.3.6 gebeuren.

Gegevens en resultaten van de eerste meting:

Frequentie	2,17	[kHz]
Stroom	103,2	[A]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 1	861	[W/m]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 2	826	[W/m]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 3	niet te bepalen	[W/m]

Gegevens en resultaten van de tweede meting:

Frequentie	3,17	[kHz]
Stroom	107,3	[A]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 1	975	[W/m]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 2	859	[W/m]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 3	777	[W/m]

Gegevens en resultaten van de beide metingen:

Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 1	918	[W/m]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 2	848	[W/m]
Gemiddelde vermogensdichtheid locatie 3	777	[W/m]

In bijlage 6.3.3 en bijlage 6.4.3 staan alle resultaten van de metingen van 6 april vermeld.

Opmerking:

Uit beide metingen is duidelijk op te maken dat het gedissipeerde vermogen dicht in de buurt van de rand, op locatie 1, van de demper groter is dan meer richting het (axiale) midden van de demper, locatie 2 en locatie 3. Vooral de tweede meting toont dit duidelijk aan.

3.3.6 Bepaling van de grootte van de axiale warmtestroom

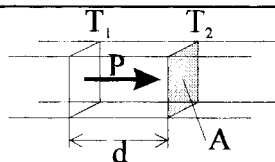
In paragraaf 3.1 is de axiale warmtestroom verwaarloosd bij de bepaling van de temperatuurverdeling in de demper.

Om te zien of de axiale warmtestroom verwaarloosd mag worden is er een meting verricht waarbij de Pt-100 elementen op verschillende afstanden tot de rand van de demper zijn gemonteerd. Dit is het geval bij de metingen van 6 april 1995. Vooral de tweede meting is hiervoor geschikt.

Tabel 3.1. Gegevens ten behoeve van de berekening van de axiale warmtestroom.

Kanaal	dT/dt [K/s]	dT(30) [K]	gemiddelde temperatuurstijging
0	0,7974	23,9	23,1
1	0,7401	22,2	
2	0,6897	20,7	20,3
3	0,6633	19,9	
4	verworpen	---	18,4
5	0,6124	18,4	

Uit de tweede meting van 6 april 1995 worden de resultaten van tabel 3.1 berekend. De tweede kolom is letterlijk overgenomen uit de resultaten van de tweede meting van 6 april 1995, zie bijlage 6.3.3.2. In de tabel staat per Pt-100 element de temperatuurstijging van de demper na 30 seconden, $dT(30)$, en de gemiddelde temperatuurstijging per locatie (zie 3.3.5.3) vermeld.



Figuur 3.8. Schets ter verduidelijking van de vergelijking voor een warmtestroom.

Voor de grootte van een warmtestroom, het vermogen dat getransporteerd wordt, geldt:

$$P = k \cdot \frac{A}{d} \cdot (T_1 - T_2). \quad (3.20)$$

Hierin is k de warmtegeleidingscoëfficiënt in [W/m/K] (voor koper 390 W/m/K), A de doorsnede en d de afstand tussen de punten waar T_1 en T_2 gemeten worden. (Zie figuur 3.8.) In dit geval is A ongeveer gelijk aan $2 \cdot \pi \cdot r_d \cdot d_d$, waarin r_d de straal van de demper en d_d de dikte van de demper is.

Met behulp van de resultaten van tabel 3.1 en de vergelijking voor de warmtestroom (vergelijking (3.20)) kan de grootte van de axiale warmtestroom bepaald worden.

Tabel 3.2 Bepaling van de grootte van de axiale warmtestroom.

Beschouwde situatie	temperatuurverschil na 30 seconden [°C]	Afstand tussen beide locaties [m]	Warmtestroom [W]
locatie 1 → locatie 2	2,8	0,025	19
locatie 2 → locatie 3	1,9	0,025	13
locatie 1 → locatie 3	4,7	0,050	16

In tabel 3.2 is de grootte van de axiale warmtestroom berekend. Om nu te bepalen of de axiale warmtestroom verwaarloosd mag worden moet deze vergeleken worden met het gedissipeerde vermogen in de delen van de demper (secties) die horen bij de locaties. Een sectie spreidt zich uit over de lengte van een Pt-100 element, dus over de as van de demper. De sectie is dus een soort ring met de dikte en de doorsnede van de demper en de lengte van een Pt-100 element.

Tabel 3.3 Bepaling van het gedissipeerde vermogen per sectie.

Plaats	Uit de meting bepaalde vermogensdichtheid [W/m]	Breedte van de sectie [m]	Gedissipeerde vermogen in de sectie [W]
locatie 1	918	0,025	23
locatie 2	848	0,025	21
locatie 3	777	0,025	19

Uit een vergelijking van tabel 3.2 met tabel 3.3 blijkt dat de axiale warmtestroom ongeveer even groot is als het gedissipeerde vermogen in de secties. De interpretatie van deze ruwe vergelijking is lastig. Wordt bijvoorbeeld naar sectie 2 gekeken dan is de warmtestroom die daar vanuit sectie 1 terecht komt 19 W, er gaat een warmtestroom van 13 W naar sectie 3, zodat sectie 2 netto 6 W ontvangt. Deze 6 W is al inbegrepen in de 21 W die in sectie 2 gedissipeerd wordt. In werkelijkheid wordt er in sectie 2 slecht $21-6=15$ W gedissipeerd. Over sectie 1 en sectie 3 is geen soortgelijke uitspraak te doen.

Het blijkt dat de axiale warmtestroom, waarschijnlijk voornamelijk aan de rand van de demper (sectie 1 en sectie 2), een aanzienlijke invloed heeft op de bepaalde dichtheid van het gedissipeerde vermogen. Een kwantificering hiervan is aan de hand van de hier uitgevoerde metingen onmogelijk.

3.4 Conclusies met betrekking tot de temperatuurmetingen

De conclusies die getrokken kunnen worden uit de voor dit afstudeeronderzoek verrichte metingen zijn:

1. De hoeveelheid warmtegeleidende pasta, de dikte van de laag warmtegeleidende pasta onder het Pt-100 element en de correcte plaatsing in axiale richting zijn van invloed op de thermische tijdconstante.

Een aantal gemeten temperatuurcurven had een te grote thermische tijdconstante. Deze metingen zijn verworpen omdat de uitkomsten ervan niet betrouwbaar zijn.

2. De invloed van de axiale warmtestroom op de temperatuurverdeling van de demper is niet uit de metingen te bepalen en blijft daarmee onzeker.

Omdat de Pt-100 elementen te groot zijn en omdat de spreiding in de metingen groot is ($\pm 10\%$) is de grootte van de axiale warmtestroom zoals die uit de metingen bepaald wordt een (te) ruwe benadering.

3. Het eindeffect is niet te verwaarlozen.

Als ervan uitgegaan wordt dat de dichtheid van het gedissipeerde vermogen in het midden van de demper niet beïnvloed wordt door de axiale warmtestroom, dan is de dichtheid van het gedissipeerde vermogen in de rand van de demper (916 W/m) ruwweg 70% hoger dan in het midden van de demper (ongeveer 537 W/m).

Hierbij dient opgemerkt te worden dat er met de Pt-100 elementen niet zeer lokaal gemeten kan worden en dat de dissipatie in de rand van de demper in werkelijkheid (veel) hoger kan zijn.

4. Conclusies en aanbevelingen

4.1 De conclusies

Het afstudeeronderzoek leidt tot de onderstaande conclusies:

1. Het bepalen van de dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen is via een meting van de initiële temperatuurstijging slechts mogelijk in het midden van de demper.
2. De met behulp van het theoretische verliesmodel berekende dichtheid van het gedissipeerde vermogen (518 W/m) komt overeen met de dichtheid van het uit de meting bepaalde gedissipeerde vermogen in het midden van de demper (537 W/m); dit is 8% lager dan berekend en ligt binnen de meetnauwkeurigheid.
3. De vermogensdichtheid gemiddeld over een breedte van 25 mm is nabij de rand van de demper ongeveer 70% hoger dan in het midden van de demper (916 W/m versus 537 W/m); dit is het gevolg van de stromen in tangentiële richting in de uiteinden van de demper.
4. De verrichte metingen zijn niet bruikbaar voor een nauwkeurige bepaling van de invloed van de axiale warmtestroom.

4.2 De aanbevelingen

1. Het in de demper gedissipeerde vermogen als functie van de axiale coördinaat zou nauwkeurig bepaald kunnen worden door met kleinere sensoren te meten, bijvoorbeeld met thermokoppels. Er zou dan tevens een betere bepaling mogelijk zijn van de axiale warmtestroom en de grootte van de dichtheid van het in de randen gedissipeerde vermogen.
2. Door middel van het bepalen van begin- en eindtemperatuur van de demper (na een korte opwarm periode) of door middel van het bepalen van de totale toegevoerde warmte zou het totale in de demper gedissipeerde vermogen bepaald kunnen worden.
3. De met behulp van het theoretische tweedimensionale verliesmodel bepaalde dichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen kan nauwkeuriger bepaald worden door de dradendichtheid op de statorboring beter te benaderen. Ook kan de invloed van de vertanding op de magnetische permeantie van de luchtspleet in rekening gebracht kunnen worden.
4. Het theoretische verliesmodel zou verder verbeterd kunnen worden door geen volledige afscherming van de radiale luchtspleetinductie tengevolge van wervelstromen ter hoogte van de demper, maar ter hoogte van de stalen rotor te veronderstellen.

Geraadpleegde en aanbevolen literatuur

De geraadpleegde literatuur is gebruikt bij het schrijven van dit verslag, in het verslag wordt naar (delen van) deze literatuur verwezen. De aanbevolen literatuur is literatuur die verband houdt met het onderwerp en gelezen is tijdens het afstudeerproject, maar niet gebruikt wordt bij het schrijven van dit verslag.

Geraadpleegde literatuur:

- [1] L.J.J. Offringa, "*Perspectieven van een Sneldraaiende Generator voor een 1400 kW Gasturbine*", Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Elektrotechniek, vakgroep EMV, interim verslag, april 1994.
- [2] R. Kerkenaar, "*Een elektromechanisch voorontwerp van een 500 kW-generator met een toerental van 25000 omw/min.*", Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Elektrotechniek, vakgroep EMV, rapport EMV 93-10, juni 1993.
- [3] J.L.F. van der Veen, L.J.J. Offringa, "*Rotorverlies in een synchrone generator met permanente magneten en belast met een gelijkrichter.*", Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Elektrotechniek, vakgroep EMV, rapport EMV 94-26, januari 1995.
- [4] P.L. Alger, "*Induction Machines*", Gordon & Breach, New York, 1970.
- [5] P.C.T. van der Laan, A.P.J. van Deursen, "Electromagnetic Compatibility", Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Elektrotechniek, vakgroep EHC, collegedictaat behorende bij het college EMC, december 1993.

Aanbevolen literatuur:

B.C. Mecrow, A.G. Jack, J.M. Masterman. "*Determination of rotor eddy current losses in permanent magnet machines.*", 'Sixth international conference on Electrical Machines and Drives', Oxford, U.K., 8-10 september 1993, IEE.

Symbolenlijst

Enkele symbolen hebben meerdere betekenissen, uit de context blijkt dan welke betekenis aan het symbool gegeven moet worden. De recommendaties van de IEC worden aangehouden.

A_d	Stroombelegging op de demper
$A_d^{\nu,\kappa}$	Stroombelegging op de demper van één harmonische combinatie ν, κ
$A_d^{\nu,\zeta}$	Stroombelegging op de demper van één harmonische combinatie ν, ζ
$\hat{A}_d^{\nu,\kappa}$	Amplitude van de stroombelegging op de demper van één harmonische combinatie ν, κ
A_s	Stroombelegging op de statorboring
$A_s^{\nu,\kappa}$	Stroombelegging op de statorboring van één harmonische combinatie ν, κ
$A_s^{\nu,\zeta}$	Stroombelegging op de statorboring van één harmonische combinatie ν, ζ
$\hat{A}_s^{\nu,\kappa}$	Amplitude van de stroombelegging op de statorboring van één harmonische combinatie ν, κ
A_x	Algemene schrijfwijze voor de stroombelegging van de x-de harmonische combinatie met amplitude 1
\hat{A}_x	Amplitude van de stroombelegging van de x-de harmonische combinatie
B	Magnetische inductie
B_θ	De tangentiële component van de magnetische inductie
B_r	De radiële component van het de magnetische inductie
$B_\theta^{\nu,\kappa}$	De tangentiële component van de magnetische inductie van één harmonische combinatie ν, κ
$B_r^{\nu,\kappa}$	De radiële component van de magnetische inductie van één harmonische combinatie ν, κ
C, A	De contour C van een niet gesloten oppervlakt A (wordt gebruikt bij integralen)
C_t	Thermische capaciteit
C_1, C_2	Constanten
K	Fase-tal (niet gelijk aan aantal fasen, bijvoorbeeld semi-K-fasig)
L	Aantal deelsystemen
M	Aantal fasen in het geval van L deelsystemen met elk K fasen
N	Natuurlijk getal, $N \in \mathbb{N}$
P	Vermogen
P_v	Vermogensverlies

Symbolenlijst.

$P_v^{\nu,\kappa}$	Vermogensverlies van één harmonische combinatie ν, κ
Q	Vermogendichtheid
R	Vereenvoudigde schrijfwijze voor een functie afhankelijk van r
R_t	Thermische weerstand
R_1, R_2	Integratie constanten
R_{1r}, R_{2r}	Integratie constanten
$R_{1\theta}, R_{2\theta}$	Integratie constanten
T	Vereenvoudigde schrijfwijze voor een functie afhankelijk van θ of de periodetijd T of Temperatuur
T_1, T_2	Temperaturen
T_{1r}, T_{2r}	Integratie constanten
$T_{1\theta}, T_{2\theta}$	Integratie constanten
V	Volume
Z	Geheel getal, $Z \in \mathbb{Z}$ of Dradendichtheid of Scheidingsconstante
d_d	Dikte van de demper
$d_{skin}^{\nu,\kappa}$	Skin-dikte behorende bij de harmonische combinatie ν, κ
i_k	Stroom in de k -de fase
\hat{i}	Amplitude van de stroom
\hat{i}_ν	Amplitude van de ν -de stroomharmonische
i	Stroom
i_ν	De ν -de stroomharmonische stroom
$i_{k,\nu}$	De ν -de stroomharmonische stroom in de k -de fase
k	Ranggetal van de fase
ℓ	Ranggetal van de deelsystemen of de lengte (van de demper)
m	Ranggetal van de fase in het geval van L deelsystemen met elk K fasen of massa (van de demper)
p	Poolpaartal
r	Radiale coördinaat of Straal
r_d	Straal van de demper
r_s	Straal van de statorboring
s	Slip
t	Tijd
u_k	Spanning van de k -de fase
\hat{u}	Amplitude van de spanning
z	Dradendichtheid of Axiale coördinaat
z_κ	De κ -de ruimteharmonische Dradendichtheid

\hat{z}	Amplitude van de dradendichtheid
\hat{z}_κ	De κ -de ruimteharmonische amplitude van de dradendichtheid
\hat{z}_k	Amplitude van de dradendichtheid van de k -de fase
$\hat{z}_{k,\kappa}$	De κ -de ruimteharmonische amplitude van de dradendichtheid van de k -de fase
\vec{E}	Elektrische veld
$\vec{E}_d^{\nu,\kappa}$	Elektrische veld bij de demper van één harmonische combinatie ν, κ
\vec{H}	Magnetische veld
$\vec{H}_d^{\nu,\kappa}$	Magnetische veld bij de demper van één harmonische combinatie ν, κ
$\vec{J}_d^{\nu,\kappa}$	Stroomdichtheid in de demper van één harmonische combinatie ν, κ
\vec{P}	Vermogensdichtheid
$\vec{P}^{\nu,\kappa}$	Vermogensdichtheid van één harmonische combinatie ν, κ
$\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z$	Eenheidsvectoren in radiale, tangentiële en axiale richting van het coördinatenstelsel
$\vec{n}, \vec{\tau}$	Eenheidsvectoren in normale en tangentiële richting ten opzichte van een lijn(stuk) en een vlak
α	Rangtal van een combinatie van de ruimte- en tijdharmonische, $\alpha = \nu + \kappa$ of $\alpha = \nu - \kappa$
α_x	Rangtal van de x -de combinatie van de ruimte- en tijdharmonische, zie α
β_x	Rangtal van de x -de combinatie van de ruimte- en tijdharmonische, $\beta_x = \pm \kappa$
δ_x	Dikte van de geleidende laag voor de x -de combinatie van de ruimte- en tijdharmonische
$\delta^{\nu,\kappa}$	Dikte van de geleidende laag voor de harmonische combinatie ν, κ
ζ	Relatieve rangtal van de ruimteharmonische, $\zeta = \pm \kappa$
θ	Tangentiële coördinaat of Hoek
θ_s	Tangentiële coördinaat in het statorcoördinatenstelsel
θ_r	Tangentiële coördinaat in het rotorcoördinatenstelsel
κ	Relatieve ranggetal van de ruimteharmonische
κ'	Absoluut rangtal van de ruimteharmonische
κ_x	Relatieve ranggetal van de x -de combinatie van de ruimteharmonische
μ, μ_θ, μ_r	Permeabiliteit, permeabiliteit van vacuüm, relatieve permeabiliteit
ρ	Dichtheid (Soortelijk gewicht)
σ	Geleidbaarheid of Soortelijke geleiding
ν	Rangtal van de tijdharmonischen van de stroom
ν_x	Rangtal van de x -de combinatie van de tijdharmonische
φ	Willekeurige (fase)hoek

Symbolenlijst.

ω	Hoeksnelheid of Cirkelfrequentie
ω_m	Hoeksnelheid van de rotor
ω_s	Cirkelfrequentie van het grondharmonische statorveld
$\omega_r^{\nu,\kappa}$	Cirkelfrequentie van het rotorveld voor de harmonische combinatie ν, κ

1. Literatuuronderzoek

In deze bijlage is het verslag van het bibliotheekpracticum afgedrukt. Het bibliotheekpracticum is een verplicht practicum dat de student naar keuze mag uitvoeren bij een stage, een scriptie of het afstuderen.

Met behulp van het bibliotheekpracticum wordt hier voor de afstudeeropdracht relevante literatuur opgezocht. Dat betekent dat er hier gezocht wordt naar literatuur waarin verliezen tengevolge van wervelstromen in de rotor beschreven worden evenals maatregelen waarmee deze verliezen verkleind kunnen worden.

Het practicum is uitgevoerd in mei 1995.

Inhoudsopgave literatuuronderzoek

1. Inleiding	63
2. De afstudeeropdracht en de literatuuroopdracht	64
2.1 Omschrijving van de afstudeeropdracht	64
2.2 Omschrijving van de literatuuroopdracht	64
3. Concept ‘Inhoudsopgave’ (afstudeerverslag)	65
4. Het literatuuronderzoek	66
4.1 Het zoeken van literatuur	66
4.1.1 ‘VUBIS’	66
4.1.2 INSPEC	67
4.1.3 DISSERTATION ABSTRACTS	68
4.1.4 NTIS	69
4.1.5 ETDE	70
4.1.6 COMPENDEX	71
4.2 Sneeuwbal-methode	71
4.3 Citatie-methode	72
4.4 Recente literatuur	73
4.4.1 INSPEC - gedrukte versie	73
4.4.2 Electric Machines and Power Systems	74
4.4.3 IEE proceedings on Electric Power Applications	74
4.4.4 IEE proceedings on Generation, Transmission and Distribution	74
5. De gevonden literatuur en het onderzoek	75
6. De conclusies	76
7. De definitieve literatuurlijst	77

1. Inleiding

Het bibliotheekpracticum is een verplicht onderdeel in het studieprogramma van de Faculteit Elektrotechniek aan de Technische Universiteit Eindhoven. De student mag het practicum voldoen bij een stage, een scriptie of bij het afstuderen. Het bibliotheekpracticum is een middel om de student te leren zoeken in diverse literatuurbronnen volgens verschillende zoekmethoden, om zo vlot en doeltreffend literatuur over een bepaald onderwerp op te zoeken.

