

# **Ontwerp en berekening van inductiemotoren met numerische technieken, met inbegrip van de spoelkop- en ringproblematiek**

R. De Weerd, R. Mertens, K. Hameyer en R. Belmans

Katholieke Universiteit Leuven, Dep. EE (ESAT), Div. ELEN,  
Kardinaal Mercierlaan 94, 3001 Heverlee, België

## **1 Inleiding**

Het ontwerp van inductiemotoren is vooral gebaseerd op werken die reeds verschillende decennia oud zijn. Het voorgestelde ontwerpproces is zeer rechtlijnig en bestaat uit een verzameling formules die deels analytisch en deels experimenteel bepaald zijn. Er is weinig ruimte voor keuzes van de ontwerper. Waarden van variabelen aangepast aan de huidige stand van zaken, nieuwe gleufvormen, enz. dienen opgevangen te worden door correctiefactoren en/of aangepaste formules. De eindige elementen methode daarentegen is een objectievere methode daar er veel minder veronderstellingen gemaakt worden en kan in een eerste stap gebruikt worden als controle voor de klassieke ontwerpmethod. Vandaar ook het belang van de berekening van inductiemotoren met eindige elementen. In een volgende stap kan de eindige elementen methode op zich als ontwerpmethod gebruikt worden, of als deel van een gecombineerde analytische - eindige elementen methode.

## **2 Eindige elementen berekening van inductiemotoren**

De meest voorkomende berekeningsmethode van inductiemotoren is tot op heden de tweedimensionale eindige elementen methode. De reden dat nog geen volledige driedimensionale berekeningen uitgevoerd worden, is terug te vinden in de kleine luchtspleet van de inductiemotor. Omwille van numerieke redenen moeten de elementen een goede vormfactor hebben. Bovendien is op plaatsen waar een grote variatie van het magnetisch veld verwacht wordt, een fijne vermazing vereist. Dit komt neer op een zeer fijne vermazing van het gebied rond de luchtspleet en zo is het wenselijk om de luchtspleet zelf op te bouwen uit minimum drie lagen elementen (figuur 1). Een driedimensionale vermazing die de ganse motor omvat, bevat een zo groot aantal knooppunten dat problemen met geheugenruimte verwacht kunnen worden en de rekentijden ontoelaatbaar hoog worden.

Uit de bestaande literatuur blijkt dat met een tweedimensionale berekening reeds een zeer goede overeenkomst met meetresultaten bereikt wordt, indien een aantal aspecten eigen aan de inductiemotor ingerekend worden. Het werkingsprincipe van de inductiemotor steunt op geïnduceerde stromen in de rotor. Bovendien hebben verzadiging, waaraan de meeste inductiemotoren onderhevig zijn, en eindeffecten zoals spoelkop- en ringimpedantie, een invloed op deze geïnduceerde stromen. Vandaar dat de tweedimensionale berekeningsmethode geïnduceerde stromen, verzadiging en eindeffecten moet inrekenen.

