

Uitgebreide Nederlandstalige Samenvatting

GEKOPPELDE ELEKTROMAGNETISCH-THERMISCHE PROBLEMEN IN ELEKTRISCHE ENERGIE-OMZETTERS

1 Inleiding

In de ingenieurswetenschappen moeten vele fenomenen van verschillende aard gezamenlijk beschouwd worden om de werking van onderdelen of volledige toestellen te voorspellen. Daarbij komt nog de moeilijkheid dat deze gekoppelde problemen zich afspelen op verschillende tijdsschalen.

Numerieke simulaties, zoals de Eindige Elementen Methode (EEM) worden dikwijls aangewend tijdens de analyse of het ontwerp van dergelijke toestellen. De aangewende programmatuur is meestal geoptimaliseerd voor bepaalde types velden. De wiskundig gecompliceerde, gekoppelde problemen worden dan dikwijls opgelost door een rudimentaire iteratieve combinatie.

Er is een duidelijke noodzaak deze ingenieursmatige gekoppelde problemen grondig te bestuderen. Dit werk heeft tot doel bij te dragen tot dit onderzoeksonderwerp in het algemeen met toepassing op de elektrische energie-omzetting in het bijzonder.

In de elektrische energie-omzetting, waarin elektromagnetische velden aangewend worden om energie te produceren, over te brengen of om te zetten, komen vele gekoppelde fysische en niet-fysische fenomenen voor met elke hun typische tijdsconstanten die vele ordes kunnen verschillen. De toepassingen van deze discipline zijn velerlei: gaande van micro-systemen (bijv. on-chip interconnecties), elektrische aandrijvingen (bijv. elektrische voertuigaandrijvingen) tot zeer grote transformatoren en generatoren.

De wederzijds gekoppelde problemen kunnen op vele manieren ingedeeld worden. De veel gebruikte aanduiding 'sterk' en 'zwak' gekoppeld leidt tot verwarring daar zij dikwijls op subjectieve gronden steunt. Andere indelingen zijn bijv. reikwijdte (deels of volledige overlappende berekeningsgebieden), discretiseringsmethode (gebruikte transformatie van een continu naar een discreet wiskundig probleem) of het soort globale niet-lineaire oplossingsalgoritme.

2 Modelling van gekoppelde fysische velden

2.1 Gemeenschappelijke aspecten van individuele fysische velden

Vele fysische velden die wederzijds interageren kunnen door gelijksoortige differentiaalvergelijkingen voorgesteld worden. De verschillende types wiskundige randvoorwaarden hebben telkens andere fysische interpretaties.

Een belangrijk aspect is de verwerking van de tijdsafhankelijkheden in de differentiaalvergelijkingen. Enerzijds kan er in het tijdsdomein verder gerekend worden of anderzijds, wanneer de oplossing een periodisch gedrag vertoont, kan er overgegaan worden naar het frequentiedomein via een Fouriertransformatie of een scheiding van de variabelen, waarbij de variabelen als een product van een faser met een harmonische functie geschreven worden. Sommige fenomenen vertonen echter zowel snelle, quasi-periodische, als trage dynamica. In dat geval kan de faser eveneens als complexe tijdsfunctie geschreven worden.

De niet-lineariteiten in de differentiaalvergelijking dienen ingedeeld te worden naargelang zij voorkomen onder de vorm van coëfficiënten of termen, afhankelijk van de eigen deelprobleemvariabelen of afhankelijk van de geassocieerde gekoppelde problemen.

2.2 Methodes voor de berekeningen van individuele fysische velden

Voor de berekening van individuele fysische velden, als deelprobleem van het gekoppeld probleem, kunnen veldberekeningsmethoden, gecondenseerde methoden of hybride methoden die beide technieken combineren, gebruikt worden.

In de gecondenseerde methoden wordt het eventueel getransformeerde veldprobleem, gereduceerd in dimensionaliteit en geherformuleerd in termen van staande of lopende grootheden. Deze techniek wordt ondermeer toegepast in elektrische en thermische netwerken.

In de veldmethoden wordt het oplossingsveld als dusdanig benaderd met een numerieke methode. Met het oog op de niet-lineariteiten voorkomend in gekoppelde problemen lijkt de Rand Elementen Methode minder geschikt, aangezien speciale technieken vereist zijn om deze in rekening te brengen. De Eindige Differentie Methode is evenmin minder geschikt voor typische technische berekeningsmodellen met ingewikkelde geometrie. De Eindige Elementen Methode (EEM) daarentegen lijkt, omwille van haar flexibiliteit qua geometrie en gemakkelijke toepasbaarheid van niet-lineariteiten dan ook de meest interessante methode in dit verband.

2.3 Eindige Elementen Methode voor gekoppelde problemen

De Eindige Elementen Methode (EEM) wordt toegepast op een discretisatie van het berekeningsdomein, de vermazing, beschreven door geometrische vrijheidsgraden. De benaderende oplossing wordt geschreven als een gewogen som van

vormfuncties, die een van nul verschillende waarde hebben in een beperkt gebied (de elementen). De gewichten, of wiskundige vrijheidsgraden, dienen berekend te worden.

Over de EEM bestaat er een zeer uitgebreide, kwalitatief hoogstaande literatuur. De bespreking hier wordt dan ook beperkt tot de zaken met een bijzonder belang voor gekoppelde problemen.

De vermazing kan identiek genomen worden voor de verschillende deelproblemen, maar dit is dikwijls een nadelige keuze. Zo vereisen niet alle deelproblemen eenzelfde opgelegde nauwkeurigheid in eenzelfde stuk van het oplossingsdomein en hebben niet alle gebieden een betekenis (bijv. lucht voor magnetische velden wordt thermisch een convectierandvoorwaarde). Om een voldoende globale nauwkeurigheid te bereiken zouden er dan ook veel overbodige vrijheidsgraden geïntroduceerd dienen te worden.

Voor de te maken afleidingen is het interessant om ervan uit te gaan dat alle relevante deeloplossing beschikbaar zijn op alle vermazingen.

Voor de elementtypes bestaat er een uitgebreide keuzemogelijkheid. De meest aangewende varianten zijn de elementen gebaseerd op lokale veeltermbenaderingen van een bepaalde orde.

Vooraleer de vergelijkingen van de EEM af te kunnen leiden, dienen zij individueel herwerkt te worden tot hun 'zwakke vorm', na eerst geschreven te zijn als een variationele vergelijking door:

- omwerking tot een (energie)minimalisatieprobleem;
- gebruik van de voor bepaalde standaardtypes differentiaalvergelijkingen afgeleide functionaal;
- het gebruik van de gewogen residu-methode: het residu van de vergelijking (en de randvoorwaarden) worden vermenigvuldigd met een reeks testfuncties en geïntegreerd. Een interessante keuze voor de testfuncties zijn de vormfuncties zelf (Galerkin keuze).

Van de eerste twee technieken kan aangetoond worden dat ze bijna nooit toepasbaar zijn voor een stel gekoppelde vergelijkingen. Het gewogen residu is altijd toepasbaar.

Een voordeel van de EEM is dat ze vanaf dit punt kan uitgewerkt worden tot een stel bouwblokken, verbonden aan de termen in de vergelijkingen. Uiteindelijk dienen er een stel integralen van eenvoudige functies in termen van de vormfuncties analytisch of numeriek uitgewerkt te worden. Deze basisbouwblokken worden vervolgens samengesteld tot een sparse systeemmatrix en bijhorende rechterlidvector.

Meestal wordt er voor het opstellen van deze fundamentele matrices verondersteld dat de eventueel afhankelijke coëfficiënten van de differentiaalvergelijking als constant benaderd kunnen worden binnen het eindig element.

Evenwel, door het benaderen van deze niet-lineariteiten met dit nulde orde element, wordt er een eerste orde fout geïntroduceerd. De veldoplossing zelf is lokaal benaderd met een oplossing van orde p en een fout van orde $p+1$. In de termen

waarin deze als product voorkomen, kan er dus een fout voorkomen van orde één, wat lager is dan de verwachte $p+1$. De nauwkeurigheid kan evenwel verhoogd worden door voor de niet-lineaire coëfficiënten (bijv. materiaalparameters of brontermen) een hogere orde eindige elementen benadering aan te wenden. De basisbouwblokken kunnen dan nog steeds uitgewerkt worden, meestal met de extra materiaalvormfunctie in de integrant.

Op deze manier wordt het probleem van de ruimtelijke niet-lineaire materiaalbenadering feitelijk verheven tot het niveau van de veldoplossingen zelf. Samen vormen zij een uitgebreid gekoppeld probleem. De afhankelijke materiaalparameters, nu geschreven als een gediscretiseerd materiaalveld, kunnen bepaald worden, door gebruik te maken van:

- *Interpolatie*: de niet-lineariteiten worden geëvalueerd op bepaalde geselecteerde punten (geen stelsel op te lossen).
- *Kleinste-kwadratenbenadering*: het kwadratisch verschil tussen het continue materiaalveld en de eindige elementenbenadering wordt geminimaliseerd.
- *Gewogen residumethode*: ditzelfde verschil wordt weerom vermenigvuldigd met testfuncties en geïntegreerd, bijv. numeriek met Gausspunten.

Deze laatste twee zijn in feite identiek en leiden tot eenzelfde spaars stelsel vergelijkingen ingeval van de Galerkinkeuze. Deze methoden leiden niet noodzakelijk tot dezelfde oplossing als verkregen door interpolatie.

Initieel werd er verondersteld dat de verschillende deeloplossingen in alle wiskundige vrijheidsgraden van alle deelvermazingen ter beschikking zijn. Praktisch kan dit gerealiseerd worden, waar lokaal nodig, door het implementeren van projecties tussen de verschillende deeloplossingsruimten. De benodigde projectievergelijkingen worden afgeleid op dezelfde manier als hiervoor: enerzijds een snelle interpolatiemethode of anderzijds een spaars stelsel afgeleid uit de kleinste-kwadratenmethode of de gewogen residumethode.

Deze projectie-operaties dienen evenwel met de nodige omzichtigheid toegepast te worden. Als er verschillende vermazingen met verschillende nauwkeurigheden (functie van de elementgrootte en de orde) gecombineerd worden, leidt een projectie snel tot nauwkeurigheidsverlies, bijvoorbeeld wanneer een fijn vermaasde oplossing geprojecteerd wordt op een stel grotere elementen, gaan de hoogste ruimtelijke frequenties in de oplossing verloren, tenzij deze zacht zou verlopen. In sommige situaties kan dit probleemloos gebeuren, bijv. wanneer een gebied fijner vermaasd werd om een overgang te realiseren. Er dient een gepaste vorm van ‘vermazingscompatibiliteit’ voorhanden te zijn.

Indien de deeloplossing een onvoldoende nauwkeurigheid bezit, dient deze verhoogd te worden door lokaal de vermazing te verfijnen. Dit kan bekomen worden door de elementgroottes te verkleinen (h -verfijning), de orde te verhogen (p -verfijning) of een combinatie van beide.