Het in dit verslag beschreven literatuuronderzoek is verricht in het kader van het afstudeerproject “Rotorverliezen van een sneldraaiende synchrone generator welke bekrachtigd wordt door permanente magneten”.

2. De afstudeeropdracht en de literatuuroopdracht

2.1 Omschrijving van de afstudeeropdracht

Een door permanente magneten bekrachtigde, compacte generator wordt gekoppeld aan een gasturbine met een toerental van circa 18.000 omw/min. Naar verwachting zal dit concept een verbetering inhouden met betrekking tot het rendement, de massa en het volume ten opzichte van conventionele ontwerpen. Het cruciale punt in het ontwerp van de generator is het beperken van de verliezen in de rotor vanwege de temperatuurgevoelige magneten en de bandage van koolstofvezel en composiet-materiaal.

In de afstudeeropdracht wordt gevraagd de gemaakte berekeningen te verifiëren door middel van metingen, het gemaakte schaalmodel te beproeven, het model van het rotorverlies nader uit te werken en de maatregelen ter beperking van het rotorverlies te onderzoeken.

2.2 Omschrijving van de literatuuroopdracht

In de afstudeeropdracht is de opdracht voor het literatuuronderzoek geformuleerd. De opdracht luidt:

“De maatregelen waarmee de in de rotor optredende verliezen beperkt kunnen worden dienen door middel van een literatuuronderzoek gerubriceerd te worden.”

Het literatuuronderzoek is dus gericht op het vinden van literatuur waarin verliezen (voorkeur: verliezen tengevolge van wervelstromen) in de rotor van elektrische machines (voorkeur: generatoren) met permanente magneten worden beschreven en/of beperkt. Er wordt niet verwacht dat er veel literatuur over het onderwerp te vinden is zodat alle bruikbare literatuur onderzocht dient te worden. Omdat het een betrekkelijk nieuw onderwerp is wordt in eerste instantie gezocht naar recente literatuur (1992-heden) pas daarna wordt naar oudere literatuur gezocht. Er worden geen eisen gesteld aan de oorsprong van en het soort literatuur.

3. Concept 'Inhoudsopgave' (afstudeerverslag)

De verwachte opbouw van het afstudeerverslag wordt hier weergegeven aan de hand van een concept van de inhoudsopgave van dat verslag. In dit concept van de inhoudsopgave wordt alleen de indeling van de hoofdstukken weergegeven.

Hoofdstuk 1. Inleiding.

- Redenen voor het ontwerpen van een sneldraaiende generator met permanente magneten.
- Het huidige onderzoek.

Hoofdstuk 2. Theoretische bepaling van het rotorverlies.

- Analytische bepaling volgens een tweedimensionaal model.
- Berekening van het rotorverlies voor diverse configuraties.

Hoofdstuk 3. Praktische verificatie van het rotorverlies.

- Uitwerking van het te hanteren thermische model.
- Uitwerking van de metingen volgens het thermische model .

Hoofdstuk 4. Extrapolatie van het rotorverlies naar 'de grote generator'.

- Algemene schaalwetten, beknopt weergegeven.
- Berekening van het rotorverlies volgens hoofdstuk 2 voor 'de grote generator'.
- Aanpassing van het berekende rotorverlies van 'de grote generator' met behulp van schaalwetten en de bepaalde afwijkingen tussen het berekende en gemeten rotorverlies van hoofdstuk 3.

Hoofdstuk 5. Conclusies en aanbevelingen.

- Conclusies met betrekking tot de theorie.
- Conclusies met betrekking tot de metingen.
- Conclusies met betrekking tot de extrapolatie.
- Aanbevelingen ter beperking van het rotorverlies.

4. Het literatuuronderzoek

In eerste instantie wordt naar literatuur gezocht in de diverse ter beschikking staande bronnen. De meeste van deze bronnen zijn 'elektronisch', dat wil zeggen te raadplegen met behulp van een computerprogramma. De literatuur die zo gevonden wordt dient als basis voor het verdere zoekwerk door middel van de sneeuwbal-methode en de citatie-methode.

4.1 Het zoeken van literatuur

In de volgende subparagrafen wordt per bron vermeld wat de zoekcriteria zijn en hoeveel referenties er in gevonden zijn.

4.1.1 'VUBIS'

'VUBIS' is de 'online'-catalogus van de bibliotheken van de Technische Universiteit Eindhoven (TUE). Hierin is alle op de TUE aanwezige literatuur opgenomen.

In 'VUBIS' wordt gezocht op trefwoord. Na het ingeven van een trefwoord zoekt 'VUBIS' naar de 'VUBIS'-trefwoorden die het ingegeven trefwoord dekken. Per trefwoord wordt het aantal gevonden verwijzingen weergegeven. Mocht een trefwoord voor dit literatuuronderzoek niet interessant zijn dan wordt dit weergegeven met een '-' bij het aantal gevonden verwijzingen.

De zoek-strategie verliep als volgt:

Trefwoord	'VUBIS'-trefwoord	Aantal gevonden verwijzingen
verliezen	asynchrone machines; verliezen	-
	elektrische machines; verliezen	12
wervelstromen	wervelstromen	32
generatoren	elektrostatische generatoren	-
	magnetohydrodynamische generatoren	-
	synchrone generatoren	17
magneten	elektrische machines; permanente magneten	29
	elektrische magneten	-
	keramische magneten	-
	magneten	-
	permanente magneten	-
	supergeleidende magneten	-

Er zijn in totaal 90 verwijzingen naar boeken, proefschriften, artikelen enzovoorts gevonden. Hieruit zijn, op grond van de titel, 6 verwijzingen geselecteerd. Deze zijn opgezocht. Na een selectie op basis van de samenvatting en/of de inhoudsopgave vielen ze alle 6 af.

Met behulp van VUBIS is er geen bruikbare literatuur gevonden.

4.1.2 INSPEC

INSPEC wordt gepubliceerd door 'The Institution of Electrical Engineers' en bevat jaarlijks ongeveer 250.000 referenties en samenvattingen uit circa 4.200 tijdschriften, congresverslagen en 1.000 rapporten.

Er is in eerste instantie gebruik gemaakt van INSPEC-ondisc, de CD-ROM versie van INSPEC. De CD-ROM wordt benaderd met behulp van de zoektaal ProQuest (versie 4.30). Er is gezocht in de jaargangen '92, '93, '94 en jan'95-mrt'95.

ProQuest kan, in het 'options'-menu, zo ingesteld worden dat er zowel naar enkelvoud en meervoud van de opgegeven zoektermen wordt gekeken en dat er ook wordt gekeken naar spellingsvarianten van de zoektermen.

In INSPEC wordt gezocht op 'Thesaurus'-termen (gecontroleerde trefwoorden) met behulp van het 'commando' DE (. . .) (description). De trefwoorden worden verkregen met behulp van de 'Thesaurus'-index. Elke 'zoekstap' in ProQuest wordt genummerd en de resultaten van vorige 'zoekstappen' zijn te combineren in nieuwe 'zoekstappen' met booleaanse functies.

De zoek-strategie verliep als volgt:

Zoekstap	Zoekopdracht
#1	DE(eddy current losses)
#2	DE(eddy currents)
#3	DE(loss measurement)
#4	DE(losses)
#5	DE(permanent magnet machines)
#6	DE(rotors)
#7	(#1 or #2 or #3 or #4) and #5
#8	#5 and #6

Het zoeken gaat nu eenvoudig door ProQuest met de juiste CD-ROM van INSPEC op te starten en vervolgens #7, #8 en #7 or #8 in te typen, zo worden alle verwijzingen die aan #7 en/of #8 voldoen gevonden.

Het resultaat van deze zoekactie in de verschillende jaargangen ziet er als volgt uit:

Zoekactie	Aantal gevonden verwijzingen per jaargang			
	'92	'93	'94	jan '95- mrt '95
#7	2	5	0	0
#8	6	13	9	1
#7 or #8	7	16	9	1
na selectie op titel	4	12	3	0
na selectie op 'abstract'	3	3	0	0

Er zijn in totaal 6 referenties gevonden. Op grond van de inhoud is bepaald of het bruikbaar was. Na deze selectie bleef slechts 1 congresartikel over.

Met behulp van INSPEC is er dus 1 bruikbaar artikel gevonden.

4.1.3 DISSERTATION ABSTRACTS

DISSERTATION ABSTRACTS wordt gepubliceerd door 'University Microfilms International' en bevat referenties met (vanaf 1990) samenvattingen van vooral Amerikaanse dissertaties en afstudeerverslagen. Per jaar worden ongeveer 40.000 titels toegevoegd. Er worden ook (Engelstalige) proefschriften van buitenlandse universiteiten opgenomen; er is echter geen sprake van volledige dekking.

Er is gebruik gemaakt van DISSERTATION ABSTRACTS-ondisc, de CD-ROM versie van DISSERTATION ABSTRACTS. De CD-ROM wordt benaderd met de zoektaal ProQuest (versie 4.10). Er is gezocht in de jaargangen jan '88-dec '92 en jan '93-mrt '95.

ProQuest kan, in het 'options'-menu, zo ingesteld worden dat er zowel naar enkelvoud en meervoud van de opgegeven zoektermen wordt gekeken en dat er ook wordt gekeken naar spelling-varianten van de zoektermen.

In DISSERTATION ABSTRACTS kan niet zoals in INSPEC gezocht worden op 'thesaurus'-termen. In plaats daarvan wordt op termen uit de 'Basic'-index gezocht, met behulp van het 'commando' BI (. . .). Elke 'zoekstap' in ProQuest wordt genummerd en de resultaten van vorige 'zoekstappen' zijn te combineren in nieuwe 'zoekstappen' met booleaanse functies.

De zoek-strategie verliep als volgt:

Zoekstap	Zoekopdracht
#1	BI(eddy current losses)
#2	BI(eddy currents)
#3	BI(loss measurement)
#4	BI(losses)
#5	BI(permanent magnet machines)
#6	BI(rotors)
#7	(#1 or #2 or #3 or #4) and #5
#8	#5 and #6

Het zoeken gaat nu eenvoudig door ProQuest met de juiste CD-ROM van DISSERTATION ABSTRACTS op te starten en vervolgens #7, #8 en #7 or #8 in te typen, zo worden alle verwijzingen die aan #7 en/of #8 voldoen gevonden.

Het resultaat van deze zoekactie in de verschillende jaargangen ziet er als volgt uit:

Zoekactie	Aantal gevonden verwijzingen per jaargang	
	jan'88-dec'92	jan'93-mrt'95
#7	5	5
#8	15	7
#7 or #8	19	10
na selectie op titel	2	6
na selectie op abstract	1	0

Er is 1 referentie gevonden. Aan de hand van de inhoud ervan is bepaald of deze bruikbaar was. Dit bleek niet het geval te zijn.

Met behulp van DISSERTATION ABSTRACTS is er dus geen bruikbare literatuur gevonden.

4.1.4 NTIS

NTIS wordt gepubliceerd door 'The National Technical Information Service' en bevat referenties met samenvattingen van rapporten van door de Amerikaanse overheid gesubsidieerde onderzoeksresultaten, inclusief softwarepakketten en databestanden. De rapportliteratuur betreft vooral technische onderwerpen, maar omvat alle vormen van toegepast onderzoek. Per jaar worden circa 70.000 referenties toegevoegd.

Er is gebruik gemaakt van de CD-ROM versie van NTIS. De CD-ROM wordt benaderd met behulp van de zoektaal SPIRS (versie 3.11, SPIRS=Silver Platter Information Retrieval System). Er is gezocht op de CD-ROM van jan'90-mrt'95.

De opgegeven woorden mogen overal in de in NTIS opgenomen literatuurbeschrijvingen voor komen.

De zoek-strategie verliep als volgt:

Zoekwoord/zoeckwoorden	Aantal gevonden verwijzingen	Na selectie op titel
permanent* magnet* field* calculation*	12	0
field* calculation*	78	0
harmonic* loss*	3	0

Met behulp van NTIS is er dus geen bruikbare literatuur gevonden.

4.1.5 ETDE

ETDE wordt geproduceerd door 'The International Energy Agency and Contributing Member States' en bevat meer dan 1.000.000 referenties met samenvattingen van tijdschriftartikelen, onderzoeksrapporten, conferentieverlagen, octrooien, boeken en dissertaties over alle aspecten van energie en energieonderzoek.

Er is gebruik gemaakt van de CD-ROM versie van ETDE. De CD-ROM wordt, evenals NTIS, benaderd met behulp van de zoektaal SPIRS (nu versie 3.30). Er is gezocht op de CD-ROM's van jan'92-jun'93 en jul'93-dec'94.

De opgegeven woorden mogen overal in de in ETDE opgenomen literatuurbeschrijvingen voor komen.

De hier gevolgde zoek-strategie verliep als volgt:

Zoekwoord/zoeckwoorden	Aantal gevonden verwijzingen	Na selectie op titel	Na selectie op 'abstract'
rotor* loss*	150	0	0
permanent magnet*	42	2	1

Er is 1 referentie gevonden. De referentie beschrijft een artikel in het Japans. Er is niet vermeld of er een Engelstalige vertaling van bestaat, dit is tijdens het afstuderen ook niet achterhaald. Ook is het onduidelijk waar het artikel precies over gaat.

Met behulp van ETDE is een referentie gevonden naar een artikel dat op grond van de titel en de samenvatting interessant lijkt, het artikel zelf is echter niet gevonden.

4.1.6 COMPENDEX

COMPENDEX wordt geproduceerd door 'Engineering Information Inc' en bevat referenties met samenvattingen uit 4.500 internationale tijdschriften, congresverslagen, rapporten, monografieën enzovoort. Per jaar worden circa 200.000 referenties toegevoegd.

Er is gebruik gemaakt van de CD-ROM versie van COMPENDEX. De CD-ROM wordt benaderd met behulp van de zoektaal Dialog (versie 4.3j van januari 1994). Er is gezocht in de jaargangen '91, '92, '93, '94 en jan'95-mrt'95.

In de COMPENDEX wordt gezocht op 'title-words', woorden uit de titel.

De zoek-strategie verliep als volgt:

Zoekstap	Aantal gevonden verwijzingen per jaargang				
	'91	'92	'93	'94	jan'95- mrt'95
permanent* magnet*	62	83	58	97	28
na selectie op titel	0	0	0	0	0
na selectie op 'abstract'	0	0	0	0	0
field* calculation*	18	58	43	41	4
na selectie op titel	0	0	0	0	0
na selectie op 'abstract'	0	0	0	0	0
rotor* loss*	1	1	4	1	2
na selectie op titel	0	0	0	0	0
na selectie op 'abstract'	0	0	0	0	0
eddy* current* loss*	2	1	3	3	1
na selectie op titel	0	0	0	0	0
na selectie op 'abstract'	0	0	0	0	0

Met behulp van de COMPENDEX is er dus geen bruikbare literatuur gevonden.

4.2 Sneeuwbal-methode

Bij de sneeuwbal methode wordt getracht met behulp van de gevonden literatuur meer literatuur over hetzelfde onderwerp te vinden aan de hand van de literatuurverwijzingen (die opgenomen zijn in de gevonden literatuur). Vervolgens wordt aan de hand van de literatuurverwijzingen in de 'nieuwe' gevonden literatuur weer een stap terug gezocht. Op deze manier kan ook nagegaan worden of alle auteurs verwijzen naar dezelfde (standaard-) literatuur of dat er meerdere bronnen zijn.

Tot nu toe is er bij dit literatuuronderzoek slechts één artikel ('conference paper') gevonden, waarin 4 literatuurverwijzingen opgenomen zijn. Deze literatuurverwijzingen luiden (*letterlijk*):

1. Binns, K.J., Lisboa, P.J.G., and Al-Din, M.S.N., EMD, 1991, pp21-25.
2. Carter, F.W., JIEE, Vol54 1916.
3. Kuyper, W.W., AIEE, 1943.
4. Lawrenson, P.J., Reece, P., Ralph, M.C., Proc IEE Vol 113, No4, 1966.

Slechts nummer 1 en nummer 4 zijn te traceren.

Nummer 1 verwijst naar 'The fifth International Conference on Electrical Machines and Drives', het onderdeel (paper) met als titel 'The use of canned rotors in high speed permanent magnet machines'. Dit artikel is voor het literatuuronderzoek niet interessant omdat er niet nader wordt ingegaan op verliezen en/of de beperking ervan in de rotor van een machine met permanent magneten.

Nummer 4 verwijst naar een artikel gepubliceerd in proceedings van de IEE. De titel ervan is 'Tooth-ripple losses in solid poles'. Dit artikel is eveneens niet interessant voor het literatuuronderzoek.

Nummer 2 en nummer 3 zijn niet op te zoeken, bovendien bestaat het vermoeden dat het hier om verouderde literatuur gaat. Nummer 2 stamt waarschijnlijk uit 1975 (1916+54 volumes+5 oorlogsjaren geeft 1975). Nummer 3 stamt uit 1943.

De sneeuwbal-methode is dus slecht toepasbaar op de gevonden literatuur, en levert geen nieuwe literatuur op.

4.3 Citatie-methode

Met behulp van de citatie-methode wordt nagegaan of er bruikbare nieuwere literatuur is die verwijst naar de gevonden literatuur. Als dat zo is dan wordt weer een stap verder gedaan totdat er geen nieuwere literatuur meer is die voor het literatuuronderzoek bruikbaar is.

Het gevonden artikel is een 'conference paper', een rapport dat bij een conferentie besproken is. Het opzoeken van artikelen die dit artikel geciteerd hebben is onmogelijk met behulp van de SCIENCE CITATION INDEX omdat hierin alleen tijdschrift artikelen opgenomen zijn. De citatie-methode kan niet op dit literatuuronderzoek toegepast worden.

4.4 Recente literatuur

Er is weinig literatuur gevonden over het gestelde onderwerp. Dit kan veroorzaakt worden door meerdere factoren. Enkele daarvan zijn (mogelijk):

- Over het onderwerp zijn geen op zichzelf staande artikelen verschenen. Het wordt steeds als onderdeel van een bepaald onderwerp behandeld maar is niet het hoofdonderwerp van het artikel. Zodoende zou er bij het zoeken op trefwoorden steeds te beperkt gezocht kunnen worden.

Ik denk dat hiervan nauwelijks sprake is. Het beperken van verliezen in de rotor van een generator is wel degelijk een punt dat onderzocht wordt. Het probleem is echter dat dit nooit onderzocht wordt voor sneldraaiende generatoren (waar het probleem groter is dan bij conventionele generatoren) en bij machines met permanente magneten (omdat die alleen in lagere vermogensklassen veelvuldig gebruikt worden waarbij de verliezen beheersbaar zijn).

- Literatuur over het onderwerp wordt niet direct openbaar gemaakt, omdat het onderzoek naar sneldraaiende generatoren door bedrijven of door bedrijven in samenwerking met een universiteit verricht worden. In die gevallen zal niet direct en niet volledig openbaar gemaakt worden wat de meeste recente vorderingen zijn.

