

Kabel geslagen uit rechthoekige koperdraden met lakisolatie en zijn toepassing in transformatorwikkelingen

DOOR
J. WILDEBOER

KORTE INHOUD

Voor een goede kopervulfactor van de wikkingsruimte en een robuuste wikkingsconstructie is het gewenst transformatorwikkelingen op te bouwen uit geleiders met een rechthoekige doorsnede. Om het extra-koperverlies binnen nauwe grenzen te houden, moeten de afmetingen van de massieve draden klein blijven. Een samengestelde geleider in de vorm van een kabel geslagen uit rechthoekige draden, die elk zijn voorzien van een dunne laklaag, voldoet aan deze eisen. Bovendien wordt een belangrijk voordeel verkregen door een besparing van wikkeltijd, in het bijzonder bij toepassing in lagenwikkelingen voor middelgrote transformatoren (3000-30000 kVA). Als bijzondere toepassingen worden genoemd: lagenwikkelingen voor hoge spanningen, spoelenwikkelingen voor hoge stromen en wikkelingen voor ijzerloze kortsluitstroom-begrenzingsmoerspoelen.

Enige gegevens worden verstrekt van de rechthoekige kabel, zoals deze door onze Draadfabriek wordt gefabriceerd. Bij het wikkelen met deze kabel zijn vele ervaringen opgedaan, hetgeen heeft geleid tot een aanzienlijke uitbreiding van de mogelijkheden tot vormgeving van transformatorwikkelingen.

SUMMARY: CONTINUOUSLY TRANSPOSED COPPER STRIPS WITH ENAMEL COVERING AND ITS APPLICATION IN TRANSFORMER WINDINGS.

A high copper-spacefactor of the winding space and a robust winding construction make it desirable to build transformer windings from conductors with a rectangular cross section. In order to keep the extra-copper losses within narrow limits the dimensions of the solid strips are to remain small.

A composite conductor in the shape of a cable laid from strips each covered with a thin enamel covering meets these requirements. In addition an important advantage is gained by the saving of labour in the windingshop, particularly when applied to layer type windings for medium size transformers (3000-30000 kVA). As special applications are mentioned: layer type windings for high voltages, disc type windings for heavy currents and windings for current limiting reactors without an iron core.

Some details are given about the rectangular cable, as it is manufactured by our Wire Factory. The many experiences gained during the winding operations resulted in a great extension of the possibilities for the design of transformer windings.

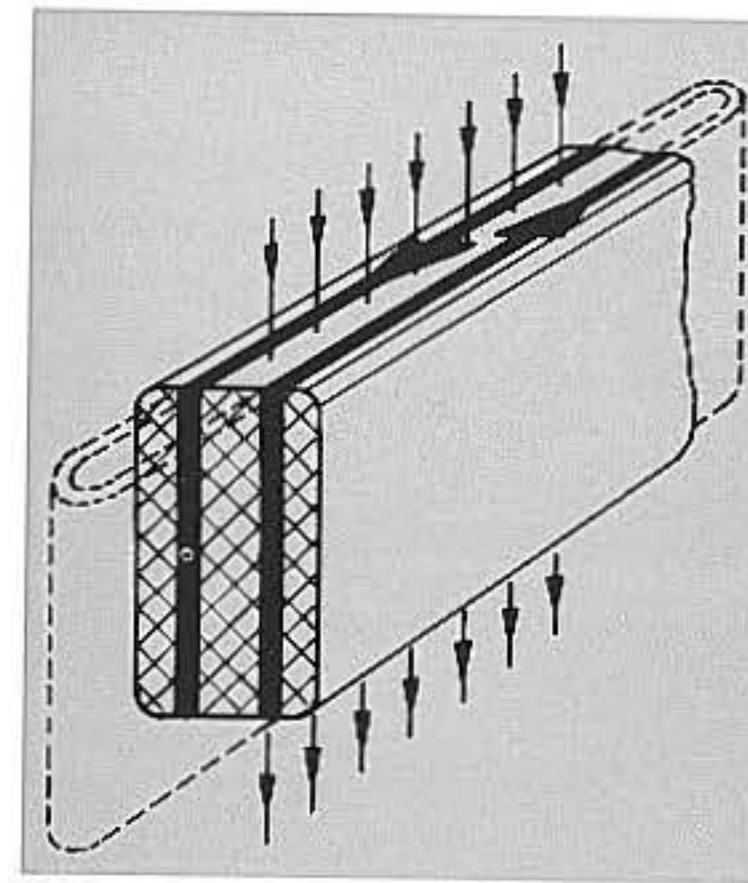
U.D.C. 621.315.213.1:621.315.337.4-426.3:621.314.21.045

1. Inleiding.

Transformatorwikkelingen voor stromen groter dan 30 à 40 A worden in het algemeen opgebouwd uit koperdraden met een rechthoekige doorsnede. Door de rechthoekige vorm sluiten de aan elkaar grenzende windingen goed aaneen, zodat een stevige wikkingsopbouw en een hoge kopervulfactor van de wikkingsruimte worden verkregen.

De afmetingen van de rechthoekige draad, d.w.z. de dikte (in radiale richting in de wikkling) en de breedte (in axiale richting), zijn echter aan be-

paalde grenzen gebonden. In eerste aanleg spelen hierbij de mogelijkheden van de fabricage en van de verwerking van de draad een rol. Naarmate het vermogen van de transformator, waarin de draad wordt toegepast, groter is, wordt de maximaal toelaatbare dikte bovendien sterk beperkt door het extra-koperverlies, tengevolge van de door het lekveld in het koper geïnduceerde werelstromen (afb. 1). Bij wikkelingen voor stromen groter dan 100 à 200 A gaat men dan ook over op twee of



Afb. 1. Baan van werelstromen, door het lekveld in een massieve geleider geïnduceerd.

Path of the eddy currents, induced in a solid conductor by the leakage field.

meer tezamen gewikkelde en parallel-geschakelde draden of splitst men de wikkling in twee of meer delen, elk gewikkeld met één draad, welke delen parallel worden geschakeld.

Daar elke draad door de volledige draadisolatie is omgeven, betekent het splitsen van één zware draad in enige kleinere dat de hoeveelheid draadisolatie in de wikkling toeneemt en dus de vulfactor van de wikkingsruimte afneemt. Verder vereist het wikkelen met twee of meer draden meer tijd dan met één draad, vooral door de bijzondere voorzieningen, die moeten worden getroffen om de tezamen gewikkelde draden regelmatig onderling van positie te laten verwisselen. Dit is nodig om een gelijkmatige stroomverdeling over de parallel-geschakelde draden te verkrijgen.