In elke van deze strategieën dienen er fouten geschat te worden op basis van de bekomen deeloplossingen. Een verfijning van de vermazing op basis van deze individuele foutvelden leidt evenwel niet altijd tot een globale vermindering van de

fout. Zo kan er een kleine fout die geen verfijning behoeft, voorkomen in combinatie met een grote fout in een gekoppelde gebied. In dat geval dienen beide best verfijnd te worden, aangezien door de koppeling in beide gebieden een grote fout kan ontstaan (eveneens ‘vermazingscompatibiliteit’).

De gepaste compatibiliteit wordt bekomen door de geschatte foutvelden te projecteren en te combineren met het lokale foutveld. Deze combinatie wordt gemaakt door een algebraïsche, kwadratische of geometrische uitmiddeling.

Indien verder gerekend wordt in het tijdsdomein, vereist de tijdsvariabele een aparte discretisatie, bijv. in een lineaire multistapsmethode. Meestal wordt een éénstapsmethode gebruikt met een voldoende kleine tijdsstap die flexibel met de niet-lineaire fenomenen te combineren is.

In verband met de gekoppelde problemen met verschillende tijdsschalen dient men op te letten voor de ‘stijfheid’ van de numerieke problemen die ontstaan wanneer de tijdsconstanten te ver uit mekaar liggen.

3 Modelling van elektromagnetische en thermische velden

3.1 Elektromagnetische veldmodellering in de EEM

De vergelijkingen van Maxwell bevatten niet-lineaire materiaalgrootheden, met name een saturerende permeabiliteit en permanent-magneetkarakteristieken.

Voor de numerieke berekeningen wordt er overgegaan op potentiaalformuleringen, met enerzijds de magnetische vectorpotentiaal, die in 2D herleid wordt tot een scalaire grootheid en anderzijds de scalaire elektrische spanningspotentiaal, die de vergelijkingen omvormen tot de eerder besproken basisvormen. Indien de karakteristieke golflengtes significant groter zijn dan de modelafmetingen, kunnen het elektrische en magnetische veld als ontkoppeld beschouwd worden.

De bekomen magnetische veldvergelijkingen in een vlak en de elektrische veldvergelijking in de ruimte met hun specifieke interpretaties voor de randvoorwaarden worden kort besproken. Foutenschatters en transformaties van het berekeningsdomein die toelaten oneindige gebieden in rekening te brengen, worden behandeld.

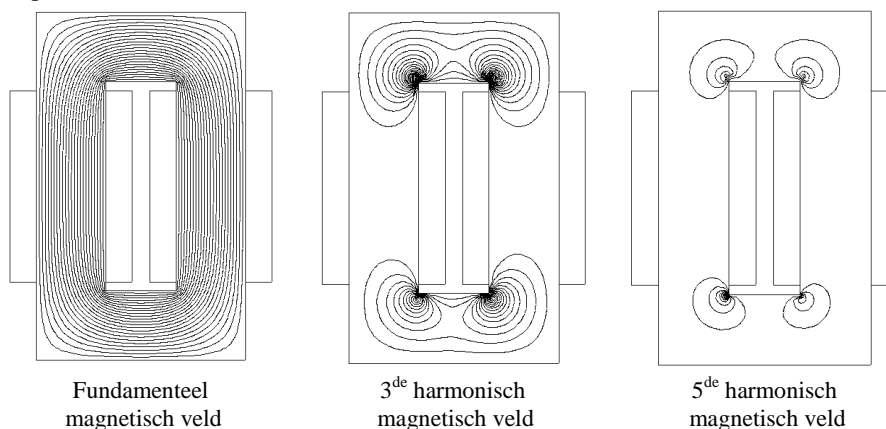
De bronterm in het magnetische veld bevat de stroomdichtheden en bijdragen vanwege permanent magnetische materialen. De stroomdichtheid kan op haar beurt een onbekende zijn met een geassocieerde circuitvergelijking. De stroomvoerende gebieden worden in dit verband onderverdeeld volgens twee modellen, nl. massieve geleiders en draadgeleiders. Het onderscheid situeert zich in het optreden van stroomverdringing (interne wervelstromen), wat een impact heeft op de magnetische veldverdelingen en de daaropvolgende verliesberekening. Bij de massieve geleiders dient er op gelet te worden dat er bij de vermazing rekening wordt gehouden met de indringdiepte van de wisselstroom.

In de circuitvergelijkingen worden de opgelegde en geïnduceerde elektrische grootheden gecombineerd. Hier dienen eveneens de niet-lineariteiten en de gekozen aanpak voor de tijdsafhankelijkheden in rekening gebracht te worden.

De berekeningswijzen van de magnetische velden onderscheiden zich van elkaar door de veronderstelling betreffende de tijdsafhankelijkheden. Indien er gekozen wordt voor een modellering in het gediscretiseerde tijdsdomein, dan leidt de toepassing van de EEM op de veldvergelijking tot de zuivere transiënte methode. Hierin worden op opeenvolgende momenten, ogenblikkelijke oplossingen benaderd op basis van de voorgeschiedenis. Indien de grootheden echter onafhankelijk van de tijd kunnen verondersteld worden, wordt het statisch veld berekend.

In vele gevallen is de stationaire toestand het doel van de berekening. Indien deze bestaat uit een periodische verandering, dan is een modellering in het frequentiedomein, waarin de oplossingen als discrete spectra voorkomen, aangewezen.

De toepassing van de Fouriertransformatie leidt tot de volledige vergelijking in het frequentiedomein, waarin er convolutieproducten voorkomen tussen de spectra tengevolge van afhankelijke materiaalparameters en het oplossingspectrum, naast een term die de geïnduceerde stroomdichtheid vertegenwoordigt. Dit leidt rechtstreeks tot de volledige complexe harmonische balans methode. Deze oplossingsmethode kan herwerkt tot een parallelliseerbaar, in frequentiecomponenten ontbonden algoritme. Hiertoe worden de niet-dominante termen naar het rechterlid gebracht, waar zij de rol van fictieve stromen die de flux weghouden uit de gesatureerde gebieden spelen (voorbeeld in Figuur 0.1). Door de interpretatie als gekoppeld probleem met deelproblemen met gelijkaardige fysische achtergrond, worden de oplossingsstrategieën voor gekoppelde problemen toepasbaar.



Figuur 0.1 Set van oplossingen van een harmonische-balans methode in een eenfasige transformator met verzadigingsharmonischen

Deze uitgebreide spectrale methode kan echter tot numerieke problemen leiden indien er componenten van uiteenlopende grootteordes gecombineerd worden. In dat geval worden de benaderende frequentiedomeinmethoden interessant voor de praktische toepassingen:

- Als er dominante componenten aanwezig zijn (*DC*-term voor de materialen, *AC* term voor het veld), herleidt dit zich tot de veelgebruikte tijdsharmonische methode.
- Indien de quasi-constante niet-lineariteiten voornamelijk bepaald worden door de fundamentele component of indien de niet-lineariteiten een dominante constante term, afhankelijk van het hele oplossingspectrum bevatten, dan kunnen er na decompositie, eenvoudiger te paralleliseren multi-harmonische methoden afgeleid worden.

Als de tijdsevolutie van het magnetisch veld, zowel trage als snelle dynamische verschijnselen bevat, dan is de hier voorgestelde transiënte frequentiedomeinmethode aangewezen. De oplossing wordt geschreven als een product van een periodische (complexe) basisfunctie en een tijdsafhankelijke complexe fasor (als het ware de “enveloppe” of omhullende rond de oscillaties). De eerste beschrijft de snelle quasi-periodieke veranderingen, daar waar de tweede de trage evolutie beschrijft, die bijv. het gevolg is van thermische invloeden.

Uiteindelijk wordt er een methode bekomen die verwant is aan zowel de tijdsharmonische als de puur transiënte methode. De voor beide specifieke geïnduceerde stroomtermen komen gecombineerd voor met als onbekende in de complexe fasor:

$$\nabla \cdot (\underline{\nu}_r(\underline{A})\nabla(\underline{A})) - \mu_0 \underline{\sigma}(T) \left(j\omega \underline{A} + \frac{\partial \underline{A}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \underline{\sigma}(T) \underline{V}_s. \quad (0.1)$$

met	\underline{A}	magnetische vector potentiaal fasor
	$\underline{\nu}_r$	relatieve reluctiviteit
	μ_0	permeabiliteit van vacuüm
	σ	elektrische geleidbaarheid
	T	temperatuur
	ω	pulsatie
	t	tijd
	\underline{V}_s	bronspanningsfasor

De tijdstappen in de hiervoor toepasselijke tijdsdiscretisatie kunnen groter gemaakt worden dan de grens aangegeven door het Nyquistcriterium in de overeenkomstige zuiver transiënte methode, wat een snellere transiënte berekening volgens de tijdsschaal van de het trage dynamische verschijnsel toelaat. Deze methode wordt geïllustreerd aan de hand van de simulatie van een transformator onderhevig aan spanningsflicker.

De berekening van het elektrische veld, van belang voor diëlektrische verliezen komt eveneens aan bod.

3.2 Thermische velden in de EEM

Warmtetransport komt voor in drie verschillende vormen: geleiding, convectie en straling. De invloed van deze laatste kan in elektromagnetische energie-omzetters verwaarloosd worden omwille van de relatief lage temperaturen.

De vergelijking is te schrijven in de eerder behandelde basisvorm. De aanwezige niet-lineariteiten zijn, naast de diverse bijdragen tot de bronterm, toe te schrijven aan de materiaalevoluties, met inbegrip van eventuele fase-transformaties. Veelal wordt er gebruik gemaakt van eerste orde benaderingen voor de temperatuurafhankelijkheden. Gebieden met gemengde materialen (bijv. windingen van geïsoleerde draden) worden best voorgesteld in de EEM door equivalente homogene materialen.

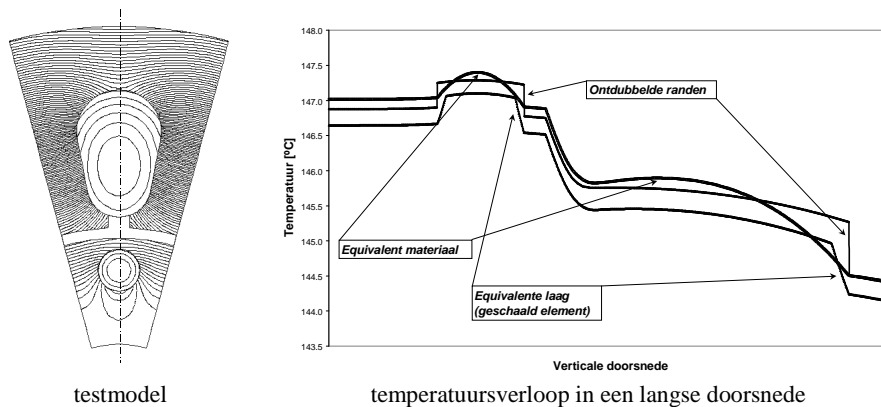
Bij de randvoorwaarden verdient de modellering van convectie bijzondere aandacht. De bepaling van de convectiecoëfficiënten komt meestal neer op een ingewikkelde procedure waarbij er gebruik gemaakt wordt van dimensieloze getallen die de toestand van de vloeistroming karakteriseren, bijv. het Taylor getal voor de stroming in een luchtspleet tussen twee concentrisch draaiende cilindres. De ingerekende temperatuurafhankelijkheden leiden tot niet-lineaire randvoorwaarden.