Ik denk dat dit aspect een belangrijke rol speelt, samen met het feit dat er slechts weinig plaatsen op de wereld zijn waar men geïnteresseerd is in sneldraaiende generatoren.

- De doorzochte bronnen dekken niet alle rapporten, verslagen en dergelijke. Alleen rapporten die gepubliceerd worden in een wat groter tijdschrift zijn opgenomen in de diverse bronnen.

Ik vermoed dat bedrijven die zich met dezelfde problematiek bezig houden, als die gesteld in de literaturopdracht, niet of nauwelijks publiceren en dat onderwijsinstellingen veel publicaties 'intern' houden.

Omdat er weinig literatuur gevonden is in de 'elektronische' versie van diverse bronnen wordt er met de hand nog gezocht in naar recente literatuur.

4.4.1 INSPEC - gedrukte versie

Er is gezocht in de gedrukte versie van INSPEC, te weten die van april '95 en die van mei '95. Er is gezocht met behulp van de 'subject guide'.

Termen uit de 'subject guide' waren: 'permanent magnet machines' en 'permanent magnet motors' (codes 8310,8320 en 8340) en 'loss measurement' (codes 7310h en 7310k)

Er zijn hiermee geen nieuwe literatuurverwijzingen gevonden.

4.4.2 Electric Machines and Power Systems

Dit is een tijdschrift dat uitgegeven wordt door Taylor&Francis. Van het huidige jaar (Vol 23) zijn de eerste drie nummers bekeken (jan-feb, mrt-apr, mei-jun).

Er is hiermee geen nieuwe literatuur gevonden.

4.4.3 IEE proceedings on Electric Power Applications

Hiervan zijn de eerste drie nummers van het huidige jaar bekeken (jan-feb, mrt-apr, mei-jun).

Er is hiermee geen nieuwe literatuur gevonden.

4.4.4 IEE proceedings on Generation, Transmission and Distribution

Hiervan zijn de eerste drie nummers van het huidige jaar bekeken (jan-feb, mrt-apr, mei-jun).

Er is hiermee geen nieuwe literatuur gevonden.

5. De gevonden literatuur en het onderzoek

Uiteindelijk is er slechts één ‘conference paper’ gevonden, dit artikel is, in relatie tot het project, nieuw voor de vakgroep EMV:

B.C. Mecrow, A.G. Jack, J.M. Masterman, ‘Determination of rotor eddy current losses in permanent magnet machines’. In: ‘Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives’, 8-10 september 1993, London, U.K., IEE, 1994.

In het artikel laten de auteurs zien hoe zij op basis van een tweedimensionaal model verliezen berekenen. Verder beschrijven zij het effect van het materiaal waarvan de dempercylinder is gemaakt op de grootte van de verliezen.

Ik denk dat ik het gevonden artikel gebruik bij hoofdstuk 2 van mijn afstudeerverslag, bij de analytische bepaling van het rotorverlies en bij hoofdstuk 5, bij de aanbevelingen.

Tevens is er een referentie gevonden naar een artikel uit Japan, tevens in het Japans opgesteld:

Y. Okuyama, ‘Development of synchronous excited by permanent magnet with the largest capacity in the world.’. In: ‘Doryoku-Power-Journal-of-the-Japan-Power-Association-Japan.’, 30 juli 1992.

Uit de titel en de samenvatting is het niet duidelijk of het om een ontwerp van een sneldraaiende generator gaat of dat het om een gerealiseerde generator gaat. Het is niet gelukt een vertaling van het artikel te bemachtigen.

6. De conclusies

De conclusies die aan het bibliotheekpracticum in relatie tot het afstudeeronderzoek verbonden kunnen worden zijn:

1. Er is slechts weinig literatuur (gevonden) waarin:
 - dieper wordt ingegaan op het berekenen van wervelstromen in een cilindrische rotor;
 - het in die rotor gedissipeerde vermogen wordt uitgerekend;
 - expliciet één of een aantal maatregelen wordt genoemd om verliezen in een rotor te beperken.
2. Het fenomeen demper-cylinder is bekend in de literatuur, andere termen hiervoor zijn 'sleeve' (mouw) en 'canned rotor' (ingeblikt, verpakt). Het gebruik van een dempercylinder is meestal vanwege mechanische aspecten (onder andere het opvangen van centrifugaalkracht).
3. Een auteur die ik vaak ben tegen gekomen bij literatuur over elektrische machines met permanente magneten is K.J. Binns. Hij is verbonden aan de universiteit van Liverpool.

7. De definitieve literatuurlijst

De definitieve literatuurlijst van literatuur die gevonden is met behulp van het bibliotheekpracticum en waarnaar in het afstudeerwerk wordt verwezen luidt:

B.C. Mecrow, A.G. Jack, J.M. Masterman, 'Determination of rotor eddy current losses in permanent magnet machines'. In: 'Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives', 8-10 september 1993, London, U.K., IEE, 1994.

Het Japanse artikel waarvan alleen een referentie gevonden is (het artikel zelf nog niet) luidt:

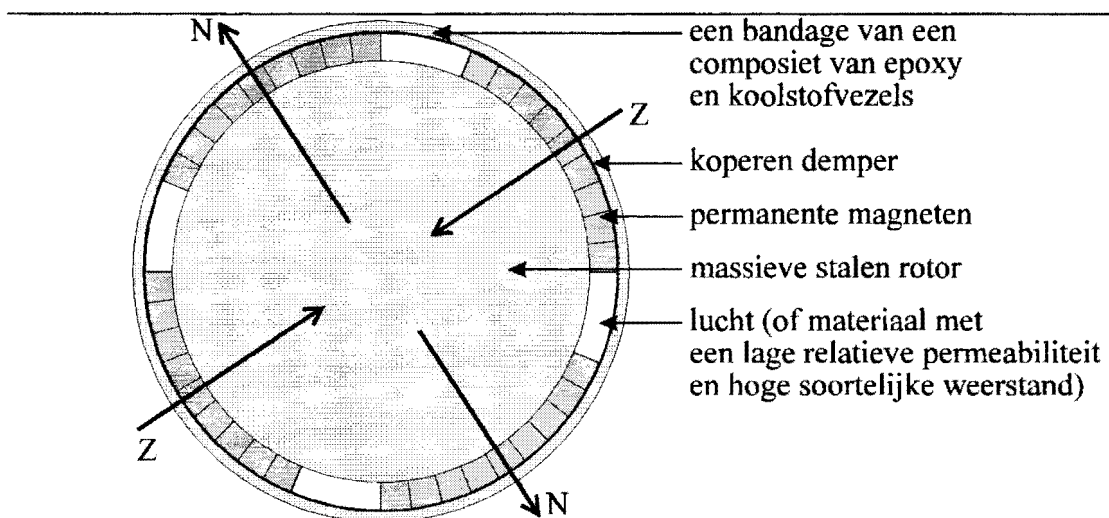
Y. Okuyama, 'Development of synchronous excited by permanent magnet with the largest capacity in the world.'. In: 'Doryoku-Power-Journal-of-the-Japan-Power-Association-Japan.', 30 juli 1992.

2. Gegevens van de machines

In deze bijlage zijn de belangrijkste gegevens van drie machines opgenomen. Twee proefmodellen, waarvan één ten behoeve van de blokkeeringsmeting en één die volledig functioneert als schaalmodel van de sneldraaiende generator, zijn gerealiseerd. De derde machine, de uiteindelijke 1,4 MW-generator, bestaat (nog) niet.

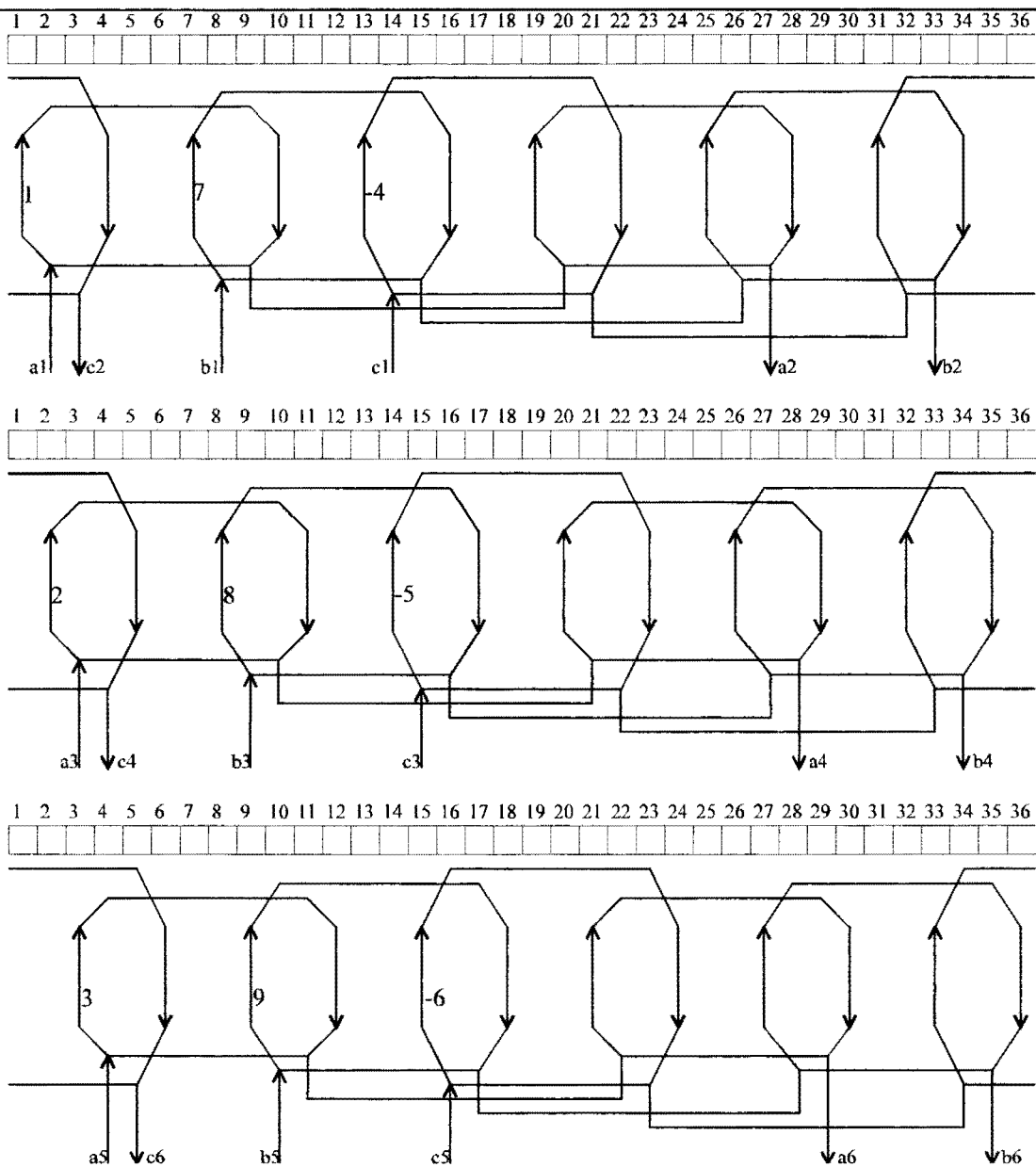
2.1 Algemene gegevens van de machines

De machines zijn van het binnenpool type. Dit houdt in dat het roterende deel, de rotor, geplaatst is binnen het vaste deel, de stator. De rotor is voorzien van magneten; de magnetisatie is radiaal gericht. De stator is voorzien van wikkelingen.



Figuur B2.1 De doorsnede van de rotor.

De rotor bestaat uit een stalen cylinder waarop de permanente magneten gemonteerd zijn (oppervlaktemontage). Dit geheel is omgeven door een koperen cylinder (demper). Dit alles is voorzien van een bandage van een composiet van epoxy en koolstofvezels. In figuur B2.1 is een schematische voorstelling gegeven van de constructie van de rotor.



Figuur B2.2 Het algemene wikkelschema van de machines.

De stator is onder andere opgebouwd uit een statorblikpakket dat in een statorhuis wordt aangebracht. Er zijn 36 gleuven regelmatig verdeeld over de omtrek, in het statorblik aangebracht. Over deze 36 gleuven zijn negen spoelgroepen verdeeld. Het aantal draden per gleuf en de dikte van de draden is (binnen de beschikbare ruimte in een gleuf) te variëren.

In figuur B2.2 is het wikkelschema van de machines afgebeeld. De nummers slaan op de nummers van de fasen uit het semi-18-fasige stelsel. Een negatief nummer betekent dat de wikkelzin van de betreffende fase 'verkeerd' is. (De uiteinden van de fase dienen verwisseld te worden.) De aanduidingen a1 t/m a6, b1 t/m b6 en c1 t/m c6 zijn door de wikkelaar aangebracht. Eén proefmodel kent geen aanduidingen a5, a6, b5, b6, c5 en c6, daarvoor in de plaats zijn de aanduidingen a7, a8, b7, b8, c7 en c8 gebruikt.

2.2 Gegevens 40 kW-proefmodellen

Er zijn twee proefmodellen gerealiseerd.

Het eerste proefmodel heeft slechts één draad (dradenbundel) per gleuf en is uitgevoerd zonder magneten en bandage. Dit proefmodel wordt gebruikt bij de temperatuurmetingen met geblokkeerde rotor.

Het tweede proefmodel heeft vier draden (dradenbundels) per gleuf en is volledig uitgevoerd (met magneten en bandage). Deze generator moet 40 kW kunnen leveren bij een toerental van 9.000 omw/min. Dit proefmodel wordt niet in dit afstudeerverslag gebruikt.

Afmetingen:

Stator	Diameter van de boring	150 mm
	Actieve lengte	245 mm
	Dikte van een statorblik	0,35 mm
Rotor	Buitendiameter stalen binnenwerk	122 mm
	Hoogte magneten	8 mm
	Dikte koperen demper	1 mm
	Buitendiameter koperen demper	140 mm
	Dikte van de bandage	3,5 mm
	Lengte stalen binnenwerk	245 mm
	Totale lengte magneten	245 mm
	Lengte koperen demper	245 mm

2.3 Gegevens 1,4 MW-generator

De 1,4 MW-generator heeft een nog onbekend aantal draden (dradenbundels) per gleuf. De generator zal worden uitgevoerd met een koel-installatie. De generator moet circa 1,4 MW gaan leveren bij een toerental van circa 18.000 omw/min. De generator is (nog) niet gerealiseerd.

Verwachte afmetingen:

Stator	Diameter van de boring	272 mm
	Actieve lengte	620 mm
	Dikte van een statorblik	0,20 mm
Rotor	Buitendiameter stalen binnenwerk	220 mm
	Hoogte magneten	15 mm
	Dikte koperen demper	1 mm
	Buitendiameter koperen demper	252 mm
	Dikte van de bandage	onbekend
	Lengte stalen binnenwerk	620 mm
	Totale lengte magneten	620 mm
	Lengte koperen demper	620 mm

3. Afleidingen en berekeningen

In deze bijlage staan bewijzen en afleidingen waarnaar in het verslag wordt verwezen.

3.1 Bewijzen harmonische stroombelegging

In deze bijlage wordt gebruik gemaakt van de volgende gegevens:

- Als $\nu - \kappa$ even is dan is $\nu + \kappa$ ook even, als $\nu - \kappa$ oneven is dan is $\nu + \kappa$ ook oneven. Dit is in te zien met behulp van de volgende tabel.

ν	κ	$\nu - \kappa$	$\nu + \kappa$
even	even	even	even
even	oneven	oneven	oneven
oneven	even	oneven	oneven
oneven	oneven	even	even

- De cosinus en de sinus kunnen geschreven worden als complexe e-machten:

$$\cos(\varphi) = \frac{1}{2} \cdot (e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}) \text{ en}$$

$$\sin(\varphi) = \frac{1}{2j} \cdot (e^{j\varphi} - e^{-j\varphi}).$$

- De volgende som is te vereenvoudigen:

$$\sum_{a=1}^A b^{(a-1)}$$

Als $b=1$ dan is de som gelijk aan A . Voor $b=1$ geldt:

$$\sum_{a=1}^A 1^{(a-1)} = \underbrace{1^0 + \dots + 1^{(A-1)}}_{A \text{ termen}} = A \quad (\text{B3.1})$$

Als $b \neq 1$ dan geldt:

$$\sum_{a=1}^A b^{(a-1)} = \frac{b^A - 1}{b - 1} \quad (\text{B3.2})$$

3.1.1 Vereenvoudiging K-fasige en semi-K-fasige stroombelegging

In hoofdstuk 2 worden de stroombeleggingen voor het K-fasige en het semi-K-fasige draaistroomsysteem geschreven als

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \sum_k \left(\begin{array}{l} \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ - \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s - (v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) \end{array} \right). \quad (\text{B3.3})$$

Met $v, \kappa \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ en $k = 1 \dots K$ voor het K-fasige systeem en $k = 1 \dots \frac{K}{2}$ voor het semi-K-fasige systeem.

Om nu tot een eenvoudige uitdrukking voor de stroombelegging voor één harmonische combinatie te komen wordt de stroombelegging gesplitst in meerdere stroombeleggingen die elk bij een bepaalde combinatie van v en κ horen. De stroombelegging volgens vergelijking (B3.3) wordt daartoe omgewerkt tot:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \sum_k \left(\begin{array}{l} \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \cos((v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ + \sin(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \sin((v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ - \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \cos((v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ - \sin(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \sin((v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) \end{array} \right). \quad (\text{B3.4})$$

Deze uitdrukking voor de stroombelegging wordt nog verder ontleedt door het somteken op die plaatsen naar te zetten waar het van invloed is. Er volgt dan:

$$A_s^{v,\kappa}(t, \theta_s) = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_v \cdot \hat{z}_\kappa \cdot \left(\begin{array}{l} \cos(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \sum_k \cos((v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ + \sin(v \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \sum_k \sin((v - \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ - \cos(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \sum_k \cos((v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) + \\ - \sin(v \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s) \cdot \sum_k \sin((v + \kappa) \cdot (k - 1) \cdot \frac{2\pi}{K}) \end{array} \right). \quad (\text{B3.5})$$

Aan de hand van deze uitdrukking kan de stroombelegging vereenvoudigd worden. In de volgende paragrafen 3.1.1.1 en 3.1.1.2 wordt dit gedaan voor een K-fasige machine en een semi-K-fasige machine.

Om de uitdrukking te vereenvoudigen worden de sommen van de cosinus- en sinusfuncties eerst apart vereenvoudigd. De sommen van $\cos((v - \kappa) \dots)$ en $\cos((v + \kappa) \dots)$ worden in eerste instantie geschreven als een som van $\cos((\alpha) \dots)$. De sommen van $\sin((v - \kappa) \dots)$ en $\sin((v + \kappa) \dots)$ worden in eerste instantie geschreven als een som van $\sin((\alpha) \dots)$.

3.1.1.1 Het K-fasige systeem

Voor het K-fasige symmetrische draaistroomsysteem loopt de som over $k = 1 \dots K$.

De som van een rij cosinusfuncties met symmetrisch verdeelde argumenten:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \cos(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^K \left(e^{j\alpha(k-1)\frac{2\pi}{K}} + e^{-j\alpha(k-1)\frac{2\pi}{K}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^K \left((R_1)^{k-1} + (R_2)^{k-1} \right). \end{aligned} \quad (\text{B3.6})$$

met $R_1 = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}$ en $R_2 = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}$.

Er zijn twee gevallen te onderscheiden: ($R_1 = 1, R_2 = 1$) en ($R_1 \neq 1, R_2 \neq 1$).

