7e Jaargang. No. 1. 9 Januari 1929

ELECTROTECHNIEK

14-daagsch Tijdschrift, waarin opgenomen

„STERKSTROOM" EN HET „TIJDSCHRIFT VOOR ELECTROTECHNIEK"

TEVENS ORGAAN VAN:

Verbond van Electrotechnische Handel en Industrie (V. E. H. I.)

Vereeniging van Directeuren van Electriciteitsbedrijven in Nederland (V. D. E. N.)

Vereeniging van Stroomdistributie-Bedrijven in Nederland (V. S. D. B.) en Electrobond

Directeur: J. Moorman - Uitgave N.V. Moorman's Periodieke Pers, Amalia van Solmsstraat 2, Den Haag, Tel. 71620

ABONNEMENT: Binnenland f 4.— per kwartaal, Buitenland f 20.— per jaar. Losse Nummers f 1.—. ADVERTENTIËN 40 cent per regel. Bij contract verlaagd tarief.

De bij Kortsluiting van Transformatoren optredende Krachten

Door C. FELDMANN.

De vernielende werking van de bij kortsluiting optredende zeer groote krachten noopt tot het aanbrengen van vast isolatiemateriaal op de einden van de wikkeling, dus juist daar, waar men wegens de diëlectrische vastheid liever geen vast materiaal had. Want de olie heeft als vloeibare isolatie het groote voordeel bij de diëlectrisch het zwaarst belaste plaatsen door circulatie steeds vernieuwd te worden. Een doorslag in een vloeibare isolatiestof zal dus onopgemerkt blijven of slechts voorbijgaande storing kunnen veroorzaken; in een vaste stof zal hij mettertijd zich op dezelfde plek herhalen en daarbij steeds gevaarlijker worden.

Gelukkig zijn voor diëlectrische vastheid en voor groote mechanische vastheid tegenover kortsluiting de eischen dezelfde, namelijk een niet te kleine spreidingsspanning. Vooral voor transformatoren van groot vermogen komt dit op de voorgrond, omdat de daarbij optredende krachten zeer groot worden. Een groote spreidingsspanning kan alleen worden verkregen door grooten afstand Δ tusschen de spoelen, groote spoeldikte δ en niet te groote lengte l_s, noch te fijne onderverdeeling der spoelen. Deze eischen strekken echter tevens tot betere circulatie van de olie en grootere diëlectrische vastheid.

Noemt men S de op primair herleide spreidingsinductantie per kern van de transformator, dan is de daarmede overeenkomende, in het veld opgehoopte magnetische energie

$$T = \tfrac{1}{2}\, i_1^2\, S,$$

waarin i_1 de stroom primair, bij kortsluiting dus de primaire kortsluitstroom i_{k1} is. Verschuift nu een van de wikkelingen in de richting h van die component van de kracht P_h, waarin wij belang stellen, met een klein bedrag dh, dan verandert de spreidingsinductantie met een bedrag dS.

De in de lekvelden opgehoopte energie verandert dan bij een stroom i_{k1} met $\frac{1}{2}\, d\,(S\, i_{k1}^2)$. En aangezien de stroom i bij deze kleine beweging dh niet noemenswaard verandert, mag hij buiten de accolade geplaatst worden.

De vormveranderingsarbeid is $\frac{1}{2} P_h\, dh$, de totale mechanische arbeid $P_h\, dh$. Wij vinden dus [1])

$$P_h\, dh = \tfrac{1}{2} P_h\, dh + \tfrac{1}{2}\, i_{k1}^2\, dS$$

of
$$P_h = i_{k1}^2 \frac{dS}{dh} \text{ dyne} \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

wanneer alle eenheden in absolute maat gemeten worden. Drukt men i_{k1} in ampère, S in Henry uit, dan krijgt men P_h in kg bij een kleine verschuiving dh cm:

$$P_h = 10{,}2 \,.\, i_{k1}^2 \frac{dS}{dh} \text{ kg} \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

a) Symmetrische schijfwikkeling.

1) Noemt men l_s de radiale hoogte der spoelen, waarvan er q primaire ter dikte δ_1, $(q-1)$ heele en twee halve secundaire ter dikte δ_2 met een onderlingen axialen afstand Δ de wikkeling vormen, (afb. 1), dan is voor de eindschijven de spreidingsreactantie

$$S_e = \frac{S}{2q} = \frac{0{,}4\,\pi}{k_s\, l_s} \left(\frac{w}{2q}\right)^2 \delta\; O \,.\, 10^{-8} \text{ henry.}$$

Hierin beteekent δ volgens een door Vidmar ingevoerde term de „gereduceerde luchtspleet" (beter wel de gereduceerde afstand) tusschen de twee spoelgroepen en k_s een door Rogowski berekenden correctiefactor, terwijl O de gemiddelde omtrek der spoelen is.