Deze nadelen worden vermeden indien men overgaat tot een geleider, die is samengesteld uit een aantal draden, elk overtrokken met een dunne laklaag als isolatie tegen de werelstromen, en gemeenschappelijk omwikkeld met papier als geleiderisolatie (afb. 2).

De positie van de draden in de samengestelde geleider wordt op gezette afstanden verwisseld, om de gelijkmatige stroomverdeling over de draden te verkrijgen. Tevens geven deze verwisselingen een zekere samenhang, een zekere stevigheid aan de samengestelde geleider. Op deze wijze wordt een kabel verkregen, met als essentieel kenmerk dat de doorsnede van de afzonderlijke draden rechthoekig

is en dat de doorsnede van de kabel zelf een nage-nog rechthoekige vorm vertoont.

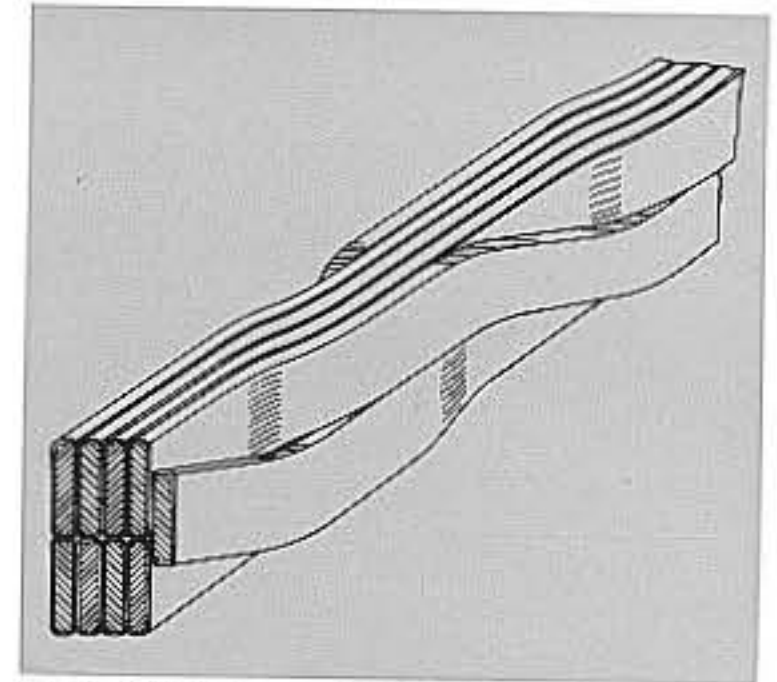
Bij de beschouwing van deze samengestelde geleider valt onmiddellijk de overeenkomst op met de „Roebelstaaf”, waarvan in het afgelopen jaar het 50-jarig bestaan in herinnering werd geroepen en die zijn toepassing vindt in generatoren.* De toepassing van de rechthoekige kabel in transformatoren is echter niet zo oud, waaraan het probleem van de fabricage van deze kabel wel niet vreemd zal zijn geweest.

Bij de generator-staven gaat het namelijk om afgepaste, tamelijk korte lengten van de samengestelde geleider, terwijl men voor transformatorwikkelingen juist grote lengten aan één stuk nodig heeft. Toepassingen van rechthoekige kabel in transformatoren dateren van omstreeks de tweede wereldoorlog, vooral in Amerika, terwijl ook enige Europese transformatorfabrikanten reeds jaren over deze kabel beschikken.

De toepassing van de rechthoekige kabel in transformatoren is de laatste tijd weer actueel geworden door de arbeidsbesparing, die met deze kabel kan worden bereikt. Daarnaast worden nog enige andere voordelen verkregen, als lage extra-koperverliezen en een grote mechanische sterkte van de wikkelingen.

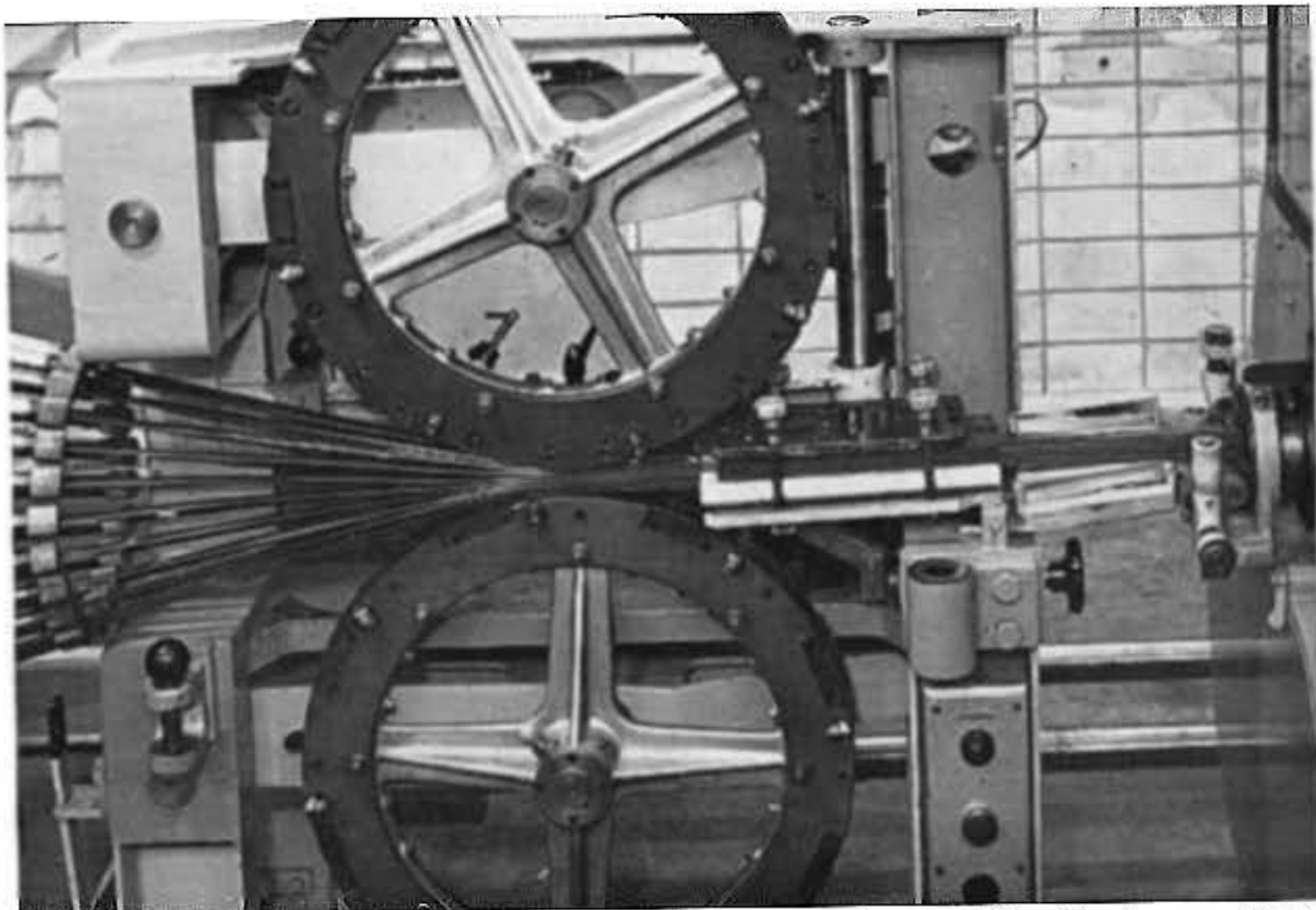
Voor de fabricage van de rechthoekige kabel is door onze constructeurs een bijzonder vervormingsmechanisme ontworpen (afb. 3), waarop verschillende binnenlandse en buitenlandse octrooien zijn verworven. Dit mechanisme vormt tezamen met de gebruikelijke delen als draaibare haspelkooi,