- Als $R_1 = 1, R_2 = 1$ dan geldt:

$e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} = 1$ en $e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} = 1$, dit geldt als $\frac{\alpha}{K} = Z$ met $Z \in \mathbb{Z}$, ofwel als $\alpha = Z \cdot K$,

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.1), gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot (K + K) = K$.

- Als $R_1 \neq 1, R_2 \neq 1$ dan geldt:

$R_1^K = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot K} = 1$ en $R_2^K = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot K} = 1$,

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.2), gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot (0 + 0) = 0$.

Som van een rij sinusfuncties met symmetrisch verdeelde argumenten:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \sin(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}) &= \frac{1}{2j} \cdot \sum_{k=1}^K \left(e^{j\alpha(k-1)\frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha(k-1)\frac{2\pi}{K}} \right) \\ &= \frac{1}{2j} \cdot \sum_{k=1}^K \left((R_1)^{(k-1)} - (R_2)^{(k-1)} \right). \end{aligned} \quad (\text{B3.7})$$

met $R_1 = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}$ en $R_2 = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}$.

Er zijn twee gevallen te onderscheiden: ($R_1 = 1, R_2 = 1$) en ($R_1 \neq 1, R_2 \neq 1$).

- Als $R_1 = 1, R_2 = 1$ dan geldt:

$e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} = 1$ en $e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} = 1$, dit geldt als $\frac{\alpha}{K} = Z$ met $Z \in \mathbb{Z}$, ofwel als $\alpha = Z \cdot K$,

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.1), gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot (K - K) = 0$.

- Als $R_1 \neq 1, R_2 \neq 1$ dan geldt:

$R_1^K = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot K} = 1$ en $R_2^K = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot K} = 1$,

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.2), gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot (0 - 0) = 0$.

Het resultaat in tabelvorm:

	$\sum_{k=1}^K \cos(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K})$	$\sum_{k=1}^K \sin(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K})$
$\alpha = Z \cdot K$	K	0
$\alpha \neq Z \cdot K$	0	0

Met $\alpha = \nu - \kappa$ of $\alpha = \nu + \kappa$, $Z \in \mathbb{Z}$.

Er geldt: $\kappa \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, $\nu \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ en $K \in \mathbb{N} \setminus \{0,1,2\}$.

De vereenvoudigde stroombelegging voor het K-fasige systeem:

- Als $\nu - \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = -Z \cdot K + \nu$ met $Z \in \mathbb{Z}$, dan geldt:

$$A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{\nu,\kappa} \cdot \cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{\nu,\kappa} = \frac{K}{2} \cdot \hat{i}_\nu \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- Als $\nu + \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = Z \cdot K - \nu$ met $Z \in \mathbb{Z}$, dan geldt:

$$A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{\nu,\kappa} \cdot \cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{\nu,\kappa} = -\frac{K}{2} \cdot \hat{i}_\nu \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- In alle andere gevallen geldt:

$$A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s) = 0.$$

3.1.1.2 Het semi-K-fasige systeem

Voor het semi-K-fasige symmetrische draaistroomsysteem loopt de som over $k = 1 \dots \frac{K}{2}$.

De som van een rij cosinusfuncties met symmetrisch verdeelde argumenten:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \cos(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \left(e^{j\alpha(k-1)\frac{2\pi}{K}} + e^{-j\alpha(k-1)\frac{2\pi}{K}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \left((R_1)^{(k-1)} + (R_2)^{(k-1)} \right). \end{aligned} \tag{B3.8}$$

$$\text{met } R_1 = e^{j\alpha \frac{2\pi}{K}} \text{ en } R_2 = e^{-j\alpha \frac{2\pi}{K}}.$$

Er zijn twee gevallen te onderscheiden: ($R_1 = 1$, $R_2 = 1$) en ($R_1 \neq 1$, $R_2 \neq 1$).

- Als $R_1 = 1$, $R_2 = 1$ dan geldt:

$$e^{j\alpha \frac{2\pi}{K}} = 1 \text{ en } e^{-j\alpha \frac{2\pi}{K}} = 1, \text{ dit geldt als } \frac{\alpha}{K} = Z \text{ met } Z \in \mathbb{Z}, \text{ ofwel als } \alpha = Z \cdot K,$$

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.1), gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{K}{2} + \frac{K}{2} \right) = \frac{K}{2}$.

- Als $R_1 \neq 1$, $R_2 \neq 1$ dan geldt:

$$R_1^{\frac{K}{2}} = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = 1 \text{ en } R_2^{\frac{K}{2}} = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = 1 \text{ als } \alpha \text{ even is,}$$

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.2), gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot (0 + 0) = 0$.

$$R_1^{\frac{K}{2}} = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = -1 \text{ en } R_2^{\frac{K}{2}} = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = -1 \text{ als } \alpha \text{ oneven is,}$$

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.2), gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-2}{e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - 1} + \frac{-2}{e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - 1} \right)$.

Het uitwerken hiervan geeft:

$$\frac{1 - e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} + 1 - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}}{2 - e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}} = \frac{2 - e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}}{2 - e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}} = 1.$$

De som van een rij sinusfuncties met symmetrisch verdeelde argumenten:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \sin\left(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}\right) &= \frac{1}{2 \cdot j} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \left(e^{j\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K}} \right) \\ &= \frac{1}{2 \cdot j} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \left((R_1)^{(k-1)} - (R_2)^{(k-1)} \right). \end{aligned} \quad (\text{B3.9})$$

met $R_1 = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}$ en $R_2 = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}$.

Er zijn twee gevallen te onderscheiden: ($R_1 = 1$, $R_2 = 1$) en ($R_1 \neq 1$, $R_2 \neq 1$).

- Als $R_1 = 1$, $R_2 = 1$ dan geldt:

$$e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} = 1 \text{ en } e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} = 1, \text{ dit geldt als } \frac{\alpha}{K} = Z \text{ met } Z \in \mathbb{Z}, \text{ ofwel als } \alpha = Z \cdot K,$$

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.1), gelijk aan $\frac{1}{2 \cdot j} \cdot \left(\frac{K}{2} - \frac{K}{2} \right) = 0$.

- Als $R_1 \neq 1$, $R_2 \neq 1$ dan geldt:

$$R_1^{\frac{K}{2}} = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = 1 \text{ en } R_2^{\frac{K}{2}} = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = 1 \text{ als } \alpha \text{ even is,}$$

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.2), gelijk aan $\frac{1}{2 \cdot j} \cdot (0 - 0) = 0$.

$$R_1^{\frac{K}{2}} = e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = -1 \text{ en } R_2^{\frac{K}{2}} = e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{K}{2}} = -1 \text{ als } \alpha \text{ oneven is,}$$

de som is dan, met behulp van vergelijking (B3.2), gelijk aan $\frac{1}{2 \cdot j} \cdot \left(\frac{-2}{e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - 1} - \frac{-2}{e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - 1} \right)$.

Het uitwerken hiervan geeft:

$$\frac{1}{j} \cdot \frac{\left(1 - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} \right) - \left(1 - e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} \right)}{2 - e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}} = \frac{1}{j} \cdot \frac{e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}}{2 - e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}} = \frac{\left(\frac{e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} - e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}}{2 \cdot j} \right)}{1 - \frac{e^{j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}} + e^{-j\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}}}{2}} = \frac{\sin\left(\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}\right)}{1 - \cos\left(\alpha \cdot \frac{2\pi}{K}\right)}.$$

Dit is uit te werken tot:

$$\frac{\sin(\alpha \cdot \frac{2\pi}{K})}{1 - \cos(\alpha \cdot \frac{2\pi}{K})} = \frac{2 \cdot \sin(\alpha \cdot \frac{\pi}{K}) \cdot \cos(\alpha \cdot \frac{\pi}{K})}{2 \cdot \sin^2(\alpha \cdot \frac{\pi}{K})} = \frac{\cos(\alpha \cdot \frac{\pi}{K})}{\sin(\alpha \cdot \frac{\pi}{K})} = \cot(\alpha \cdot \frac{\pi}{K}).$$

Het resultaat in tabelvorm:

	$\sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \cos(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K})$	$\sum_{k=1}^{\frac{K}{2}} \sin(\alpha \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{K})$
$\alpha = Z \cdot K$	$\frac{K}{2}$	0
$\alpha \neq Z \cdot K, \alpha$ even	0	0
$\alpha \neq Z \cdot K, \alpha$ oneven	1	$\cot(\alpha \cdot \frac{\pi}{K})$

Met $\alpha = \nu - \kappa$ of $\alpha = \nu + \kappa, Z \in \mathbb{Z}$.

Geldt nu tevens dat $\hat{i}_\nu = 0$ voor even waarden van ν , en $\hat{z}_\kappa = 0$ voor even waarden van κ , zodat de even waarden van ν en κ vervallen, dan kunnen $\nu - \kappa$ en $\nu + \kappa$ nooit meer oneven zijn (zie het begin van bijlage 3.1) en vervalt dus het geval ‘ α oneven’, zodat de stroombelegging alleen voor $\alpha = Z \cdot K$, dus voor $\nu - \kappa = Z \cdot K$ en $\nu + \kappa = Z \cdot K$, ongelijk is aan nul. Er geldt: $\kappa \in \mathbb{N} \setminus \{0\}, \nu \in \mathbb{N} \setminus \{0\}, K \in \mathbb{N} \setminus \{0,1,2\}$ en K is even.

Vereenvoudigde stroombelegging voor het semi-K-fasige systeem met alleen oneven ruimte- en tijdharmischen:

- Als $\nu - \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = -Z \cdot K + \nu$ met $Z \in \mathbb{Z}$, dan geldt:

$$A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{\nu,\kappa} \cdot \cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{\nu,\kappa} = \frac{K}{4} \cdot \hat{i}_\nu \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- Als $\nu + \kappa = Z \cdot K$, ofwel als $\kappa = Z \cdot K - \nu$ met $Z \in \mathbb{Z}$, dan geldt:

$$A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s) = \hat{A}_s^{\nu,\kappa} \cdot \cos(\nu \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_s)$$

$$\text{met } \hat{A}_s^{\nu,\kappa} = -\frac{K}{4} \cdot \hat{i}_\nu \cdot \hat{z}_\kappa.$$

- In alle andere gevallen geldt:

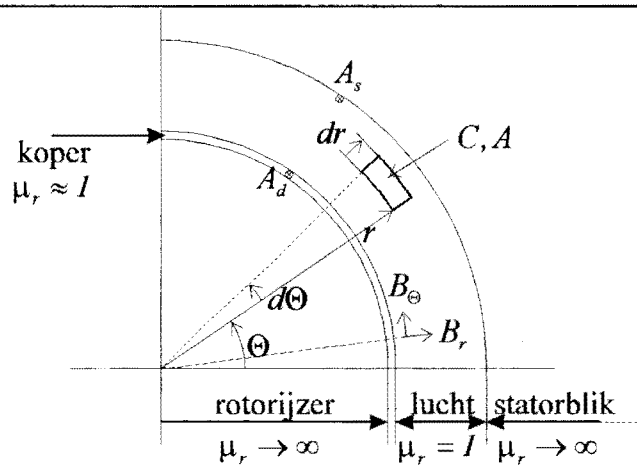
$$A_s^{\nu,\kappa}(t, \theta_s) = 0.$$

3.2 De stroombelegging op de demper

De stroombelegging op de demper wordt bepaald aan de hand van het luchtspleetveld. Het luchtspleetveld wordt bepaald met behulp van de wetten van Maxwell en de randvoorwaarden die horen bij de configuratie. De wetten van Maxwell kunnen zowel in differentiaalvorm als in integraalvorm gebruikt worden. Hier worden de wetten van Maxwell in de integraalvorm gebruikt. In [4] wordt de afleiding van het luchtspleetveld globaal weergegeven.

De hier te gebruiken wetten van Maxwell (geldig in de luchtspleet) luiden:

$$\begin{cases} \oint_C (\vec{H} \cdot \vec{\tau}) \cdot d\ell = 0 \\ \oiint_A (\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot dA = 0. \end{cases} \quad (\text{B3.10})$$



Figuur B3.1 Plaatje van de configuratie voor de Maxwell-integralen.

Het toepassen van

$$\oint_C (\vec{H} \cdot \vec{\tau}) \cdot d\ell = 0 \quad (\text{B3.11})$$

op de kring C , zie figuur B3.1, geeft:

$$B_r(r, \theta) \cdot dr + B_\theta(r + dr, \theta) \cdot (r + dr) \cdot d\theta - B_r(r + dr, \theta + d\theta) \cdot dr - B_\theta(r, \theta + d\theta) \cdot r \cdot d\theta = 0. \quad (\text{B3.12})$$

Dit is met een Taylorreeksontwikkeling te benaderen door:

$$B_r \cdot dr + \left(B_\theta + \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \cdot dr \right) \cdot (r + dr) \cdot d\theta - \left(B_r + \frac{\partial B_r}{\partial r} \cdot dr + \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \cdot d\theta \right) \cdot dr + \left(B_\theta + \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \cdot d\theta \right) \cdot r \cdot d\theta = 0 \quad (\text{B3.13})$$

en verder uit te werken tot:

$$\left(B_r \cdot dr \right) + \left(r \cdot B_\theta \cdot d\theta + r \cdot \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \cdot dr \cdot d\theta + B_\theta \cdot dr \cdot d\theta + \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \cdot dr \cdot dr \cdot d\theta \right) + \left(-B_r \cdot dr - \frac{\partial B_r}{\partial r} \cdot dr \cdot dr - \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \cdot d\theta \cdot dr \right) - \left(r \cdot B_\theta \cdot d\theta - r \cdot \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \cdot d\theta \cdot d\theta \right) = 0. \quad (\text{B3.14})$$

Door de hogere orde effecten te verwaarlozen ($dr \cdot dr$ en $d\theta \cdot d\theta$) gaat dit over in:

$$r \cdot \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta - \frac{\partial B_r}{\partial \theta} = 0. \quad (\text{B3.15})$$

Het toepassen van:

$$\oiint_A (\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot dA = 0 \quad (\text{B3.16})$$

op het gesloten axiale oppervlak A , zie zie figuur B3.1, geeft:

$$B_r(r + dr, \theta) \cdot (r + dr) \cdot d\theta - B_r(r, \theta + d\theta) \cdot r \cdot d\theta - B_\theta(r, \theta) \cdot dr + B_\theta(r + dr, \theta + d\theta) \cdot dr = 0. \quad (\text{B3.17})$$

Dit is te benaderen door:

$$\left(B_r + \frac{\partial B_r}{\partial r} \cdot dr \right) \cdot (r + dr) \cdot d\theta - \left(B_r + \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \cdot d\theta \right) \cdot r \cdot d\theta + \left(-B_\theta \cdot dr + \left(B_\theta + \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \cdot dr + \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \cdot d\theta \right) \cdot dr \right) = 0 \quad (\text{B3.18})$$

en verder uit te werken tot:

$$r \cdot B \cdot d\theta + r \cdot \frac{\partial B}{\partial r} \cdot dr \cdot d\theta + B \cdot dr \cdot d\theta + \frac{\partial B}{\partial r} \cdot dr \cdot dr \cdot d\theta + \left(-r \cdot B \cdot d\theta - r \cdot \frac{\partial B}{\partial \theta} \cdot d\theta \cdot d\theta - (B \cdot dr) + B \cdot dr + \frac{\partial B}{\partial r} \cdot dr \cdot dr + \frac{\partial B}{\partial \theta} \cdot d\theta \cdot dr \right) = 0 \quad (\text{B3.19})$$

Door de hogere orde effecten te verwaarlozen ($dr \cdot dr$ en $d\theta \cdot d\theta$) gaat dit over in:

$$r \cdot \frac{\partial B}{\partial r} + B + \frac{\partial B}{\partial \theta} = 0. \quad (\text{B3.20})$$

De beide wetten van Maxwell leveren twee gekoppelde eerste orde differentiaalvergelijkingen, (B3.15) en (B3.20):

$$\begin{cases} r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta - \frac{\partial B_r}{\partial \theta} = 0 \\ r \frac{\partial B_r}{\partial r} + B_r + \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} = 0. \end{cases} \quad (\text{B3.21})$$

Deze twee gekoppelde differentiaalvergelijkingen worden ontkoppeld. Dit gaat als volgt:

Herschrijf de differentiaalvergelijkingen:

$$\begin{cases} r \frac{\partial B_r}{\partial r} + B_r = -\frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \\ \frac{\partial B_r}{\partial \theta} = r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta. \end{cases} \quad (\text{B3.22})$$

Differentieer nu de bovenste vergelijking van (B3.22) naar θ en gebruik de onderste vergelijking van (B3.22) om B_r te elimineren. Dit gaat als volgt:

Differentiëren naar θ :

$$r \frac{\partial^2 B_r}{\partial r \cdot \partial \theta} + \frac{\partial B_r}{\partial \theta} = -\frac{\partial^2 B_\theta}{\partial \theta^2}. \quad (\text{B3.23})$$

De onderste vergelijking substitueren:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta \right) + \left(r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta \right) = -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} B_\theta \quad (\text{B3.24})$$

en uitwerken:

$$r^2 \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r^2} + r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta = -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} B_\theta \quad (\text{B3.25})$$

geeft uiteindelijk een ontkoppelde, partiële, tweede-orde differentiaalvergelijking van de tangentiële component van de inductie B_θ in de luchtspleet:

$$r^2 \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r^2} + 3 \cdot r \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta = -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} B_\theta. \quad (\text{B3.26})$$

Differentieer nu de onderste vergelijking van (B3.22) naar θ en gebruik de bovenste vergelijking van (B3.22) om B_θ te elimineren. Dit gaat als volgt:

Differentiëren naar θ :

$$\frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} = r \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial \theta \cdot \partial r} + \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta}. \quad (\text{B3.27})$$

De bovenste vergelijking substitueren:

$$\frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} = r \frac{\partial}{\partial r} \left(-r \frac{\partial B_r}{\partial r} - B_r \right) + \left(-r \frac{\partial B_r}{\partial r} - B_r \right) \quad (\text{B3.28})$$

en uitwerken:

$$-\frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} = r^2 \frac{\partial^2 B_r}{\partial r^2} + r \frac{\partial}{\partial r} B_r + r \frac{\partial}{\partial r} B_r + r \frac{\partial B_r}{\partial r} + B_r, \quad (\text{B3.29})$$

geeft uiteindelijk een ontkoppelde, partiële, tweede-orde differentiaalvergelijking van de radiële component van de inductie B_r in de luchtspleet:

$$-\frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} = r^2 \frac{\partial^2 B_r}{\partial r^2} + 3 \cdot r \frac{\partial}{\partial r} B_r + B_r. \quad (\text{B3.30})$$

Er blijven twee ongekoppelde differentiaalvergelijkingen over:

$$\begin{cases} r^2 \cdot \frac{\partial^2 B_r}{\partial r^2} + 3 \cdot r \cdot \frac{\partial B_r}{\partial r} + B_r + \frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} = 0 \\ r^2 \cdot \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r^2} + 3 \cdot r \cdot \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta + \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial \theta^2} = 0. \end{cases} \quad (\text{B3.31})$$

Deze twee differentiaalvergelijkingen hebben dezelfde vorm. Daarom wordt voor B_r en B_θ nu B geschreven, zodat de algemene differentiaalvergelijking

$$r^2 \cdot \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + 3 \cdot r \cdot \frac{\partial B}{\partial r} + B + \frac{\partial^2 B}{\partial \theta^2} = 0 \quad (\text{B3.32})$$

volstaat.