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{6} + \Delta$$

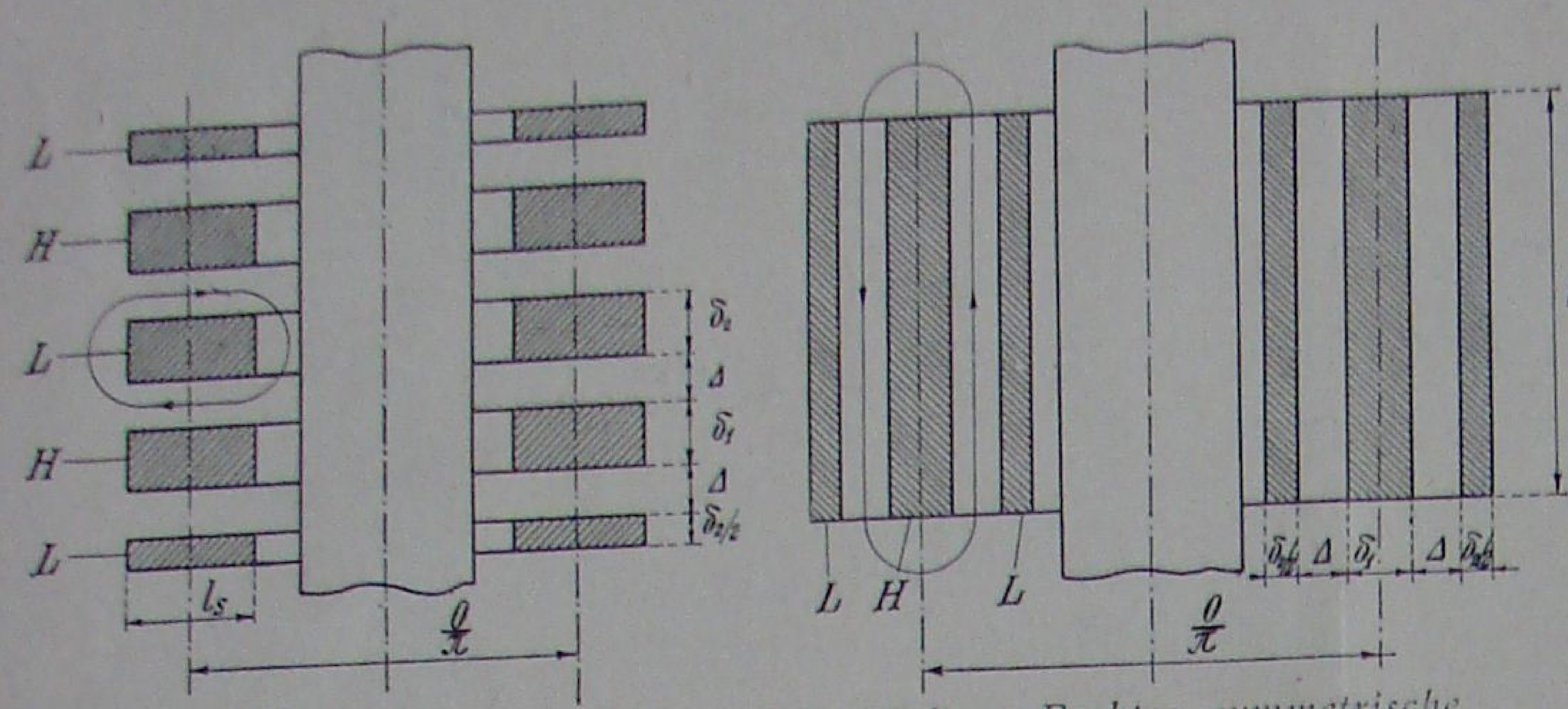
$$\frac{1}{k_s} = 1 - \frac{\delta_1 + \delta_2 + 2\,\Delta}{2\,\pi\, l_s}.$$

De eindspoelen worden dus tegen de jukken aangedrukt met een kracht in de richting δ