* Brown Boveri Mitteilungen 49-6 (1962).



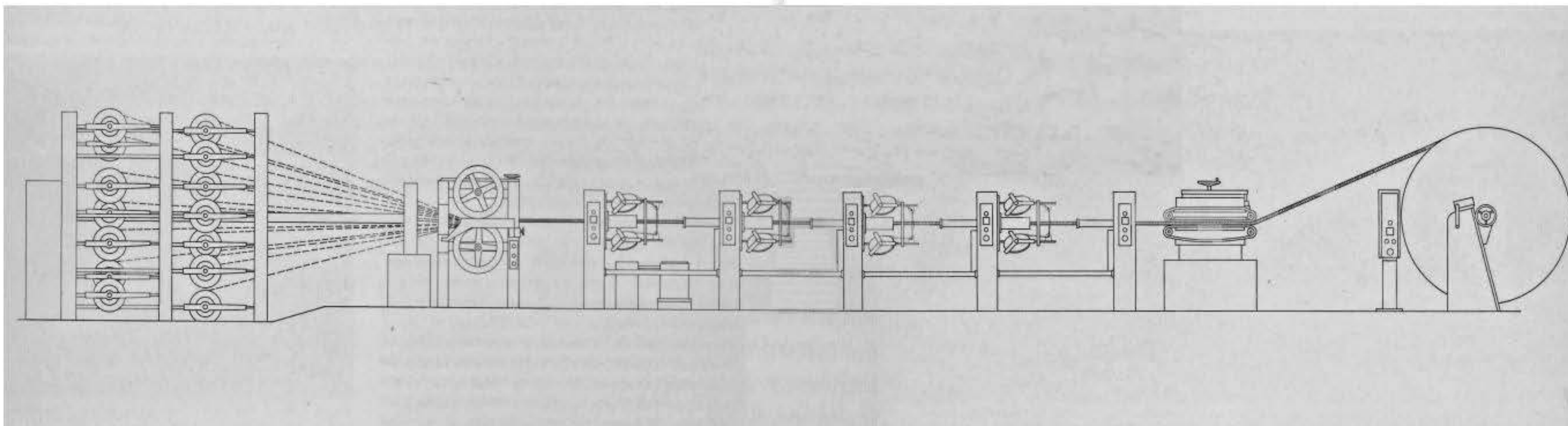
Afb. 2. Detail van een kabel geslagen uit rechthoekige draden. Het aantal draden per kabel is altijd oneven. De gemeenschappelijke papieromwikkeling is weggelaten.

Illustrating the continuously transposed strips. The number of strips in one cable is always odd. The common paper wrapping is not shown.



Afb. 3. Het vervormingsmechanisme van de kabelslagmachine. De draden worden tussen beide wielen doorgevoerd. Langs de omtrek van de wielen geplaatste meenemers buigen de draden in hun nieuwe positie.

The transposing head of the cable-making machine. The strips are passed between the two wheels. Push-members uniformly distributed around the circumference of the wheels bend the strips in their new position.



Afb. 4. Opstelling van de kabelslagmachine: Van links naar rechts de draaibare haspelkooi, het vervormingsmechanisme, de papieromspinners, de uittrekrups en de ophaspelrichting.

papieromspinners, uittrekrups en ophaspelrichting, een kabelslagmachine, die sinds 1959 bij onze draadfabriek in gebruik is (afb. 4). Daarbij wordt de door deze fabriek geproduceerde „Duroflex“-lakdraad met rechthoekige doorsnede verwerkt. De ervaringen zowel bij de fabricage van de rechthoekige kabel als bij de toepassing ervan in transformatorwikkelingen zijn gunstig. Zelfs smaakten wij het genoeg om deze kabel aan enige buitenlandse transformatorfabrikanten te leveren, waarbij wij een groeiende belangstelling voor dit produkt menen te mogen bespeuren.

2. Toepassingen van rechthoekige kabel in transformatorwikkelingen.

Wikkelingen voor transformatoren kan men in twee typen onderscheiden, nl. *spoelenwikkelingen* en *lagenwikkelingen*. Bij de spoelenwikkeling worden de opeenvolgende windingen om elkaar gelegd, waardoor een schijfvormige spoel ontstaat (afb. 5a). Zo'n spoel wordt dus in radiale richting opgebouwd; als de spoel „vol" is, wordt de draad in axiale richting afgebogen om de volgende spoel te gaan wikkelen. Indien de eerste spoel van binnen naar buiten is gewikkeld, dan wordt de tweede van buiten naar binnen opgebouwd; samen vormen deze twee „enkelspoelen" een „dubbelspoel". De bewerking „van buiten naar binnen opbouwen" geschiedt in de praktijk meestal door de betreffende schijf van binnen naar buiten te wikkelen en daarna bin-

nenste buiten te keren. Daarom noemt men deze spoelenwikkelingen ook wel *gekeerde* wikkelingen. Kenmerkend voor dit type wikkeling is dat de boven- en onderkant vlak zijn, hetgeen de afsteuning vergemakkelijkt, en dat het begin en het eind van de wikkeling ver uit elkaar liggen. Deze wikkeling wordt dan ook veel toegepast voor hoge spanningen bij niet al te grote stromen.

Bij het wikkelen van de lagenwikkeling worden de opvolgende windingen naast elkaar gelegd; een laag wordt dus in axiale richting opgebouwd. Als een laag vol is steekt de draad in radiale richting over naar de volgende laag, die op zijn beurt wordt volgewikkeld in axiale richting, maar tegengesteld aan de voorgaande laag (afb. 5b). Op deze wijze kunnen enige lagen op elkaar worden gelegd.