Door het toepassen van scheiding van variabelen kan een algemene oplossing bepaald worden. Voor B wordt nu geschreven:

$$B = R(r) \cdot T(\theta) \quad (\text{B3.33})$$

ofwel

$$B = R \cdot T. \quad (\text{B3.34})$$

Hierin is R geen functie van θ , en T geen functie van r , zodat geldt:

$$\frac{\partial B}{\partial r} = R' \cdot T \quad \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} = R'' \cdot T \quad \frac{\partial B}{\partial \theta} = R \cdot T' \quad \frac{\partial^2 B}{\partial \theta^2} = R \cdot T'' \quad (\text{B3.35})$$

In (B3.44) geldt:

$$R' = \frac{dR}{dr} \quad R'' = \frac{d^2R}{dr^2} \quad T' = \frac{dT}{d\theta} \quad T'' = \frac{d^2T}{d\theta^2}. \quad (\text{B3.36})$$

De differentiaalvergelijking (B3.32) gaat nu over in:

$$R \cdot T'' + r^2 \cdot R'' \cdot T + 3 \cdot r \cdot R' \cdot T + R \cdot T = 0. \quad (\text{B3.37})$$

Dit is te schrijven als:

$$-R \cdot T = (r^2 \cdot R'' + 3 \cdot r \cdot R' + R) \cdot T \quad (\text{B3.38})$$

ofwel:

$$\frac{T''}{T} = -\frac{r^2 \cdot R'' + 3 \cdot r \cdot R' + R}{R}. \quad (\text{B3.39})$$

De linkerzijde van vergelijking (B3.39) is alleen maar afhankelijk van θ en de rechterzijde alleen maar van r . Daarom moet vergelijking (B3.39) gelijk zijn aan een constante. Er wordt hier gekozen voor $-\Omega^2$. Er geldt dan:

$$\begin{cases} \frac{T''}{T} = -\Omega^2 \\ -\frac{r^2 \cdot R'' + 3 \cdot r \cdot R' + R}{R} = -\Omega^2. \end{cases} \quad (\text{B3.40})$$

Dit is ook te schrijven als:

$$\begin{cases} T'' - \Omega^2 \cdot T = 0 \\ r^2 \cdot R'' + 3 \cdot r \cdot R' + (1 - \Omega^2)R = 0. \end{cases} \quad (\text{B3.41})$$

De oplossing van de bovenste vergelijking van (B3.41):

$$T'' - \Omega^2 \cdot T = 0 \quad (\text{B3.42})$$

wordt gegeven door:

$$T = T_1 \cdot \cos(\Omega \cdot \theta) + T_2 \cdot \sin(\Omega \cdot \theta). \quad (\text{B3.43})$$

Omdat T (dus zowel T_r als T_θ) periodiek moet zijn over θ geldt er dat $\Omega = Z \in \mathbb{Z}$. Z is de scheidingsconstante. Vanuit elektromechanisch oogpunt is $\Omega = 0$ hier uitgesloten, omdat er in de gestelde configuratie geen homopolair veld aanwezig is.

De oplossing van de onderste (Euler-Cauchy) vergelijking van (B3.41):

$$r^2 \cdot R'' + 3 \cdot r \cdot R' + (1 - \Omega^2)R = 0 \quad (\text{B3.44})$$

wordt gegeven door:

$$R = r^n \quad R' = n \cdot r^{n-1} \quad R'' = n \cdot (n-1) \cdot r^{n-2}, \quad (\text{B3.45})$$

waarmee vergelijking (B3.44) over gaat in:

$$n \cdot (n-1) \cdot r^n + 3 \cdot n \cdot r^n + (1 - Z^2) \cdot r^n = 0. \quad (\text{B3.46})$$

Dit moet voor alle waarden van r gelden, dus:

$$n \cdot (n-1) + 3 \cdot n + (1 - Z^2) = 0 \quad (\text{B3.47})$$

$$n^2 + 2 \cdot n + (1 - Z^2) = 0.$$

voor n geldt nu:

$$n = \frac{-2 \pm \sqrt{4 - 4 \cdot (1 - Z^2)}}{2} = -1 \pm \sqrt{Z^2} = -1 \pm Z \quad (\text{B3.48})$$

zodat voor R geldt:

$$R = R_1 \cdot r^{-1+Z} + R_2 \cdot r^{-1-Z}. \quad (\text{B3.49})$$

De oplossing voor B luidt nu:

$$B = (R_1 \cdot r^{-1+Z} + R_2 \cdot r^{-1-Z}) \cdot (T_1 \cdot \cos(Z \cdot \theta) + T_2 \cdot \sin(Z \cdot \theta)). \quad (\text{B3.50})$$

De algemene oplossing van de differentiaalvergelijkingen van vergelijking (B3.21) luidt:

$$\begin{cases} B_r(r, \theta) = (R_{1r} \cdot r^{-1+Z} + R_{2r} \cdot r^{-1-Z}) \cdot (T_{1r} \cdot \cos(Z \cdot \theta) + T_{2r} \cdot \sin(Z \cdot \theta)) \\ B_\theta(r, \theta) = (R_{1\theta} \cdot r^{-1+Z} + R_{2\theta} \cdot r^{-1-Z}) \cdot (T_{1\theta} \cdot \cos(Z \cdot \theta) + T_{2\theta} \cdot \sin(Z \cdot \theta)). \end{cases} \quad (\text{B3.51})$$

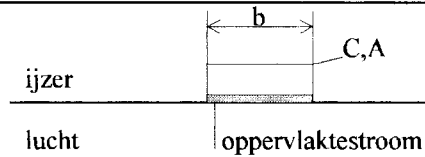
De randvoorwaarden die horen bij het hier gestelde probleem luiden:

$$1. \lim_{r \uparrow r_s} B_\theta(r, t, \theta_r) = \mu_0 \cdot A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) \quad (\text{B3.52})$$

$$\text{met } A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos((v \pm \kappa \cdot (l-s)) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r).$$

$$2. \lim_{r \downarrow r_d} B_r(r, t, \theta) = 0. \quad (\text{B3.53})$$

De eerste randvoorwaarde komt voort uit de gegeven stroombelegging op de statorboring. Deze zorgt voor een tangentiële inductie in de luchtspleet.



Figuur B3.2 Configuratie voor de afleiding van de eerste randvoorwaarde.

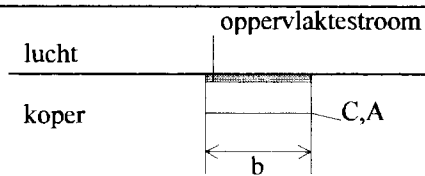
De afleiding van de eerste randvoorwaarde geschiedt aan de hand van figuur B3.2.

Er moet in het ijzer gelden

$$\oint_C (\vec{H} \cdot \vec{\tau}) d\ell = I_{\text{omvat}}. \quad (\text{B3.54})$$

Vanwege de hoge permeabiliteit van het ijzer ($\mu \rightarrow \infty$) geldt in het ijzer dat $\vec{H} = 0$. Voor de gegeven contour C gaat vergelijking (B3.54) over in $H_{\theta, \text{lucht}} \cdot b = A_s^{\text{v}, \text{K}} \cdot b$ ofwel $B_{\theta, \text{lucht}} = \mu \cdot A_s^{\text{v}, \text{K}}$, waarbij $r \uparrow r_s$.

De tweede randvoorwaarde komt voort uit de veronderstelling van een volledige afscherming van de radiële luchtspleetinductie ter hoogte van de koperen dempercylinder. Deze veronderstelling is geoorloofd vanwege het grote snelheidsverschil tussen de koperen demper en het inductieveld.



Figuur B3.3 Configuratie voor de afleiding van de tweede randvoorwaarde.

De afleiding van de tweede randvoorwaarde geschiedt aan de hand van figuur B3.3.

Er moet in het koper gelden

$$\oint_C (\vec{E} \cdot \vec{\tau}) d\ell = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_A (\vec{B} \cdot \vec{n}) dA. \quad (\text{B3.55})$$

Vanwege de hoge soortelijke geleiding van het koper ($\sigma \rightarrow \infty$) geldt in het koper dat $\vec{E} = 0$, zodat de integraal over de contour C nul oplevert. In het koper zal dus $\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = 0$ gelden.

Vanwege de continuïteit van B zal voor $r \downarrow r_d$ (in de luchtspleet) $B_r(r, t, \theta) = 0$ gelden.

Omdat in de afleiding van $B_r(r, \theta)$ en $B_\theta(r, \theta)$ geen operaties voorkomen die betrekking hebben op de tijd, de variabele t , mag in formule voor $A_s^{v, \kappa}(t, \theta_r)$ het gedeelte $((v \pm \kappa \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t)$ voorlopig buiten beschouwing gelaten worden. Voor $A_s^{v, \kappa}(t, \theta_r)$ geldt nu: $A_s^{v, \kappa}(t, \theta) = \hat{A}_s^{v, \kappa} \cdot \cos(\pm \kappa \cdot p \cdot \theta)$. Hierin geldt $\kappa \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, zodat er ook gerekend mag worden met $A_s^{v, \zeta}(t, \theta) = \hat{A}_s^{v, \zeta} \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta)$, nu met $\zeta \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$.

De eerste randvoorwaarde (B3.50) geeft:

$$(R_{10} \cdot r_s^{-1+Z} + R_{20} \cdot r_s^{-1-Z}) \cdot (T_{10} \cdot \cos(Z \cdot \theta) + T_{20} \cdot \sin(Z \cdot \theta)) = \mu_0 \cdot \hat{A}_s^{v, \zeta} \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta). \quad (\text{B3.56})$$

Hieruit volgt:

$$\begin{aligned} (R_{10} \cdot r_s^{-1+Z} + R_{20} \cdot r_s^{-1-Z}) \cdot T_{10} &= \mu_0 \cdot \hat{A}_s^{v, \zeta} \\ Z &= \zeta \cdot p \\ T_{20} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{B3.57})$$

zodat nu voor $B_r(r, \theta)$ en $B_\theta(r, \theta)$ zijn te schrijven is als:

$$\begin{cases} B_r(r, \theta) = (R_{1r} \cdot r^{-1+\zeta \cdot p} + R_{2r} \cdot r^{-1-\zeta \cdot p}) \cdot (T_{1r} \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta) + T_{2r} \cdot \sin(\zeta \cdot p \cdot \theta)) \\ B_\theta(r, \theta) = (R_{1\theta} \cdot r^{-1+\zeta \cdot p} + R_{2\theta} \cdot r^{-1-\zeta \cdot p}) \cdot T_{1\theta} \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta). \end{cases} \quad (\text{B3.58})$$

De tweede randvoorwaarde (B3.53) moet de oplossing compleet maken. Het radiële luchtspleetinductieveld $B_r(r, \theta)$ wordt nu uitgedrukt met behulp van de coëfficiënten van het tangentiële inductieveld. Met behulp van vergelijking (B3.15) kan dit. Vergelijking (B3.15) is te schrijven als:

$$\frac{\partial B_r}{\partial \theta} = r \cdot \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + B_\theta. \quad (\text{B3.59})$$

Door hierin de $B_\theta(r, \theta)$ van vergelijking (B3.58) te substitueren komt er:

$$\frac{\partial B_r}{\partial \theta} = (\zeta \cdot p \cdot R_{1\theta} \cdot r^{-1+\zeta \cdot p} - \zeta \cdot p \cdot R_{2\theta} \cdot r^{-1-\zeta \cdot p}) \cdot T_{1\theta} \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta). \quad (\text{B3.60})$$

Deze vergelijking wordt (partieel) geïntegreerd naar θ . Dit geeft:

$$B_r(r, \theta) = (R_{1\theta} \cdot r^{-1+\zeta \cdot p} - R_{2\theta} \cdot r^{-1-\zeta \cdot p}) \cdot T_{1\theta} \cdot \sin(\zeta \cdot p \cdot \theta) + B_{constant}. \quad (\text{B3.61})$$

De integratieconstante $B_{constant}$ is gelijk aan nul omdat er geen homopolair veld aanwezig is.

Voor $B_r(r, \theta)$ geldt tevens de bovenste vergelijking van (B3.58) zodat geldt:

$$\begin{aligned} & (R_{1r} \cdot r^{-1+\zeta p} + R_{2r} \cdot r^{-1-\zeta p}) \cdot (T_{1r} \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta) + T_{2r} \cdot \sin(\zeta \cdot p \cdot \theta)) = \\ & (R_{1\theta} \cdot r^{-1+\zeta p} - R_{2\theta} \cdot r^{-1-\zeta p}) \cdot T_{1\theta} \cdot \sin(\zeta \cdot p \cdot \theta). \end{aligned} \quad (\text{B3.62})$$

Hieruit volgt:

$$T_{1r} = 0. \quad (\text{B3.63})$$

Er wordt nu gesteld dat

$$\begin{aligned} R_{1r} \cdot T_{2r} &= R_{1\theta} \cdot T_{10} = C_1 \\ -R_{2r} \cdot T_{2r} &= R_{2\theta} \cdot T_{10} = C_2 \end{aligned} \quad (\text{B3.64})$$

zodat voor $B_r(r, \theta)$ en $B_\theta(r, \theta)$ geldt:

$$\begin{cases} B_r(r, \theta) = (C_1 \cdot r^{-1+\zeta p} - C_2 \cdot r^{-1-\zeta p}) \cdot \sin(\zeta \cdot p \cdot \theta) \\ B_\theta(r, \theta) = (C_1 \cdot r^{-1+\zeta p} + C_2 \cdot r^{-1-\zeta p}) \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta). \end{cases} \quad (\text{B3.65})$$

De tweede randvoorwaarde (B3.53) is nu te schrijven als:

$$(C_1 \cdot r_d^{-1+\zeta p} - C_2 \cdot r_d^{-1-\zeta p}) \cdot \sin(\zeta \cdot p \cdot \theta) = 0 \quad (\text{B3.66})$$

zodat

$$C_1 \cdot r_d^{-1+\zeta p} - C_2 \cdot r_d^{-1-\zeta p} = 0. \quad (\text{B3.67})$$

De beide randvoorwaarden (B3.52) en (B3.53) hebben nu twee vergelijkingen met twee onbekenden geleverd:

$$\begin{cases} C_1 \cdot r_s^{-1+\zeta p} + C_2 \cdot r_s^{-1-\zeta p} = \mu_0 \cdot \hat{A}_s^{\nu, \zeta} \\ C_1 \cdot r_d^{-1+\zeta p} - C_2 \cdot r_d^{-1-\zeta p} = 0. \end{cases} \quad (\text{B3.68})$$

Dit stelsel vergelijkingen heeft als oplossing voor C_1 en C_2 :

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{\nu, \zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \\ C_2 = \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{\nu, \zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \cdot \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}. \end{cases} \quad (\text{B3.69})$$

Voor $B_r(r, \theta)$ en $B_\theta(r, \theta)$ geldt nu, als $A_s^{v, \zeta}(t, \theta) = \hat{A}_s^{v, \zeta} \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta)$:

$$\left\{ \begin{aligned} B_r(r, \theta) &= \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{v, \zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \cdot \left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1+\zeta p} - \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p} \cdot \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1-\zeta p} \right) \cdot \sin(\zeta \cdot p \cdot \theta) \\ B_\theta(r, \theta) &= \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{v, \zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \cdot \left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1+\zeta p} + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p} \cdot \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1-\zeta p} \right) \cdot \cos(\zeta \cdot p \cdot \theta). \end{aligned} \right. \quad (\text{B3.70})$$

Voor $B_r(r, \theta_r)$ en $B_\theta(r, \theta_r)$ geldt nu, als $A_s^{v, \zeta}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v, \zeta} \cdot \cos((v + \zeta \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t + \zeta \cdot p \cdot \theta_r)$:

$$\left\{ \begin{aligned} B_r(r, t, \theta_r) &= \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{v, \zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \cdot \left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1+\zeta p} - \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p} \cdot \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1-\zeta p} \right) \cdot \sin \left(\begin{array}{l} (v + \zeta \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t + \\ \zeta \cdot p \cdot \theta_r \end{array} \right) \\ B_\theta(r, t, \theta_r) &= \frac{\mu_0 \cdot \hat{A}_s^{v, \zeta}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p}} \cdot \left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1+\zeta p} + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\zeta p} \cdot \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1-\zeta p} \right) \cdot \cos \left(\begin{array}{l} (v + \zeta \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t + \\ \zeta \cdot p \cdot \theta_r \end{array} \right). \end{aligned} \right. \quad (\text{B3.71})$$

De stroomdichtheid net onder het demperoppervlak wordt bepaald met behulp van het tangentiële inductieveld, $B_\theta(r, t, \theta_r)$ voor $r = r_d$. Er geldt:

$$A_d^{v, \zeta}(t, \theta_r) = \frac{B_\theta^{v, \zeta}(r_d, t, \theta_r)}{\mu_0}. \quad (\text{B3.72})$$

De afleiding van vergelijking (B3.72) geschiedt aan de hand van de configuratie van figuur B3.3. Voor de gegeven contour C geldt:

$$\oint_C (\vec{H} \cdot \vec{\tau}) d\ell = I_{\text{omvat}}. \quad (\text{B3.73})$$

Vanwege de volledige afscherming van de koperen demper geldt in het koper dat $\vec{H}(t) = 0$. Vergelijking (B3.73) gaat dan over in $H_{\theta, \text{lucht}} \cdot b = A_d^{v, \kappa} \cdot b$, ofwel $B_{\theta, \text{lucht}} = \mu \cdot A_d^{v, \kappa}$. Hieruit volgt vergelijking (B3.72).

De stroombelegging op de demper is hiermee bepaald.

- Voor $\zeta > 0$, dus voor $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos((v + \kappa \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t + \kappa \cdot p \cdot \theta_r)$, geldt:

$$A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{-l+\kappa \cdot p}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\kappa \cdot p}}. \quad (\text{B3.74})$$

- Voor $\zeta < 0$, dus voor $A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_s^{v,\kappa} \cdot \cos((v - \kappa \cdot (1-s)) \cdot \omega_s \cdot t - \kappa \cdot p \cdot \theta_r)$, geldt:

$$A_d^{v,\kappa}(t, \theta_r) = A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{-l-\kappa \cdot p}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{-2\kappa \cdot p}} = A_s^{v,\kappa}(t, \theta_r) \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{-l+\kappa \cdot p}}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^{2\kappa \cdot p}}. \quad (\text{B3.75})$$

3.3 Bewijs onafhankelijkheid harmonische componenten

Voor het totale vermogensverlies, zoals bepaald in hoofdstuk 2, vergelijking (2.73), geldt:

$$P_v = \frac{I}{T} \cdot \int_{t=0}^T \frac{r_d \cdot \ell}{\sigma} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \left(\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu,\kappa}} \cdot A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot d\theta_r \cdot dt \quad (\text{B3.76})$$

ofwel

$$P_v = \frac{r_d \cdot \ell}{\sigma} \cdot \frac{I}{T} \cdot \int_{t=0}^T \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \left(\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu,\kappa}} \cdot A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot d\theta_r \cdot dt. \quad (\text{B3.77})$$

De beide integralen moeten bepaald worden over het produkt van twee sommen. Het zou eenvoudiger zijn als het totale vermogensverlies bepaald zou kunnen worden als een som over alle harmonische combinaties van het vermogensverlies per harmonische combinatie.