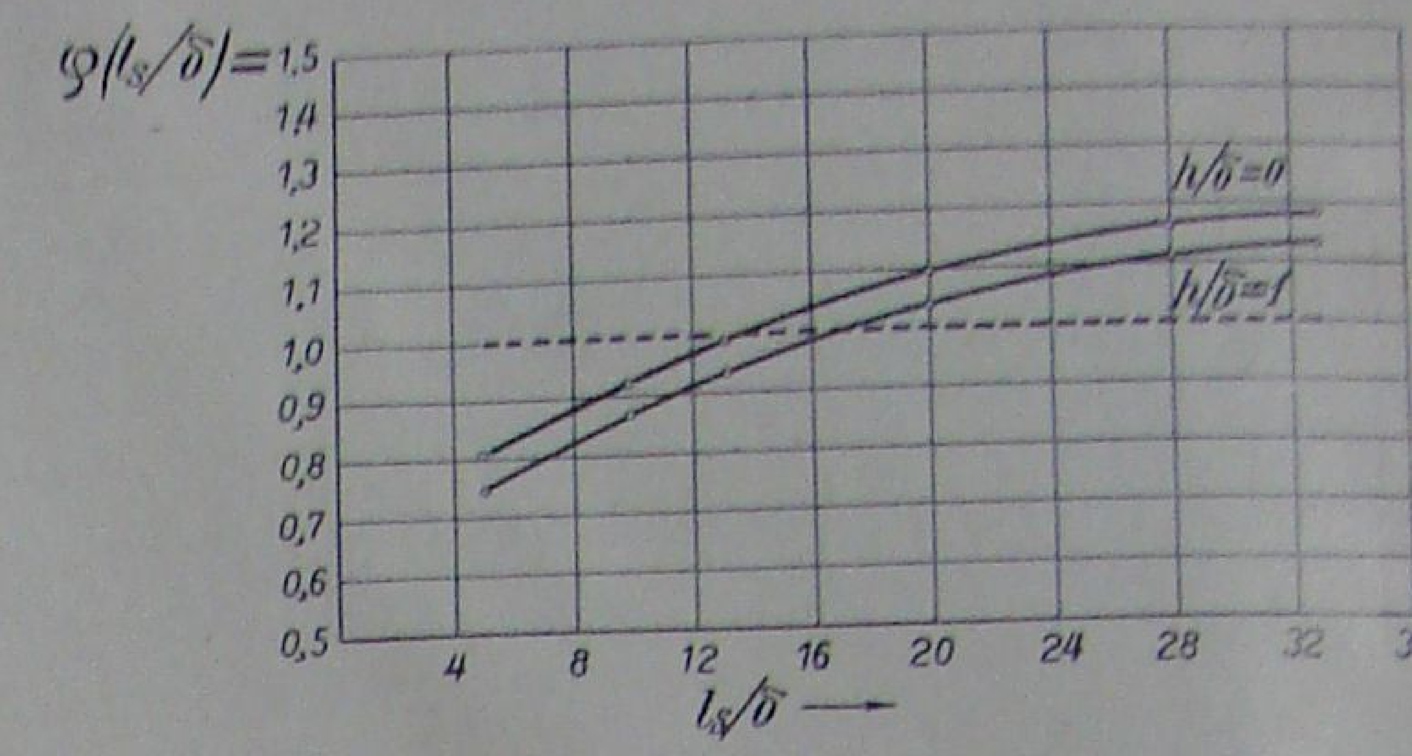
$$P_\delta = \frac{12{,}8}{k_s\, l_s} \left(\frac{i_{k1}\, w_1}{2q}\right)^2 O \,.\, 10^{-8} \text{ kg} \quad \ldots \quad (2)$$

Voor de tusschen de halve eindspoelen liggende normale spoelen heffen deze twee drukkrachten elkaar tennaastenbij op.

[1]) J. Biermanns. Bulletin Schweizer Elektrot. Verein 1923, p. 212, 245.



Afb. 1. *Links: symmetrische schijfwikkeling. Rechts: symmetrische verdeelde cylinderwikkeling.*



Afb. 2.

Nu is voor constante klemspanning U de stationaire kortsluitstroom $i_{k_1} = \frac{U_1}{\omega S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{w_1 \Phi \cdot 10^{-8}}{S}$, wanneer men $U_1 \approx E_1$ stelt en den weerstand verwaarloost.