In de thermische modellering van elektromagnetische energie-omzetters wordt er tot op heden nog veel gebruik gemaakt van thermische circuits. Netwerkelementen in de vorm van T-equivalente modellen zijn zeer interessant voor de te behandelen geometrieën en warmtestromen. Het is mogelijk om, net zoals bij de magnetische velden, deze circuits te combineren met EEM-modellen indien het pad van de warmtestromen dit toelaat.

Bijzondere aandacht gaat uit naar de inrekening van dunne thermische overgangslagen in de EEM, meer bepaald thermische contactweerstand en dunne isolatielagen, die op verschillende plaatsen in elektrische machines voorkomen. De volgende modelleringstechnieken komen in aanmerking:

- *Niet-geschaalde eindige elementen*: de voorstelling van de lagen met de reële afmetingen leidt tot een enorm verbruik van eindige elementen om numerieke problemen te vermijden.
- *Geschaalde eindige elementen*: de afmetingen en de (equivalente) contactcoëfficiënten van de lagen kunnen geschaald worden, maar dit leidt tot zeer gecompliceerde niet-isomorfe projecties tussen de geassocieerde problemen.
- *Equivalent materiaal*: er wordt een gecorrigeerde anisotrope thermische geleidbaarheid berekend voor het materiaal van het onderdeel grenzend aan de dunne overgangslaag (bijv. de ingesloten wikkeling), wat voordelig is voor de projecties, maar niet evident indien de vorm niet eenvoudig is.
- *Ontdubbelde randen*: Door het aanbrengen van sneden in de vermazing en ontdubbeling van de vrijheidsgraden hoeven de materiaalparameters niet gecorrigeerd te worden en blijft projectie mogelijk. De extra vrijheidsgraden worden bepaald in extra vergelijkingen die de ééndimensionale warmtestroom over de laag vastleggen.

Deze verschillende methodes worden vergeleken in een representatief testmodel, waarbij de voordelen van deze laatste nieuwe techniek tot uiting komen (Figuur 0.2).



Figuur 0.2 Vergelijking van de modelleringstechnieken voor dunne thermische overgangslagen; links wordt de oplossing van het testmodel met de techniek van de ontdubbelde randen getoond

4 Interactie van elektromagnetische en thermische velden

4.1 Temperatuursafhankelijke elektromagnetische materiaalparameters

Door de invloed van de lokale temperatuur op de materiaalparameters die in de elektromagnetische vergelijkingen voorkomen, bestaat er een directe invloed van het thermisch veld op het elektromagnetische.

Vooreerst verandert de elektrische geleidbaarheid met de temperatuur. Dit heeft een impact op de opgelegde en geïnduceerde stroomtermen en de gerelateerde verliezen.

De magnetische eigenschappen van zachtmagnetisch materiaal veranderen over een groot temperatuursbereik slechts matig, maar verdwijnen vrij snel bij de transitietemperatuur, de Curietemperatuur.

Hardmagnetische materialen (permanente magneten), kennen een sterke temperatuursafhankelijkheid. Hun karakteristiek in het B/-H-kwadrant verschuift nagenoeg evenwijdig, waardoor er een veldverzwakking bij verhoogde temperaturen optreedt. Het punt van irreversibele demagnetisatie verplaatst zich eveneens, met als gevolg een verhoogd risico op deze onomkeerbare lokale veldverzwakking in warmere magneten. Deze gevoeligheden zijn sterk afhankelijk van de het type permanent-magneetmateriaal.

Een laatste belangrijke afhankelijkheid bestaat uit veranderingen in de eigenschappen geïnitieerd door fasetransformaties, wat een niet te verwaarlozen effect is in elektrothermische processen.

4.2 Elektromagnetische verliesberekeningen

De brontermen van de thermische vergelijking toepasbaar op elektromagnetische energie-omzetters bestaan hoofdzakelijk uit de verscheidene elektromagnetische verliesdichtheden, onder andere de Joule, diëlektrische en ijzerverliezen. Deze bevatten op hun beurt temperatuursafhankelijke grootheden zoals bijv. de elektrische geleidbaarheid.

De eerste verliesgrootte zijn Joule verliezen in algemene zin, dus met de bijdrage van optredende wervelstromen, in de niet-magnetische geleiders. Deze verliesdichtheid wordt berekend door een integratie van de niet-lineaire uitdrukking over het eindige element van het geleidend gebied. De term die de geïnduceerde stroom vertegenwoordigt, dient voorgesteld te worden rekening houdend met de gekozen aanpak voor de tijdsvariabele. Voor de berekening van de volledige Joule verliesintegraal, is een numerieke integratie aangewezen, tenzij een vereenvoudigde uitdrukking toepasselijk is (bijv. als de stroomdichtheid quasi constant is binnen het element).

De ijzerverliezen zijn een verzameling verliesbijdragen met verschillende componenten tengevolge van fysische effecten optredend in de laminaties:

- *Hysteresisverliezen*: verbonden aan de oppervlakte van de hysteresislus en resulterend in een verlieshoek tussen de magnetische inductie en veldsterkte;
- *Klassieke wervelstroomverliezen*: niettegenstaande de lamineringen, treden er macroscopische wervelstromen op in de blikplaten, met een Joule verlies tot gevolg;
- *Verliezen tengevolge van microscopische effecten*: op het niveau van de microscopische materiaalstructuur treden er moeilijke te kwantificeren energie-dissiperende effecten op.

Elk van deze bijdragen is op een andere manier frequentieafhankelijk.

Het is mogelijk de ijzerverliestermen te berekenen door gebruik te maken van geavanceerde numerieke materiaalmodellen. Hier werd echter gekozen voor de iets minder nauwkeurige, maar snellere aanpak bestaande uit de numerieke tijdsintegratie van analytische uitdrukkingen. De benodigde lokale magnetische grootheden worden bekomen door een berekening van de magnetische inductie in de eindige elementen in een reeks opeenvolgende magnetische modellen. Op deze manier kunnen bijdragen door alternerende en roterende fluxen in rekening gebracht worden.

Deze verschillende verliestermen werken terug op de elektromagnetisch veldoplossing. Zij dienen dan ook in rekening gebracht te worden in de EEM methode. Voor de frequentiedomeinmethoden kan dit bijv. door het verwerken van een veralgemeende 1verlieshoek in de reluctiviteiten.

4.3 Indirecte interacties

Indirect zijn er nog een hele reeks interacties tussen gekoppelde elektromagnetische en thermische veldproblemen die niet kunnen verwaarloosd worden. Zo verandert de verzadiging mee met thermisch geïnduceerde veranderingen van veldsterkte. Thermische uitzetting is meestal een te verwaarlozen effect als het

temperatuursbereik beperkt blijft. Mechanische verliezen door wrijving met de lucht of in de lagers zijn een indirect gevolg van de magnetische krachtwerking.

5 Numerieke berekening van gekoppelde elektromagnetisch-thermische problemen

5.1 Berekening van het niet-lineaire gekoppelde probleem

Niet-lineaire wiskundige problemen bestaan in vele soorten. De gekoppelde problemen behoren tot de soort waarin er een samengestelde oplossingsvector moet bepaald worden. Een bijkomende moeilijkheid is dat de eenduidigheid van de oplossing niet altijd gegarandeerd is.

De twee voornaamste iteratieve methoden in dit verband zijn:

- *Picarditeraties (of substitutiemethodes)*. Benadering door opeenvolgende functie-evaluaties, waarna de oplossing terug ingevuld wordt in de functie. Voorwaarde is dat de spectrale radius van de Jacobiaan van de functie kleiner is dan één. Deze methode convergeert dikwijls met sterke oscillaties. Bij gekoppelde problemen kan deze strategie geïmplementeerd worden als een blok-Jacobi methode die onafhankelijk van mekaar de deelproblemen evalueert of een blok-Gauss-Seidel-methode die opeenvolgend de deelproblemen aanpakt, met onmiddellijke inrekening van de pas bekomen deeloplossing. Theoretisch is de laatste lichtjes minder stabiel, maar convergeert sneller.
- *Newtonmethoden*. Lokaal wordt er een eerste orde benadering gemaakt waarvoor de volledige Jacobiaan, die alle eerste orde afgeleiden bevat, vereist is. Deze wordt omgevormd tot een gelineariseerd systeem met als rechterlid de residuvectoren en als systeemmatrix de Jacobiaan in het werkingpunt, waarmee opeenvolgende correcties berekend worden. Theoretisch hebben de Newtonmethoden een snellere, kwadratische convergentie als de benadering dicht genoeg in de buurt van de oplossing komt.

De Newtonmethoden kunnen zeer duur zijn, omwille van de uitgebreide procedure om de Jacobiaan op te stellen, wat niet altijd expliciet analytisch mogelijk is, en de oplossing van het uitgebreide gelineariseerde systeem, waarin alle deelproblemen met hun specifieke numerieke eigenschappen, verzameld zijn.

Om deze problemen te omzeilen, zijn er verschillende goedkopere benaderende quasi-Newtonmethoden voorhanden.

Vooreerst zijn er methoden die de Jacobiaan een aantal stappen fixeren of die de Jacobiaan zelf benaderen, bijv. door differenties, wat nog altijd een omvangrijke berekening vertegenwoordigt.

Alternatief, kan het matrix/vector-product zoals dit voorkomt in bepaalde iteratieve oplossingsalgoritmen voor de correctievergelijking, benaderd worden door een differentie die slechts één bijkomende systeemevaluatie vereist. De benodigde parameter(s) dienen evenwel met de nodige voorzorgen gekozen te worden om de combinatie van de benaderingsfout en de numerieke fouten niet te doen oplopen. Zo

wordt een expliciete berekening van de Jacobiaanmatrix vermeden en vervangen door een impliciete.

Deze algoritmes worden gecontroleerd door een stopcriterium op basis van het residu of het verschil tussen opeenvolgende oplossingen. Het is nodig de bijdragen van de verschillende deelproblemen te wegen om ze te kunnen vergelijken.