Om te bepalen of voor het totale vermogensverlies een eenvoudiger uitdrukking te vinden is wordt eerst het produkt van de twee sommen vereenvoudigd.

Het produkt van de twee sommen luidt:

$$\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{I}{\delta^{\nu,\kappa}} \cdot A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right). \quad (\text{B3.78})$$

Hierin geldt voor $A_d^{\nu,\kappa}$:

$$A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) = \hat{A}_d^{\nu,\kappa} \cdot \cos\left(\left(\nu \pm \kappa \cdot (l-s)\right) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa \cdot p \cdot \theta_r\right).$$

Dit wordt vereenvoudigd tot:

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\hat{A}_n}{\delta_n} \cdot A_n \right) \right) \cdot \left(\sum_{m=1}^{\infty} \hat{A}_m \cdot A_m \right). \quad (\text{B3.79})$$

Hierin zijn \hat{A}_n en \hat{A}_m de amplitudes, te vergelijken met $\hat{A}_d^{\nu,\kappa}$, δ_n is de dikte van de geleidende laag, te vergelijken met $\delta^{\nu,\kappa}$. Voor A_n en A_m geldt:

$$\begin{aligned} A_n &= \cos\left(\left(\nu_n \pm \kappa_n \cdot (l-s)\right) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa_n \cdot p \cdot \theta_r\right) \\ A_m &= \cos\left(\left(\nu_m \pm \kappa_m \cdot (l-s)\right) \cdot \omega_s \cdot t \pm \kappa_m \cdot p \cdot \theta_r\right) \end{aligned} \quad (\text{B3.80})$$

Om de vergelijkingen eenvoudig te houden wordt $\nu_x \pm \kappa_x \cdot (l-s)$ vervangen door α_x en $\pm \kappa_x$ vervangen door β_x ($x = n, m$ en $\alpha_x, \beta_x \in \mathbb{Z}$ onder de voorwaarde dat s geheel is.)

Vergelijking (B3.77) wordt dan:

$$\begin{aligned} A_n &= \cos(\alpha_n \cdot \omega_s \cdot t + \beta_n \cdot p \cdot \theta_r) \\ A_m &= \cos(\alpha_m \cdot \omega_s \cdot t + \beta_m \cdot p \cdot \theta_r) \end{aligned} \quad (\text{B3.81})$$

Het produkt van twee willekeurige termen uit de sommen volgens vergelijking (B3.78)

$$\frac{\hat{A}_n \cdot \hat{A}_m}{\delta_n} \cdot (\cos(\alpha_n \cdot \omega_s \cdot t + \beta_n \cdot p \cdot \theta_r) \cdot \cos(\alpha_m \cdot \omega_s \cdot t + \beta_m \cdot p \cdot \theta_r)) \quad (\text{B3.82})$$

is uit te werken tot:

$$\frac{\hat{A}_n \cdot \hat{A}_m}{\delta_n} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cos((\alpha_n + \alpha_m) \cdot \omega_s \cdot t + (\beta_n + \beta_m) \cdot p \cdot \theta_r) + \frac{1}{2} \cdot \cos((\alpha_n - \alpha_m) \cdot \omega_s \cdot t + (\beta_n - \beta_m) \cdot p \cdot \theta_r) \right) \quad (\text{B3.83})$$

Deze uitdrukking wordt eerst geïntegreerd over $\theta_r = 0 \dots 2 \cdot \pi$, dan geïntegreerd over $t = 0 \dots T$.

De integraal over $\theta_r = 0 \dots 2 \cdot \pi$ levert:

$$\frac{\hat{A}_n \cdot \hat{A}_m}{\delta_n} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \cos((\alpha_n + \alpha_m) \cdot \omega_s \cdot t + (\beta_n + \beta_m) \cdot p \cdot \theta_r) \cdot d\theta_r + \frac{1}{2} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \cos((\alpha_n - \alpha_m) \cdot \omega_s \cdot t + (\beta_n - \beta_m) \cdot p \cdot \theta_r) \cdot d\theta_r \right) \quad (\text{B3.84})$$

- Voor $\beta_n \neq \beta_m$ leveren beide integralen nul op.
- Voor $\beta_n = \beta_m$ levert de integraal met $(\beta_n + \beta_m)$ nul op en gaat de (B3.83) over in:

$$\frac{\hat{A}_n \cdot \hat{A}_m}{\delta_n} \cdot \frac{1}{2} \cdot \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \cos((\alpha_n - \alpha_m) \cdot \omega_s \cdot t) \cdot d\theta_r \quad (\text{B3.85})$$

ofwel

$$\frac{\hat{A}_n \cdot \hat{A}_m}{\delta_n} \cdot \pi \cdot \cos((\alpha_n - \alpha_m) \cdot \omega_s \cdot t) \quad (\text{B3.86})$$

De integraal over $t = 0 \dots T$ levert (als $\beta_n = \beta_m$):

$$\frac{\hat{A}_n \cdot \hat{A}_m}{\delta_n} \cdot \pi \cdot \frac{1}{T} \int_{t=0}^T \cos((\alpha_n - \alpha_m) \cdot \omega_s \cdot t) \cdot dt$$

- Voor $\alpha_n \neq \alpha_m$ levert de integraal nul op.
- Voor $\alpha_n = \alpha_m$ levert de integraal:

$$\frac{\pi}{\delta_n} \cdot \hat{A}_n \cdot \hat{A}_m \quad (\text{B3.87})$$

Uit het voorafgaande volgt dat de integratie over $\theta_r = 0 \dots 2 \cdot \pi$ en over $t = 0 \dots T$ van de termen van het product van de sommen alleen iets ongelijk aan nul oplevert als $\beta_n = \beta_m$ en $\alpha_n = \alpha_m$, ofwel als $\nu_n = \nu_m$ en $\kappa_n = \kappa_m$, zodat vergelijking (B3.86) te schrijven is als:

$$\frac{\pi}{\delta_n} \cdot (\hat{A}_n)^2 \quad (\text{B3.88})$$

Voor \hat{A}_n wordt nu weer $\hat{A}_d^{\nu,\kappa}$ geschreven en voor δ_n wordt nu weer $\delta^{\nu,\kappa}$ geschreven.

Tevens is hiermee aangetoond dat de integratie over $\theta_r = 0 \dots 2 \cdot \pi$ en over $t = 0 \dots T$ van het produkt van twee sommen

$$\frac{1}{T} \cdot \int_{t=0}^T \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \left(\left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{1}{\delta^{\nu,\kappa}} A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \cdot \left(\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_d^{\nu,\kappa}(t, \theta_r) \right) \right) \cdot d\theta_r \cdot dt \quad (\text{B3.89})$$

hier gelijk is aan

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{\pi}{\delta^{\nu,\kappa}} \cdot (\hat{A}_d^{\nu,\kappa})^2 \quad (\text{B3.90})$$

zodat voor het totale vermogensverlies geldt:

$$P_v = \frac{r_d \cdot \ell}{\sigma} \cdot \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{\pi}{\delta^{\nu,\kappa}} \cdot (\hat{A}_d^{\nu,\kappa})^2 \right) \quad (\text{B3.91})$$

ofwel

$$P_v = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \left(\frac{\pi \cdot r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{\nu,\kappa}} \cdot (\hat{A}_d^{\nu,\kappa})^2 \right) \quad (\text{B3.92})$$

De term achter het somteken is gelijk aan het vermogensverlies tengevolge van één harmonische combinatie $P_v^{\nu,\kappa}$. Hiervoor geldt:

$$P_v^{\nu,\kappa} = \frac{\pi \cdot r_d \cdot \ell}{\sigma \cdot \delta^{\nu,\kappa}} \cdot (\hat{A}_d^{\nu,\kappa})^2 \quad (\text{B3.93})$$

zodat voor het totale vermogensverlies geldt:

$$P_v = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\kappa=1}^{\infty} P_v^{\nu,\kappa} \quad (\text{B3.94})$$

4. Afdrukken van de gebruikte MathCad bestanden

In deze bijlage zijn twee MathCad bestanden afgedrukt. Deze twee bestanden zijn ook op diskette te vinden, in de directory \MATHCAD\ (zie ook bijlage 9).

Met het afgedrukte bestand van bijlage 4.1 wordt het verlies bepaald in de demper van een drie fasige motor. Het bestand is op diskette te vinden onder de naam LOSS_3F.MCD.

Met het afgedrukte bestand van bijlage 4.2 wordt het verlies bepaald in de demper van een semi-18-fasige generator. Het bestand is op diskette te vinden onder de naam LOSS_18F.MCD.

4.1 MathCad bestand voor een drie-fasige motor

Met behulp van dit bestand kan het watt-verlies in een koperen demper bepaald worden voor het geval dat de demper geblokkeerd is en er op de drie statorfasen een in de tijd sinusvormig variërende stroom aangebracht is.

De stator heeft 36 gleuven, drie fasen. Het poolpaartal is 2. Er zijn dus drie gleuven per pool per fase.

Dit bestand is volledig gericht op de berekening van het verlies in de koperen demper in de beschreven configuratie, enkele formules zijn daarom specifiek voor deze berekening en dus niet algemeen geldig.

Machine gegevens:

$p := 2$	het poolpaartal
$K := 3$	het aantal fasen.
$r_s := 0.075$	de straal van de statorboring (in m)
$r_d := 0.0695$	de straal van de massieve koperen demper (in m)
$r_r := 0.061$	de straal van de rotor (in m)
$l := 0.245$	de actieve lengte van de rotor (in m)
$d_d := 0.001$	de dikte van de koperen demper (in m)

Materiaal gegevens:

$\mu_{cu} := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	de permeabiliteit van koper, de relatieve mu van koper is ongeveer 1
$\sigma_{cu} := 50 \cdot 10^6$	de soortelijke geleiding van koper

Externe factoren:

$f_s := 1250$	de frequentie van de stroom die aan de stator wordt toegevoerd.
$\omega_s := 2 \cdot \pi \cdot f_s$	de frequentie van het statorveld (in rad/s)
$\omega_m := 0$	de mechanische hoeksnelheid van de rotor/demper (de rotor is geblokkeerd)
$I_{eff} := 100$	de effectieve waarde van de stroom per gleuf

Beperkingen voor de berekening:

$v := 1..1$	mogelijke ranggetallen van de harmonischen in de stroom
$\kappa := 1..25$	mogelijke relatieve ranggetallen van de ruimte-harminischen

Voor de grootte van de harmonische componenten van de tijd- en ruimteharmonischen geldt:

$$i_v(v) := I_{eff} \sqrt{2}$$
$$z_{\kappa}(\kappa) := \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot r_s} \cdot \left(\sin\left(\frac{\kappa \cdot 7 \cdot \pi}{18}\right) - \sin\left(\frac{\kappa \cdot 9 \cdot \pi}{18}\right) - \sin\left(\frac{\kappa \cdot 11 \cdot \pi}{18}\right) \right)$$

De topwaarde van de stroombelegging op de statorboring wordt bepaald aan de hand van de stroombelegging voor een K-fasig draaistroomsysteem.

$$A_s(v, \kappa) := \text{if} \left(\text{mod} \left(\frac{|v - \kappa|}{K}, 1 \right) \leq 0, \frac{K}{2} \cdot i_v(v) \cdot z_{\kappa}(\kappa), 0 \right) + \text{if} \left(\text{mod} \left(\frac{v + \kappa}{K}, 1 \right) \leq 0, -\frac{K}{2} \cdot i_v(v) \cdot z_{\kappa}(\kappa), 0 \right)$$

Voor de topwaarde van de stroombelegging op de demper geldt:

$$A_r(v, \kappa) := A_s(v, \kappa) \cdot \frac{\left(\frac{r_d}{r_s} \right)^{-1 + \kappa \cdot p} \cdot 2}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s} \right)^{2 \cdot \kappa \cdot p}}$$

De stroom in de demper loopt in een geleidende schil. De dikte van die schil is maximaal gelijk aan de dikte van de demper maar nooit groter dan de indringdiepte (skin-dikte). Om deze skin-dikte te bepalen moet eerst de frequentie van de stromen in de demper bepaald worden.

Voor de frequentie van de stromen in de demper geldt:

$$\omega_r(v, \kappa) := v \cdot \omega_s$$

Voor de skin-dikte geldt:

$$d_{\text{skin}}(v, \kappa) := \sqrt{\frac{2}{\sigma_{\text{cu}} \cdot \mu_{\text{cu}} \cdot \omega_r(v, \kappa)}}$$

Voor de dikte van de geleidende laag geldt:

$$d(v, \kappa) := \text{if} \left(d_d < d_{\text{skin}}(v, \kappa), d_d, d_{\text{skin}}(v, \kappa) \right)$$

Voor het verlies in de demper tengevolge van een harmonische combinatie geldt:

$$P_v(v, \kappa) := \frac{\pi \cdot r_d \cdot l}{\sigma_{\text{cu}} \cdot d(v, \kappa)} \cdot A_r(v, \kappa)^2$$

Het totale verlies in demper is gelijk aan de som van het verlies van alle harmonische combinaties:

$$P := \sum_v \sum_{\kappa} P_v(v, \kappa)$$

Het verlies in de demper, voor de hier opgegeven configuratie, is gelijk aan

$$P = 142 \quad (\text{W})$$

Voor de verliesdichtheid Q geldt:

$$Q := \frac{P}{l}$$

De verliesdichtheid, voor de hier opgegeven configuratie is gelijk aan

$$Q = 581 \quad (\text{W/m})$$

4.2 MathCad bestand voor een semi-18-fasige generator

Met behulp van dit bestand kan het watt-verlies in een koperen demper bepaald worden voor het geval dat de machine als generator werkt en belast wordt met drie in serie geschakelde 3-fase-bruggelijkrichters. De commutatie-inductiviteit wordt hier buiten beschouwing gelaten.

De stator heeft 36 gleuven, negen spoelgroepen. Het poolpaartal is 2. Er is dus een gleuf per pool per fase. Het betreft een semi-18-fasige machine.

Dit bestand is volledig gericht op de berekening van het verlies in de koperen demper in de beschreven configuratie, enkele formules zijn daarom specifiek voor deze berekening en dus niet algemeen geldig.

Machine gegevens:

$p := 2$	het poolpaartal
$K := 18$	het aantal fasen.
$r_s := 0.075$	de straal van de statorboring (in m)
$r_d := 0.0695$	de straal van de massieve koperen demper (in m)
$r_r := 0.061$	de straal van de rotor (in m)
$l := 0.245$	de actieve lengte van de rotor (in m)
$d_d := 0.001$	de dikte van de koperen demper (in m)

Materiaal gegevens:

$\mu_{cu} := 4 \pi \cdot 10^{-7}$	de permeabiliteit van koper, de relatieve mu van koper is ongeveer 1
$\sigma_{cu} := 50 \cdot 10^6$	de soortelijke geleiding van koper

Externe factoren:

$\omega_m := 2 \pi \cdot \frac{3000}{60}$	de mechanische hoeksnelheid van de rotor/demper (in rad/s)
$\omega_s := \omega_m \cdot p$	de frequentie van de grondharmonische van de statorstroom (in rad/s)
$f_s := \frac{\omega_s}{2 \pi}$	idem (in Hz)
$I_{dc} := 50.4$	de grootte van de gelijkstroom per gleuf

Beperkingen voor de berekening:

$v := 1..25$	'range' met rangtallen van de harmonischen in de stroom
$\kappa := 1..25$	'range' met relatieve rangtallen van de ruimte-harminischen

Voor de grootte van de harmonische componenten van de tijd- en ruimteharmonische geldt:

$$i_v(v) := \frac{I_{dc}}{v \cdot \pi} \left(\cos\left(\frac{v \cdot \pi}{6}\right) - \cos\left(\frac{v \cdot 5 \cdot \pi}{6}\right) - \cos\left(\frac{v \cdot 7 \cdot \pi}{6}\right) + \cos\left(\frac{v \cdot 11 \cdot \pi}{6}\right) \right)$$

$$z_\kappa(\kappa) := \frac{-2 \cdot p}{\pi \cdot r_s} \cdot \sin\left(\frac{\kappa \cdot \pi}{2}\right)$$

De topwaarde van de stroombelegging op de statorboring wordt bepaald aan de hand van de stroombelegging voor een semi-K-fasig draaistroomsysteem.

$$A_s(v, \kappa) := \text{if} \left(\text{mod} \left(\frac{|v - \kappa|}{K}, 1 \right) = 0, \frac{K}{4} \cdot i_v(v) \cdot z_\kappa(\kappa), 0 \right) + \text{if} \left(\text{mod} \left(\frac{v + \kappa}{K}, 1 \right) = 0, -\frac{K}{4} \cdot i_v(v) \cdot z_\kappa(\kappa), 0 \right)$$

Voor de topwaarde van de stroombelegging op de demper geldt:

$$A_r(v, \kappa) := A_s(v, \kappa) \cdot \frac{\left(\frac{r_d}{r_s} \right)^{-1 + \kappa \cdot p} \cdot 2}{1 + \left(\frac{r_d}{r_s} \right)^{2 \cdot \kappa \cdot p}}$$

De stroom in de demper loopt in een geleidende schil. De dikte van die schil is maximaal gelijk aan de dikte van de demper maar nooit groter dan de indringdiepte (skin-dikte). Om deze skin-dikte te bepalen moet eerst de frequentie van de stromen in de demper bepaald worden.

Voor de frequentie van de stromen in de demper geldt:

$$\omega_r(v, \kappa) := \text{if} \left(\text{mod} \left(\frac{|v - \kappa|}{K}, 1 \right) = 0, |v - \kappa| \cdot \omega_s, \omega_s \right) + \text{if} \left[\text{mod} \left(\frac{v + \kappa}{K}, 1 \right) = 0, (v + \kappa) \cdot \omega_s, \omega_s \right]$$

Voor de skin-dikte geldt:

$$d_{\text{skin}}(v, \kappa) := \sqrt{\frac{2}{\sigma_{\text{cu}} \cdot \mu_{\text{cu}} \cdot \omega_r(v, \kappa)}}$$

Voor de dikte van de geleidende laag geldt:

$$d(v, \kappa) := \text{if} \left(d_d < d_{\text{skin}}(v, \kappa), d_d, d_{\text{skin}}(v, \kappa) \right)$$

Voor het verlies in de demper tengevolge van 1 harmonische combinatie geldt:

$$P_v(v, \kappa) := \frac{\pi \cdot r_d \cdot l}{\sigma_{\text{cu}} \cdot d(v, \kappa)} \cdot A_r(v, \kappa)^2$$

Het totale verlies in demper is gelijk aan de som van het verlies van alle harmonische combinaties, de geldigheid hiervan is aangetoond in het afstudeerverslag.

$$P := \sum_v \sum_\kappa P_v(v, \kappa)$$

Het verlies in de demper, voor de hier opgegeven configuratie, is gelijk aan

$$P = 377 \quad (\text{W})$$

Voor de verliesdichtheid Q geldt:

$$Q := \frac{P}{l}$$

De verliesdichtheid, voor de hier opgegeven configuratie is gelijk aan

$$Q = 1537 \quad (\text{W/m})$$

5. Afdrukken van de gebruikte MatLab bestanden

In deze bijlage zijn vier MatLab bestanden afgedrukt. Deze vier bestanden zijn ook op diskette te vinden, in de directory \MATLAB\ (zie ook bijlage 9).

Met het afgedrukte bestanden van bijlage 5.1 wordt uit een set temperatuurmetingen de vermogensdichtheid van het in de demper gedissipeerde vermogen bepaald. In hoofdstuk 3 wordt de methode waarop dat gebeurt besproken. Het bestand BACKCALC.M is het in MatLab te starten bestand en voert de berekeningen uit. Het bestand BACKFUNC.M is een bestand waarin de minimaliseringsfunctie gedefinieerd word, dit bestand wordt door BACKCALC.M gebruikt.