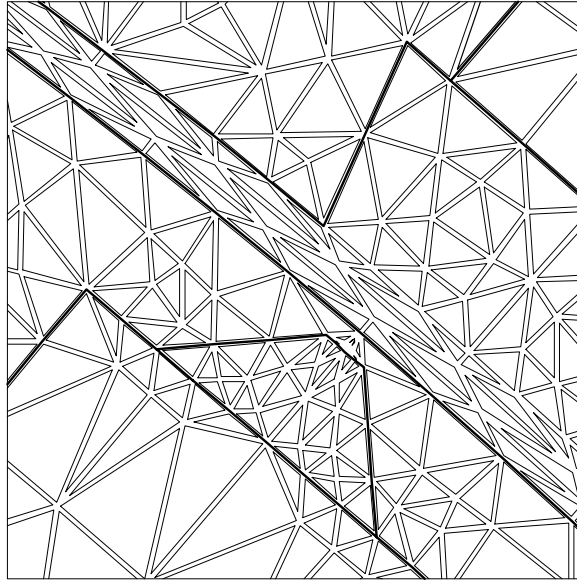


Fig. 1: *Vermazing van het luchtspleetgebied*

### 3 Geïnduceerde stromen en verzadiging

Theoretisch is een transiënte oplossing vereist om geïnduceerde stromen te berekenen en verzadiging in rekening te brengen. Een transiënte oplossing wordt echter buiten beschouwing gelaten omwille van de te lange rekentijd. Uit praktisch standpunt wordt daarom de voorkeur gegeven aan benaderende methodes gebaseerd op effectieve reluctiviteiten. Een lineaire tijdsharmonische oplossing wordt berekend rond een werkingpunt dat onderhevig is aan verzadiging. Daar verzadiging een lokaal verschijnsel is, verschilt de waarde van de reluctiviteit van element tot element.

Een mogelijkheid om verzadiging in te rekenen, is een niet-lineaire tijdsharmonische oplossing. De reluctiviteit wordt in elke berekeningsstap aangepast op basis van een effectieve magnetisatiekarakteristiek. Een van de moeilijkheden is dat er verschillende manieren bestaan om deze effectieve magnetisatiekarakteristiek te berekenen uit een ogenblikkelijke magnetisatiekarakteristiek. Een eerste mogelijkheid is gebaseerd op de gemiddelde opgeslagen magnetische energie bij een bepaalde waarde  $H_m$  van de amplitude van het magnetische veld  $H = H_m \cos(\omega t)$ .

$$\frac{1}{2} \int_0^{B_{eq}} H_m dB_{eq} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \int_0^B H(b) db \right) dt \quad (1)$$

Een tweede mogelijkheid berekent de effectieve reluctiviteit als de gemiddelde waarde van de ogenblikkelijke waarden van de reluctiviteit over een periode bij een bepaalde waarde van de amplitude van het magnetische veld. Andere mogelijkheden kunnen een sinusoidaal verloop van de magnetische inductie veronderstellen.

$$v = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2)$$

Als alternatief kan men een lineaire tijdsharmonische oplossing combineren met een magnetostatische oplossing om verzadiging in te rekenen. De tijdsharmonische oplossing bevat de geïnduceerde stromen, die in een volgende stap gebruikt worden als excitatie van twee magnetostatische problemen. Het gemiddelde van de reluctiviteit van de oplossing op het reëel en het imaginair tijdstip wordt gebruikt als een nieuw werkingspunt waarrond een lineaire tijdsharmonische oplossing berekend wordt. Dit geeft aanleiding tot het algoritme van figuur 2.

Eigen aan een tijdsharmonische oplossing is een vaste frequentie waarop alle grootheden pulseren. Nochtans kan men bij een inductiemotor twee verschillende frequenties onderscheiden, de netfrequentie in de stator en de slipfrequentie in de rotor. Gebruik van de netfrequentie levert de eenvoudigste methode op, daar in dit geval enkel de geleidbaarheid van de rotor met een factor gelijk aan de slip verlaagd moet worden. De vergelijkingen van een tijdsharmonisch probleem voor stator en rotor zijn:

$$\begin{aligned} \text{Stator: } \nabla \cdot (v \nabla A_z) - j 2 \pi f_{net} \sigma A_z &= J_{s,z} \\ \text{Rotor: } \nabla \cdot (v \nabla A_z) - j 2 \pi f_{net} (s \sigma) A_z &= J_{s,z} \end{aligned} \quad (3)$$

## 4 Eindeffecten

Het derde aspect dat bij de berekening van inductiemotoren dient bekeken te worden, is de invloed van eindeffecten zoals spoelkop- en ringimpedantie. Dit aspect is even belangrijk als de berekening van geïnduceerde stromen en de inrekening van verzadiging. De oplossing is volkomen foutief indien de eindeffecten niet ingerekend worden. Bij een stroomgestuurd probleem lijkt de oplossing enkel juist, maar ze is het niet, zelfs al worden temperatuureffecten ingerekend.