Voert men dit in verg. 1) en bedenkt men dat

$$\frac{d S_e}{d \delta} = \frac{S}{2 q \delta} \text{ en } \Phi = B \cdot f_k,$$

dan vindt men voor de kracht loodrecht op de leklijnen

$$P_\delta = \frac{10{,}2}{2 \cdot 0{,}4 \pi} \cdot \frac{k_s l_s}{O \delta^2} \cdot \Phi^2 \; 10.^{-8} =$$

$$= 4{,}06 \frac{k_s l_s}{O \delta^2} \left(\frac{B \; f_K}{10000}\right)^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

2) Een andere componente van de totale kracht tracht de windingshoogte l_s te verminderen, waardoor de spreidingsinductantie vergroot zou worden. Een bekende stelling zegt, dat iedere spoel naar zoodanige vorm streeft dat het maximum van reactantie bereikt wordt. Wij moeten dus S naar l_s differentieeren en vinden, omdat de kracht in de 2q spleten optreedt, voor deze in de richting van de leklijnen werkende kracht op een halve eindspoel:

$$P_{l_s} = \frac{10{,}2}{2q} \cdot i_{k_1}^2 \; \frac{d S}{d l_s}$$

Maar $\frac{d S}{d l_s} = - \frac{0{,}4 \pi}{2q \; k_s \; l_s^2} \; w_1^2 \; \delta \; 0.10^{-8} = - \frac{S}{l_s}$

en $i_{k_1} = \frac{w_1 \Phi}{\sqrt{2} \; S} \; 10^{-8}$, $\Phi = B \; f_K$

dus $P_{l_s} = - 4{,}06 \frac{k_s}{0 \delta} \left(\frac{B \; f_k}{10000}\right)^2$ kg . . . . (4)

Het min-teeken duidt aan, dat de kracht de spoelhoogte evenwijdig aan de leklijnen tracht te verkleinen. De onderverdeeling q primaire, (q — 1) heele en twee halve spoelen komt in de vergelijking niet voor.

Voor de geheele spoelen is de kracht tweemaal zoo groot.

3) Is er in de richting van de leklijnen een onsymmetrie met een klein bedrag h cm, dan treedt nog een kracht op, die door verschuiving de onsymmetrie tracht te vergrooten. Deze schuifkracht is

$$P_h = \frac{8{,}12 \; k_s \; h}{O \; \delta^2} \left(\frac{B \; f_k}{10000}\right)^2 \varphi \left(\frac{l_s}{\delta}\right) \text{ kg} \quad . \; . \quad (5)$$

en moet evenals de onder (1) genoemde kracht P_δ door de steunstukken opgenomen worden. De formule geldt alleen benaderd. Zij moet feitelijk nog met een correctiefactor verbeterd worden, die uit afb. 2 voor $\frac{h}{\delta} = O$ en $\frac{h}{\delta} = 1$ kan worden ontnomen. Zijn de spoelen niet even lang, dan moet $h = \frac{h_1 - h_2}{4}$ en de hoogte l_s voor den correctiefactor $l_s = \frac{l_1 + l_2}{4}$ gesteld worden.

In de formule (5) voor P_h komt l_s niet voor.

Deze formules gelden voor de bij symmetrische wikkelingen gebezigde halve eindspoelen. Voor heele spoelen en voor de enkelvoudige concentrische wikkeling zijn zij tweemaal zoo groot.

b. **Dubbelconcentrische cylinderwikkeling.**

De schijfwikkeling wordt alleen voor matige spanningen toegepast. Voor zeer hooge spanningen bezigt men de *cylinderwikkeling met onder-verdeelde secundaire spoel* (afb. 1b, H = hooge spanning, L = lage spanning).

De formules blijven dan gelijk (voor q = 1) en men vindt

1⁰. een kracht loodrecht op de leklijnen.

$$P_{\delta_{max}} = \frac{4{,}06 \cdot k_s \; l_s}{O \; \delta^2} \left(\frac{B \; f_k}{10000}\right)^2 \text{ kg} \quad . \; . \; . \; . \quad (3)$$

die bij de concentrische wikkeling de inwendige spoel tegen de kern perst, maar de buitenste spoel op trek belast, die door de draad zelf moet worden opgenomen. De specifieke trekspanning is daarbij

$$\sigma_{trek} = \frac{P_\delta}{\pi \; w_b \; f_2} = \frac{2 \; P_\delta}{\pi \; w_2 \; f_2} \quad . \; . \; . \; . \quad (6)$$

als $w_b = \frac{w_2}{2}$ het windingstal, f_2 de draaddoorsnede van iedere winding van de buitenste spoel beteekent.