De algoritmes voor het numeriek oplossen van niet-lineaire stelsels vergelijkingen mogen echter niet zonder meer toegepast worden. De convergentie-eigenschappen zijn meestal slechts ten volle geldig in de buurt van de oplossing. Dit kan onder andere afgedwongen worden door het gebruik van de voldoende goede startoplossing. Deze kan bekomen worden door continuering van een parameter die de grote invloed heeft op de 'sterkte' van de koppeling, door het projecteren van een eerder bekomen benadering op een grovere vermazing of door, bij transiënte methoden, de oplossing van de vorige tijdsstap te projecteren.

Om een globale convergentie te garanderen zijn er bijkomende maatregelen nodig.

Door het invoeren van een adaptieve relaxatie- of dempingstechniek worden gevaarlijke oscillaties, die de benadering weg zouden kunnen voeren van de oplossing, beperkt. Hierbij wordt het verschil tussen de vorige en nieuwe benadering (de correctie) slechts ten dele ingerekend. Voor de bepaling van de optimale relaxatieparameter, wat een klein optimalisatieprobleem op zich is, kunnen verschillende methodes die gebaseerd zijn op het berekenen van enkele residu's met deels heuristische keuzes van de te testen waarden voor de relaxatieparameter, aangewend worden. Er kan nog een beperkte verbetering in de convergentie bekomen worden indien er voor de demping van de niet-lineaire deeloplossingen verschillende dempingsfactoren gebruikt worden. De bepaling hiervan vraagt echter meerdere (deel)functie-evaluaties.

Een andere aanpak die de globale convergentie bevordert, is de stabilisatie van de oplossing door deze uit werken als een (pseudo-)transiënte methode, verwant aan continuering met een tijdsparameter. In het algemeen zorgt de inbreng van de transiënte term voor een verruiming van het interval waarbinnen de convergentie gegarandeerd is, maar dit gaat ten koste van een groter aantal iteraties in de bijkomende tijdsclus. Fysisch kan dit effect ingezien worden door het systeem rustig in de (soms fictieve) tijd te laten evolueren naar de stationaire oplossing, in plaats te proberen hier in één keer te geraken.

De verschillende oplossingsprocedures worden in een aangepaste algoritmische syntax besproken met het oog op de concrete implementatie voor een gekoppeld elektromagnetische probleem, in zowel de stationaire als de (pseudo-)transiënte variant. Er wordt aangegeven waar een parallellisatie van berekeningsprocessen mogelijk is.

De procedure voor het opstellen van de correctievergelijking voor dit gekoppeld probleem op onafhankelijke vermazingen wordt meer in detail besproken, zonder de algemeenheid uit het oog te verliezen. De basisvergelijking bevat een asymmetrische systeemmatrix voor de te berekenen correcties δ :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G_A}{\partial A} & \frac{\partial G_A}{\partial T'} \frac{\partial T'}{\partial T} \\ \frac{\partial G_T}{\partial A'} \frac{\partial A'}{\partial A} & \frac{\partial G_T}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_A \\ \delta_T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_A \\ G_T \end{bmatrix} \quad (0.2)$$

In de asymmetrische buiten-diagonaal blokken die de vergelijkingen koppelen, dienen de magnetische (residu-)vergelijking G_A naar de op de magnetische vermazing geprojecteerde temperatuur T en de thermische (residu-)vergelijking G_T naar de op de thermische vermazing geprojecteerde magnetische oplossing A' afgeleid te worden. De kettingafgeleiden worden berekend op basis van de projectievergelijkingen. Doordat er meerdere wiskundige vrijheidsgraden in de ene vergelijking een bijdrage leveren tot de geprojecteerde variabele, ontstaat een tamelijk grote opvulling van de buiten-diagonaal blokken.

De afgeleiden in de diagonaalblokken ontstaan door niet-lineariteiten van de deelproblemen op zichzelf.

Wanneer de projecties niet expliciet kunnen geformuleerd en afgeleid kunnen worden, dient (0.2) vervangen te worden door een vergelijking met impliciete projecties.

Een bijkomend probleem ontstaat er wanneer de magnetische vergelijking geschreven is in complexe fasorgrootheden in het frequentiedomein. Er kan aangetoond worden dat de functie niet analytisch en bijgevolg niet differentieerbaar is. De complexe vergelijking moet dan geschreven worden als een stelsel van een reële en een imaginaire functie, wat wel differentieerbaar is:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \operatorname{Re}\{G_A\}}{\partial \operatorname{Re}\{A\}} & \frac{\partial \operatorname{Re}\{G_A\}}{\partial \operatorname{Im}\{A\}} & \frac{\partial \operatorname{Re}\{G_A\}}{\partial T'} \frac{\partial T'}{\partial T} \\ \frac{\partial \operatorname{Im}\{G_A\}}{\partial \operatorname{Re}\{A\}} & \frac{\partial \operatorname{Im}\{G_A\}}{\partial \operatorname{Im}\{A\}} & \frac{\partial \operatorname{Im}\{G_A\}}{\partial T'} \frac{\partial T'}{\partial T} \\ \frac{\partial G_T}{\partial \operatorname{Re}\{A'\}} \frac{\partial \operatorname{Re}\{A'\}}{\partial \operatorname{Re}\{A\}} & \frac{\partial G_T}{\partial \operatorname{Im}\{A'\}} \frac{\partial \operatorname{Im}\{A'\}}{\partial \operatorname{Im}\{A\}} & \frac{\partial G_T}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{Re}\{\delta_A\} \\ \operatorname{Im}\{\delta_A\} \\ \delta_T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \operatorname{Re}\{G_A\} \\ \operatorname{Im}\{G_A\} \\ G_T \end{bmatrix} \quad (0.3)$$

Deze vergelijking, na scalering, is dikwijls slecht geconditioneerd qua tijdsconstanten (conditiegetallen in de orde van 10^{10} - 10^{20}), wat verklaard wordt door de verschillende onderliggende fysische vergelijkingen met hun kenmerkende grootte-orde.

De quasi-Newton methode die steunt op een benaderend Jacobiaan/vector-product, toegepast in het GMRES algoritme, wordt geïllustreerd. Om het aantal variabelen (geheugengebruik bij GMRES) en functie-evaluaties verder te minimaliseren, worden de impliciete functies herschreven in termen van de subset van alternatieve variabelen die rechtstreeks gekoppeld zijn, met name de elektrische geleidbaarheid en de verliesdichtheid. De Jacobiaan krijgt dan eenheidsmatrices op de diagonaal en het product wordt benaderd door slechts twee evaluaties van deelfuncties. Het

probleem van de niet-differentieerbare complexe functies is hier omzeild. Er is echter geen evidente preconditionering voorhanden.

In deze aanpak wordt de oplossingssoftware voor de deelproblemen als een ‘zwarte doos’ behandeld. Dit biedt mogelijkheden om gesloten commerciële programma's te combineren in een quasi-Newton gekoppelde oplossingsstrategie.

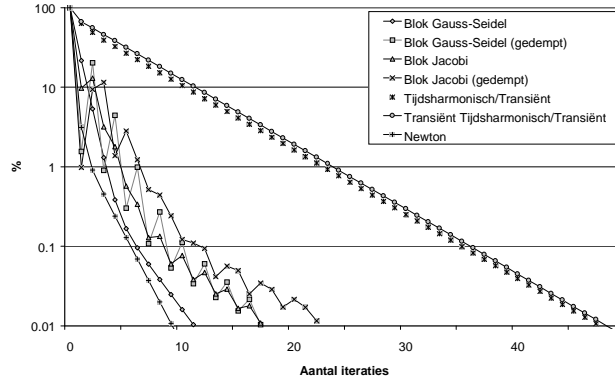
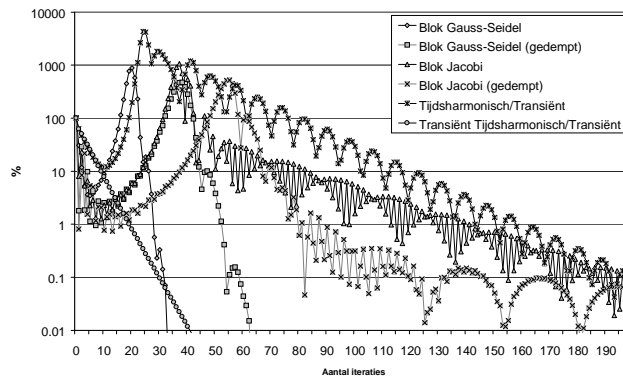
In de berekening van het transiënte gekoppelde elektromagnetisch-thermische probleem, duikt de moeilijkheid van numerieke stijfheid op door de combinatie van de kleine magnetische en grote thermische tijdsconstanten. Hiermee kan op verschillende manieren rekening gehouden worden.

1. *Simuleer met de kleine tijdstappen van het magnetisch probleem:* Dit leidt tot onaanvaardbaar lange berekeningstijden en het thermisch veld wijzigt amper.
2. *Simuleer met de grote tijdstappen van het thermische probleem:* Dit vereist een zeer dure transiënte methode voor stijve vergelijkingen (bijv. BDF). Praktisch is de bekomen oplossing weinig nauwkeurig.
3. *Simuleer volgens twee tijdsschalen:* Als uitbreiding kunnen de thermische variabelen een tijd constant verondersteld worden. Als er een aantal cycli van het magnetisch veld bekend zijn, kunnen deze geëxtrapoleerd worden. Synchronisatie is niet evident.
4. *Veronderstel een ‘continue stationaire toestand’:* In de limiet leidt de vorige extrapolerende methode tot de aanname dat het magnetische veld in een soort continue stationaire toestand is en dus gesimuleerd zou kunnen worden met een frequentiedomeinmethode. Deze toestand wordt herberekend na elke (grote) thermische tijdsstap. In sommige gevallen divergeert deze methode omwille van de extrapolatie.
5. *De ‘omhullende’ aanpak:* Door gebruik te maken van de eerder voorgestelde transiënte tijdsharmonische methode, waarin de snelle en trage dynamica in het magnetische probleem gescheiden worden, verdwijnt het probleem van de stijfheid. Voor beide systemen wordt de tijdsstap identiek genomen. Deze methode blijkt zeer stabiel.

5.2 Referentiemodel en algoritmekeuze

Om alle besproken methodes te vergelijken en om de keuze tussen de algoritmes te argumenteren, wordt een eenvoudig referentieprobleem opgelost. Dit bevat een massieve staaftgeleider met stroomverdringing die door asymmetrische convectie gekoeld wordt (boven- en onderaan verschillend). De hoogte/breedte-verhouding is variabel, maar de oppervlakte is constant. Er zijn enkel Joule verliezen en de elektrische geleidbaarheid is de enige thermisch afhankelijke materiaalgrootheid. Hierdoor kan de impact van het stroomverdringingseffect, gevoelig aan de plaatselijke thermisch geïnduceerde geleidbaarheidsveranderingen, gevarieerd worden. Dit niet-lineaire probleem bezit meerdere numerieke oplossingen, waarvan er slechts één fysisch mogelijk is.