De eindeffecten worden ingerekend als gelocaliseerde parameters extern aan de eindige elementen oplossing. Samen met het eindige elementen probleem worden de netwerkvergelijkingen opgelost van dit extern circuit. Deze parameters dienen voorafgaandelijk een waarde te krijgen. Voor de meeste eindeffectparameters bestaan analytische of empirische formules. Beter is het om deze parameters met eindige elementen te berekenen. De waarde van de verschillende eindeffectparameters (weerstand en reaktantie) is functie van de belastingstoestand. Bovendien is de invloed van de verschillende parameters verschillend voor elke belastingstoestand. Dit heeft vooral te maken met de frequentieafhankelijkheid.

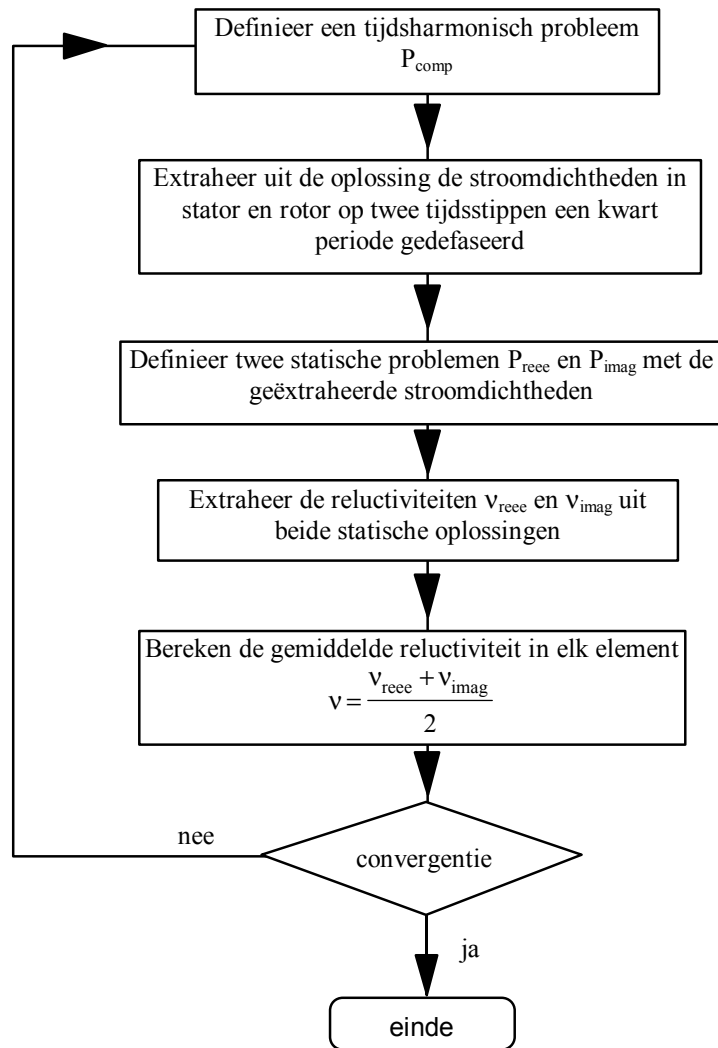


Fig. 2: *Gecombineerde magnetostatische - tijdsharmonische oplossing*

#### 4.1 Analytische berekening

De berekening van de weerstanden als eindeffectparameters stelt weinig problemen. De spoelkopweerstand kan op eenvoudige wijze analytisch bepaald worden uitgaande van de lengte van de spoelkoppen. In de literatuur bestaat een analytische uitdrukking voor de ringimpedantie waaruit de ringweerstand en de ringinductantie bepaald kunnen worden. Indien de lengte van de staven langer is dan het blikpakket kan dit ingerekend worden als een supplementaire weerstand.

#### 4.2 Eindige elementen berekening

Om een tweedimensionale eindige elementen berekening uit te voeren wordt een axiale doorsnede van de spoelkopruimte gemaakt overeenkomstig figuur 3. Een driedimensionaal model wordt overeenkomstig figuur 4 opgebouwd, waarbij duidelijk een koppeling tussen de eindring en de spoelkoppen bestaat.