Met het afgedrukte bestanden van bijlage 5.2 wordt uit twee rijen elektrische metingen (spanning en stroom) de frequentie, de effectieve waarde van de spanning en de stroom en het complexe en werkzame vermogen bepaald, evenals de cosinus van de fasehoek tussen spanning en stroom. Het bestand ELEKCALC.M is het in MatLab te starten bestand en voert de berekeningen uit. Het bestand ELEKFUNC.M is een bestand waarin de minimaliseringsfunctie gedefinieerd wordt, dit bestand wordt door ELEKCALC.M gebruikt.

5.1 MatLab bestanden t.b.v. temperatuurmetingen

5.1.1 Het MatLab bestand BACKCALC.M

```
%BACKCALC.M

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Met behulp van deze M-file wordt de door een Pt-100 sensor geregistreeerde
% temperatuur, met behulp van 'curve-fitting', teruggerekend naar de
% werkelijke temperatuur. Dit wordt gedaan voor zes rijen meetgegevens uit een
% door de gebruiker te specificeren bestand.
%
% Deze M-file leest alleen *.DAT bestanden die verkregen zijn met de
% programmatuur die ontwikkeld is bij de stage van F.A.Kamerbeek,
% "De ontwikkeling van hardware en software t.b.v. temperatuurmetingen in
% elektrische machines met behulp van Pt-100-elementen".
%
% In deze M-file vindt u drie keer een filenaam. Vervang deze door de naam van
% de te bewerken file, al dan niet met de extensie. (Op het einde van de regel
% met een filenaam staat '###$##'.)
%
% Deze M-file maakt gebruik van:
% - Een datafile, bijvoorbeeld r1060495.dat
%   De eerste tien kolommen van de *.dat file zijn de temperaturen van
%   kanaal 0 t/m 9, de elfde kolom is de tijd.
% - Een hulpfile voor MatLab (function-file) BACKFUNC.M
%
% Deze M-file produceert:
% - 6 'plots' van de gemeten, gefitte en terugberekende curves
% - Een tabel waarin van de 6 curves de snelheid van de initiële
%   temperatuurstijging, het daaruit bepaalde gedissipeerde vermogen en de
%   bepaalde tijdsconstante van de thermische weerstand en sensor-capaciteit
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Initialisatie van MatLab, definitie globale variabelen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
clc;
whitebg;
options=foptions;
options(1)=0;options(2)=1e-12;options(3)=1e-12;options(14)=2000;
format short e;
global temp t0 t;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Inlezen van de datafile, definitie van variabelen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

load      r1150395.dat;          % ###$##
a=        r1150395;             % ###$##
clear     r1150395;             % ###$##

MASSA=    0.925;                % Massa van de koperen dempercylinder (in [kg])
LENGTH=   0.245;                % Lengte van de koperen demper (in [m])
SIGMA=    387;                  % Soortelijke warmte van koper (in [J/kg/K] bij 293 K)
VERMOGEN= 280;                  % Geschat vermogen dat gedissipeerd wordt (in [W])
STOPTIJD= 30;                   % Duur van de initiële fase (in [s])
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Uitsplitsen van de datafile, bepalen van rijnummer einde opwarming
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[maxx,maxy]=size(a);

tmeet=a(1:maxx,1:6);
tamb=a(1:maxx,10);
tijd=a(1:maxx,11);

clear a;

[dummy,rij_nrs]=max(tmeet);
max_rij=min(rij_nrs);
[dummy,stop_rij]=min(abs(tijd-STOPTIJD));

if max_rij>stop_rij tmax=stop_rij; else tmax=max_rij; end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Bepalen van snelheid van de initiële temperatuurstijging, in de demper
% gedissipeerde vermogen en tijdconstante meetplaats-meetsensor
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for n=1:6

    gu_Aa=VERMOGEN/(MASSA*SIGMA); % schatting voor Aa (=P/(rho*V*sigma of =DT/dt)
    gu_Bb=4; % schatting voor Bb (=R_thermisch*C_sensor)

    temp=tmeet(1:tmax,n);
    t=tijd(1:tmax);
    t0=tmeet(1,n);

    pu=fmins('backfunc',[gu_Aa gu_Bb],options);

    Aa=pu(1); Bb=pu(2); % m.b.v. 'curve-fitting' bepaalde waarden

    T1_up=Aa*t + t0;
    T2_up=Aa*t + (exp(-t/Bb)-1)*Aa*Bb + t0;

    figure; clf;
    plot(t,temp,'k-',t,T1_up,'b-',t,T2_up,'r+');
    title('Gemeten temperatuur en gefitte curve T2(t) en curve van T1(t)');
    grid on;xlabel('tijd (s)'); ylabel('Temperatuur (°C)');

    result(n,1)=n-1;
    result(n,2)=Aa;
    result(n,3)=result(n,2)*MASSA*SIGMA/LENGTH;
    result(n,4)=Bb;

end;

disp(' kanaal dT/dt Q Tau')
disp(' -----')
disp(result)

pause; close; close; close; close; close; close; close;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End of file

```

5.1.2 Het MatLab bestand BACKFUNC.M

```
% BACKFUNC.M
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Deze M-file wordt gebruikt door BACKCALC.M. In deze file wordt de
% minimaliseringsfunctie gedefinieerd.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function q=backfunc(p);

global temp t0 t;

Aa=p(1);
Bb=p(2);

q=Aa*t+(exp(-t/Bb)-1)*Aa*Bb + t0;
q=q-temp;
q=sum(q.^2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End of file
```

5.2 Matlab bestanden t.b.v. elektrische metingen

5.2.1 Het MatLab bestand ELEKCALC.M

```
%ELEKCALC.M
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Met behulp van deze M-file worden de door een digitale geheugenoscilloscoop
% geregistreeerde stroom en spanning verwerkt. De effectieve waarde van de
% spanning en de stroom wordt bepaald, evenals de grootte van het vermogen,
% het complexe vermogen en de arbeidsfactor.
%
% Deze M-file leest alleen *.AD bestanden die verkregen zijn met behulp van
% een NICOLETT 320.
%
% In deze M-file vindt u zes keer een filenaam, drie van stromen (i*) en drie
% van spanningen (v*), de tijdschalen van beide bestanden lopen synchroon.
% Vervand deze door de namen van de voor de berekening benodigde files.
% (Op het einde van de regel met een filenaam staat '####$###'.)
%
% Deze M-file maakt gebruik van:
% - Een stroom-datafile, bijvoorbeeld i2060495.ad
% - Een spanning-datafile, bijvoorbeeld v2060495.ad
% - Een hulpfile voor MatLab (function-file) ELEKFUNC.M
%
% Deze M-file produceert:
% - De uit het stroom bestand bepaalde frequentie
% - Een 'plot' ter controle van de m.b.v. 'curve'fitting' bepaalde frequentie
% - De effectieve waarde van de spanning en de stroom
% - De grootte van het complexe en het werkzame vermogen
% - De arbeidsfactor
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Initialisatie van MatLab, definitie globale variabelen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
clc;
whitebg;
options=foptions;
options(1)=0;options(2)=1e-12;options(3)=1e-12;options(14)=2000;
global Imax i t

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Inlezen van de datafiles, definitie van variabelen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

load i2060495.ad; % ####
load v2060495.ad; % ####
a= i2060495; % ####
b= v2060495; % ####
clear i2060495; % ####
clear v2060495; % ####

gu_freq=3300;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Uitsplitsen van de datafiles, berekenen van de stroom
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

i= a(1:4000,2);
t= a(1:4000,1);
v= b(1:4000,2);
clear a;
clear b;

i=i*(-150/300e-3);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Bepalen van de frequentie, de periodetijd en het aantal samples per periode
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Imax=(max(i)-min(i))/2;

gu_omega=gu_freq*2*pi;
gu_alpha=0;
gu_offset=(max(i)+min(i))/2;

pu=fmins('elekfunc',[gu_omega gu_alpha gu_offset]);

omega=pu(1);
alpha=pu(2);
offset=pu(3);

i_fit=Imax*sin(omega*t+alpha)+offset;

figure; clf; plot(t,i,'k-',t,i_fit,'r-'); grid on;
title('De gemeten (zwart) en gefitte (rood) stroom');
xlabel('tijd (s)'); ylabel('I (A)');

freq=omega/(2*pi);
T=1/freq;
dT=t(2)-t(1);
N=round(T/dT);

```

Bijlage 5. Afdrukken van de gebruikte MatLab bestanden.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Bepaling van de effectieve waarde van de spanning en de stroom, het complexe
% en werkzame vermogen en de arbeidsfactor
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

i_gem=mean(i(1:N));
v_gem=mean(v(1:N));

i=i-i_gem;
v=v-v_gem;

I=0; V=0; P=0;

for n=1:N;
    I=I+(i(n))^2;
    V=V+(v(n))^2;
    P=P+i(n)*v(n);
end;

V=sqrt(V/N);
I=sqrt(I/N);
P=P/N;
S=V*I;
lambda=P/S;

disp('frequentie:')
disp(freq)
disp('stroom:')
disp(I)
disp('spanning:')
disp(V)
disp('complex vermogen:')
disp(S)
disp('werkzaam vermogen:')
disp(P)
disp('arbeidsfactor:')
disp(lambda)

pause; close;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End of file
```

5.2.2 Het MatLab bestand ELEKFUNC.M

```
%ELEKFUNC.M

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Deze M-file wordt gebruikt door ELEKCALC.M. In deze file wordt de
% minimaliseringfunctie gedefinieerd.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function q=elekfunc(p);

global Imax i t;

omega=p(1);
alpha=p(2);
offset=p(3);

