

VAKGROEP ELEKTROMECHANISCH ONDERHOUD



InfoTech 16

## Wikkelspoed en de zoektocht naar de perfecte (sinus)golf



© UNETO-VNI, Zoetermeer 2013

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van UNETO-VNI.

Disclaimer

Dit artikel is oorspronkelijk gepubliceerd in EASA Currents, februari 2004. UNETO-VNI heeft veel zorg besteed aan de samenstelling van deze uitgave. Desondanks kunnen er fouten en/of onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. UNETO-VNI en de rapporteur zijn niet aansprakelijk voor de gevolgen van fouten en/of onvolledigheden

# Wikkelspoed en de zoektocht naar de perfecte (sinus)golf

Dit begon als een artikel waarin de situaties worden uitgelegd waarin een concentrisch-naar-lusconversie van een tweepolige wikkeling niet werkt. De oorzaak had te maken met de gekozen wikkelspoed en met harmonischen in de spleten tussen de windingen. Deze harmonischen hebben een negatief effect op de prestaties van de motor. De verklaring is dat niet elke wikkelspoed kan worden gebruikt en de problematische tweepolige spoed is afhankelijk van het aantal spleten en de wikkelspoed. Om het artikel nuttiger te maken zijn er tabellen in opgenomen waarin de 'beste' wikkelspoed voor tweepolige driefasenwikkelingen worden bepaald, maar ook waarden voor de wikkelspoed die beter kunnen worden vermeden.

Een van de leukste kanten van onze branche – en tevens de grootste uitdaging – is dat we te maken krijgen met apparatuur van allerlei leeftijden. Waar anders kun je het ene moment bezig zijn met een motor die een eeuw geleden is ontworpen en gebouwd en op dezelfde dag nog met een hypermoderne machine?

Elektrische motoren worden al meer dan 120 jaar geproduceerd door letterlijk honderden fabrikanten over de hele wereld. Veel van deze motoren krijgen wij ter reparatie aangeboden: soms gaat het om een goed ontwerp en soms is het een stuk minder.

Ofschoon fabrikanten inmiddels tientallen jaren ervaring hebben en van deze ervaring hebben geleerd, stammen sommige van de motoren die wij repareren uit het begin van hun leercurve. En niet alle nieuwe machinebouwers beginnen op hetzelfde punt van die leercurve.

## Wikkelspoed en twee polen

Een onderwerp waarvoor dit met name geldt, is de wikkelspoed. De meeste lezers zijn zich bewust van het potentiële gevaar als een motor een diameterwikkeling heeft (Distributiefactor 1,0). Een reden waarom ontwerpers gebruik maken van een distributiewikkeling (wikkeling met korte spoed) is dat ze zo de genoemde harmonischen willen terugdringen. Een diameterwikkeling heeft eerder ernstige pieken en hogere ruisniveaus dan een koordewikkeling. Af en toe komen we diameterwikkelingen tegen op nieuwe motoren. Voor ontwerpen met vier of meer polen moet de wikkelspoed een koordefactor hebben tussen 0,900 en 0,996 om deze harmonischen in de spleten tussen de windingen te voorkomen.

Maar tweepolige machines met een zo wijde spoed zijn moeilijk te wikkelen; zo moeilijk dat fabrikanten een koordefactor gebruiken van tussen 0,707 en 0,866 voor de meeste tweepolige luswikkelingen. Omdat de optimale spoed onpraktisch is voor tweepolige machines vermijden verstandige ontwerpers een wikkelspoed die resulteert in significante 5e of 7e harmonischen. Dat zijn de harmonischen die de sinusvorm van de lijnfrequentie het meest verstoren.

Wat bedoelen we met verstoren? Welnu, in extreme gevallen wordt de golfvorm zo vervormd dat de motor gewoon niet op toeren kan komen. De motor kan dan niet op toeren komen na een ernstige dip (een cusp) in de koppelkarakteristiek. Dit wordt ook wel een 'zadelkoppel' genoemd. Zelfs binnen de voorgestelde bandbreedte van een tweepolige koordefactor zijn er bepaalde wikkelspoedwaarden die kunnen resulteren in ongewenste prestaties. Als de geselecteerde wikkelspoed in harmonischen resulteert, moet de ontwerper de flux vergroten om het gewenste koppel te kunnen produceren.