De resultaten van de convergentie in de numerieke experimenten zijn samengevat in Figuur 0.3. De linkse grafieken zijn gemaakt voor een model met een gematigde hoogte/breedte-verhouding, bij de rechtse is deze parameter groot.

(a) $h/b=30$ (b) $h/b=38$

Figuur 0.3 Resultaten van de numerieke experimenten ter vergelijking van de niet-lineaire oplossingsalgoritmes op een referentieprobleem

Alle strategieën convergeren naar de correcte oplossing voor $h/b=30$ en soms zelfs overgerelaxeerd, maar dit is niet het geval voor $h/b=38$. De blok-Jacobi en blok-Gauss-Seidel methode convergeren naar de niet-fysische oplossing, zelfs met zeer sterke demping. Een pseudo-transiënt algoritme op basis van de veronderstelling van een ‘continu stationaire toestand’ (nr. 4 hierboven) divergeert. De theoretisch correctere stabiliserende combinatie van het transiënt tijdsharmonische magnetische en het transiënt thermische model blijkt het meest robuust en convergeert altijd naar de fysische oplossing.

Voor de toegepaste Newtonmethode wordt de volledige Jacobiaan berekend volgens (0.3). Reeds in dit nog vrij eenvoudige probleem met onafhankelijke vermazingen is dit een gecompliceerde operatie omwille van het bepalen van de verschillende afgeleiden. De conditiegetallen van de asymmetrische Jacobiaan zijn vrij hoog, wat zijn oorzaak vindt in de compleet verschillende fysische achtergronden. De oplossing van de correctievergelijking vraagt dan ook geavanceerde methoden.

De quasi-Newtonmethode met benaderd matrix/vector-product levert eveneens goede resultaten bij een goede startoplossing (bijv. enkele stappen van een pseudo-transiënte methode).

Uit deze experimenten kunnen lessen getrokken worden voor de keuze van de methode. De reden van de divergentie en/of convergentie naar niet-fysische oplossingen, is de aanwezigheid van aanzienlijke stroomconcentraties met bijhorende verliezen in dit model in combinatie met de niet-uniforme warmtepaden. Daardoor veranderen de materiaaleigenschappen zeer sterk en wordt er een totaal andere wervelstroomverdeling berekend. Het oplossingsproces is dus (te) sterk oscillerend.

Eenzelfde gevaar treedt op bij modellen met:

- sterk niet-uniforme warmtepaden, bijv. asymmetrische koeling;
- sterk niet-uniforme verliesverdeling, te meer als het verlies zelf temperatuursafhankelijk, onder andere bij uitgesproken stroomverdringing.

Deze ‘gevaarlijke’ problemen met zeer sterke koppeling worden best opgelost met het robuuste gestabiliseerde ‘omhullende’ algoritme. Andere kunnen met goedkope Picardmethoden opgelost worden, eventueel met initiële demping. De Newtonmethoden met expliciete Jacobiaan zijn zeer duur en alleen toelaatbaar als de koppeling eenvoudig is en het oplossen van het stelsel met gepaste algoritmes mogelijk en verantwoord is.

5.3 Berekening van het gelineariseerde probleem

Op diverse plaatsen, in de ontkoppelde deelproblemen of in correctievergelijkingen moeten spaarse lineaire systemen met EEM-oorsprong opgelost worden. Dit gebeurt met Krylov-methoden waarover een uitgebreide literatuur bestaat. In deze methoden wordt de oplossing iteratief benaderd in de Krylov-ruimte, waarbij het residu geminimaliseerd wordt of orthogonaal gemaakt wordt aan een bepaalde deelruimte. De snelheid van de convergentie hangt samen met de spreiding van de eigenwaarden (onder andere het conditiegetal). Deze kan verbeterd worden door het gebruik van een preconditioner.

6 Implementatie-aspecten

De geschiedenis van de gebruikte EEM onderzoekscode 'Olympos' wordt kort besproken, met aandacht voor de uitbreidingen nodig voor elektromagnetisch-thermisch gekoppelde problemen. Dit omvat onder andere specifieke thermische deelaspecten, zoals speciale randvoorwaarden, toevoegingen voor overgangslagen (met aanpassing van het vermazingsprogramma). Diverse routines voor de verliesberekening worden toegevoegd.

Door een herwerking van de C-code naar object-georiënteerde C++-code worden speciale datastructuren, ondermeer voor materiaalkarakteristieken en andere bouwblokken, ingebracht. Hiermee wordt een vlotte implementatie van de multi-harmonische en transiënt tijds-harmonische methoden mogelijk.

Verder is de code uitgebreid om 3D modellen aan te kunnen, ondermeer voor thermische en elektrostatische problemen.

Vermits de berekening van allerhande gekoppelde problemen een vlotte combinatie vraagt van vermazingsprogramma's, code om de deelproblemen op te lossen en tussenberekeningen zoals verliesberekeningen, is er een 'script-interpreter' ontwikkeld die de specifieke operaties uitvoert, vanuit de conditionele clausules die de geneste berekeningslussen interpreteren.

De verschillende geïmplementeerde commando's zijn:

- aanpassingsroutines voor de afhankelijke materiaalkarakteristieken;
- verliesberekeningsroutines en gerelateerde operaties voor hybride thermische EEM/circuit-modellen;
- externe processturingen om andere routines (eventueel als een zwarte doos) op te roepen;
- controle van het iteratieproces en adaptieve demping;
- projectie-algoritmes.

Het is mogelijk de berekeningsopdrachten parallel uit te voeren. Deze code werd object-georiënteerd ontwikkeld, zodat specifieke routines herbruikt kunnen worden in applicatie-georiënteerde code.

De verschillende opdrachten worden geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld op een ondergrondse vermogenkabel, waarvan het elektrisch, magnetisch en thermische veld met onafhankelijke vermazingen interageren.

Voor basis gekoppelde berekeningen zijn standaard scenario's voorhanden, die snel aangepast kunnen worden door de modelnamen in te voeren. Op deze manier wordt het eveneens mogelijk voor minder ervaren gebruikers om deze complexe berekeningsprocessen op te starten.

Parallele operaties op procesniveau zijn geïmplementeerd met een PVM-bibliotheek (Parallel Virtual Machine). Hierdoor kunnen diverse rekeneenheden, eventueel verspreid in een netwerkarchitectuur gecombineerd worden. Dit is onder andere gebruikt in de ontkoppelde multi-harmonische magnetische veldberekeningen, de voornoemde quasi-Newton methode en iteratieve niet-lineaire blok algoritmen. Zo kan er zeer efficiënt gewerkt worden indien twee velden gekoppeld te berekenen zijn (bijv. een tijdsharmonisch magnetisch en een thermisch veld) op een werkstation met een dual-processor architectuur.

7 Toepassing: Invloed van Power Quality problemen op transformatoren

7.1 Probleemsituering

In distributiesystemen voor elektrische energie zijn er een aantal door technologie geïnitieerde veranderingen gebeurd:

- Door de vrijmaking van de elektriciteitsmarkt komen er meer energiestromen en wordt er meer vermogenelektronica gebruikt om deze te conditioneren.
- Voor het gebruik van hernieuwbare energieën (fotovoltaïsch, wind, ...) worden er meer vermogenelektronische invertoren aangewend.

- De eigenheid van vele belastingen is veranderd. In verlichtingstoepassingen, aandrijvingen, elektrische verwarming en ICT-apparatuur worden vermogenelektronische schakelingen gebruikt.

Spijtiggenoeg heeft deze evolutie ook schaduwzijden. Deze niet-lineaire bronnen en lasten veroorzaken niet-sinusoidale stromen en bijgevolg onrechtstreeks ook vervormde spanningen, wat een vermindering van de 'Power Quality' betekent. De gevolgen hiervan zijn dikwijls te modelleren als elektromagnetisch-thermisch gekoppelde problemen, bijv.:

- bijkomende verliezen in geleiders door hoogfrequente stroomcomponenten.
- verhoogde diëlektrische en geleidingsverliezen in condensatoren.
- toegenomen verliezen in elektromagnetische energie-omzetters zoals motoren, generatoren en transformatoren.

Om een betere inzicht te hebben in de effecten op transformatoren, met het doel een gepaste 'derating' te kunnen bepalen, worden deze hier gedetailleerd bestudeerd.

7.2 Invloed van stroom- en spanningsharmonischen op transformatoren

De verliezen in een transformator bestaan uit:

1. nullastverliezen (kernverliezen): voornamelijk ijzerverliezen in de kern
2. belastingsverliezen: Joule verliezen in de wikkelingen en bijkomende verliezen veroorzaakt door de ontstane lekvelen.

Spanningsharmonischen veroorzaken bijkomende harmonischen in de flux, die afnemen evenredig met het ordegetal. In realistische systemen (sterke netten) maken deze spanningsharmonischen slechts enkele percenten uit van de aangelegde spanningen. Bijgevolg kan de bijdrage van de spanningsharmonischen in de verliezen verwaarloosd worden.

Stroomharmonischen, die in grootte de fundamentele stroom kunnen overtreffen, veroorzaken niet te verwaarlozen bijkomende belastingsharmonischen. Hiertoe is op basis van analytische modellen voor draadgewonden transformatoren een K -factor gedefinieerd, die de relatieve toename van de verliezen ten opzichte van een situatie met eenzelfde stroom op fundamentele frequentie, aangeeft.

7.3 Simulatiemodellen voor transformatoren

De magnetische modellen voor berekeningen in de EEM bestaan uit drie belangrijke onderdelen: kern, windingen en de omgevende lucht (plus eventuele structuurdelen). De voorstelling van de lucht mag niet verwaarloosd worden met het oog op de inrekening van de belangrijke lekflux.

De componenten van de winding worden voorgesteld door een draadgeleider of een set massieve geleiders indien er een niet te verwaarlozen stroomverdringing optreedt, zoals dat het geval is bij bijvoorbeeld foliewikkelingen.

Deze keuze heeft gevolgen voor de berekening van de Joule verliezen. In de massieve geleiders wordt de invloed van interne en externe lekvelen volledig in

rekening gebracht en het verlies kan direct door integratie bekomen worden. Berekeningen op een proefmodel tonen trouwens aan dat de door de klassieke K -factor definitie vooropgestelde kwadratische frequentie-afhankelijkheid niet opgaat bij foliewikkelingen.

In de draadgeleiders wordt zo enkel het gelijkstroomverlies berekend. Het bijkomend verlies tengevolge van de beperkte interne wervelstromen en invloed van externe lekvelden, vooral ter hoogte van de spoelkoppen, is niet inbegrepen. Er wordt aangegeven hoe men met een stel kleine, geparametriseerde EEM-berekeningen de correctie op deze waarde kan schatten. Telkens wordt er van een EEM model van één enkele draad, nu gemodelleerd als massieve geleider, onderhevig aan een externe éénheidsflux, het Joule verlies berekend. Ingeval van meerdere harmonischen wordt deze berekening hernomen voor andere frequenties. De alzo berekende wisselstroombijdrage wordt als toeslag aan de resultaten van de volledige wikkeling toegevoegd, na gewogen te zijn aan de hand van de uit de EEM berekende lokale grootte van de lekflux.