2⁰. een kracht in de richting van de leklijnen

$$P_{l_s} = - \frac{4{,}06 \; k_s}{O \; \delta} \left(\frac{B \; f_k}{10000}\right)^2 \text{ kg} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (4)$$

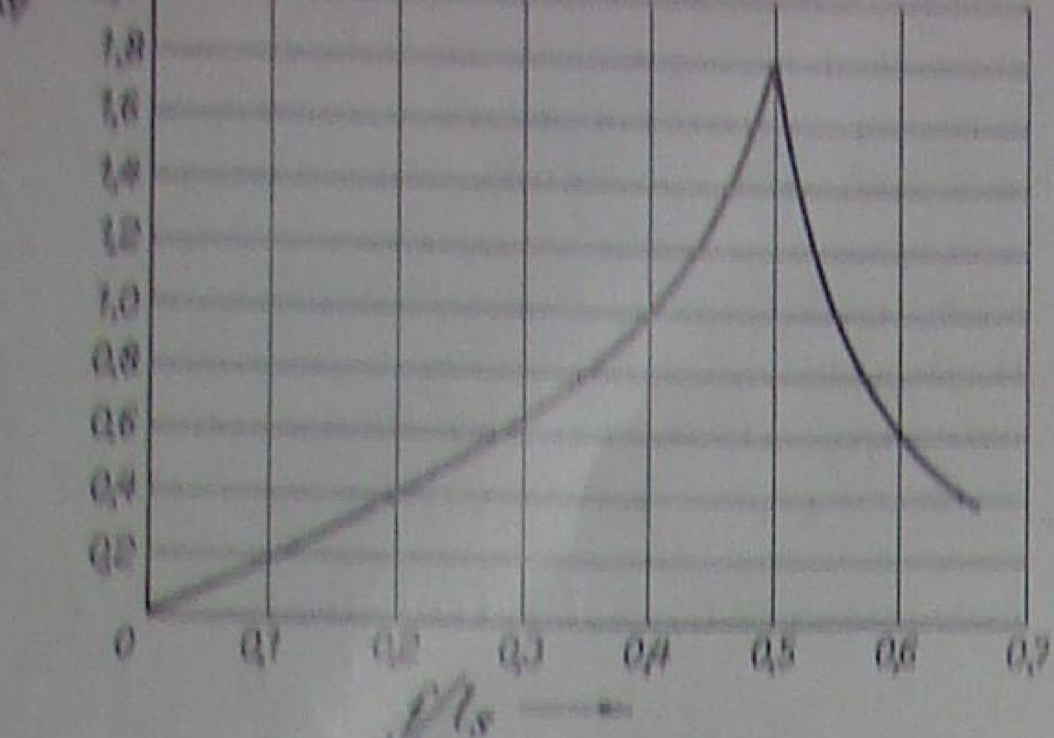
die de spoel tracht te verkorten en daarin als druk werkt.

3⁰. Een schuifkracht tengevolge van een onsymmetrie h in richting van de leklijnen, dus van de spoelhoogte met een waarde

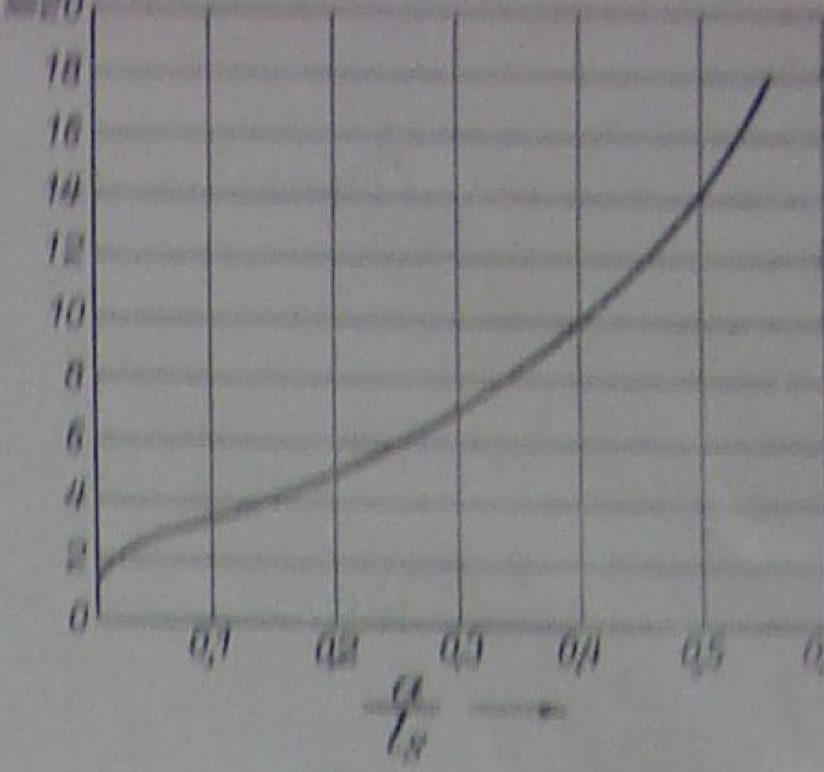
$$P_h = \frac{8{,}12 \; k_s \; h}{O \; \delta^2} \left(\frac{B \; f_K}{10000}\right)^2 \varphi \left(\frac{l_s}{\delta}\right) \text{ kg}$$