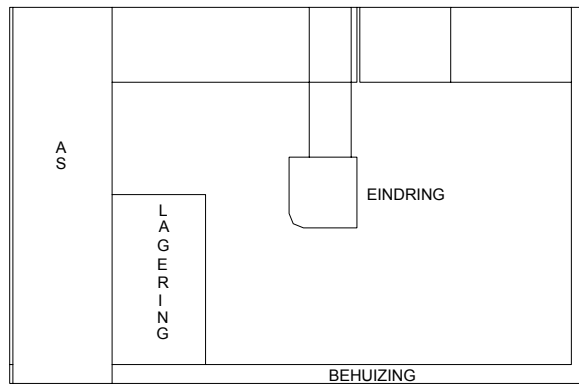


Fig. 3: Dwarsdoorsnede van de spoelkopruimte van een kooianker inductiemotor

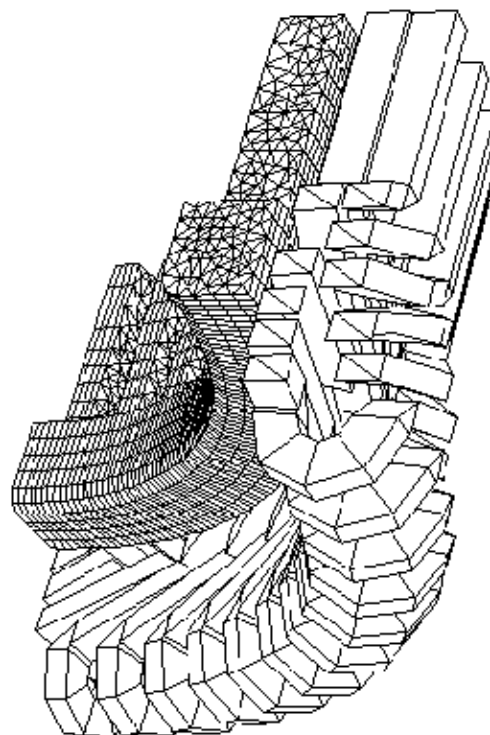


Fig. 4: Driedimensionaal model met eindring en spoelkoppen

Figuur 5 toont de berekening van de effectieve ringweerstand en de effectieve weerstand van de staafuiteinden. Hiertegenover houdt de analytische berekening slechts in beperkte mate of helemaal geen rekening met stroomverdringing. Het driedimensionaal model bevat enkel de eindring, daar de invloed op het statorveld gering is. Algemeen wordt in de probleemdefinitie een eenheidsstroom opgelegd met een variabele frequentie. Op basis van de opgeslagen energieën kunnen de verschillende inductanties berekend worden.