Indien nodig, kunnen circuitvergelijkingen toegevoegd worden aan de (2D) EEM-modellen. Hierin kunnen circuitelementen zitten die effecten in de derde dimensie voorstellen.

Ingeval van berekeningen met meerdere belastingsharmonischen, past het deze voor te stellen als stroombron. Het voedend net wordt een spanningsbron bij fundamentele frequentie en een kortsluiting of impedantie bij harmonische frequenties.

Voor de thermische modellen vraagt de winding de meeste aandacht. Draadwindingen worden voorgesteld als equivalente samengestelde materialen. Foliewindingen bestaan uit lagen afwisselend goed en (dunner) slecht thermische geleidend materiaal. Er kan een equivalent isotroop materiaal bepaald worden of de methode met de ontdubbelde randen kan gebruikt worden.

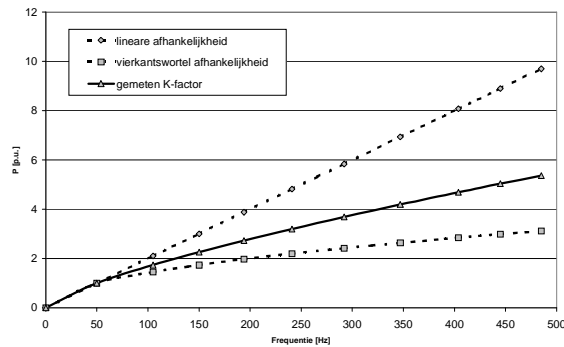
7.4 Praktische factor voor het bijkomend verlies

De gestandaardiseerde K -factor voldoet niet bij transformatoren met een foliewikkeling. Er kan een factor voor het bijkomende verlies bij niet-lineaire belastingen bepaald worden op basis van een reeks kortsluitproeven bij verschillende frequenties. Hieruit wordt de verhoging van de AC-serieverliesweerstand bepaald, waarop de schatting van de frequentie-afhankelijkheid van de belastingsverliezen gebaseerd kan worden. Deze waarden dienen vanzelfsprekend bepaald te worden voor een transformator op bedrijfstemperatuur. Uitgaande van deze gegevens kan dan voor een samengesteld stroomspectrum het extra verlies geschat worden.

Deze kortsluitproeven kunnen uitgevoerd worden op testtransformatoren, gevoed door een bron met regelbare frequentie. Vermits enkel het verliesvermogen moet toegeleverd worden, is het vereiste vermogen beperkt.

In de ontwerpfase kunnen deze kortsluittoestanden gesimuleerd worden. Een gekoppelde berekening laat toe de juiste interne temperatuurverdeling te bepalen. Op basis van de verliesberekening kan dan de beoogde weerstand berekend worden.

Figuur 0.4 toont de bekomen extra relatieve verliezen bij verschillende harmonische frequenties voor een driefasige transformator met foliewikkeling.



Figuur 0.4 Gemeten extra relatieve verliezen bij harmonische frequenties voor een driefasige transformator met foliewikkeling

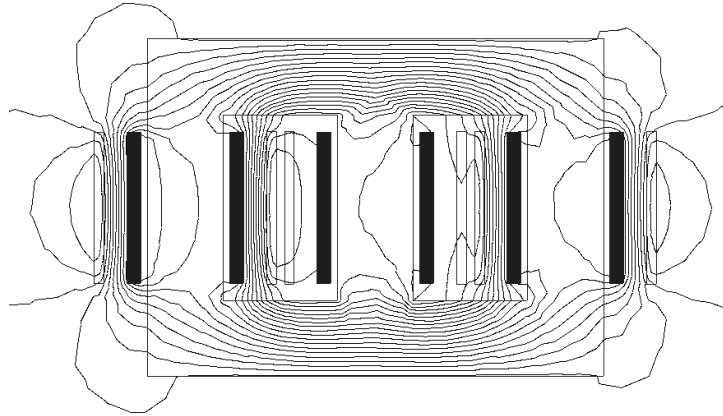
7.5 Simulatie van een droge driefasige distributietransformator met foliewinding

Ter validatie van de gekoppelde berekening wordt een droge driefasige distributietransformator van 30 kVA met een gemengde folie- en draadwinding gesimuleerd in kortsluittoestand met gekoppelde magnetisch-thermische modellen. Deze energie-omzetter wordt gekoeld door natuurlijke convectie. De resultaten worden vergeleken met metingen op een prototype.

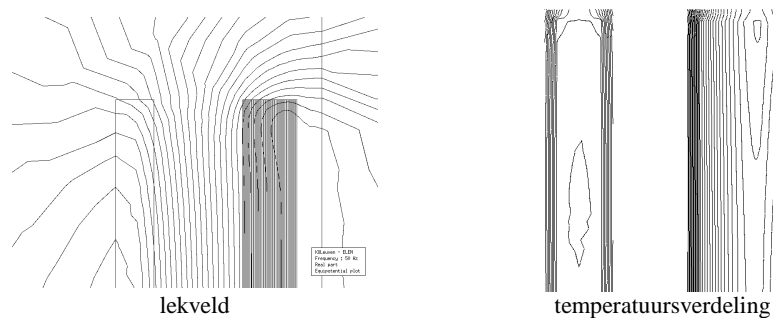
Daar de foliewikkeling 50 lagen bevat, bevindt 80 % van de elementen in het magnetische EEM-model zich in deze gebieden. Dit model is noodzakelijk 2D omdat een 3D model onmogelijk veel elementen zou vereisen. Er is wel vergeleken met een vereenvoudigd 3D model, waaruit blijkt dat de lekvelden een dusdanige symmetrie vertonen dat een 2D model geen ernstige afwijkingen in dit verband vertoont.

Voor het thermische model zijn enkel de windingen (losstaand van de kern) weerhouden. Daarbij komt dat de kern en de ijzerverliezen weinig van belang zijn voor de kortsluittesten. De convectieve randvoorwaarden worden gemodelleerd op basis van de natuurlijke convectiemodellen voor rechtopstaande vlakken. Het is van belang gebleken dat de convectieparameters als functie van de hoogte en temperatuur berekend worden.

Enkele van de veldbeelden horende bij de stationaire nominale kortsluittoestand op 50 Hz worden getoond in Figuur 0.5 (magnetisch veld) en Figuur 0.6 (details van het lekveld en de temperatuursverdeling).



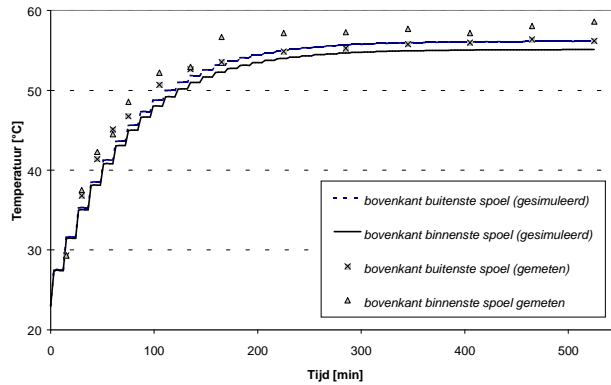
Figuur 0.5 Reëel deel van de magnetische veldoplossing



Figuur 0.6 Details van de magnetische en thermische oplossing

Om de impact van mogelijke benaderingsfouten en onzekerheden in de modellering in te schatten, is er een sensitiviteitsanalyse gemaakt, waarin belangrijke parameters of grootheden met 10 % gevarieerd worden. Hieruit blijkt dat de vulfactoren, die de equivalente thermische geleidbaarheden bepalen, een grote invloed hebben, naast de thermische geleidbaarheden zelf. De convectiecoëfficiënten zijn erg bepalend voor de temperatuur van het onderdeel waar ze bijhoren.

De transiënte opwarming is gesimuleerd met een gekoppeld transiënt tijdsharmonisch magnetisch en een transiënt thermisch algoritme. De resultaten worden vergeleken met de metingen in Figuur 0.7.



Figuur 0.7 Vergelijking van de gemeten en de (gekoppeld) gesimuleerde opwarming

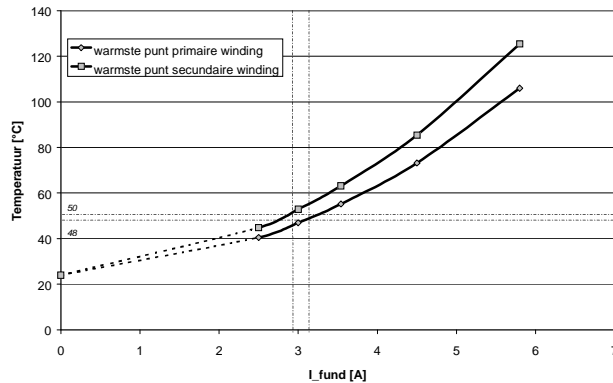
Ter vergelijking is hetzelfde model ook ongekoppeld berekend. Dit levert temperaturen op die minstens 5 % lager zijn.

In de gemeten en gesimuleerde elektrische grootheden zijn kleine verschillen vastgesteld die toegeschreven kunnen worden aan de beperkende 2D benadering en de verwaarlozing van structuurdelen.

Enkele van de geregistreerde temperaturen wijken sterker af van de simulatie. Dit gebeurt op plaatsen waarvoor de benadering van de geometrie in het convectiemodel vrij grof is (bijv. onderaan, dicht bij de bodem, of binnenin het kernvenster). Dit kan enkel verbeteren indien de luchtstroming nauwkeuriger gemodelleerd wordt, bijv. in een numeriek fluidumstromingsmodel.

Tenslotte is er op basis van de EEM-modellen een serie berekeningen gedaan, waarin de heetste punten in de wikkeling zijn geregistreerd gedurende een belasting met een harmonisch vervuilde stroom afkomstig van een elektrische aandrijving. Hierbij zijn de verschillende harmonische velden in parallel berekend.

Deze 'hot spots' vormen de grootste bedreiging voor de isolatie. Met het oog op de levensduur van de isolatie, zou er op basis van deze waarden de derating moeten bepaald worden. Dit wordt verwezenlijkt door te vergelijken met de temperatuur bekomen uit een simulatie met een overeenkomstige sinusoidale stroom (Figuur 0.8).



