

# InfoTech No. 11

Reliable Solutions Today! EASA

**Laten hoogrendementsmotoren zich goed opnieuw wikkelen?**

Door Professor D.G. Walters, OBE, CEng, MIEE, MIMarE

# InfoTech No. 11

## Samenvatting

Deze vraag is aan weerszijden van de Atlantische Oceaan onderwerp van discussie. Dit artikel levert een bijdrage aan die discussie door in te gaan op werk dat in het Verenigd Koninkrijk is verricht door de *Association of Electrical and Mechanical Trades* (AEMT), door Brook Hansen, de grootste motorfabrikant in Het Verenigd Koninkrijk, en door Dowding & Mills PLC, de grootste reparateur in het Verenigd Koninkrijk. Het werk werd mede mogelijk gemaakt door de Britse regering in het kader van haar *Energy Efficient Best Practice Program*. De conclusie luidt dat de meeste hoogrendementsmotoren zich in principe goed laten repareren indien dit zorgvuldig wordt gedaan, maar dat meer inspanningen van zowel reparateurs als fabrikanten nodig zijn om de kans op verlies van rendement als gevolg van opnieuw wikkelen te verkleinen, vooral bij grote motoren.

### 1. Motorverliezen

deze omvatten:

- Koperverlies (stator en rotor)
- IJzerverlies
- Strooiverlies
- Wrijvings- en wikkelverlies

De verdeling van verliezen in een typische 20 pk motor wordt getoond in figuur 1. Boven halve belasting domineren de koperverliezen en is het van groot belang dat de weerstand per fase van de vervangende wikkeling gelijk is aan of minder dan die van de oorspronkelijke (zie paragraaf 3).

Van de ijzerverliezen wordt over het algemeen aangenomen dat ze onafhankelijk zijn van belasting - maar is dat wel zo en hoe worden ze beïnvloed door de uitbrandingstemperatuur? (Zie paragraaf 4.)

De wrijvings-, wikkelings- en strooiverliezen zijn betrekkelijk klein, maar kunnen aanzienlijk toenemen door onachtzaam uitgevoerde reparaties of het plaatsen van de verkeerde maat ventilator. Dit artikel is evenwel gericht op de belangrijkste probleemgebieden - koper- en ijzerverlies.

Voordat we toekomen aan wat wel en niet mag, kijken we nog even naar de theorie om deze zaken in het juiste perspectief te zien.

### 2. Koppel, flux en wikkelingen

Bij een inductiemotor is de koppel evenredig aan flux vermenigvuldigd met stroom. Beide zijn gevoelig voor veranderingen in de wikkeling en dus ook voor een vervangende wikkeling.

De spanning die op elke fase van de motor wordt toegepast, wordt tegengewerkt door (en is bijna gelijk aan) de tegen-e.m.k., wat wordt weergegeven in de volgende formule:

$$E = 4,44 \times f \times N \times \emptyset \times K_d \times K_p$$

waarbij:

E = tegen-e.m.k. per fase

f = frequentie

N = aantal seriewikkelingen per fase

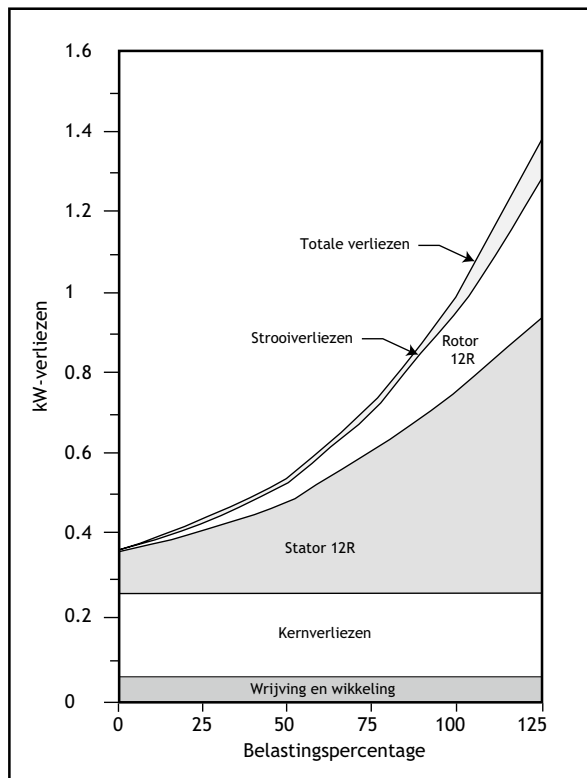
$\emptyset$  = magnetische flux per fase