Problemen kunnen zich voordoen als we een van de volgende dingen doen:

- + een slecht oorspronkelijk ontwerp overnemen;
- + de wikkelspoed veranderen zonder de gevolgen te doorzien;
- + de verkeerde spoed kiezen bij het ombouwen van een concentrische tweepolige wikkeling tot een luswikkeling;
- + een speciale voorziening zoals een geregelde onderbreking weglaten.

Reparateurs die zich bezighouden met het opnieuw wikkelen van motoren die de afgelopen honderd jaar door vele verschillende fabrikanten zijn geproduceerd, komen inderdaad tweepolige motoren tegen met een slechte wikkelspoed.

Als de reparateur weet welke wikkelspoedwaarden buitensporige harmonischen in de spleten tussen de windingen kunnen veroorzaken, kan hij op zijn hoede zijn voor mogelijke problemen. Voor het verminderen van harmonischen in de spleten is niet altijd een langere spoed vereist; soms is een kortere spoed zelfs een betere oplossing.

	😊	😊	😞	😊	
Spoed	1-9	1-8	1-7	1-6	1-5
<b>K<sub>p</sub></b>	0,985	0,940	0,866	0,831	0,707
<b>5<sup>e</sup> harm.</b>	3%	<3%	5%	6%	<3%
<b>7<sup>e</sup> harm.</b>	<3%	<3%	<3%	<3%	4%

Tabel 1. 18 spleten, 2-polig

	😊			😞		
Spoed	1-12	1-11	1-10	1-9	1-8	1-7
<b>K<sub>p</sub></b>	0,991	0,966	0,924	0,866	0,793	0,707
<b>5<sup>e</sup> harm.</b>	<3%	<3%	<3%	6%	<3%	4,3%
<b>7<sup>e</sup> harm.</b>	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%

Tabel 2. 24 spleten, 2-polig

		😊					😞	😞		
Spoed	1-19	1-18	1-17	1-16	1-15	1-14	1-13	1-12	1-11	1-10
<b>K<sub>p</sub></b>	1,0	0,966	0,924	0,966	0,940	0,904	0,866	0,819	0,766	0,707
<b>5<sup>e</sup> harm.</b>	4%	3,8%	<3%	<3%	<3%	<3%	4%	5%	5,1%	4,1%
<b>7<sup>e</sup> harm.</b>	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%

Tabel 3. 36 spleten, 2-polig

			😊	😊						😞		
Spoed	1-24	1-23	1-22	1-21	1-20	1-19	1-18	1-17	1-16	1-15	1-14	1-13
<b>K<sub>p</sub></b>	0,988	0,991	0,981	0,966	0,947	0,924	0,897	0,866	0,831	0,793	0,752	0,707
<b>5<sup>e</sup> harm.</b>	4%	3,8%	<3%	<3%	<3%	<3%	3%	4%	4,8%	5,1%	4,9%	4%
<b>7<sup>e</sup> harm.</b>	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%

Tabel 4. 48 spleten, 2-polig

				😊	😊				😞	😞		
Spoed	1-25	1-24	1-23	1-22	1-21	1-20	1-19	1-18	1-17	1-16	1-15	1-14
<b>K<sub>p</sub></b>	0,985	0,973	0,958	0,940	0,918	0,894	0,866	0,836	0,802	0,766	0,727	0,636
<b>5<sup>e</sup> harm.</b>	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	4%	4,7%	5,1%	5%	4,5%	3,5%
<b>7<sup>e</sup> harm.</b>	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%

Tabel 5. 54 spleten, 2-polig

😊 deze wikkelspoed heeft de voorkeur

😞 deze tweepolige wikkelspoed vermijden

Een 5<sup>e</sup> of 7<sup>e</sup> harmonische  $\geq 5\%$  van de grondfrequentie (lijnfrequentie is de grondfrequentie, of 1<sup>e</sup> harmonische) zal de motorprestaties negatief beïnvloeden.

Een goede richtlijn is elke wikkelspoed te vermijden die resulteert in een harmonische met een grootte van 5% (of groter) van de grondfrequentie. Het percentage van de harmonische in de spleten tussen de windingen is voor elke combinatie van wikkelspoed en tussenruimten per pool weer anders. Dus u hoeft deze percentages niet te berekenen, zij worden gegeven in de tabellen op de vorige pagina. De wikkelspoed en de corresponderende koordefactor ( $k_p$ ) worden gegeven en de procentuele harmonische in de spleten tussen de windingen staat eronder. Maak u geen zorgen over kleinere harmonischen – de 5%-grens is redelijk.