Figuur 0.8 Temperatuur van het warmste punt bij in een simulatie ter bepaling van de derating

8 Toepassing: Draaiende machines

8.1 Doel

In elektromagnetische actuatoren en meer in het bijzonder elektrische machines wordt het thermisch gedrag ervaren als een parasitair verschijnsel. Nochtans is de temperatuurshuishouding van uiterst belang voor de goede werking. Een gecombineerde magnetisch/thermische aanpak, reeds van in het ontwerp stadium, heeft een aantal voordelen:

- een beter inzicht in het gedrag van de actuator, wat betreft de werkingskarakteristieken en efficiëntie;
- een nauwkeuriger inschatting van de levensduur van de actuator;
- de mogelijkheid om regeltechnisch robuustere aandrijvingen te ontwerpen.

De machines en actuatoren kunnen op vele manieren onderscheiden worden. De bespreking hier spitst zich toe op roterende machines met radiaal veld.

8.2 Simulatiemodellen voor elektrische machines

De modellen voor simulatie van het magnetisch veld met de EEM zijn hoofdzakelijk 2D radiaal. Eindwindingen worden via circuitvergelijkingen in rekening gebracht. Omwille van de symmetrie volstaat er een beperkt aantal polen.

De veroorzaakte verliezen zijn onder andere Joule verliezen in de windingen of staven, maar ook wervelstroomverliezen in andere geleidende onderdelen zoals bepaalde types permanente magneten, onder andere NdFeB. De berekening hiervan is niet-evident en verschillende benaderingen zijn mogelijk.

In de hier gebruikte methode om de waarden te schatten, wordt aangenomen dat de geïnduceerde stromen in de magneetblokjes geen globale invloed hebben op het magnetisch veld, wat bijv. het geval is bij kleine geïsoleerde stukjes. De verandering in het magnetisch veld in de magneten wordt dan benaderd door met

een reeks EEM-berekeningen, waarin de rotor opeenvolgende posities (overeenkomstig met bepaalde ogenblikken bij een veronderstelde draaisnelheid) inneemt, de veldvector op de opeenvolgende momenten te bepalen. In de integraal over het eindig element in de permanente magneet, die het Joule verlies berekent, wordt de tijdsafgeleide vervangen door een eindige differentie. In de praktijk zijn er verschillen tussen de vermazingen voor de verschillende posities. Om het veld op een bepaalde plaats te onderzoeken, dient er dan ook teruggeprojecteerd te worden naar een referentiepositie.

Bij de ijzerverliezen mag de bijdrage van de roterende flux niet vergeten worden. Hiertoe wordt de evolutie van de magnetische veldvector in de tijd gereconstrueerd op basis van een set magnetische velden voor opeenvolgende posities van de rotor. De alzo bekomen resultaten worden dan voor de desbetreffende elementen geïntegreerd voor de verschillende verliesbijdragen. Deze berekeningsprocedure kan gecombineerd worden met de vorige voor het schatten van het wervelstroomverlies in de magneten.

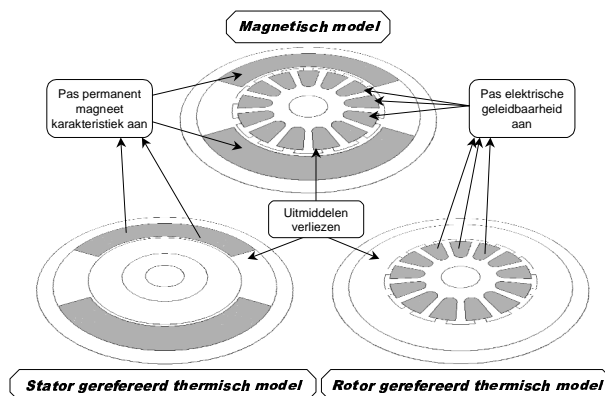
Voor de thermische modellering van elektrische machines worden sinds lang vooral thermische netwerken gebruikt. EEM modellen vinden ingang, maar bevatten een aantal moeilijk in te schatten parameters.

Om te beginnen moet er gekozen worden tussen 2D- en 3D-modellen. Een aantal thermische effecten is namelijk uitgesproken 3D, bijv. in het eindwindingsgebied. Eventueel kan een 2D model met thermische circuits op hybride wijze gecombineerd worden.

Een belangrijk probleem is de ‘globale anisotropie’ in roterende machines. Hiermee worden de, omwille van de draaiing, constant wijzigende warmtepaden in de radiale doorsnede bedoeld. Dit kan ingerekend worden voor de meest gangbare types van machines:

- *Inductiemachines*: Vooreerst dient er rekening gehouden te worden met de periodisch variërende verliezen op een vaste plaats. Deze dienen uitgemiddeld te worden, wat kan op basis van een magnetisch model in het frequentiedomein. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het feit dat de tijdsevolutie door de draaiing kan omgezet worden in een plaatsafhankelijkheid. Door rotatie en projectie van de verliesverdeling kan deze op verschillende tijdsmomenten geschat worden.
De preferentiële radiale warmtepaden in het blik lopen doorheen de (ijzeren) tanden, die afgewisseld worden door de gleuven, waarin isolerend materiaal verwerkt zit. Door de draaiing wisselen deze extreme paden mekaar constant af, wat als een globale anisotropie kan bestempeld worden. Indien de thermische EEM berekening gebeurt op basis van één model (met de uitgemiddelde warmtebronnen), wordt er een positie gefixeerd. De lokale verschillen die ontstaan door de verschillende mogelijke slot/gleuf combinaties worden weggewerkt door nog een extra radiale uitmiddeling op het thermische veld, op dezelfde manier als eerder voor het verliesveld.
- *Permanent-magneetmachines*: In permanent-magneetmachines, waarbij vooral gedacht wordt aan DC- of AC-machines met oppervlaktmagneten, is deze

anistropie in de warmtepaden veel meer uitgesproken. Een uitmiddingeling van de verliezen is nog steeds nodig, maar een tweede uitmiddingeling van de oplossing van een thermisch model is niet verantwoord. In de plaats daarvan dienen hier twee thermische modellen gebruikt te worden die reeds zelf ‘ruimtelijk uitgemiddeld’ zijn: het eerste model kijkt vanuit de stator naar de snel draaiende rotor en het andere is verbonden met de rotor, zodat de stator snel draaiend waargenomen wordt. Deze snel draaiende structuren worden gezien als equivalente cilinder-symmetrische onderdelen. Bijgevolg worden de ruimtelijke paden in het model zelf uitgemiddeld (Figuur 0.9).



Figuur 0.9 Verband tussen het magnetisch en het duale thermische model in permanent-magneetmachines

De equivalente materialen voor de windingen worden bepaald met formules voor equivalente grootheden voor composieten.

De isolatie en thermische contacten, die moeilijk te karakteriseren zijn, worden ingebracht door ontdebeldde vrijheidsgraden en extra betrekkingen of ingerekend in equivalente materialen.

Een gecompliceerder fenomeen is het gedrag van het fluïdum en het bijhorende convectief warmtetransport in de elektrische machine. Dit kan, met het oog op EEM berekeningen, op verschillende wijzen gekarakteriseerd worden:

- *Rechtstreekse metingen op prototypes:* dDe nauwkeurigheid van de meetmethodes kan hier soms een probleem vormen, alsook de kosten en tijd verbonden met de aanmaak van een prototype.
- *Parameteridentificatie na onrechtstreekse metingen:* de onbekende parameters worden gefit in een berekeningsmodel (ook toepasbaar voor bijvoorbeeld thermische contactweerstand).
- *Numerieke simulatie van de fluïdumstromingen:* dit wordt (nog) slechts weinig toegepast wegens de compacte, ingewikkelde geometrieën en soms zeer turbulente stromingen.

Een belangrijke stroming is deze in de nauwe luchtspleet. Deze is zeer complex door de combinatie van wrijving, centrifugale krachten en axiale stroming. De stromingstoestand wordt gekarakteriseerd door het Taylor-getal. Voor de convectiecoëfficiënten zijn er op experimenten gesteunde correlaties en vuistregels

voorhanden. Deze parameters kunnen dan omgerekend worden tot een equivalente thermische geleidbaarheid van een fictief materiaal dat in de luchtspleet kan verondersteld worden.

Andere interne luchtstromingen, zoals de wervelende lucht in het eindwindingsgebied worden bepaald door gebruik te maken van vereenvoudigde warmtetransportmodellen of empirische gegevens. De convectiecoëfficiënten van de ruwe poreuze eindwindingsstructuur zijn slechts met een grote onzekerheid in te schatten.

Externe koelstromen zoals lucht langsheen ribben en koelvloeistoffen worden eveneens met vereenvoudigde semi-analytische stromingsmodellen benaderd.

De keuze van de algoritmes in een gekoppelde berekening ligt niet voor de hand door de verschillende betrokken tijdsconstanten (thermisch, mechanisch, elektromagnetisch, enz.).

De fundamentele werking van inductiemachines wordt best met frequentiedomeinmethoden bestudeerd. Voor de lange-termijntransiënten zoals deze die veroorzaakt worden door opwarming wordt de transiënt tijdsharmonische omhullende berekend. Voor synchrone machines met en zonder permanente magneten en *DC*-machines zijn er (semi-)statische methoden voorhanden. De bewegingsinductie wordt extern ingerekend in de elektrische brontermen. Beperkte lokale veranderingen in het veld zijn van belang voor de verliezen, die volgens de hierboven beschreven methoden in het tijdsdomein berekend worden.

8.3 Simulatie van een dynamische PMSM-aandrijving

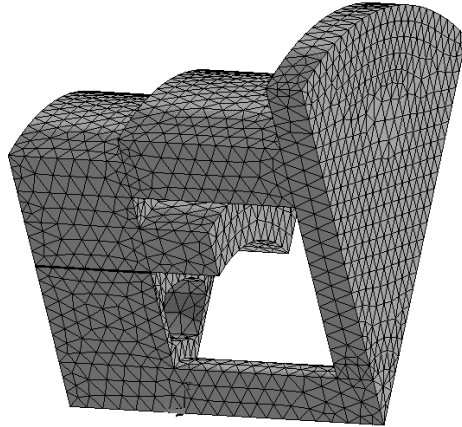
Ter validatie van de gekoppelde berekeningen wordt een 6-polige 45 kW synchrone machine met permanente magneten (PMSM), van het NdFeB-type, op de oppervlakte van de rotor gesimuleerd met gekoppelde magnetisch-thermische modellen. Deze machine wordt gekoeld met een watercircuit. De resultaten worden vergeleken met metingen in verschillende werkingstoestanden als generator met constante resistieve last en variabele koeling op een prototype met temperatuurssensoren in de windingen.

De magnetische en thermische modellen worden volgens de hierboven beschreven methoden opgebouwd.

Voor het magnetisch model dient in de gesimuleerde werkingstoestanden, de lasthoek bepaald te worden. Onrechtstreeks door de feitelijke veldverzwakking van de opwarmende magneten varieert deze ‘temperatuursafhankelijk’ bij een constante last en voeding. Deze parameter werd iteratief benaderd. De verliezen werden steeds in het tijdsdomein bepaald. Het thermische model is dubbel en bevat een model gerefereerd naar de stator en de rotor. Er wordt zowel van 2D als van 3D modellen gebruik gemaakt waarbij de voor- en nadelen van beide afgewogen werden. Voor de 3D thermische modellen (Figuur 0.10) worden er aangepaste projectiemethoden geïmplementeerd.