q=Imax*sin(omega*t+alpha)+offset;
q=q-i;
q=sum(q.^2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End of file
```

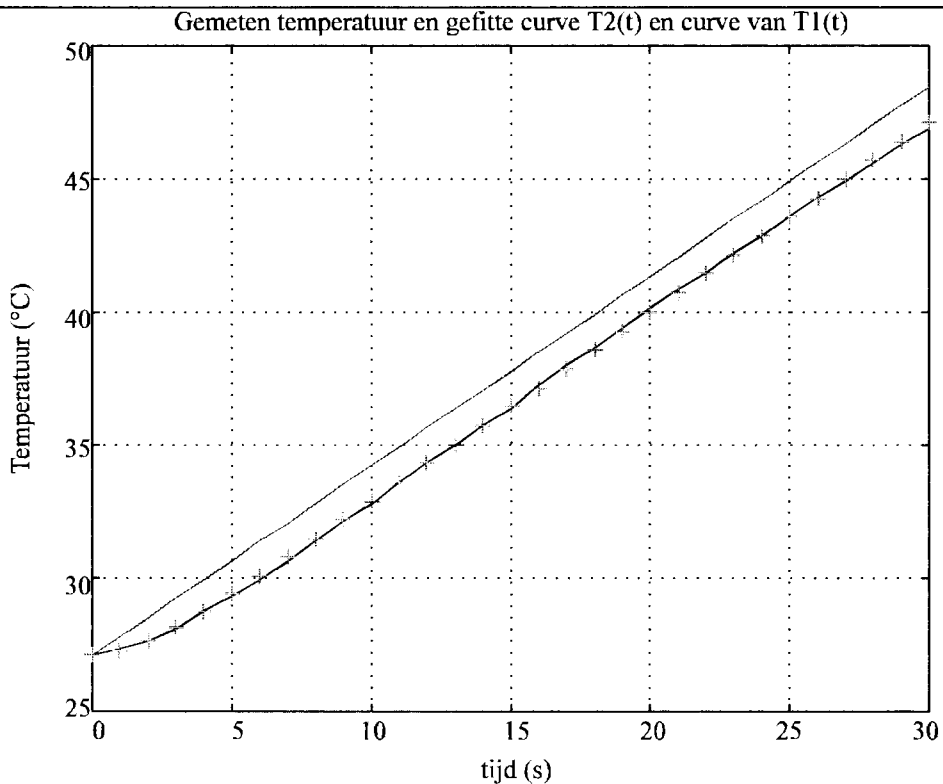

6. Gegevens van de metingen

In deze bijlage zijn diverse gegevens opgenomen van de temperatuurmetingen en de elektrische metingen.

In bijlage 6.1 is een 'plot' afgebeeld van een 'curve fitting'. In bijlage 6.2 wordt het uitgebreide elektrische schema weergegeven. In bijlage 6.3 staan de gegevens afgedrukt zoals ze met behulp van de MatLab programma's uit de temperatuurmeting en de elektrische meting bepaald worden. In bijlage 6.4 zijn de bewerkte meetgegevens afgedrukt.

6.1 Voorbeeld van een 'plot' van een 'curve-fitting'

De gemeten temperatuurcurve wordt met behulp van MatLab bewerkt om zo goed mogelijk het in de demper gedissipeerde vermogen te bepalen.

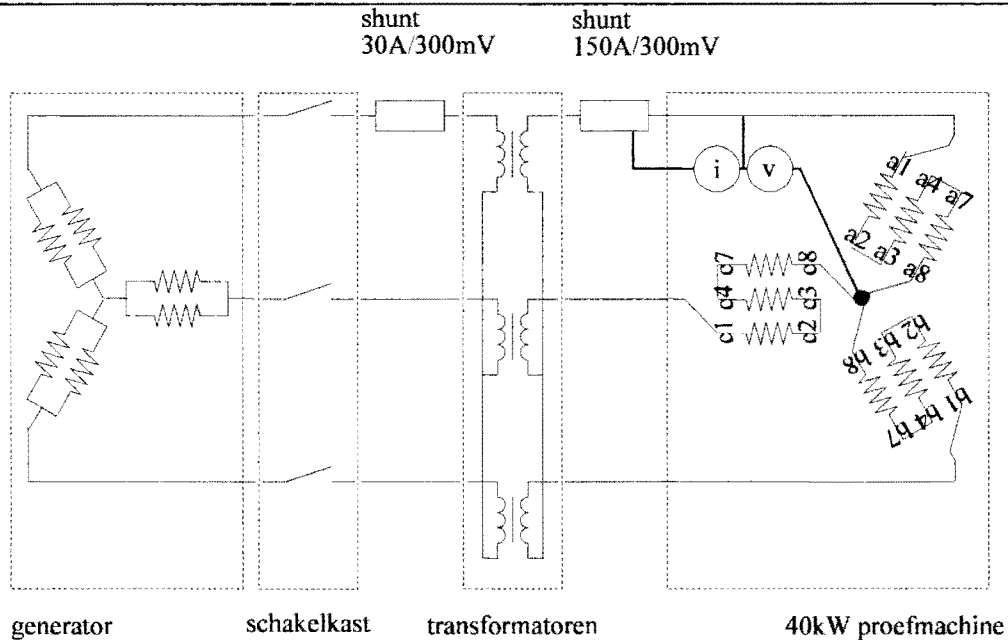


Figuur B6.1 Voorbeeld van een 'plot' van een curve-fitting. Hier is de 'plot' van kanaal 5 van de temperatuurmeting van 15 maart 1995 afgebeeld.

In figuur B6.1 is een 'plot' gegeven zoals MatLab die afbeeld op het scherm na de 'curve-fitting'. De lijn die door de plus-tekens getrokken is geeft de gemeten temperatuurcurve weer. De plus-tekens markeren de door de 'curve-fitting benaderde curve van deze gemeten temperatuur. De ongemarkeerde rechte lijn geeft de temperatuur weer van de meetplaats die berekend is met behulp van de met de 'curve-fitting' bepaalde parameters.

6.2 Het uitgebreide elektrische schema

Het uitgebreide elektrische schema beslaat alleen het gedeelte van de generator tot en met het proefmodel. De voeding van de motor (van de motor/generator-set) en bekrachtiging van de generator is niet opgenomen in het elektrische schema.



Figuur B6.2 Het uitgebreide elektrische schema.

In figuur B6.2 is het uitgebreide elektrische schema geschetst. Links in de figuur zijn de wikkelingen van de generator afgebeeld. De schakelkast bevat (onder andere) drie schakelaars; deze worden tegelijkertijd bediend. De transformatoren zijn speciaal voor deze toepassing vervaardigd. De proefmachine is als drie-fasige machine aangesloten, waarbij de afzonderlijke fasen per drie in serie zijn geschakeld. De 'i' en de 'v' in figuur B6.2 geven aan dat de spanningen die hier gemeten worden tegelijkertijd geregistreerd worden door een digitale geheugenoscilloscoop.

Opmerking: de nummering van de spoelgroepen van het proefmodel wijkt af van de nummering in bijlage 2. In plaats van a5, a6, b5, b6, c5 en c6 zijn de nummers a7, a8, b7, b8, c7 en c8 gebruikt.

Voor de beschrijving van de diverse onderdelen wordt verwezen naar bijlage 7.

6.3 Gegevens van de metingen

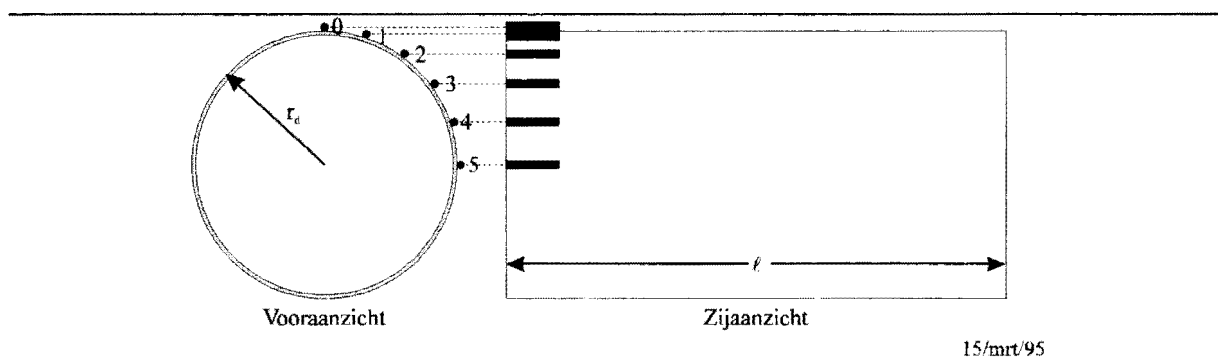
In dit gedeelte van deze bijlage zijn gegevens van de metingen afgedrukt, zoals dit na verwerking door de MatLab-programma's worden verkregen. In deze bijlage is de letterlijke uitvoer van MatLab opgenomen

Van elke meting is de configuratie van de Pt-100 elementen vermeld. Verder zijn de bestandsnamen en resultaten van de verwerking met de MatLab programma's vermeld.

Opmerking: het complexe vermogen en werkzame vermogen onder het kopje elektrische metingen hebben betrekking op één fase.

6.3.1 Gegevens van de meting d.d. 15 maart 1995

Op 15 maart zijn er twee metingen verricht. De locatie van de Pt-100 elementen was voor beide metingen gelijk.



15/mrt/95

Figuur B6.3 De locatie van de Pt-100 elementen bij de metingen van 15 maart 1995.

De locatie van de Pt-100 elementen is weergegeven in figuur B6.3. De Pt-100 elementen zijn aan de buitenkant op de rand van de demper aangebracht. Het Pt-100 element met nummer n is aangesloten op meetkanaal n van de meetversterker. De demper is zodanig aangebracht dat het Pt-100 element met nummer 0 boven ligt.

6.3.1.1 Gegevens van de eerste meting d.d. 15 maart 1995

Temperatuurmeting:

Naam van het bestand met de ruwe data: R1150395.RAW

Naam van het bestand met de temperatuurdata: R1150395.DAT

Naam van het bestand met de ijkgegevens: 090295_4.IJK

Resultaten na verwerking met BACKCALC.M:	kanaal	dT/dt	Q	Tau
	0	5.8518e-001	8.5502e+002	1.6874e+001
	1.0000e+000	5.5682e-001	8.1358e+002	2.4180e+000
	2.0000e+000	6.8975e-001	1.0078e+003	2.3090e+000
	3.0000e+000	6.5903e-001	9.6293e+002	2.9732e+000
	4.0000e+000	5.1797e-001	7.5682e+002	1.5564e+001
	5.0000e+000	7.1289e-001	1.0416e+003	1.8925e+001

Elektrische meting:

Naam van het bestand met de stroom-data: I1150395.AD

Naam van het bestand met de spannings-data: V1150395.AD

Resultaten na verwerking met ELEKCALC.M:	
frequentie:	2.2007e+003
stroom:	102.4309
spanning:	18.7479
complex vermogen:	1.9204e+003
werkzaam vermogen:	285.0484
arbeidsfactor:	0.1484

6.3.1.2 Gegevens van de tweede meting d.d. 15 maart 1995

Temperatuurmeting:

Naam van het bestand met de ruwe data: R2150395.RAW

Naam van het bestand met de temperatuurdata: R2150395.DAT

Naam van het bestand met de ijkgegevens: 090295_4.IJK

Resultaten na verwerking met BACKCALC.M:	kanaal	dT/dt	Q	Tau
	-----	-----	-----	-----
	0	6.1944e-001	9.0507e+002	1.4135e+001
	1.0000e+000	6.1550e-001	8.9932e+002	2.4719e+000
	2.0000e+000	7.8001e-001	1.1397e+003	1.9266e+000
	3.0000e+000	7.4305e-001	1.0857e+003	3.1348e+000
	4.0000e+000	5.4879e-001	8.0185e+002	1.1220e+001
	5.0000e+000	8.1104e-001	1.1850e+003	1.7776e+000

Elektrische meting:

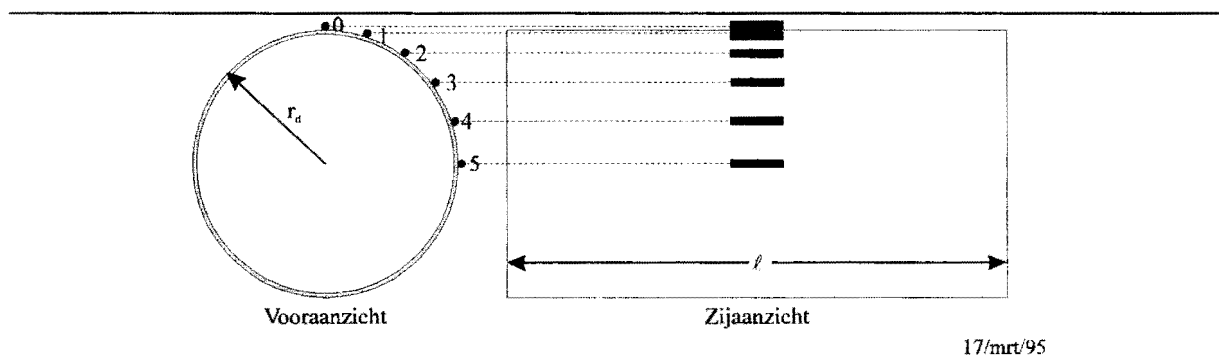
Naam van het bestand met de stroom-data: I2150395.AD

Naam van het bestand met de spannings-data: V2150395.AD

Resultaten na verwerking met ELEKCALC.M:	frequentie:	3.2447e+003
	stroom:	108.3159
	spanning:	28.0205
	complex vermogen:	3.0351e+003
	werkzaam vermogen:	403.5580
	arbeidsfactor:	0.1330

6.3.2 Gegevens van de meting d.d. 17 maart 1995

Op 17 maart zijn er twee metingen verricht. De locatie van de Pt-100 elementen was voor beide metingen gelijk.



17/mrt/95

Figuur B6.4 De locatie van de Pt-100 elementen bij de metingen van 17 maart 1995.

De locatie van de Pt-100 elementen is weergegeven in figuur B6.3. De Pt-100 elementen zijn aan de buitenkant in het midden van de demper aangebracht. Het Pt-100 element met nummer n is aangesloten op meetkanaal n van de meetversterker. De demper is zodanig aangebracht dat het Pt-100 element met nummer 0 boven ligt.

6.3.2.1 Gegevens van de eerste meting d.d. 17 maart 1995

Temperatuurmeting:

Naam van het bestand met de ruwe data: R1170395.RAW

Naam van het bestand met de temperatuurdata: R1170395.DAT

Naam van het bestand met de ijkgegevens: 090295_4.IJK

Resultaten na verwerking met BACKCALC.M:	kanaal	dT/dt	Q	Tau
	0	3.6238e-001	5.2948e+002	8.2131e+000
	1.0000e+000	3.5771e-001	5.2265e+002	8.1015e+000
	2.0000e+000	2.3704e-001	3.4634e+002	7.5803e+000
	3.0000e+000	3.6047e-001	5.2669e+002	7.1973e+000
	4.0000e+000	3.6935e-001	5.3967e+002	5.8928e+000
	5.0000e+000	3.5110e-001	5.1301e+002	8.5392e+000

Elektrische meting:

Naam van het bestand met de stroom-data: I1170395.AD

Naam van het bestand met de spannings-data: V1170395.AD

Resultaten na verwerking met ELEKCALC.M:	frequentie:	2.2060e+003
	stroom:	100.4921
	spanning:	18.3485
	complex vermogen:	1.8439e+003
	werkzaam vermogen:	267.8576
	arbeidsfactor:	0.1453

6.3.2.2 Gegevens van de tweede meting d.d. 17 maart 1995

Temperatuurmeting:

Naam van het bestand met de ruwe data: R2170395.RAW

Naam van het bestand met de temperatuurdata: R2170395.DAT

Naam van het bestand met de ijkgegevens: 090295_4.IJK

Resultaten na verwerking met BACKCALC.M:	kanaal	dT/dt	Q	Tau
	-----	-----	-----	-----
	0	4.2643e-001	6.2307e+002	9.1507e+000
	1.0000e+000	4.0241e-001	5.8796e+002	7.6488e+000
	2.0000e+000	3.0794e-001	4.4994e+002	1.1860e+001
	3.0000e+000	3.9666e-001	5.7957e+002	7.9485e+000
	4.0000e+000	4.1837e-001	6.1129e+002	7.3799e+000
	5.0000e+000	4.1348e-001	6.0415e+002	1.0559e+001

Elektrische meting:

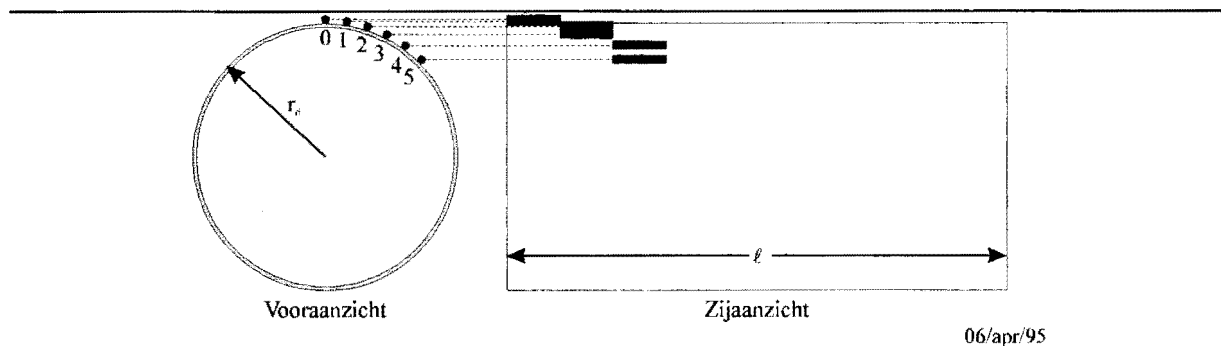
Naam van het bestand met de stroom-data: I2170395.AD

Naam van het bestand met de spannings-data: V2170395.AD

Resultaten na verwerking met ELEKCALC.M:	frequentie:	3.2113e+003
	stroom:	103.7905
	spanning:	26.5780
	complex vermogen:	2.7585e+003
	werkzaam vermogen:	361.7762
	arbeidsfactor:	0.1311

6.3.3 Gegevens van de metingen d.d. 6 april 1995

Op 6 april zijn er twee metingen verricht. De locatie van de Pt-100 elementen was voor beide metingen gelijk.



Figuur B6.5 De locatie van de Pt-100 elementen bij de metingen van 6 april 1995.

De locatie van de Pt-100 elementen is weergegeven in figuur B6.5. De Pt-100 elementen zijn aan de buitenkant aan de rand van de demper en meer naar het midden van de demper toe aangebracht. Het Pt-100 element met nummer n is aangesloten op meetkanaal n van de meetversterker. De demper is zodanig aangebracht dat het Pt-100 element met nummer 0 boven ligt.

6.3.3.1 Gegevens van de eerste meting d.d. 6 april 1995

Temperatuurmeting:

Naam van het bestand met de ruwe data: R1060495.RAW

Naam van het bestand met de temperatuurdata: R1060495.DAT

Naam van het bestand met de ijkgegevens: 090295_4.IJK

Resultaten na verwerking met BACKCALC.M:	kanaal	dT/dt	Q	Tau
	0	6.4435e-001	9.4147e+002	3.0009e+000
	1.0000e+000	6.1178e-001	8.9388e+002	5.0335e+000
	2.0000e+000	6.0238e-001	8.8015e+002	9.6846e+000
	3.0000e+000	6.6286e-001	9.6852e+002	1.7198e+001
	4.0000e+000	5.6505e-001	8.2560e+002	1.9342e+001
	5.0000e+000	5.9465e-001	8.6885e+002	1.5126e+001

Elektrische meting:

Naam van het bestand met de stroom-data: I1170395.AD

Naam van het bestand met de spannings-data: V1170395.AD

Resultaten na verwerking met ELEKCALC.M:	frequentie:	2.1673e+003
	stroom:	103.1683
	spanning:	18.6897
	complex vermogen:	1.9282e+003
	werkzaam vermogen:	429.3667
	arbeidsfactor:	0.2227

6.3.3.2 Gegevens van de tweede meting d.d. 6 april 1995

Temperatuurmeting:

Naam van het bestand met de ruwe data: R2060495.RAW

Naam van het bestand met de temperatuurdata: R2060495.DAT

Naam van het bestand met de ijkgegevens: 090295_4.IJK

Resultaten na verwerking met BACKCALC.M:	kanaal	dT/dt	Q	Tau
	0	7.9742e-001	1.1651e+003	2.3444e+000
	1.0000e+000	7.4013e-001	1.0814e+003	4.0864e+000
	2.0000e+000	6.8968e-001	1.0077e+003	8.7944e+000
	3.0000e+000	6.6330e-001	9.6916e+002	8.8152e+000
	4.0000e+000	5.9980e-001	8.7638e+002	1.4679e+001
	5.0000e+000	6.1243e-001	8.9484e+002	9.9008e+000

Elektrische meting:

Naam van het bestand met de stroom-data: I2060495.AD

Naam van het bestand met de spannings-data: V2060495.AD

Resultaten na verwerking met ELEKCALC.M:	frequentie:	3.2748e+003
	stroom:	107.3479
	spanning:	28.1608
	complex vermogen:	3.0230e+003
	werkzaam vermogen:	636.3468
	arbeidsfactor:	0.2105

6.4 Uitwerking van de metingen

In dit gedeelte van deze bijlage zijn de uitwerkingen van de metingen afgedrukt. De uitwerkingen zijn met behulp van Excel (zie bijlage 8) uitgevoerd. Het Excel-bestand is op de diskette te vinden, in de directory \EXCEL\ (zie ook bijlaeg 9).

Alle door MatLab bepaalde vermogensdichtheden worden eerst genormeerd op 100 A.

Van de metingen van 15 maart en 17 maart wordt per meting het gemiddelde en de standaarddeviatie van de vermogensdichtheid Q en de tijdconstante berekend over de niet verworpen metingen. Tevens wordt per configuratie het gemiddelde en de standaarddeviatie van de vermogensdichtheid Q bepaald over alle niet verworpen metingen.

Van de meting van 6 april wordt per meting per 'axiale locatie' het gemiddelde van de vermogensdichtheid Q en de tijdconstante berekend over de niet verworpen metingen. Dit wordt eveneens gedaan over beide metingen samen.

Metingen worden verworpen als de tijdconstante groter is dan 10 s. Bij een dergelijk grote tijdconstante kan het thermische contact slecht zijn (grote thermische weerstand), er kan teveel warmtegeleidende paste gebruikt zijn (grote thermische capaciteit) of kan de axiale warmtestroom van invloed zijn (vooral op de rand van de demper, de temperatuur stijgt dan steeds minder snel vanwege de warmtestroom naar het midden van de demper).

6.4.1 Uitwerking van de meting d.d. 15 maart

Meting 1:

Stroom: 102,4 A

Frequentie: 2,20 kHz

Kanaal	Q [W/m]	genormeerde Q [W/m]	Tijdconstante [s]	Verworpen
0	855	815	16.9	ja
1	814	776	2.4	nee
2	1008	961	2.3	nee
3	963	918	3.0	nee
4	757	722	15.6	ja
5	1042	994	1.9	nee
Gemiddelde		912	2.4	
Standaarddeviatie		83	0.4	

Meting 2:

Stroom: 108,3 A

Frequentie: 3,04 kHz

Kanaal	Q [W/m]	genormeerde Q [W/m]	Tijdconstante [s]	Verworpen
0	905	772	14.1	ja
1	899	766	2.5	nee
2	1140	972	1.9	nee
3	1086	926	3.1	nee
4	802	684	11.2	ja
5	1185	1010	1.8	nee
Gemiddelde		919	2.3	
Standaarddeviatie		93	0.5	

Totaal van de metingen:

	Q [W/m]	Tijdconstante [s]
Gemiddelde	916	2.4
Standaarddeviatie	88	0.5

6.4.2 Uitwerking van de meting d.d. 17 maart

Meting 1:

Stroom: 100,5 A

Frequentie: 2,21 kHz

Kanaal	Q	genormeerde Q	Tijdconstante	Verworpen
	[W/m]	[W/m]	[s]	
0	529	524	8.2	nee
1	523	518	8.1	nee
2	346	343	7.6	ja
3	527	522	7.2	nee
4	540	535	5.9	nee
5	513	508	8.5	nee
Gemiddelde		521	7.6	
Standaarddeviatie		9	1.0	

Meting 2:

Stroom: 103,8 A

Frequentie: 3,21 kHz

Kanaal	Q	genormeerde Q	Tijdconstante	Verworpen
	[W/m]	[W/m]	[s]	
0	623	578	9.2	nee
1	588	546	7.6	nee
2	450	418	11.9	ja
3	580	538	7.9	nee
4	611	567	7.4	nee
5	604	561	10.6	ja
Gemiddelde		557	8.0	
Standaarddeviatie		16	0.7	

Totaal van de metingen:

	Q	Tijdconstante
	[W/m]	[s]
Gemiddelde	537	7.8
Standaarddeviatie	22	0.9

6.4.3 uitwerking van de meting d.d. 6 april

Meting 1:

Stroom: 103.2 A

Frequentie: 2,17 kHz

Kanaal	Q [W/m]	genormeerde Q [W/m]	Tijdconstante [s]	Verworpen
0	941	884	3.0	nee
1	894	839	5.0	nee
Gemiddelde		861	4.0	
2	880	826	9.7	nee
3	969	910	17.2	ja
Gemiddelde		826	9.7	
4	826	776	19.3	ja
5	869	816	15.1	ja
Gemiddelde		---	---	

Meting 2:

Stroom: 107,3 A

Frequentie: 3,17 kHz

Kanaal	Q [W/m]	genormeerde Q [W/m]	Tijdconstante [s]	Verworpen
0	1165	1012	2.3	nee
1	1081	939	4.1	nee
Gemiddelde		975	3.2	
2	1008	876	8.8	nee
3	969	842	8.8	nee
Gemiddelde		859	8.8	
4	876	761	14.7	ja
5	895	777	9.9	nee
Gemiddelde		777	9.9	

Totaal van de metingen:

	Q [W/m]	Tijdconstante [s]
Gemiddelde kanaal 0 en 1	918	3.6
Gemiddelde kanaal 2 en 3	848	9.1
Gemiddelde kanaal 4 en 5	777	9.9

7. Gegevens van de gebruikte apparatuur

De volgende apparatuur is (onder andere) gebruikt:

- LabMaster a/d-converter
Scientific Solutions Inc.
LabMaster; a/d-, d/a-converter, counters en timers PC-interface
EM 1866
- Meetversterker
Zie Stageverslag 'De ontwikkeling van hardware en software t.b.v. temperatuurmetingen in elektrische machines met behulp van Pt-100 elementen', EMV 94-14.
EM xxxx
- MSDOS-PC
IBM 286 AT met harddisk
EM 1826
- Digitale geheugenoscilloscoop
Nicolett 320
EM xxxx
- Motor/generator-set
merk ??
EM 3074
- Transformatoren
3 stuk op aanvraag gewikkelde transformatoren
Wikkelverhouding 5:1, primair max. 20 A, secundair max. 100 A
EM xxxx
- Shunt 30 A/300 mV
Erich Marek
EM xxxx
- Shunt 150 A/300 mV
Erich Marek
EM xxxx

8. Gegevens van de gebruikte software

De volgende software is gebruik voor de berekeningen in dit afstudeerrapport:

- MatLab
MatLab versie 4.0
The Mathworks, Inc.
- MathCad
MathCad versie 4.0
MathSoft, Inc.
- Temperatuurmeetprogramma's
Zie Stageverslag 'De ontwikkeling van hardware en software t.b.v. temperatuurmetingen in elektrische machines met behulp van Pt-100 elementen', EMV 94-14

De volgende software is gebruikt bij het schrijven van dit afstudeerrapport:

- Word
Word versie 6.0 for Windows
Microsoft Corporation
- Excel
Excel versie 5.0 for Windows
Microsoft Corporation
- Mathtype
Mathtype versie 3.0c
Design Science, Inc.
- CorelDraw
CorelDraw versie 3.0
Corel Corporation

9. Beschrijving van de inhoud van de diskette's

Bij dit afstudeerrapport hoort één diskette met daarop de data van de metingen en de gebruikte bestanden voor MatLab en MathCad, en één diskette met daarop het volledige afstudeerrapport.

Diskette 1: Meetdata en programmabestanden.

```
+---EXCEL
|      METINGEN.XLS
|
+---MATHCAD
|      LOSS_18F.MCD
|      LOSS_3F.MCD
|
+---MATLAB
|      BACKCALC.M
|      BACKFUNC.M
|      ELEKCALC.M
|      ELEKFUNC.M
|
+---METINGEN
|      +---MEET1503
|      |      MEET1503.ZIP
|      |
|      +---MEET1703
|      |      MEET1703.ZIP
|      |
|      +---MEET0604
|      |      MEET0604.ZIP
```

Diskette 2: Het afstudeerrapport.

```
+---VERSLAG
|      VERSLAG.ZIP
|
+---FONT
|      FONT.ZIP
```