$K_d$  = verdelingsfactor van de wikkeling

$K_p$  = wikkelspoedfactor

Voor het doeleinde van opnieuw wikkelen (en niet ter verkrijging van een andere spanning of frequentie) zijn E en f constanten. Dat geldt ook voor  $K_d$ , aangezien deze afhankelijk is van de sleuven per pool per fase en niet verandert, tenzij het aantal voedings-

## InfoTech No. 11



Figuur 1. Verdeling van verliezen voor een 20 pk motor

fasen wordt gewijzigd. Derhalve kunnen drie variabelen door de wikkelaar worden beïnvloed:

$N$  = aantal seriewikkelingen per fase

$\emptyset$  = magnetische flux per fase

$K_p$  = wikkelspoedfactor

Ten behoeve van de in de linkerkolom weergegeven vergelijking dient het product van deze drie variabelen constant te blijven. Daaruit volgen de volgende belangrijke regels:

- Door hetzij de wikkelingen hetzij de spoelfactor te vergroten, wordt de flux verlaagd.
- Door hetzij de wikkelingen hetzij de spoelfactor te verlagen, wordt de flux verhoogd.
- De flux per pool blijft gelijk indien de spoelfactor en wikkelingen per fase omgekeerd evenredig aan elkaar worden gewijzigd.

Om de prestatie van de motor - qua zowel koppel als rendement - te handhaven, dient de flux per pool gelijk te blijven.

Wiskundig weergegeven:

$$K_p = \cos \frac{(\text{poolsteek} - \text{wikkelspoed})}{(\text{poolsteek})} \quad (2)$$

Zo heeft een vierpolige motor met 48 sleuven een poolsteek van 12 sleuven. Een luswikkeling met onverkorte spoed zou derhalve 12 sleuven (1-13) omspannen. Stel dat de wikkelspoed wordt verlaagd tot 10 sleuven (1-11), dan:

$$K_p = \cos \frac{(12 - 10)}{(12)} \times 90 = 0,966$$

Dit geldt voor zowel enkellaagse als dubbellaagse (d.w.z. twee wikkelingen per sleuf) luswikkelingen. De mate waarin de wikkelspoed kan worden verkort, hangt tot op zekere hoogte af van het aantal sleuven per pool en moet in ieder geval niet worden overdreven. Als vuistregel geldt een bereik van zo dicht mogelijk bij één zevende tot maximaal één vijfde van een poolsteek.

### 3. Voor- en nadelen voor de reparateur van dubbellaagse luswikkelingen met verkorte wikkelspoed

Veel fabrikanten gebruiken tegenwoordig machinaal ingebrachte twee- of drielaagse concentrische wikkelingen. Indien de doorsnede van de geleider niet wordt verkleind, kunnen alle tweelaagse concentrische wikkelingen (de meerderheid) worden vervangen door dubbellaagse luswikkelingen met verkorte spoed, wat de volgende voordelen biedt:

- Alle spoelen zijn hetzelfde.
- De lengte van de gemiddelde wikkeling (LMT) is doorgaans verkleind. Indien zorgvuldigheid wordt

# InfoTech No. 11

betracht bij de eindverbindingsprofielen, wordt hierdoor de gebruikte hoeveelheid koper teruggebracht met meer dan de voor de verhoogde wikkelingen vereiste hoeveelheid. Minder koper = minder kosten = minder weerstand = verhoogde efficiëntie.

Echter, tegenover de voordelen staan de volgende nadelen:

- Bij een luswikkeling is het moeilijk om de prestatie van een goed gefabriceerde drielaagse concentrische wikkeling te evenaren of te overtreffen. De oorspronkelijke wikkeling kan het beste zo getrouw mogelijk worden gekopieerd.
- De tussenwindingsisolatie neemt in de sleuven extra ruimte in beslag, waardoor de spoelen moeilijk kunnen worden geplaatst.