Twee opvallende kenmerken van de lagenwikkeling zijn dat de lagen een spoed vertonen in axiale richting en dat het begin en het eind van de wikkeling dicht bij elkaar komen te liggen. Het eerste kenmerk maakt dat men voor een goede afsteuning van de lagen aan hun einden cylinders moet aanbrengen, die schuin zijn afgezaagd overeenkomstig de spoed van de laag. Het feit dat begin en eind dicht bij elkaar liggen heeft tot gevolg dat de lagenwikkeling met op en neer gewikkelde lagen zonder speciale maatregelen niet bruikbaar is voor hoge spanningen.

Voor zeer hoge stromen gebruikt men vaak een lagenwikkeling met één laag, waarbij iedere win-

Set up of the cable making machine: from left to right the rotatable reel cage, the transposing head, the paper covering machines, the caterpillar draw-off mechanism and the reeling mechanism.

ding zich dus over de volle dikte van de wikkeling uitstrekt. Een winding wordt dan gevormd door een aantal tegelijkertijd gewikkelde en later parallel-geschakelde draden, die dan op bepaalde plaatsen onderling van positie worden verwisseld. Deze wikkeling noemt men daarom een *wisselwikkeling* (afb. 5c).

In tabel I aan het eind van dit artikel wordt een overzicht gegeven van verschillende factoren, die bij de vergelijking spoelen-lagenwikkeling van belang zijn. Behalve de hiervoor genoemde kenmerken zijn in de tabel nog enige andere bijzonderheden opgenomen waarop in dit artikel niet nader zal worden ingegaan. Uit dit overzicht kan worden geconcludeerd dat de lagenwikkeling bij uitstek geschikt is voor middelgrote transformatoren (3000-30000 kVA) met spanningen van 7,2 tot 72,5 kV, vooral indien voorzien van spanningsregeling.

De rechthoekige kabel nu leent zich bijzonder goed voor het wikkelen van lagenwikkelingen met niet al te kleine binnendiameters. Zoals in de inleiding reeds is gezegd zijn de voordelen:

- korte wikkeltijd,
- lage extra-koperverliezen,
- stevige wikkelopbouw.

Dit laatste is verkregen door de grote radiale afmeting, dus de grote dikte van de rechthoekige kabel. Ook de steuncylinders, die de lagen aan hun einden afsluiten, en die van een mechanisch zeer hoogwaardige kwaliteit worden gekozen, kunnen door de grote dikte de lagen langs de gehele

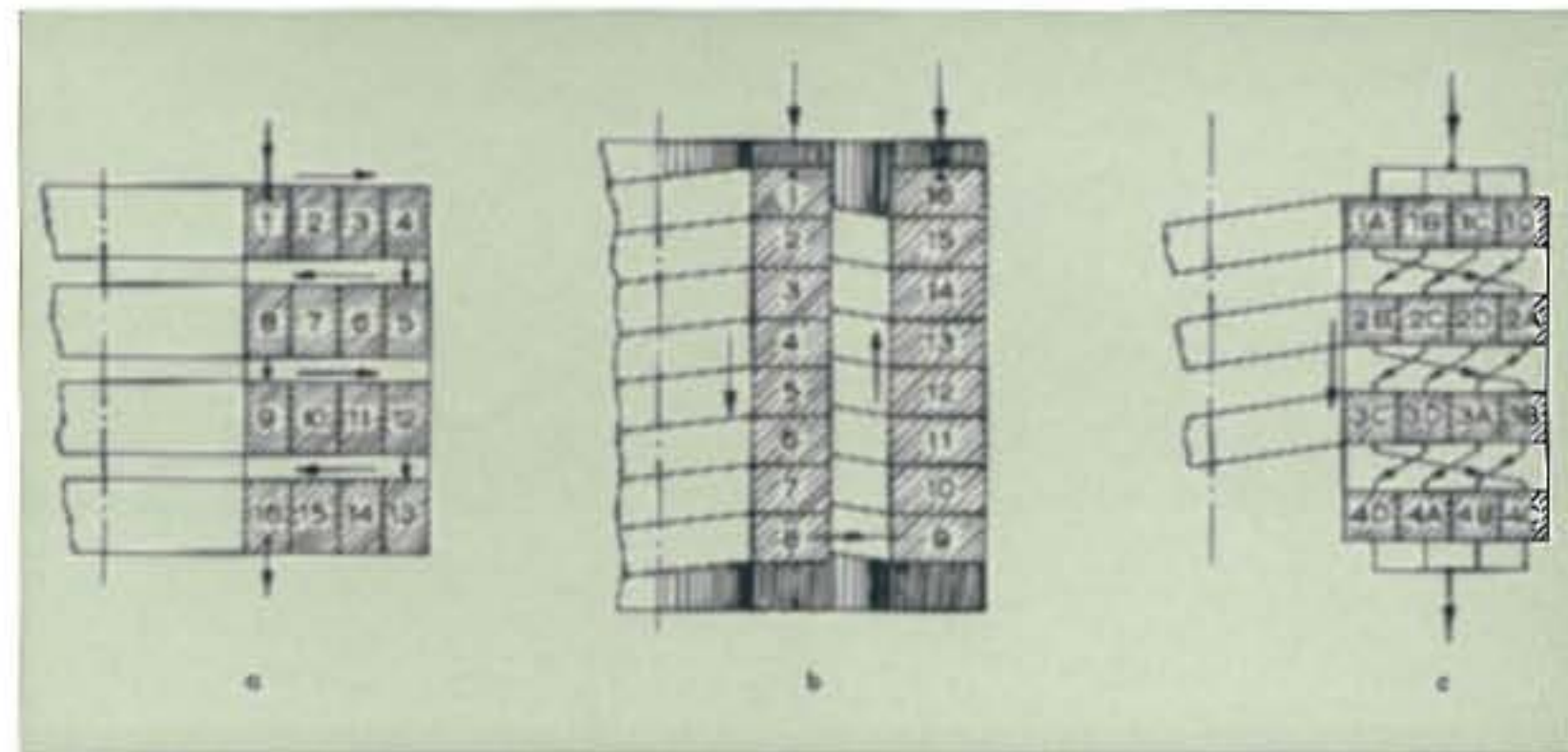
omtrek aandrukken zonder kans op afglijden of splijten. In afb. 6 wordt een lagenwikkeling voor een middelgrote transformator getoond, in afb. 7 een losse steuncylinders.

3. Bijzondere toepassingen van de rechthoekige kabel.

Lagenwikkelingen voor hoge spanning.