De interne en externe convectierandvoorwaarden worden niet-lineair, temperatuursafhankelijk, in rekening gebracht. De temperatuur van de interne lucht in het eindwindingsgebied wordt benaderd met een homogene temperatuur en berekend in een kleine thermisch circuit.

Er wordt tevens een sensitiviteitsanalyse van de modellen gemaakt.

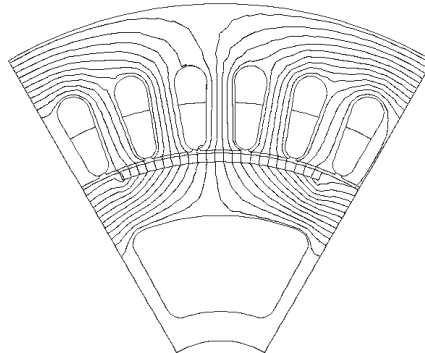


Figuur 0.10 3D Vermazing van het thermisch model

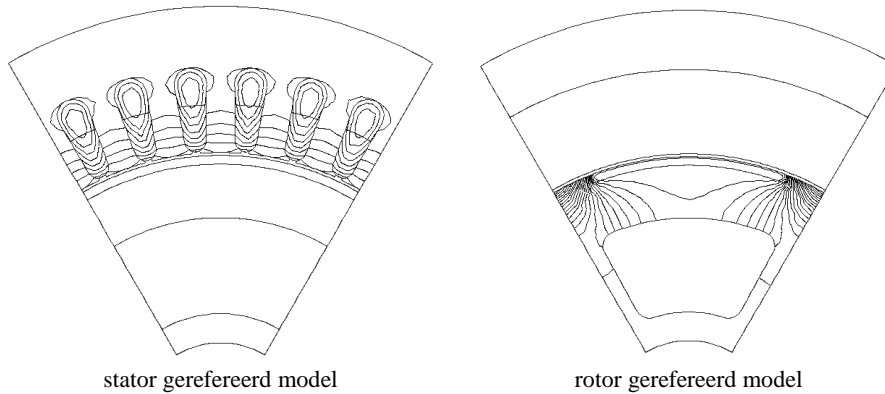
De volgende tests worden in detail gesimuleerd:

- constante partiële belasting bij 1500 t/m, watergekoeld;
- onbelaste toestand (wel ijzerverliezen e.d.) bij 3000 t/m; hierbij is de waterkoeling uitgeschakeld en is er enkel warmtetransport naar de omgevende lucht.

Het magnetisch veld onder partiële belasting wordt getoond in Figuur 0.11. De oplossingen van beide thermische modellen in deze condities zijn te zien in Figuur 0.12. De 2D modellen blijken hier te voldoen daar de warmtestroom zeer sterk radiaal gericht is omwille van de zeer krachtige waterkoeling.

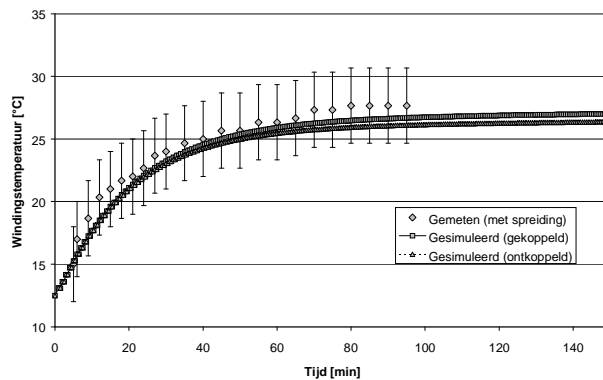


Figuur 0.11 Magnetische veld onder partiële belasting



Figuur 0.12 Oplossing van beide thermische modellen (enkel de omtrek van het snel draaiende deel is getoond omdat dit deel van de oplossing geen fysische betekenis heeft)

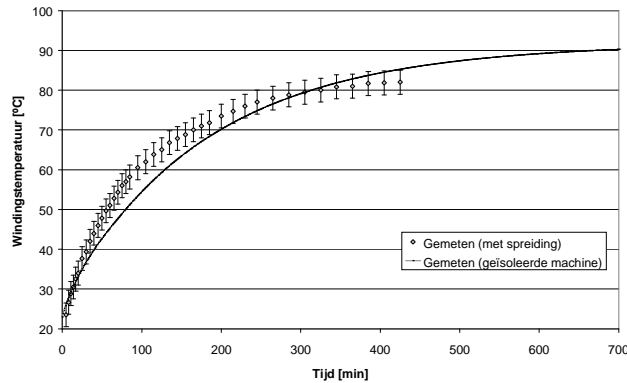
Uit de vergelijking van de meetwaarden met de simulaties blijkt er een goede overeenkomst te zijn, waarbij de gekoppelde oplossing de realiteit dichter benadert (Figuur 0.13).



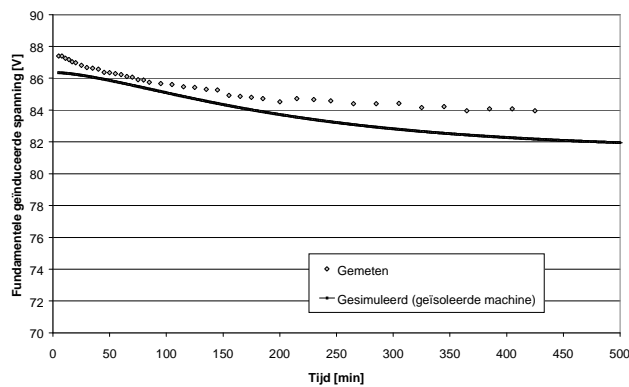
Figuur 0.13 Gemeten en gesimuleerde temperaturen bij partiële belasting

In de berekening van de onbelaste toestand is de correcte modellering van de warmtestromen veel kritischer omwille van de veel zwakkere natuurlijke convectie. De warmte spreidt zich uit over de gehele structuur, waardoor een thermisch 3D model vereist is.

Er is een vergelijking gemaakt met de temperatuursmetingen in de statorgleuven (Figuur 0.14). De berekende en gemeten geïnduceerde spanning geeft een idee over de temperaturesevolutie van de rotor (Figuur 0.15). Ook hier is er een goede overeenkomst.



Figuur 0.14 Gemeten en gesimuleerde temperaturen in onbelaste toestand



Figuur 0.15 Gemeten en gesimuleerde geïnduceerde spanning in onbelaste toestand

Tussen metingen en simulaties bestaan er kleine afwijking die ondermeer verklaard worden door het verwaarlozen van de ‘parasitaire’ warmtepaden naar de omgeving via as en bevestigingen. De onzekerheden omtrent de fluïdumstromingen dragen ook bij tot de verschillen.

Uit een sensitiviteitsanalyse blijkt dat de verwaarlozing van bepaalde gekoppelde effecten, zoals de temperatuursafhankelijkheid van de ijzerverliezen relatief grote afwijkingen veroorzaken.

8.4 Macro-modellering

In volledige elektrische aandrijvingen veroorzaken de thermische gekoppelde effecten afwijkingen in het regelgedrag. Door de simulaties van het gekoppeld magnetisch-thermische gedrag, kan er een beter inschatting van de variaties op de regelparameters kunnen gemaakt worden. Eventueel kan er aan de hand van deze simulaties een beperkter thermische model geschat worden dat in de regelketen kan ingebouwd worden.

9 Besluiten en verder onderzoek

Voor de berekening van niet-lineaire problemen met gekoppelde velden is de EEM zeer geschikt. De niet-lineaire afhankelijkheden in de brontermen en coëfficiënten, eventueel in een hogere-ordevoorstelling, worden vlot verwerkt. De modulaire opbouw van de methode laat de berekening van allerhande fysische fenomenen toe, waaronder elektromagnetische en thermische.

Door verschillende aanpakken van de tijdschalen, die in de geassocieerde velden sterk kunnen verschillen, ontstaan er uiteenlopende methodologieën in het tijds- of frequentiedomein of een combinatie van beide.

Specifieke EEM implementaties worden besproken. Voor de magnetische velden wordt ondermeer een transiënte tijdsharmonische methode besproken. Deze heeft het voordeel dat de snelle en trage dynamica gescheiden wordt, waarmee stijve gekoppelde differentiaalvergelijking vermeden worden. Multi-harmonische aanpakken kunnen periodische niet-lineaire veldoplossing berekenen.

Voor de thermische modellen wordt ondermeer een voorstelling van thermische contacten en dunne isolatielagen gepresenteerd.

Niet-lineaire oplossingstechnieken worden uitgebreid besproken. Zowel substitutieals (quasi-)Newton methoden worden voorgesteld. Stabilisatietechnieken voor globale convergentie, zoals pseudo-transiënte methoden, en de opbouw van de Jacobiaan bij onafhankelijke deelprobleemvermazingen, worden besproken. Een referentieprobleem vergelijkt de performanties en wordt gebruikt om de keuze van de algoritmes te sturen.

De toepassing van gekoppelde veldmethoden wordt uitgebreid geïllustreerd en gevalideerd in twee voorbeelden.

Vooreerst wordt de invloed van harmonische netvervuiling op distributietransformatoren besproken, met speciale aandacht voor foliewikkelingen. De afleiding van aangepaste deratingfactoren wordt voorgesteld. De simulaties omvatten zowel stationaire als transiënte, gekoppelde simulaties, die vergeleken worden met metingen.

In een tweede toepassing worden de gekoppelde velden in een permanent magneet synchrone machine voor een voertuigaandrijving bestudeerd. Specifieke methoden voor de verliesberekening worden besproken. Technieken om de berekeningen op verschillende tijdschalen te combineren, onder andere duale thermische modellen, worden voorgesteld. De machine wordt in verschillende werkingstoestanden gesimuleerd en de resultaten worden vergeleken met metingen.

Verder onderzoek is mogelijk op het vlak van:

- De methoden voor gekoppelde problemen in het algemeen kunnen toegepast worden in andere dan het elektromagnetisch-thermische gekoppelde veldprobleem.
- Verdere toepassing van de voorgestelde technieken in elektrothermische toepassingen kan tot efficiëntere en nauwkeurigere simulaties leiden.

- De beperkte modellering van het warmtetransport via de fluidumstromingen in de toepassingen vraagt om specifieke studies met speciale simulaties.
- De berekeningsmodellen voor de transformatoren kunnen aangewend worden om aangepaste ontwerpen voor omgevingen met verminderde Power Quality te maken.
- De studie van de terugwerking van thermische effecten op de regeling van aandrijvingen kan gebruik maken van de gekoppelde simulaties.