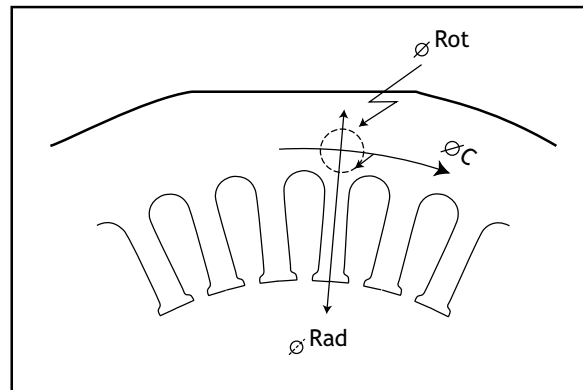
Over het geheel bezien zal bij een zorgvuldige uitvoering van het opnieuw wikkelen geen verhoging van de koperverliezen optreden en kan er zelfs sprake zijn van een verlaging daarvan. Hierdoor krijgt de reparateur de mogelijkheid om het rendement van de motor te verhogen.

Maar dan is er altijd nog het probleem van de ijzerverliezen...

## 4. IJzerverliezen

Bij motorijzerverliezen gaat het om hysteresisverliezen, wervelstroomverliezen, rotatieverliezen en overschotverliezen. Van ijzerverlies wordt - mogelijk onterecht - aangenomen dat dit niet afhankelijk is van de motorbelasting. Het kan toenemen door factoren als:

- verhoogde mechanische spanning in de kernplaten;
- beschadiging van de stator- of rotorkern - met name op de luchtspleetoppervlakken;
- elektromagnetische (flux) veranderingen;
- thermische beschadiging van de isolatie tussen de kernplaten.



Figuur 2. De bron van rotatieverlies

### (a) Verhoogde mechanische spanning

Een verhoogde spanning in de kernplaten die wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld het plaatsen van een nieuwe motorbehuizing met een strakkere perspassing dan de oorspronkelijke kan leiden tot een verhoogd rotatieverlies. Het principe van rotatieverlies laat zich het beste verklaren door figuur 2, waarin de statorflux in twee elementen wordt verdeeld: één oscillerende  $\varnothing_{RAD}$  in de statortanden en één rondom  $\varnothing_C$  in het achterste ijzer. Bovenaan elke tand zorgt de interactie tussen de twee voor kleine 'fluxwervelingen'  $\varnothing_{ROT}$ , als gevolg waarvan rotatieverlies optreedt. Dit verlies neemt niet-lineair toe, omdat de mechanische spanning in de kernplaat toeneemt.

Reparateurs die een behuizing vervangen of opnieuw inrichten dienen de perspassing tussen de kern en de behuizing tot een minimum te beperken om te zorgen dat het binnenste goed op zijn plaats blijft zitten. Indien mogelijk dienen zij de fabrikant te raadplegen voor de juiste perspassing.

### (b) Beschadiging van stator- of rotorkernen

Bij defecte motoren kan het helaas voorkomen dat de luchtspleetoppervlakken van de kern beschadigd zijn, mogelijk door een defecte lager. Als er sprake is van plaatselijke schade, is opnieuw wikkelen waarschijnlijk een adequate oplossing. Maar als de schade verder strekt, dan heeft het waarschijnlijk geen zin om te proberen de motor te repareren, tenzij de kernen

## InfoTech No. 11

eerst worden gestript en opnieuw geïsoleerd.

Het afbramen van de kernplaten door ze op de beschadigde plekken langs elkaar te schuren zorgt voor lage weerstandspaden voor wervelstromen, niet alleen op grond- of slipfrequenties, maar, en dat is ernstiger, op de veel hogere frequenties veroorzaakt door de motorgroefharmonischen.

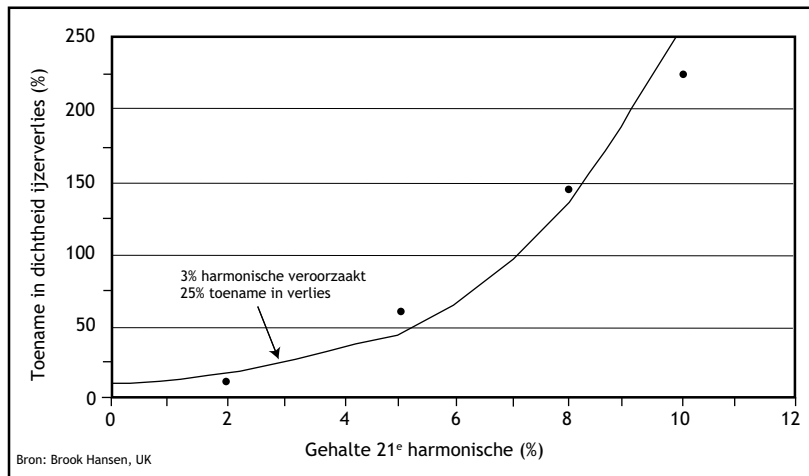
In figuur 3 is te zien hoe het ijzerverlies in die delen van de kernen dichtbij luchtspleetoppervlakken kan worden verhoogd door slechts één gezamenlijke groefharmonische (de 21<sup>e</sup>). Hoewel het volume van de betreffende kern betrekkelijk klein is, is de toename in het verlies aanzienlijk en tevens afhankelijk van de belasting. Door harmonische ijzerverliezen onder belasting kan het totale ijzerverlies met meer dan 50 procent toenemen.