Kijk bijvoorbeeld eens naar de spoed 1-6 in de tabel voor 18 spleten, 2 polen. Zelfs al ligt de  $k_p$  van 0,831 ruimschoots binnen de voorgestelde bandbreedte van de koordefactor, hij resulteert in een onaanvaardbaar hoge harmonische in de spleten tussen de windingen van 6%. Als de spoed 1-6 was gekozen voor een ombouw van concentrisch naar lus, zou de motor misschien niet eens naar zijn volle snelheid accelereren.

Een harmonische met een negatieve sequentie van 6% berooft de motor van zijn koppel. Hogere fluxdichtheden zijn nodig om dit te compenseren. Door een gunstigere wikkelspoed te kiezen verhogen we bij dezelfde fluxdichtheid als in de oorspronkelijke situatie het nettokoppel.

### **Gunstig neveneffect van grotere wikkelspoed**

Het vergroten van de wikkelspoed heeft als voordeel dat er minder windingen per spoel nodig zijn om dezelfde flux te produceren, zodat het koperoppervlak omgekeerd evenredig kan toenemen met de verandering in het aantal windingen.

Als onderdeel van een reconstructie waarbij sprake is van een tweepolige conversie (dat wil zeggen, ombouw van concentrisch naar lus), moet bij de keuze van de wikkelspoed rekening worden gehouden met de berekende windingen per spoel, de fluxdichtheid en de wenselijkheid van de wikkelspoedopties.

Zorg ervoor het aantal windingen zo te berekenen dat dezelfde flux behouden blijft. Om het nieuwe aantal windingen per spoel vast te stellen deelt u de oude  $k_p$  door de nieuwe  $k_p$  en vermenigvuldigt u de uitkomst met het oude aantal windingen per spoel.

Bijvoorbeeld, een tweepolige motor van 100 pk heeft 36 spleten en de volgende gegevens:

13 windingen per wikkeling

spoed 1-11

2-driehoekschakeling

Als we tabel 3 raadplegen vinden we dat de oorspronkelijke wikkelspoed een vijfde harmonische van 5,1% heeft. Een mogelijkheid is de wikkelspoed te vergroten tot 1-14, met minder dan 3% aan harmonische inhoud. Het nieuwe aantal windingen per spoel wordt bepaald door:

$$13 \times (0,766/0,904) = 11$$

In dit geval vermindert een toename van de wikkelspoed met drie spleten het vereiste aantal windingen per spoel van 13 tot 11. De toegenomen spleetruimte maakt een toename van het draadoppervlak mogelijk van 18% ( $13/11 = 1,18$ ) zonder dat de vulling van de spleten toeneemt. Deze toename van het draadoppervlak vermindert de wikkelverliezen ( $I^2R$ -verliezen), wat betekent dat de motor minder warm zal worden.

We hebben de prestaties verbeterd zonder dat de wikkelingen strakker in de spleten zijn komen te liggen, dus de wikkelaar kan tevreden zijn.

Minder  $I^2R$ -verliezen verbeteren de betrouwbaarheid en zouden in dit geval de efficiëntie kunnen verbeteren met bijna een half procentpunt.

Er zijn veel tweepolige motoren met een minder dan optimale wikkelspoed in gebruik waarvan de prestaties verbeterd kunnen worden. En dit is weer een extra mogelijkheid om onze klanten beter van dienst te zijn.

Als een tweepolige motor opnieuw moet worden gewikkeld, is de wikkelspoed een van de variabelen die we in de hand hebben. Maar we moeten bepaalde wikkelspoedwaarden zo mogelijk vermijden, om te voorkomen dat de motor in zijn prestaties achteruit gaat. Het verhogen van de wikkelspoed maakt het gebruik van minder windingen mogelijk bij een toename van het koperoppervlak.

Voor elke wijziging in het ontwerp van een motor is de wikkelspoed een van verschillende variabelen. Gebruik deze tabellen om te voorkomen dat u de verkeerde wikkelspoed kiest. Vergeet niet naar de boringsdiameter te kijken als u een grotere wikkelspoed overweegt. Iemand zal de spoelen nog moeten kunnen plaatsen!

## Colofon

### **Opdrachtgever**

Vakgroep Elektromechanisch Onderhoud, UNETO-VNI

### **Contactpersoon**

Terry Heemskerck

### **Auteur**

Chuck Yung, Specialist technische ondersteuning - EASA

[www.uneto-vni.nl](http://www.uneto-vni.nl)