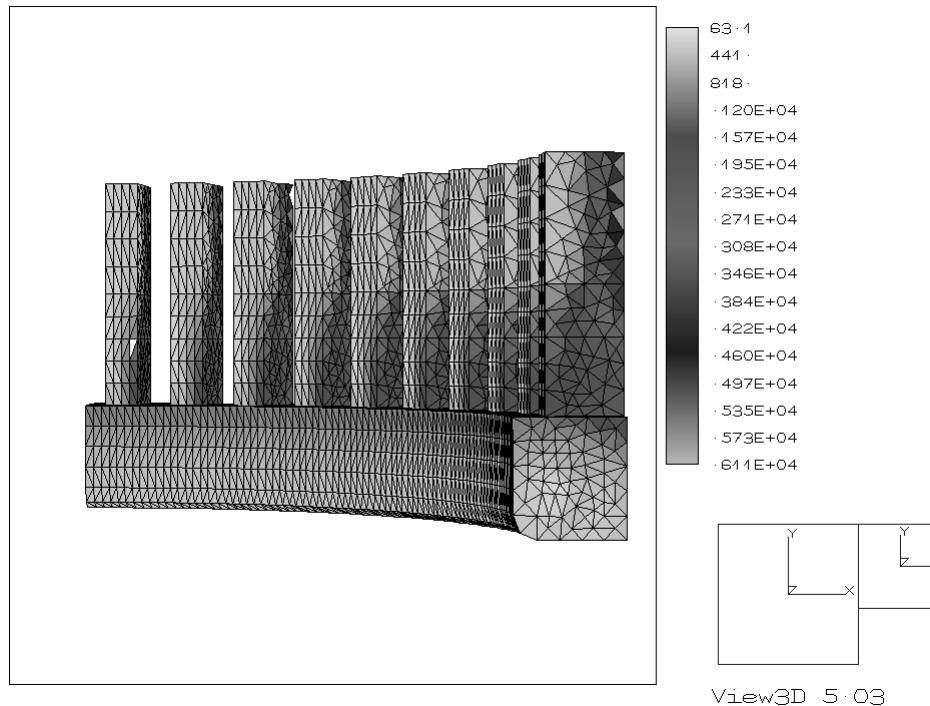


Fig. 5: *Stroomverdeling in de ring en staafluiteinden bij 50 Hz*

### 4.3 Invloed van de eindeffectparameters

Bij een ideale nullastberekening, dit wil zeggen dat er geen stroom vloeit in de rotor, wordt enkel de spoelkopimpedantie ingerekend. In deze werkingstoestand in de spoelkopinductantie werkzaam als strooiing. De invloed is in de meeste gevallen zeer klein omdat de waarde slechts enkele procenten bedraagt van de magnetisatieinductantie.

Bij belasting is de spoelkopinductantie slechts gedeeltelijk als strooiing werkzaam omdat het gedeelte van de spoelkopflux dat gekoppeld is met de ring theoretisch ingerekend moet worden bij de magnetisatieinductantie. Praktisch gezien kan wat betreft de magnetisatieinductantie deze koppeling verwaarloosd worden. Bij de bepaling van de spoelkopinductantie zelf en de eindringimpedantie mag de koppeling niet verwaarloosd worden. Als eindeffect wordt daarom alleen het strooiingsgedeelte van spoelkop- en eindringinductantie ingerekend.

De invloed van de verschillende eindeffectparameters en de temperatuursafhankelijkheid kan aan de hand van een berekening aangetoond worden. Hiervoor wordt de berekende met de gemeten waarde van de statorstroom vergeleken bij vollast (tabel 1). De eerste berekening (tabel 2) houdt geen rekening met eindeffecten en temperatuursafhankelijkheid. De tweede berekening houdt rekening met de werkelijke temperatuur. Vanaf de derde berekening wordt achtereenvolgens de spoelkopweerstand, de spoelkopinductantie, de ringweerstand en de ringinductantie ingerekend. Het gebruik van de werkelijke temperatuur en de ringweerstand hebben de grootste invloed. Bij vollast is de invloed van spoelkopimpedantie en de ringinductantie eerder gering.

Tabel 1: *Meetgegevens inductiemotor*

Aangelegde spanning	1842 V
Frequentie	50 Hz
Stroom	154,38 A
Opgenomen vermogen	445,6 kW
Slip	0,87 %
Toerental	1488 min <sup>-1</sup>
Asvermogen	425,7 kW
Koppel	2733 Nm
Temperatuur	95 °C

Tabel 2: *Berekeningsresultaten vollast*

Berekening	Ingerekende effecten	Statorstroom [A]	Staafstroom [A]
1	Geen	301.5	2600
2	Werkelijke temperatuur	231.3	1980
3	Werkelijke temperatuur en spoelkopweerstand	228.9	1950
4	Werkelijke temperatuur, spoelkopweerstand en spoelkopinductantie	225.8	1930
5	Werkelijke temperatuur, spoelkopweerstand, spoelkopinductantie en ringweerstand	158.7	1315
6	Werkelijke temperatuur, spoelkopweerstand, spoelkopinductantie, ringweerstand en ringinductantie	156.7	1300
7	Geen	154.38	1285
8	Werkelijke temperatuur	154.38	1289
9	Werkelijke temperatuur en spoelkopweerstand	154.38	1330
10	Werkelijke temperatuur, spoelkopweerstand en spoelkopinductantie	154.38	1330
11	Werkelijke temperatuur, spoelkopweerstand, spoelkopinductantie en ringweerstand	154.38	1330
12	Werkelijke temperatuur, spoelkopweerstand, spoelkopinductantie, ringweerstand en ringinductantie	154.38	1346

Bij de overeenkomstige stroomgestuurde berekeningen (berekeningen 7 t.e.m. 12) valt het op dat de waarde van de geïnduceerde stromen in de rotor slechts enkele procenten variëren. Dit stemt overeen met het gedrag van de inductiemotor gezien als een roterende transformator. Het gedrag van de inductiemotor verschilt volledig naargelang de motor spannings- of stroomgestuurd is.

#### **4.4 Belastingsafhankelijkheid**

Omdat de meeste eindeffectparameters afhankelijk zijn van de werkingstoestand, is theoretisch gesproken een iteratieproces vereist om de desbetreffende waarden te bepalen. Praktisch worden daarom eerst de stromen in de inductiemotor berekend op basis van geschatte waarden van de eindeffectparameters. Op basis van de berekende waarden van de stromen worden nieuwe waarden voor de eindeffectparameters berekend. Deze nieuwe waarden worden gebruikt om betere waarden voor de verschillende stromen te berekenen. Praktisch gezien blijkt het niet nodig te zijn om nog meer iteratiestappen uit te voeren.

### **5 Besluiten**

Drie even belangrijke aspecten van de inductiemotor spelen een rol bij de eindige elementen berekening van inductiemotoren: geïnduceerde stromen, verzadiging en eindeffecten. Wil de eindige elementen methode gebruikt worden in de ontwerpfase, is het noodzakelijk te weten hoe men deze aspecten moet inrekenen. Geïnduceerde stromen en verzadiging worden ingerekend door het gebruik van een niet lineaire tijdsharmonische of een gecombineerde magnetostatische - tijdsharmonische oplossing. Eindeffecten worden ingerekend door het eindige elementen model te koppelen met een extern circuit. Dit extern circuit is opgebouwd uit o.a. de spoelkop- en de eindringimpedantie. Voor het bepalen van de waarden voor de verschillende parameters, kan men gebruik maken van analytische uitdrukkingen of gedeeltelijke eindige elementen berekeningen.

Een gedeeltelijke eindige elementen oplossing kan bovendien gebruikt worden om de klassieke ontwerpmethode van inductiemotoren te verbeteren. Het gebruik van experimentele formules wordt vermeden en er is qua gleufvormen (berekening Carter-factor) geen beperking. Gesloten gleuven welke analytisch niet oplosbaar zijn, kunnen met eindige elementen wel berekend worden. De gecombineerde analytische - eindige elementen ontwerpmethode is hierdoor een objectievere methode.

### **Dankbetuiging**

De auteurs willen het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek danken voor hun financiële steun en de diensten van de Eerste Minister - Programmatie van het Wetenschapsbeleid voor het toekennen van IUAP Nr. 51 - Elektromagnetische Systemen.



## Referenties

- [1] R. De Weerdts "Eindige elementen modellering van kooianker inductiemotoren", Doctoraat KULeuven 1995.
- [2] Nürnberg, "Die Asynchronmaschine", Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1952
- [3] S. Williamson: "Induction motor modelling using finite elements", Proc. ICEM '94, Paris, 5-8 Sept. 1994, Vol. 1, pp. 1-8
- [4] E. Vassent, G. Meunier, J.C. Sabonnadiere: "Simulation of induction machine operation using complex magnetodynamic finite elements", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, No. 4, 1989, pp. 3064-3066
- [5] S. Williamson, M.A. Mueller: "Calculation of the impedance of rotor cage end rings", IEE Proc. Vol. 140, Pt. B, No. 1, 1993, pp. 51-60
- [6] J. Luomi, A. Niemenmaa, A. Arkkio: "On the use of effective reluctivities in magnetic field analysis of induction motors fed from a sinusoidal voltage source", Proc. ICEM München, pp. 706-709, 1986
- [7] R. Belmans, R.D. Findlay, W. Geysen: "A circuit approach to finite element analysis of a double squirrel cage induction motor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 4, 1990, pp. 719-724
- [8] A.Lowther, P.P.Silvester: "Computer-Aided Design in Magnetics", Springer-Verlag, New York, 1985
- [9] R. De Weerdts, R. Belmans: "Squirrel cage induction motor end effects using 2D and 3D finite elements", Proc. 7th international conference on Electrical Machines and Drives '95, Durham, 11-13 sept. 1995, pp.62-66.
- [10] E.M. Freeman, "MagNet User Guide", Infolytica Montreal, 1994