De boodschap voor reparateurs is dan ook duidelijk:

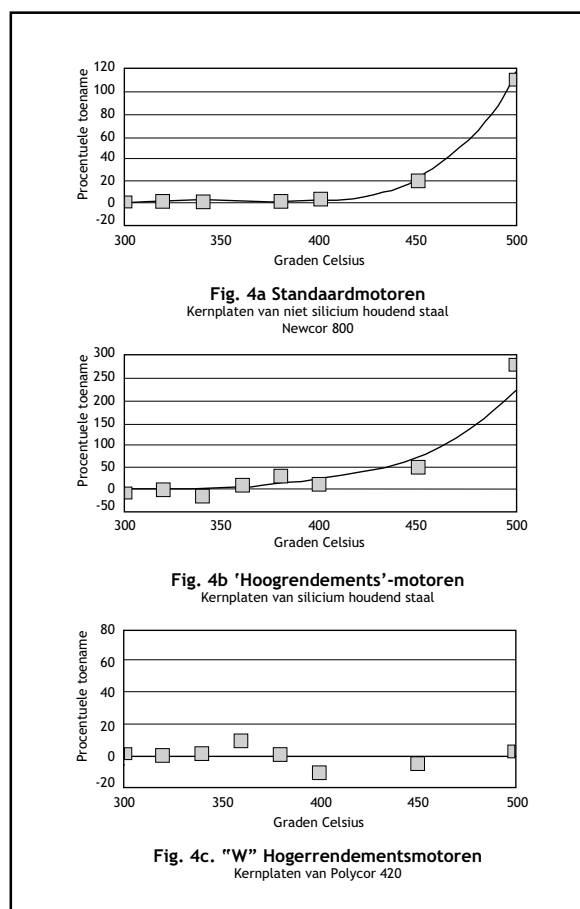
- Als de luchtspleetoppervlakken van de kernen ernstig beschadigd zijn, ga dan niet over tot opnieuw wikkelen zonder eerst de kern te strippen en opnieuw te isoleren.
- Een lichte beschadiging van de luchtspleetoppervlakken is wel acceptabel, maar probeer geen onvolkomenheden van de rotor af te schrapen. Hierdoor zal de luchtspleet groter worden en zullen de verliezen toenemen.
- Verander indien mogelijk het wikkelpatroon om koperverlies tegen te gaan (zie paragraaf 3) en eventuele toenames in ijzerverliezen te compenseren.

### (c) Elektromagnetische veranderingen

De meeste motoren dienen met optimale of bijna optimale fluxdichtheden van de kernplaten te draaien - d.w.z. vlak boven de 'knie' van de staalmagnetiseringscurve. Een toename in de fluxdichtheid heeft grote invloed op het ijzerverlies.



Figuur 3. Harmonische ijzerverliezen



Figuur 4. Grafieken die het effect van de uitbrandtemperatuur op kernverliezen tonen

# InfoTech No. 11

Reparateurs kunnen soms in de verleiding komen om de fluxdichtheid te verhogen (door de wikkelingen te verminderen) om zo de koppel te vergroten. Dat is niet goed, omdat het ten koste gaat van de efficiëntie, de verliezen doet toenemen en zelfs ernstige oververhitting kan veroorzaken.

Het is veel beter om naar de motorbelasting te kijken en vast te stellen of de (statische) wrijving iets kan worden verlaagd. Een klein beetje olie doet wonderen voor het energieverbruik van de motor!