Deze vergelijking geeft aan hoeveel de kracht op de kortere spoel wordt vermeerderd, op de langere verminderd. Wordt bij de concentrische spoelen de eene wikkeling in twee gelijke deelen gesplitst, om de aftakkingen voor spanningsvariatie in het midden van de poot te kunnen plaatsen, dan heffen de axiale schuifkrachten, die door de steunstukken moeten worden opgenomen, elkaar precies op als $h_1 - h_2 = 2 \delta$.

Deze voorwaarde wijst dus aan, welk gedeelte der wikkeling door de aftakkingen mag worden uitgeschakeld.



Afb. 3.



Afb. 4.

c. Inwendige kortsluiting.

Wanneer in een transformator **inwendige kortsluiting** optreedt, dus kortgesloten windingen aanwezig zijn, zullen deze ook groote axiale schuifkrachten in het leven roepen. Bij doelmatige beveiliging van de transformator zal de schade in betrekkelijk korte tijd gerepareerd kunnen worden, als tenminste de wikkeling niet onder de hevige schuifkracht bezweken is.

Biermanns heeft in een uitvoerige berekening aangetoond dat het ongunstigste geval zich bij verdeelde cylinderwikkeling voordoet, wanneer van een van de wikkelingen een gedeelte a wordt kortgesloten. Zij a/l_s de verhouding van kortgesloten tot totale windingen, f de afstand dier windingen van het midden der spoel, dan kan men aantoonen, dat voor zeer kleine waarden van a/l_s (b.v. 0,01) de axiale afstootende kracht

$$P_f = 5{,}1 \; \frac{1}{O\, l_s} \left(\frac{B\ f_K}{10000}\right)^2 \psi\left(\frac{f}{l_s}\right) \text{ kg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

nul wordt, wanneer de kortsluiting in het midden van een spoel plaats heeft, en maximum als de kortgesloten windingen aan het einde zitten, dus $\frac{f}{l_s} = 0{,}5$. Afb. 3 toont het verloop der functie $\psi\left(\frac{f}{l_s}\right)$.

Veronderstellen wij omgekeerd, dat de kortgesloten windingen aan het einde van een wikkeling liggen, dan heeft Biermanns berekend dat

$$P_f = 5{,}1 \; . \; \frac{1}{O\, l_s} \left(\frac{10000}{B\ f_k}\right) \psi\left(\frac{a}{l_s}\right) \text{ kg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

De axiale schuifkracht neemt dan volgens de functie $\psi\left(\frac{a}{l_s}\right)$ in afb. 4 toe en bereikt practisch haar maximum, wanneer de helft van alle windingen kortgesloten is. Dit geval kan zich bij de laagspanningswikkelingen van groote transformatoren voordoen, die men al naar gelang in twee boven elkaar staande helften parallel of in serie schakelt. Treedt nu tusschen de klemmen van een van deze cylinders een kortsluiting op, dan is de helft van een wikkeling kortgesloten.

Er kunnen dus ook zeer aanzienlijke krachten door inwendige kortsluiting van spoelen nabij het juk optreden, vooral bij driehoekschakeling. Zijn beide de wikkelingen in ster geschakeld en treedt kortsluiting slechts in een phasewikkeling op, dan zijn de krachten kleiner, omdat de stroom gesmoord wordt door het lekveld van een juk naar het andere.

De vergelijkingen veronderstellen, dat het net sterk genoeg is om de klemspanning ook bij kortsluiting constant te houden. Bij $e_{k_1} = \frac{p}{100} U_1$ is de stationaire kortsluitstroom $I_K = \frac{100}{p} I_1$, wanneer I_1 de normale stroom is. Bij sterschakeling en kortsluiting tusschen 2 phasen zijn er steeds 2 phasen in serie geschakeld en wordt de stationaire kortsluitstroom $I_K = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{100}{p} \; I_1 = \frac{86{,}7}{p} \; I_1$, dus 1... kleiner. De grootste stroomstoot treedt een halv... na de kortsluiting op ($t = \frac{1}{2\nu}$ sec.) en kan voorge... den door de vergelijking

$$I_K, \text{stoot} = i_{K_1} \sqrt{2} \,|\, (\varepsilon^{-\beta t} - \cos wt),$$

De eerste term is de zoogenaamde gelijkstroo... neemt snel af, omdat de dempingsfactor

$$\beta = \frac{r}{s} = \frac{e_r}{e_s}\, \omega$$

tusschen $\beta = 10$ voor zeer groote transformatore...
en $\beta = 50$ „ kleine „

De tweede term is de wisselstroomterm van den... stroom. Voor $t = \frac{1}{2\nu}$ wordt dus

$$I_K, \text{stoot} = i_K \sqrt{2} \,|\, (\varepsilon^{-\frac{\beta}{2\nu}} - \cos \frac{2\pi\nu}{2\nu}) = \sqrt{2}\,(1 + \varepsilon ...$$

en de formules moeten voor de maximale stootk... menigvuldigd worden met de verhouding

$$\gamma = \left(\frac{I_K, \text{stoot}}{i_{K_1}}\right)^2 = 2\,(1 + \varepsilon^{-\frac{\beta}{2\nu}})^2$$

Voor $\nu = 50$ Hertz en $\beta = 10$ wordt $\gamma = 2\,(1 + 0{,}90$...
$\beta = 27$ „ $\gamma = 2\,(1 + 0{,}76$...
$\beta = 50$ „ $\gamma = 2\,(1 + 0{,}60$...

Voorbeeld:

Een 20000 kVA transformator, 110000/6000 Volt... driephasig, schakeling Y/△ met dubbelconcentrisch... wikkeling, heeft de volgende gegevens:

aantal windingen	884/84	spoeldikte . .	δ...
doorsn. „	28/260 mm²	„ . .	δ...
gem. hoogte „	$l_s = 130$ cm	afstand . .	△...
„ lengte „	$O = 369$ „	gereduceerde afst.	...

inductie in de kern $B = 11800$ M/cm², actieve doors... kern $f_k = 3$...

Hieruit volgt

$$\frac{1}{k_s} = 1 - \frac{\delta_1 + \delta_2 + 2\,\triangle}{2\pi\, l_s} = 1 - \frac{10 + 8 + 22}{2\pi \, . \, 130} = 0{,}95...$$

$$S = \frac{0{,}2\,\pi\, w_1^2}{k_s\, l_s} . \, O\,\delta \, . \, 10^{-8} = \frac{0{,}2\,\pi \, . \, 844^2}{1{,}05 \, . \, 130} . \, 369 \, . \, 14 \, . \, 10^{-}...$$

$$I_1 = \frac{20000}{110000} \frac{10^3}{\sqrt{3}} = 105 \text{ A (normaal)}$$

$x_{k,1} = \omega S = 314 . 0{,}178 = 56$ Ohm; $I_1\, x_{k1} = e_s = 105 . 56$...
$r = r_1 + a^2 r_2 = 4{,}86$ Ohm; $I_1\, r = e_r = 105 . 4{,}86 =$ ...

We vinden dus $\frac{e_s}{U_1} = \frac{5880}{63500} = 9{,}25\ \%$ $\quad \frac{e_s}{e_r}$ ...

$\frac{e_r}{U_1} = \frac{510}{63500} = 0{,}8\ \%$

De relatieve kortsluitspanning is $\frac{e_{k1}}{U_1} = \frac{1}{U_1}\sqrt{e_s^2 + e_r^2} = \sqrt{9,25^2 + 0,8^2} = 9,3\ \%$. De dempingsfactor $\beta = \frac{e_r}{e_s}\ \omega = \frac{314}{11,5} = 27$ en $\gamma = 6.25$. De stationaire kortsluitstroom wordt dus hier bij 2 phasige kortsluiting

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{100}{9,3} \cdot I_1 = 9,3\ I_1$$

de maximale stroomstoot bij kortsluiting $\sqrt{\gamma} = 2,5$ maal zoo groot

$I_{k1,\ stoot} = 2,5\ I_{k1} = 2,5 \cdot 9,3 \cdot I_1 = 23,25\ I_1 = 2440$ A.

Met dezen reusachtigen stroomstoot, die na 0,01 secunde optreedt, gaan nu ook reusachtige krachten gepaard.

De maximale afstootende kracht tusschen de hoog- en de laagspanningswikkeling bedraagt

$$P_{\delta_{max}} = \gamma \cdot 4,08 \cdot \frac{k_s\ l_s}{O\ \delta^2}\left(\frac{B\ f_k}{10000}\right)^2 \text{ kg} =$$

$$6,25 \cdot 4,08 \cdot \frac{1,05 \cdot 130}{369 \cdot 14^2}(1,18 \cdot 3000)^2 = 600.000 \text{ kg.}$$

Deze kracht moet door de 42 windingen van de buitenliggende halve spoel opgenomen worden en veroorzaakt in de draden een trekbelasting van

$$\sigma_{Z\max} = \frac{2\ P_{\delta_{max}}}{\pi\ f_2\ w_2} = \frac{600.000}{\pi \cdot 260\ 42} = 17,5 \text{ kg/mm}^2$$

ongeveer de helft van de trekvastheid van zacht koper.

De binnenliggende halve spoel wordt met 600 ton tegen de ijzeren kern aangeperst; de drukkrachten, die op de tusschen beide in liggende hoogspanningswikkeling werken, heffen elkaar tennaastenbij op.

De spoelen worden in axiale richting samengedrukt met een kracht

$$P_{l_s\max} = -\gamma\ \frac{4,08\ k_s}{O\ \delta}\left(\frac{B\ f_k}{10000}\right)^2 =$$

$$= -4,08 \cdot 6,25 \cdot \frac{1,05}{369 \cdot 14}(1,18 \cdot 3000)^2 = -64500 \text{ kg.}$$

Is de hoogspanningsspoel met een bedrag $h = 2$ cm, dat hier nog betrekkelijk klein is vergeleken bij $\Delta = 11$ cm, axiaal verschoven, dan is de correctiefactor volgens afb. 2 voor $l_s/\delta = 130:14 = 9,3$ en $h/\delta = 0,2$ ongeveer 0,9 en de kracht, die de onsymmetrie tracht te vergrooten is:

$$P_{h_{max}} = 0,9\gamma \cdot 8,12\ \frac{k_s\ h}{O\ \delta^2}\left(\frac{B\ f_k}{10000}\right)^2 =$$

$$= 0,9 \cdot 6,25 \cdot 8,12 \cdot \frac{1,05 \cdot 2}{369 \cdot 14^2}(1,18 \cdot 3000)^2 =$$

$$= 16500 \text{ kg.}$$

Deze kracht moet door de steunstukken van ieder van de twee halve laagspanningsspoelen worden opgenomen en het dubbele door de steunen van de onverdeelde hoogspanningsspoel.

Ongeveer even groot zijn de schuifkrachten bij inwendige kortsluitingen, die zich over een klein deel van de spoel uitstrekken.

Zijn $a = 0,1\ l_s$ windingen kortgesloten, dan vindt men uit afb. 4 $\psi\left(\frac{a}{l_s}\right) = 3,4$ en zoodoende

$$P_{f_{max}} = \gamma\ \frac{5,1\ k_s}{O\ l_s}\left(\frac{B\ f_k}{10000}\right)\psi\left(\frac{a}{l_s}\right) =$$

$$= 6,25 \cdot 5,1 \cdot \frac{3,4}{369 \cdot 130 \cdot 1,05}(1,18\ \ 3000)^2 = 26800 \text{ kg.}$$

Is de helft van alle windingen kortgesloten, dan treedt de maximale schuifkracht op, waarbij $\psi\left(\frac{a}{l_s}\right) = 14,4$ en

$$P_{f_{max}} = \frac{14,4}{3,4} \cdot 26800 = 113500 \text{ kg.}$$

Nieuwjaar voor de Zakenman.

Wat is het meest typische kenmerk van de Zakenman?

Zijn werkdrift! Zijn ...

... verliest geen tijd om over de ongrijpbare tijd te filosofeeren, hij aanvaardt ...

... meerderen met verlies van nieuwe tijd, die wij noodig hebben om raak te slaan, om ons werk te doen slagen!

En wanneer zal ons werk slagen?

Als we de ongeschreven wetten volgen,