In het vorige hoofdstuk is gesteld dat de eenvoudige, op en neer gewikkelde lagenwikkeling bij uitstek geschikt is voor niet al te hoge spanningen, dus tot ca. 72,5 kV. Meer gecompliceerde uitvoeringsvormen van lagenwikkelingen zijn echter goed bruikbaar voor hoge spanningen. In afb. 8 wordt een voorbeeld van een uitvoering van een lagenwikkeling voor hoge spanning weergegeven. Alle lagen vertonen gelijke wikkelrichting; de verbindingen tussen de lagen zijn binnendoor in de koelkanalen gelegd. Om de hoge spanningen aan de eindvlakken van de wikkeling te kunnen beheersen zijn de lagen van binnen naar buiten telkens iets lager gehouden, terwijl voor een goede stootspanningsverdeling aan de buiten- en binnenzijde van de wikkeling geleidende schermen zijn aangebracht, die met het begin en het eind van de wikkeling worden verbonden.

De rechthoekige kabel is in de lagenwikkelingen voor hoge spanning uitstekend op zijn plaats, daar door de gunstige afmetingen in radiale richting een stevig geheel wordt verkregen. Men kan wel zeggen dat het zo goed als onmogelijk is om een lagen-



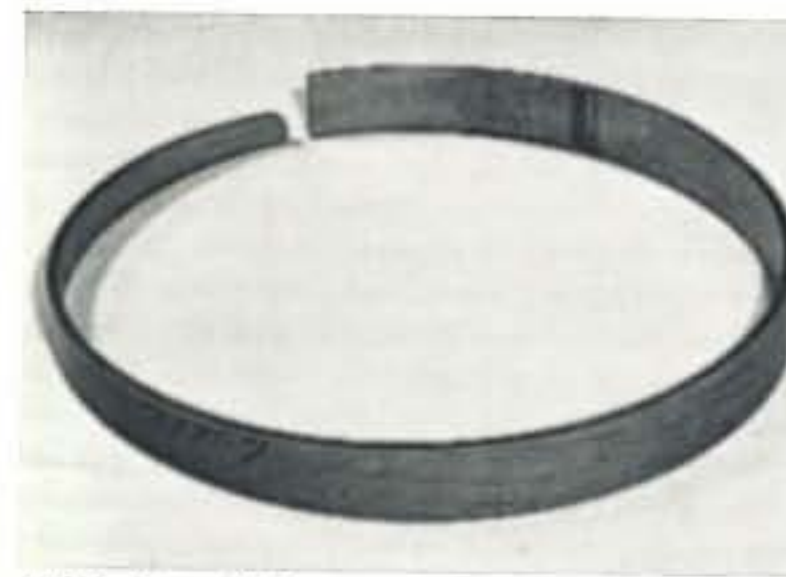
Afb. 5. Wikkeling-typen: a. spoelenwikkeling, opeenvolgende windingen om elkaar gewikkeld (in radiale richting); b. lagenwikkeling, opeenvolgende windingen naast elkaar gewikkeld (in axiale richting); c. wisselwikkeling = lagenwikkeling in één laag, met vier parallelle geleiders.

Types of windings: a. disc type winding, consecutive turns wound around each other (in radial direction); b. layer type winding, consecutive turns wound next to each other (in axial direction); c. helical winding = layer type winding with one layer, four conductors in parallel.



Afb. 6. Lagenwikkeling voor een middelgrote transformator, gewikkeld van rechthoekige kabel.

Layer type winding of a medium size transformer, wound of rectangular cable.



Afb. 7. Steuncylinders voor een lagenwikkeling, uitgezaagd volgens de spoed van de laag.

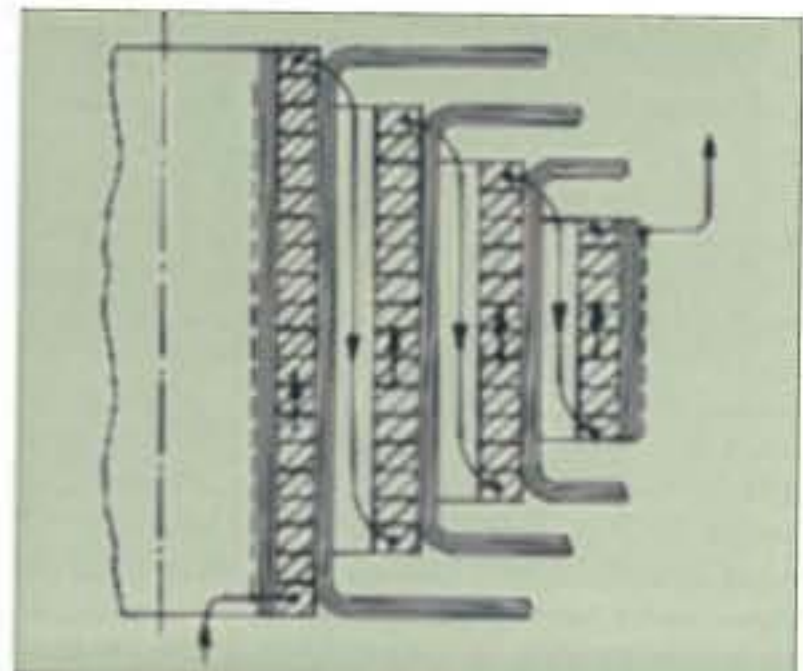
Supporting end ring for a layer type winding, cut according to the pitch of the layer.

wikkeling voor hoge spanning en groot vermogen te bouwen zonder gebruik te maken van een of andere vorm van samengestelde geleider.

Spoelenwikkelingen.

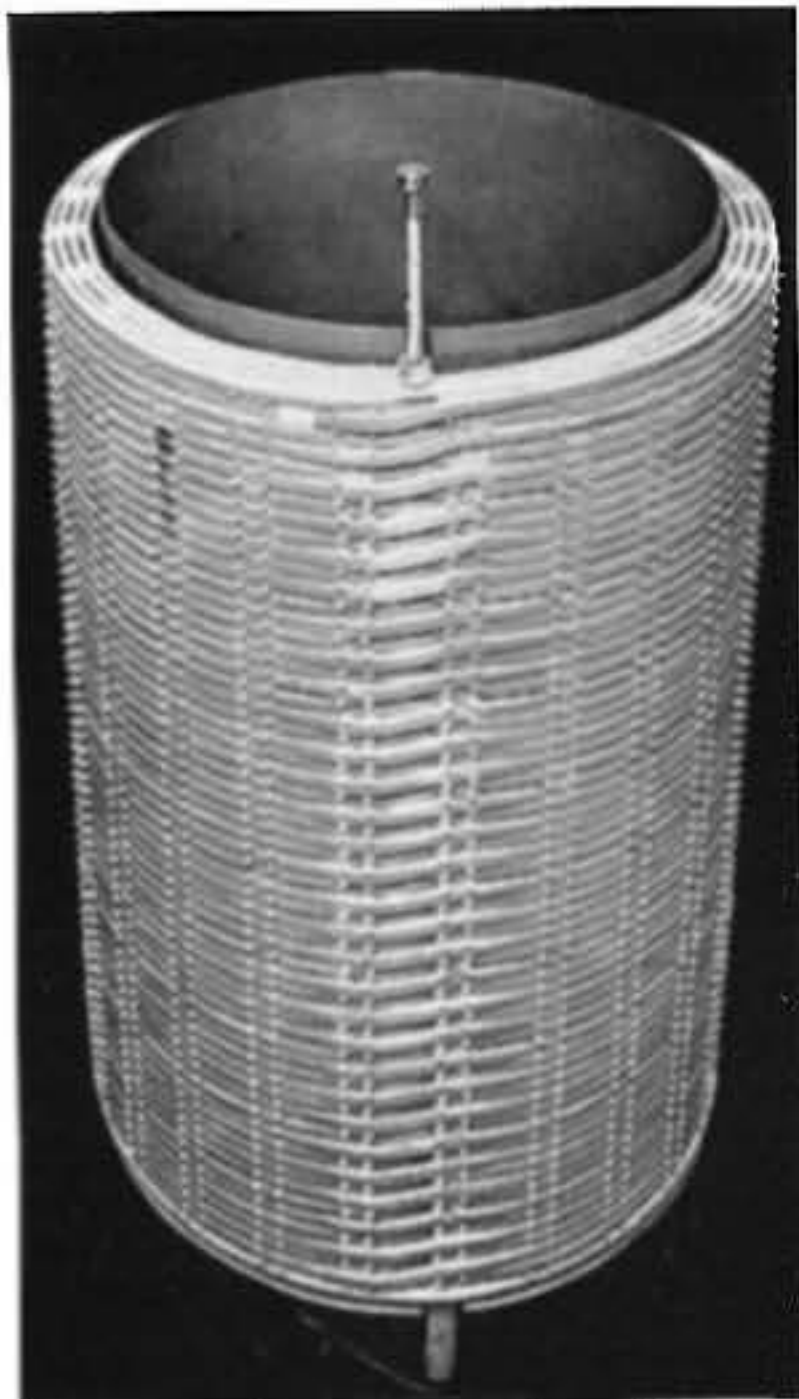
Een vraag die zich natuurlijk onmiddellijk naar voren dringt, vooral bij transformatorfabrikanten, die uit verschillende overwegingen een voorkeur tonen voor spoelenwikkelingen, is of het ook mogelijk is, spoelenwikkelingen te wikkelen met de rechthoekige kabel. Dit is door ons onderzocht direct nadat de rechthoekige kabel ter beschikking kwam. Het bleek zeer wel mogelijk met de rechthoekige kabel spoelenwikkelingen te wikkelen. Het is daarbij vanzelfsprekend noodzakelijk de wikkeling continu door te wikkelen, zonder knippen en lassen van de kabel. De spoelen, waarin de windingen van buiten naar binnen verlopen, worden niet gekeerd, maar van buiten naar binnen gewikkeld, waarbij gebruik wordt gemaakt van speciale vulstukken, die één voor één worden weggenomen bij het leggen van de windingen. Afb. 9 geeft een spoelenwikkeling weer voor een spanning 52 kV (sterschakeling). Iedere winding grenst met twee vlakken aan een koelkanaal, waardoor een goede warmte-afvoer is verzekerd. De opbouw is uiterst eenvoudig en vereist weinig bijzondere voorzieningen.

Ook voor hoge spanningen (150 kV) en grote vermogens (200 à 400 MVA) is de spoelenwikkeling met rechthoekige kabel zeer bruikbaar. Daar de gehele koperdoorsnede van één winding gemeenschappelijk van windingsisolatie wordt voorzien, blijft de ruimte, die deze isolatie inneemt in verhouding tot de kopersectie gering, ondanks de dikke isolatie, die bij hoge spanningen nodig is.



Afb. 8. Voorbeeld van een uitvoering van een lagenwikkeling voor hoge spanning.

Example of a construction of a layer type winding for high voltage.



Afb. 9. Spoelenwikkeling voor 52 kV (in sterschakeling), gewikkeld van rechthoekige kabel.

Disc type winding for 52 kV (in star connection), wound of rectangular cable.

Wikkelingen van smoorspoelen.

In de inleiding is reeds gewezen op het lage extra-koperverlies, dat door sterke onderverdeling van de sectie van de rechthoekige kabel wordt verkregen. Dit kan van bijzonder voordeel zijn bij smoorspoelen zonder ijzerkern, zoals kortsluitstroom-begrenzingsmoorspoelen. Een bekende uitvoeringsvorm van deze smoorspoelen is de betonsmoorspoel, opgesteld in lucht. In bijzondere gevallen, b.v. bij buitenopstelling in een agressieve atmosfeer, is het echter wenselijk een kortsluitstroombegrenzingsmoorspoel in een gesloten, met olie gevulde metalen bak te plaatsen. Door de afwezigheid van de ijzerkern doorsnijden de krachtlijnen het wikkelpoel onder zeer uiteenlopende hoeken, afhankelijk van de plaats in de wikkeling. Door deze wikkeling te wikkelen uit kabel met een rechthoekige doorsnede blijft het extra-koperverlies binnen de perken, terwijl de rechthoekige vorm van de kabel

een robuuste en compacte wikkeling oplevert. In afb. 10 wordt zo'n smoorspoel getoond, uitgevoerd als driefazeneenheid en bestemd om te worden geplaatst in de bak van een 100 MVA-driefazewikkelings-transformator, ter beperking van het kortsluitvermogen aan de klemmen van de tertiaire wikkeling.

4. Enkele gegevens van de rechthoekige kabel.

Zoals in afb. 2 is te zien moet het aantal draden, waaruit de kabel is opgebouwd, altijd oneven zijn. Het minimum aantal draden is 5, het maximum, waarvoor onze kabelslagmachine is ingericht, is 23. Alle daartussen liggende oneven aantallen draden kunnen tot een kabel worden geslagen, waarbij de aantallen 9, 11 en 13 het meest blijken voor te komen.

De grootste en kleinste afmetingen van de afzonderlijke draden worden bepaald door hetgeen het vervormingsmechanisme nog kan verwerken. Het is gebleken dat het in de praktijk door bijzondere maatregelen mogelijk is, draden van zeer uiteenlopende grootten en verhoudingen dikte: breedte tot een kabel te slaan. Om enige orde te scheppen in de grote hoeveelheid van mogelijkheden zijn regels opgesteld, waaraan de z.g. normale draden moeten voldoen.

Deze regels luiden: dikte afmetingen 1,4 - 1,6 - 1,8 - 2,0 of 2,2 mm; kleinste verhouding breedte: dikte = 3 : 1; grootste verhouding breedte: dikte = 5 : 1, met een maximum breedte van 10 mm. De kleinste normale draad, die tot kabel kan worden geslagen, is dus 1,4 x 4,2 mm; de grootste 2,2 x 10,0 mm. De normale breedte-afmetingen klimmen tussen 4,2 en 10,0 mm op in stappen van 0,2 mm.

De normale afmetingen van de afzonderlijke draden bieden in combinatie met de verschillende aantallen parallelle draden een zeer uitgebreide reeks van mogelijkheden. De kleinste totale koperdoorsnede, die in de praktijk voor de rechthoekige kabel nog in aanmerking komt, is ongeveer 40 mm² (b.v. 5//1,6 x 5,2 of 7//1,4 x 4,2), de grootste ongeveer 360 mm² (b.v. 21//2,2 x 8,2 of 19//2,0 x 10,0). De grootste doorsnede, die voor de rechthoekige kabel nog mogelijk is, wordt niet zo zeer door de kabelslagmachine bepaald, dan wel door de mogelijkheid om met de kabel te wikkelen. Bovendien wordt de afvoer van de verlieswarmte, veroorzaakt door de stroomdoorgang, bij zeer zware kabels een probleem, zodat men bij de gebruikelijke stroomdichtheden beter de zeer zware kabels kan splitsen in twee of meer parallelgeschakelde kabels van normale afmetingen, waardoor voldoende koelend oppervlak kan worden verkregen.

De hoeken van de rechthoekige doorsnede van de afzonderlijke draden worden afgerond ter voor-



Afb. 10. Driefazeeenheid van een kortsluitstroom-begrenzingsmoorspoel, waarin rechthoekige kabel is toegepast.

Three-phase unit of a current limiting reactor. Rectangular cable has been used for the windings.

koming van scherpe randen, waardoor de isolatie zou kunnen worden beschadigd. De isolatie-laag van de afzonderlijke draden is een lak op polyvinylacetaal-basis met een dikte van 0,05 a 0,075 mm, resulterende in een toename van de geïsoleerde ten opzichte van de blanke afmetingen van 0,10 à 0,15 mm. Sluitingen tussen naburige draden in één kabel blijken in de praktijk hoogst zelden voor te komen, ook niet nadat de kabel aan zware samendrukkingen is blootgesteld en waarbij de lakisolatie is beproefd met 500 V wisselspanning. Hoewel een enkele sluiting nog geen merkbare gevolgen zal hebben, gezien het grote aantal verwisselingen per lengte-eenheid, wordt aan de kwaliteit van de gelakte draden, die in onze draadfabriek onder de naam „Duroflex-profielraden” worden vervaardigd, hoge eisen gesteld.

De gemeenschappelijke isolatie, dus de kabelisolatie, bestaat uit een aantal lagen papier, dat minimaal

vier en maximaal (in één arbeidsgang) veertig kan bedragen. Het papier, dat voor de omwikkeling van de kabel wordt gebruikt, is een zwaar gekalanderde kwaliteit met een hoge dichtheid en trekvastheid. Hierdoor wordt de mechanische sterkte van de omwikkelde kabel vergroot, terwijl ook de elektrische eigenschappen, b.v. de stootspanningsvastheid, iets gunstiger zijn dan die van de lichtere papiersoorten. De mechanische sterkte van de rechthoekige kabel is door ons onderzocht aan vele proefwikkelingen van kabel van verschillende afmetingen (afb. 11).

5. Het wikkelen met de rechthoekige kabel.

Het wikkelen met de rechthoekige kabel stelt geen bijzondere eisen aan de wikkelaar. Daarentegen hebben wij het nuttig geoordeeld om van speciale haspels gebruik te maken, waarop de kabel tijdens de fabricage wordt opgewikkeld, daarna wordt getransporteerd en weer van wordt afgewikkeld bij het wikkelen. De breedte van deze haspels is gering (420 mm) om het mogelijk te maken tegelijkertijd met enige kabels naast elkaar te wikkelen.

Het is daarbij gewenst dat de kabels tijdens het wikkelen evenwijdig aan de wikkelaar worden toegevoerd, hetgeen door de smalle haspels zoveel mogelijk wordt benaderd (afb. 12).

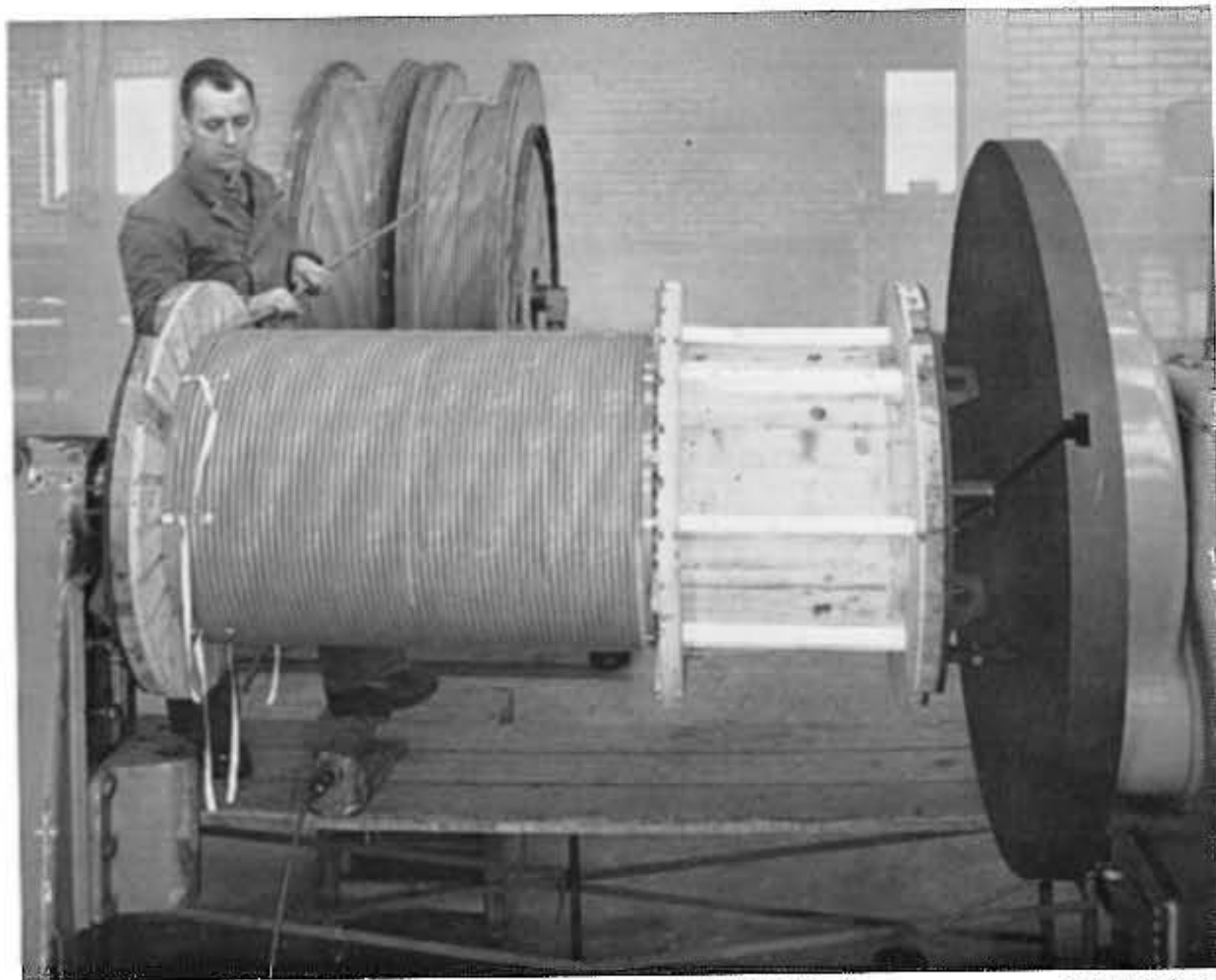
Om een grote lengte aan één stuk, die op de haspel kan worden opgeslagen, te verkrijgen, is de haspeldiameter groot gekozen (uitwendig 1900 mm ø). Het grootste gewicht aan kabel, dat zo'n speciale haspel kan bevatten, is ongeveer 1500 kg. De grote diameter maakt het tevens mogelijk om kabels van zeer zware doorsnede gemakkelijk op te haspelen.

De kleinste diameter, waarop de rechthoekige kabel



Afb. 11. Proefwikkeling voor het bepalen van de mechanische sterkte van de rechthoekige kabel. Door middel van veren wordt een bepaalde druk op de wikkeling uitgeoefend.

Experimental windings for determining the mechanical strength of rectangular cable. By means of springs a certain pressure is exerted on the winding.



Afb. 12. Het wikkelen met rechthoekige kabel. De smalle haspels vergemakkelijken het toevoeren van parallelle kabels aan de wikkelaar, terwijl zij door de grote diameter een grote lengte aan één stuk kunnen bevatten.

Illustrating the winding operation with rectangular cable. The narrow reels facilitate the feeding of parallel cables to the winding drum. At the same time the large diameter of the reels allows to store a great continuous length.

nog kan worden toegepast, hangt natuurlijk af van de kabelafmetingen, en bedraagt voor de meest voorkomende kabels 300 à 400 mm ϕ . Dit houdt dus in dat de toepassing van de kabels niet ligt bij transformatoren met vermogens kleiner dan ca. 3000 kVA.

Indien het nodig is een las te maken in de kabel kan men op twee manieren te werk gaan. De eerste manier bestaat uit het lassen van de te verbinden kabeleinden tot één geheel, waarbij alle draden dus onderling worden verbonden. Indien slechts weinig lassen in de wikkeling voorkomen – hetgeen meestal het geval zal zijn – is dit toelaatbaar. Een nadeel van deze werkwijze is dat er aan de massieve metaalklomp, die ter plaatse van de verbinding ontstaat, veel warmte moet worden toegevoerd om een goede las te verkrijgen, waardoor de isolatie van de kabel over een grote lengte verkoolt. Dit moet dan weer met de hand worden bijgewerkt.

De andere methode bestaat uit het stuk voor stuk lassen van de afzonderlijke draden, waaruit de kabel is opgebouwd, waarbij natuurlijk de aan elkaar te verbinden draden in overeenkomstige posities moeten liggen. Deze methode heeft o.m. het voordeel dat na het wikkelen de mogelijkheid bestaat de wikkeling op sluiting tussen de parallelle draadjes te controleren.

In de afgelopen jaren is door ons een grote ervaring opgedaan met de verwerking van de rechthoekige kabel. De verschillende mogelijkheden zijn systematisch onderzocht, waarbij enige, deels zeer eenvoudige, hulpgereedschappen zijn ontwikkeld, die toch onmisbaar zijn om tot resultaten te komen, die men eerst voor onbereikbaar hield.

Voor de ontwerper betekent de rechthoekige kabel een aanzienlijke uitbreiding van de mogelijkheden

TABEL I. Vergelijking van wikkeling-typen

	Spoolenwikkeling	Lagenwikkeling*	
opbouw	op elkaar gestapelde, in radiale richting gewikkelde schijven.	enige in axiale richting op en neer gewikkelde lagen.	één laag van vele parallelle draden (wisselwikkeling).
afsteuning	eenvoudig d.m.v. blokjes over de volle speelbreedte.	per laag d.m.v. steuncylinders, uitgezaagd volgens spoed.	d.m.v. blokjes over de volle breedte, verlopend volgens spoed.
verhouding draadafmetingen	platte draden	dikke draden, soms zelfs hoogkant gewikkeld	platte draden
vulfactor	goed	voldoende	zeer goed
bewerkelijkheid	tamelijk groot: spoelen keren, bochten zetten.	gering: lagen snel te wikkelen, koelspleten d.m.v. spieën.	normaal: weinig windingen, echter veel verwisselen.
spanningsregeling	aparte regelwikkeling	één of meer regellagen	aparte regelwikkeling
toepassingsgebied stromen	lage stromen (40 - 400 A)	tamelijk hoge stromen (100 - 2000 A)	zeer hoge stromen (500 - 5000 A)
toepassingsgebied spanningen	hoge spanningen (100 - 400 kV)	niet te hoge spanningen (7,2 - 72,5 kV)	lage spanningen (3,6 - 36 kV)
toepassingsgebied vermogens	8.000 - 300.000 kVA (schakeling ster)	1.000 - 30.000 kVA (schakeling ster of driehoek)	5.000 - 300.000 kVA schakeling driehoek

* De bijzondere uitvoeringsvorm van de lagenwikkeling voor hoge spanningen is in deze tabel niet opgenomen. Zie hiervoor hoofdstuk 3.

tot vormgeving van wikkelingen. De grenzen van het toepassingsbereik van de verschillende wikkelingstypen zijn verruimd, waardoor in vele gevallen ontwerpen konden worden verkregen, die beter dan

tot dusver zijn aangepast aan de moderne eisen als lage verliezen en stevige wikkelingsopbouw, gecombineerd met korte doorlooptijden in de fabriek.