#### *(d) Thermische beschadiging van de isolatie tussen de kernplaten*

Het uitbranden van de oude wikkeling voorafgaande aan de reparatie kan resulteren in beschadiging van de isolatie tussen de kernplaten met alle - rampzellige - gevolgen van dien. In het Verenigd Koninkrijk hebben de AEMT, Brook Hansen en Dowding & Mills PLC samen aan een project gewerkt om kwantitatieve gegevens van echte machines te verkrijgen. Er werden in totaal 34 motoren van 5,5 kW gebruikt, verdeeld over drie groepen:

**Groep 1.** Motoren met een standaard aluminiumbehuizing met kernplaten van 0,65 mm dik niet siliciumhoudend staal voorzien van een oxidelaag (kwaliteit Newcor 800).

**Groep 2.** Hoogrendementsmotoren met gietijzeren behuizing met kernplaten van 0,65 mm dik staal met een oxidelaag en een laag siliciumgehalte (kwaliteit Losil 450).

**Groep 3.** Hoogrendementsmotoren met een aluminiumbehuizing met 0,5 mm kernplaten van staal met een ultralaag carbongehalte, een ultralaag zwavelgehalte en zeer laag siliciumgehalte, geïsoleerd met een gemodificeerde 'L3' anorganische/organische coating (kwaliteit Polycor 420).

Alle motoren werden gebouwd en getest door de fabrikant (Brook Hansen). Vervolgens werden ze afzonderlijk gedurende bepaalde tijdsycli onder zorgvuldig gecontroleerde temperaturen uitgebrand door Dowding & Mills PLC. Tot slot werden gestripte

motoren opnieuw gewikkeld volgens de oorspronkelijke specificaties en weer getest door Brook Hansen.

De resultaten zijn grafisch weergegeven in figuur 4, waaruit blijkt dat:

- Uitbrandtemperaturen onder 360 °C acceptabel zijn voor kernplaten met een oxidelaag.
- De motoren met gecoate Polycor 420 kernplaten boven 500 °C geen last hadden van een toename in ijzerverlies.

Verdere tests, ook met motoren van andere fabrikanten, gaven aan dat deze resultaten gelden voor machines tot 30-40 pk, maar dat daarboven meer onderzoek nodig is om veilige uitbrandtemperaturen vast te stellen bij motoren met kernplaten met een oxidelaag.

Polycor 420 is duidelijk een groot voordeel voor reparateurs, en wordt nu toegepast in de meeste standaard geprijsde 'W' hoogrendementsmotoren van Brook Hansen.

# InfoTech No. 11

---

## CONCLUSIES

Hoewel het rendement vrijwel zeker afneemt als een motor met een ernstig beschadigde kern opnieuw wordt gewikkeld (tenzij de kern eerst wordt gestript en dan opnieuw geïsoleerd), kunnen de meeste hoogrendementsmotoren prima worden hersteld, mits:

- De juiste wikkelconfiguratie wordt gekozen.
- De weerstand per fase niet wordt verhoogd (liever nog verlaagd).
- De flux per pool niet wordt verhoogd.
- De mechanische spanning in de kernplaten niet wordt verhoogd.
- Het rotoroppervlak niet wordt afgeschrapt (waarvoor de luchtspleet groter zou worden).
- De uitbrandtemperatuur zorgvuldig wordt gecontroleerd binnen de limieten van de kernplaatisolatie.

Het in het Verenigd Koninkrijk verrichte werk is een goed begin om ervoor te zorgen dat hoogrendementsmotoren tijdens hun economische levensduur hun rendement behouden. Meer onderzoek is wenselijk om de optimale uitbrandcondities voor grotere motoren met andere kernplaatisolaties vast te stellen. Aangezien de complexe elektromagnetische condities die zich voordoen in een motor moeilijk in een kernmonster zijn te reproduceren, kan men voor dit werk beter machines op ware grootte blijven gebruiken. Een samenwerkingsproject tussen reparateurs aan weerszijden van de Atlantische Oceaan zou kunnen bijdragen aan de kwaliteit en beheersing van de kosten van een dergelijk programma.

Noot van de redactie:

Dit artikel is oorspronkelijk gepubliceerd in *EASA Currents* (februari/maart, 1998). De auteur, professor David Walters, was vroeger in dienst bij Brook Hansen, de grootste motorfabrikant in het Verenigd Koninkrijk. Hij heeft bijgedragen aan de ontwikkeling van de *Good Practice Guide: The Repair of Induction Motors - Best Practices to Maintain Energy Efficiency* (1998), gepubliceerd door de Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT).