Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 39 (1948)
Heft: 3

Artikel: Beitrag zum Entwurf von Hochspannungsmaschinen
Autor: Dick, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057934

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

protection, l'article 13 de l'Ordonnance mentionne les gaines de plomb et les armures des câbles à basse tension. On a déjà souvent demandé à l'Inspectorat si cela ne constituait pas une dérogation au principe selon lequel les circuits à basse tension et les parties connectées à la terre de protection doivent être complètement séparés, lorsque, dans un réseau avec mise au neutre des installations intérieures chez les consommateurs, les mêmes gaines de plomb sont également reliées au neutre, dans les bâtiments alimentés. Cela est vrai, mais les câbles sous plomb peuvent néanmoins être reliés à la terre de protection dans les postes de transformation et au neutre du réseau dans les bâtiments des abonnés, car les gaines des câbles constituent en général une excellente électrode de terre, le long de laquelle s'amortissent rapidement les potentiels qui pourraient se présenter à la terre de protection d'un poste de transformation. L'Inspectorat des installations à courant fort n'a encore jamais connu de cas où un potentiel à la terre de protection d'un poste de transformation ait été transmis, par les gaines de plomb des câbles souterrains, à des installations intérieures, même lorsque les câbles et leurs armures y étaient reliés au neutre. Une dérogation à cette règle se justifie tout au plus dans des exploitations industrielles ou analogues, où le tableau de distribution à basse tension se trouve dans un local complètement séparé de celui de la haute tension, mais peu éloigné, et où la partie métallique du tableau, ainsi que ses appareils, sont reliés au neutre mis à la terre. Dans ces cas les câbles à basse tension, dont les gaines de plomb sont raccordées à la terre de protection au poste de transformation adjacent ou très proche, doivent être isolées, au point de distribution à basse tension, des boîtes d'extrémité et du tableau métallique mis au neutre, par du ruban goudronné ou autre, et seules leurs boîtes d'extrémité seront raccordées au neutre mis à la terre.

6. Conclusions

Dans ce qui précède, nous nous sommes bornés avant tout aux questions générales de mise à la terre, qui se présentent pour la construction de postes de transformation et d'installations de distribution. Dans les grandes usines génératrices et les importantes sous-stations à haute tension, d'autres problèmes particuliers de mise à la terre peuvent se poser. L'Inspectorat des installations à courant fort est volontiers prêt à collaborer aux décisions à prendre au sujet des mises à la terre nécessaires dans ces cas.

Beitrag zum Entwurf von Hochstrommaschinen

Von *E. Dick*, Gümligen

621.313.2

Der vorliegende Aufsatz stellt einen Beitrag zum Entwurf von vielpoligen Hochstrommaschinen grosser Leistung dar. Der Autor behandelt besonders die Probleme, die sich auf die Kommutierung bei gleichzeitig höchster Ausnützung des aktiven Materiales beziehen. Die Ueberbeanspruchung der dem Netzanschlusspunkt nächstgelegenen Bürsten kann beseitigt werden, wenn das System der Sammelringe aufgegeben und der die Unsymmetrie hervorrufende Netzanschlusspunkt ausserhalb der Maschine derart angeordnet wird, dass dieser zentral zu den Anschlusspunkten der Bürstenachsenzweige zu liegen kommt.

Eine weitere nicht einwandfreie Schaltungsweise betrifft die übliche gegenläufige Serieschaltung der Wendepolwicklungen. Theoretisch einwandfrei wirkt die Einrichtung nur dann, wenn die Ankerwicklung ganz symmetrisch belastet ist. Treten aber Ungleichheiten auf, indem die Ankerstromzweige Ströme verschiedener Stärke führen, können die gleich stark erregten Wendefelder die verschieden grossen Gegenfelder des Ankers zum Teil nicht mehr ausgleichen, was an bestimmten Bürsten Ueber- bzw. Unterkommutierung verursachen kann. Dieser Nachteil wird durch die im Aufsatz beschriebene Sektorenschaltung der Wendepol- und Kompensationswicklung beseitigt. Ausserdem ermöglicht die Sektorenschaltung, dass günstige, leicht bearbeitbare Leiterbänder für die Herstellung der Wicklungen verwendet werden können.

L'auteur traite des projets de machines multipolaires à forte intensité de grande puissance, notamment des problèmes que soulève la commutation lorsqu'il s'agit de tirer le maximum de rendement des matières actives. Le surcroît de sollicitation des balais les plus proches du point de raccordement au réseau peut être évité en renonçant au système des bagues collectrices et en disposant en dehors de la machine le point de raccordement au réseau qui provoque l'asymétrie, de telle manière que ce point soit situé centralement entre les points de raccordement des dérivations aux axes des balais.

Un autre couplage peu satisfaisant est celui qui consiste à coupler en série et en opposition les enroulements des pôles de commutation. En théorie, ce dispositif n'est parfait que si l'enroulement de l'induit est chargé d'une manière tout à fait symétrique. Dès que des inégalités se présentent, c'est-à-dire que des courants d'intensités différentes parcourent les voies d'enroulement, les champs de commutation ne peuvent plus compenser individuellement les champs antagonistes de l'induit, dont les intensités sont différentes, ce qui provoque une commutation trop forte ou trop faible dans certaines rangées de balais. Cet inconvénient est supprimé par le couplage à secteurs des enroulements des pôles de commutation et de compensation, décrit dans cet article. Ce couplage permet en outre d'utiliser des rubans conducteurs, qui facilitent la confection des bobinages.

Einleitung

Bei Hochstrommaschinen bildet die Kommutierung wohl die grössten Schwierigkeiten. Diese sind auf die grossen Stromstärken pro Ankerzweig zurückzuführen, die in den kurzgeschlossenen Ankerwindungen auftreten und kommutiert werden müssen. Bedenkt man ferner, dass Maschinen grosser Leistung eine der Polzahl entsprechende Zahl von Ankerstromzweigen aufweisen, die, um eine gleichmässige Stromverteilung auf die gleichnamigen Bürstenachsen zu erzielen, alle vom Zweigstrom gleicher Stärke durchflossen sein sollten, so erkennt man die Schwierigkeiten, die sich zur Erreichung dieses Idealzustandes ergeben. Ungleichheiten in der Herstellung der Maschine, als auch im aktiven Material sind stets im kleinern und grössern Mass vorhanden, z. B. Ungenauigkeiten der Nutteilung des Ankers, der Lamellenteilung des Kollektors, der Polteilung des Gehäuses, der Teilung der Bürstenachsen, allenfalls ungleicher Luftabstand, bzw. ex-

zentrische Lagerung des Ankers zur Polbohrung usw. Hinzu kommen noch Kontaktfehler in den Lötstellen der Ankerwicklung, den Aequipotentialverbindungen, den Anschlüssen an die Kollektorlamellen, der Wendepolwicklung und der Sammelschienen, die einen ungünstigen Einfluss auf die Kommutierung ausüben können. Eine grosse Rolle spielt der Uebergangswiderstand zwischen Kohlenauflagefläche und den Kollektorlamellen, der unter Umständen sehr verschieden ausfallen kann. Dieses Thema soll später eingehender behandelt werden. Wohl das wichtigste Organ der Hochstrommaschine ist der Kollektor. Ist dieser mangelhaft konstruiert oder in der Werkstatt nicht sorgfältig ausgeführt, so kann niemals eine einwandfreie Kommutation zustande kommen. Erste Bedingung ist daher ein fester, durch die Zentrifugalkraft und Wärmeausdehnung unbeeinflusster, genau rund laufender Kollektor.

Es sind wie gesagt viele Quellen vorhanden, die im Betrieb zu unangenehmen Störungen Anlass geben können. Verantwortlich für die erwähnten nachteiligen Folgen sind entweder die Konstrukteure, das Werkstattpersonal oder beide Gruppen zusammen. Doch die grösste Verantwortung trägt der Berechner, denn dieser gestaltet und bestimmt die Grössen der elektrisch und magnetisch beanspruchten Teile auf Grund langjähriger Erfahrungen. Allerdings muss betont werden, dass das Objekt vorerst gründlich mit dem projektierenden Ingenieur auf Ausführbarkeit besprochen werden muss, damit eine zufriedenstellende Lösung zustande kommt.

Bestimmung der Hauptdaten

Bei Hochstrommaschinen ist vor allem die Art der Ankerwicklung ausschlaggebend. Es bestehen drei Ausführungsmöglichkeiten:

1. die gewöhnliche Schleifenwicklung mit $a = p$
2. die Arnoldsche Reihenparallelschaltung mit $a = p$ und $a = 2p$
3. die Schleifenwicklung mit $a = 2p$.

(Es bedeuten: $2a$ die Zahl der parallelen Ankerstromzweige und $2p$ die Polzahl.)

Alle drei Arten haben sich in der Praxis bewährt, solang die Ansprüche nicht zu hoch gestellt wurden. Da die Schleifenwicklung mit $a = 2p$ im Vergleich zu den beiden andern Wicklungsarten gewisse Vorteile in sich schliesst, soll sich im folgenden die Untersuchung nur auf diese Wicklungsart erstrecken.

Die Gleichung $a = 2p$ besagt, dass die Zahl der Stromzweigpaare gleich der Polzahl der Maschine sein soll. Ist z. B. $p = 1$, so bestehen 4 Ankerstromzweige. Sie verteilen sich bei gerader Kollektorlamellenzahl auf zwei voneinander getrennte Wicklungen. Die Ankerwicklung ist demnach zweifach geschlossen, dagegen ist sie bei ungerader Lamellenzahl einfach geschlossen (Fig. 1).

In Fig. 2 ist die Ankerwicklung einer vierpoligen Maschine dargestellt. Interessant ist, dass zwei getrennte Wicklungen vorhanden sind, die durch Mordeyverbindungen in eine einfach geschlossene Wicklung umgewandelt werden. Mordeyverbindungen sind demnach nötig, um die beiden Wicklungen miteinander zu verketten, was aber nur bei gerader Zahl der Polpaare durchführbar ist, wenn sich der Wert K/p als ungerade Zahl ergibt.

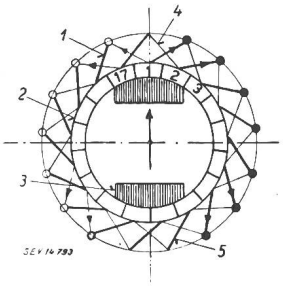

Fig. 1
Einfach geschlossene Ankerwicklung

Polpaare $p = 1$, Stromzweigpaare $a = 2$, Kollektorschritt $y_K = 2$, Lamellenzahl $K = 17$, Bürstenbedeckung $= 3\,\tau_K$ (τ_K Kollektorteilung), *1* Ankerwicklung, *2* Kollektor, *3* Bürsten, *4* eine Kurzschlußspule, *5* zwei Kurzschlußspulen.

Anker mit zwei getrennten Wicklungen ergeben ungünstigere Kommutierung als solche mit einfach geschlossenen Wicklungen. Deshalb ist es angezeigt, Maschinen mit ungerader Polpaarzahl zu bilden. Aus den schematischen Fig. 1 und 2 gehen die Bedingungen klar hervor, die beachtet werden sollten. Sie lauten:

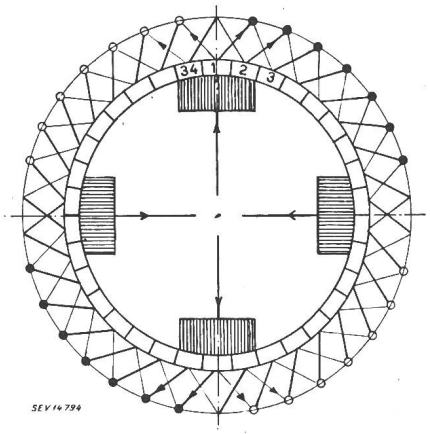

Fig. 2
Zweifach geschlossene Ankerwicklung
$p = 2$, $a = 2p$, $y_K = 2$, $K = 34$, $K/p = 17$,
Bürstenbedeckung $= 3\,\tau_K$,
(weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1).

Bei Hochstrommaschinen mit $a = 2p$ (Kollektorschritt $y_K = 2$) sollen

1. die Lamellenzahl	K	ungerade sein,
2. die Zahl der Polpaare	p	ungerade sein,
3. die Zahl der Lamellen pro Polpaar	K/p	ungerade sein.

Es taucht nun die Frage auf, wie gross der Zweigstrom I_a bemessen werden darf. Die Bestimmung dieser Grösse hängt in erster Linie von den Betriebsbedingungen ab. Wenn verlangt wird, dass die Maschine auch bei halber Nennspannung $U/2$ mit dem Vollstrom I belastet laufen muss, hat die Wahl der Grösse I_a sehr vorsichtig zu geschehen, denn die Ankerrückwirkung, die sich bei Wendepolmaschinen ausserordentlich stark entwickeln kann, verursacht eine entsprechend starke Verzerrung des Wendefeldes, bzw. eine Verschlechterung der Kommutierung. Für diesen Betriebsfall kommt nur die kompensierte Maschine in Frage. Bei Hochstrommaschinen ist aber ebenso die gleich-

mässige Belastungsverteilung auf die vielen Stromzweige der Ankerwicklung von grösster Wichtigkeit, denn nur unter dieser Voraussetzung werden die Ströme pro Abnahmestelle I/p gleich gross ausfallen und die Auflageflächen der Kohlebürsten gleich stark belastet, sofern alle Bürsten gut eingeschliffen sind. Eine ungleichmässige Stromverteilung auf Ankerwicklung, Kollektor, Bürsten und Bürstenachsen bewirkt ein sogenanntes Feuern der Bürsten. Da sich die kompensierte Maschine in der Praxis selbst bei schwersten Betriebsverhältnissen ausserordentlich gut bewährt hat, erscheint die Kompensation auch bei Hochstrommaschinen angebracht. Unter dieser Annahme kann für den Ankerzweigstrom I_a der 300fache Wert des Anker-Strombelages A ($I_a = 300\ A$) in die Formel (1) eingesetzt werden. Damit ist schon die Polpaarzahl bestimmt:

$$p = \frac{I}{4\,I_a} \tag{1}$$

Die Anker-Umfangsgeschwindigkeit v, der Strombelag A, die magnetische Induktion im Luftspalt B_l und der Polwinkel b/τ_p (b Polbreite, τ_p Polteilung) können als Erfahrungswerte angenommen werden, und es lassen sich folgende Hauptdaten der Hochstrommaschine berechnen:

Ankerdurchmesser: $$D = \frac{v \cdot 60 \cdot 100}{\pi\ n} \tag{2}$$

(n ist die Drehzahl des Ankers pro min)

Lamellenzahl des Kollektors: $$K = \frac{A\,\pi\,D\,a}{I} \tag{3}$$

K/p soll ungerade sein.

Leistung: $$P = 2\,v\,A\,\Phi\,p \cdot 10^{-9}\,\text{kW} \tag{4}$$

(Φ sei der Induktionsfluss)

Theoretische Pol- und Ankerlänge:

$$l = \frac{\Phi \cdot 10^8}{b\,B_L}\ \text{cm} \tag{5}$$

Effektive Ankerlänge: $l_A = l + \delta_v$ (δ_v bedeutet die totale Weite der im Anker vorgesehenen Ventilationskanäle).

Was die Zahl der Ankernuten Z betrifft, ist diese gleich der Lamellenzahl K. Da K/p ungerade ist, wird die Nutenzahl pro Pol $\frac{Z}{2p}$ und der Wicklungsschritt:

$$y = \frac{Z}{2\,p} - 0{,}5 \tag{6}$$

d. h. die Wicklung wird schwach gesehnt.

Bei der Bestimmung des Polwinkels b/τ_p ist zu beachten, dass es für diese Klasse von Maschinen günstig ist, die Pollücke reichlich gross zu machen, weil die Kommutierungszone breiter ausfällt als bei Normalmaschinen.

Es frägt sich nun, wie viele Kollektorlamellen überdeckt werden sollen, bzw. wie breit die Kohlebürste zu bemessen ist. Betrachtet man die in Fig. 1 dargestellte Ueberdeckung der Lamellen durch die obere Kohlebürste, so erkennt man, dass die im Kurzschluss befindliche Ankerspule an den Lamellen 17 und 2 angeschlossen ist, die dem einen Stromzweigpaar angehört, während sich die Lamelle 1 im zweiten Stromzweigpaar befindet. Der Kommutierungsvorgang der im Kurzschluss befindlichen Spule erstreckt sich im wesentlichen auf die äussern Lamellen 17 und 2. Die Bürstenbreite b_1 soll daher drei Lamellen überdecken. Demnach wird

$$b_1 = 3\,\tau_K = 3\,\frac{\pi\,D_K}{K} \tag{7}$$

(τ_K Kollektorteilung, D_K Kollektordurchmesser)

Die Breite des Wendepoles wird:

$$b_W = 3\,\frac{\pi\,D}{K} \tag{8}$$

Da die Ankerwicklung schwach gesehnt ist, gelangt eine Spulenseite nach der andern in das Wendefeld, was die Kommutierung günstig beeinflusst. Ein weiterer Vorteil der einfach geschlossenen Ankerwicklung wird durch die ungerade Nutenzahl pro Polpaar erzielt, weil in der Mittellinie der aufeinanderfolgenden Wendepole Zahn und Nute gegenüberliegen, wodurch die Stärke der Oberschwingungen des Wendefeldes vermindert wird.

Bei der einfach geschlossenen Ankerwicklung müssen ebenfalls Ausgleichringe vorhanden sein, welche Ungleichheiten in den Magnetfeldern und Strömen verhindern sollen. Die Zahl der aequipotentialen Punkte pro Ausgleichring entspricht der Polpaarzahl p. Je mehr Ausgleichringe angebracht werden, um so besser wird der Ausgleich, doch sollten die Anschlußstellen symmetrisch verteilt sein. Die Ausgleichringe sind womöglich in nächster Nähe des Kollektors mit direktem Anschluss an die Kollektorfahnen anzuordnen, womit auch erreicht wird, dass auf der Antriebseite Lötstellen in der Ankerwicklung vermieden werden können.

Damit sind die Hauptdaten für den Entwurf einer Hochstrommaschine bestimmt. Es sind aber noch andere Faktoren zu berücksichtigen, die bei der Berechnung einer Maschine gegebener Leistung und Drehzahl zur Sprache kommen sollen.

Berechnungsbeispiel

Es soll eine Hochstrommaschine mit folgenden Betriebsdaten entworfen werden:

Leistung	P	= 3850 kW,
Strom	I	= 11 000 A,
Spannung	U	= 150/350 V,
Drehzahl	n	= 250 U./min.

Erfahrungswerte

I_a	≈	300 A ($a = 2\,p$)
v	≈	40 m/s
A	≈	380 A/cm
B_l	≈	10 000 Gs
b/τ_p	≈	0,6

Nach den Gleichungen (1)...(8) lassen sich folgende Werte berechnen:

Hauptdaten

$$p = \frac{11\,000}{4 \cdot 300} = 9 \text{ Polpaare}$$

$$a = 2p = 18 \text{ Stromzweigpaare}$$

$$D = \frac{40 \cdot 60 \cdot 100}{\pi \cdot 250} = 300 \text{ cm}$$

$$K = \frac{380 \cdot \pi \cdot 300 \cdot 18}{11\,000} = 585 \text{ Lamellen}$$

Die Ankerwicklung ist einfach geschlossen, da p, K und K/p ungerade Zahlen sind ($K/p = 65$).

$$\Phi = \frac{3850 \cdot 10^9}{2 \cdot 40 \cdot 380 \cdot 9} = 14 \cdot 10^6 \text{ Mx}$$

$$\tau_p = \frac{300 \cdot \pi}{2 \cdot 9} = 52{,}3 \text{ cm}$$

$$b = 52{,}3 \cdot 0{,}6 = 31{,}4 \text{ cm}$$

(Ausführung: $b = 33$ cm, $b/\tau_p = 0{,}63$)

$$l = \frac{14 \cdot 10^6}{33 \cdot 10\,000} = 43 \text{ cm}$$

Anker

$$l_A = 43 + 7 = 50 \text{ cm}$$

(7 Ventilationskanäle zu je 1 cm)

$$y = \frac{585}{9 \cdot 2} - 0{,}5 = 32 \text{ (Fig. 3)}$$

(Nutenabmessungen siehe Fig. 4)

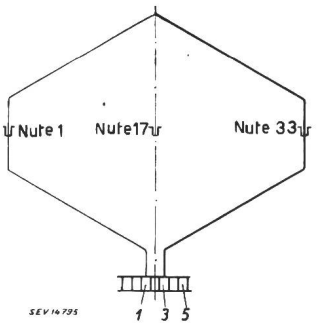

Fig. 3
Ankerspule
Wicklungsschritt $y = 32$,
Kollektorschritt $y_K = 2$.

$Z = 585$ Nuten

$S = 2$ Stäbe pro Nute

$q_s = 57$ mm² (Stabquerschnitt, Seil $100 \times 0{,}85$ ⌀)

$$\sigma = \frac{300}{57} \approx 5{,}3 \text{ A/mm}^2 \text{ (Stromdichte)}$$

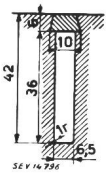

Fig. 4
Ankernute

$$l_m = \frac{300 \cdot \pi}{1{,}4 \cdot 9} + 50 + 8 = 133 \text{ cm}$$

(Mittlere Windungslänge des Stabes)

$$G_A = 1{,}33 \cdot 585 \cdot 2 \cdot 57 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \approx 800 \text{ kg}$$

(Gewicht des Ankerkupfers)

Kollektor

$D_K = 200$ cm

$$v_K = 40 \cdot \frac{200}{300} = 26{,}7 \text{ m/s}$$

$l_K = 2 \times 36$ cm

$K = 585$ ($K/p = 65$)

$\tau_K = 1{,}075$ cm (Isolation 1 mm)

Die 13 Ausgleichringe werden mit dem Kollektor durch je 9 Anschlüsse verbunden.

Verbindungen vom Ring I
zu den Lamellen 1, 66, 131, 196 usw.
Verbindungen vom Ring II
zu den Lamellen 6, 71, 136, 201 usw.
Verbindungen vom Ring III
zu den Lamellen 11, 76, 141, 206 usw.

. . . . . .

Ringquerschnitt: $3 \times 30 = 90$ mm²
Mittlerer Durchmesser: 180 cm
Cu-Gewicht der 13 Ausgleichsringe:

$$G_R = 13 \cdot 180 \cdot \pi \cdot 90 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \approx 80 \text{ kg (inkl. Anschlüsse)}$$

Bürsten

$$\text{Breite: } b_1 = 3 \cdot \frac{\pi \cdot 200}{585} = 3 \text{ cm}$$

Länge: 3 cm
Achsen pro Pol: 9
Bürsten pro Achse: 16
Auflagefläche: 1300 cm²

$$\text{Beanspruchung der Kohle: } \sigma_K = \frac{11000}{1300} = 8{,}5 \text{ A/cm}^2$$

Erregermaschine

Nun ist die Forderung gestellt, dass im Betrieb die Maschine auch bei stark reduzierter Spannung mit dem Nennstrom $I = 11\,000$ A belastet werden kann. Diese schwere Bedingung kann aus den früher angegebenen Gründen nur die kompensierte Maschine erfüllen, denn nur diese Klasse bietet Garantie für eine anstandslose, gute Kommutierung. Eine weitere Frage betrifft die Stabilität der Maschine. Selbsterregung ist nicht zu empfehlen, es sei denn, dass die Generatorspannung durch einen selbsttätigen Spannungsregler, der auf verschieden hohe Spannungen einstellbar wäre, geregelt wird. Trotzdem sich diese Methode in der Praxis gut bewährt hat (insbesondere auf dem Gebiete der Zugbeleuchtung, wo die Lichtmaschinen bei hoher Zuggeschwindigkeit ein stark geschwächtes Kraftfeld aufweisen), ist die Stabilität der Hochstrommaschine am besten durch Fremderregung gesichert. Im vorliegenden Falle ist eine genügend starke Erregermaschine zu empfehlen, die auch den Strombedarf des Werkes an Licht und Kraft decken kann. Da sich für Licht die Normalspannung von 220 V eignet, dagegen für die Kraftverteilung eine Spannung von 440 V erwünscht ist, kommt diese höhere Spannung in Frage. Die Erregermaschine müsste den Antrieb von einer vom Hochstromgenerator unabhängigen Kraftquelle erhalten, damit bei stillstehendem Hochstromgenerator die Stromversorgung des Werkes nicht in Mitleidenschaft gezogen wird. Eine direkte Kupplung der Erregermaschine mit der Hochstrommaschine wäre nicht zweckmässig.

Magnetgestell

Gehäusebohrung: $D + 2\tau_p C = 300 + 2 \cdot 52{,}3 \cdot 0{,}8 = 390$ cm
($C = 0{,}8$ für kompensierte Maschinen)

$\Phi_M = 1{,}2 \cdot 14 \cdot 10^6 = 16{,}8 \cdot 10^6$ Mx

$B_M = 13500$ Gs

$Q_M = \frac{16{,}8 \cdot 10^6}{13500} = 1250$ cm² (Ausführung: 26 × 50 cm)

$B_j = 10000$ Gs (Jochinduktion)

$\frac{1}{2} Q_j = \frac{16{,}8 \cdot 10^6}{10000 \cdot 2} = 840$ cm²

Gehäusebreite: 60 cm

Ausführung des Magnetgestelles nach Fig. 5.

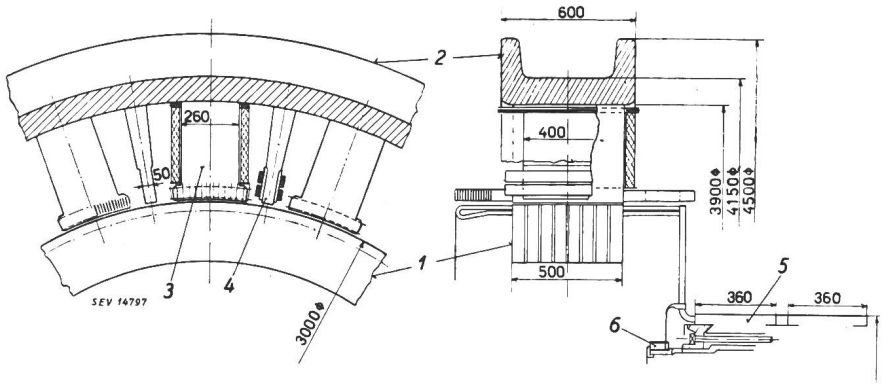

Fig. 5

Skizzen des Hochstromgenerators

Leistung $P = 3850$ kW, Strom $I = 11\,000$ A, Spannung $U = 150/350$ V, Drehzahl $n = 250$ U./min, *1* Anker, *2* Magnetgestell, *3* Hauptpol, *4* Wendepol, *5* Kollektor, *6* Ausgleichsringe.

Wendepole

$$b_W = 3 \cdot \frac{\pi \cdot 300}{10000 \cdot 2} \approx 5 \text{ cm}$$

$$l_W = 40 \text{ cm}$$

Die Durchflutung des Ankers Θ_A (auch Ampèrewindungen genannt) berechnet sich zu: [1])

$$\Theta_A = \frac{11000}{2 \cdot 18} \; 585 \; \frac{1}{2 \cdot 9} = 10000 \text{ A}$$

$\varphi = 1{,}34$ (Verhältnis der Wendefeld- und Kompensations-Durchflutung Θ_{W+K} zur Ankerdurchflutung Θ_A)

$\xi = 6$ (Kraftlinienzahl pro A und cm Stablänge)

$$\delta_w = \frac{10000\,(1{,}34-1)\,40}{0{,}8 \cdot 380 \cdot 6 \cdot 50} = 1{,}5 \text{ cm (Wendepol-Luftspalt)}$$

$$\Theta_{W+K} = 10000 \cdot 1{,}34 = 13400 \text{ A}$$

Die Ampèrewindungen Θ_{W+K} sind auf dem Wendepol und im Polschuh unterzubringen. Von der üblichen Schaltart der Wicklungen in zwei gegenläufige Zweige muss aus wickeltechnischen Gründen abgesehen werden, da Kupferquerschnitte von etwa 2000 mm² in Frage kämen. Eine Lösung, die eine überaus einfache Herstellung der Wicklungen ermöglicht, ist in der Fig. 6 dargestellt. Wie aus dieser hervorgeht, ist das übliche System der Sammelschiene verlassen worden, um die sich ergebenden ungleichen Stromstärken zwischen Bürstenachsen und Sammelschiene zu vermeiden [2]). Im Gegensatz dazu ist der Sammelpunkt der Bürstenachsen-Ströme ausserhalb der Maschine verlegt. Da die Maschine mit p Bürstenachsen gleicher Polarität versehen ist, von denen aus die nächstliegenden Wicklungen zu speisen sind, ergibt sich eine Gruppierung in 9 Sektoren, wobei der Strom pro Bürstenachse im Mittel $I/p = \frac{11\,000}{9} = 1220$ A beträgt. In jedem Sektor sind zwei Gruppen und zwar die Kompensationswicklung K, die Wendepolwicklung W und die Gegenwicklung G angeordnet, die alle vom Strom $I/2\,p$ durchflossen werden, der Teilstrom beträgt somit 610 A. In jedem Sektor ist die Stärke des Wendepolstromes gleich der Stärke des effektiven Bürstenachsenstromes. Sollten Differenzen in der Stärke der Bürstenachsenströme vorkommen, erfahren die Wendefelder in den Sektoren eine der Stärke des Bürstenachsenstromes entsprechende Aenderung der Induktion des Wendefeldes. Die Wendefelder erhalten somit eine individuelle Anpassung der erforderlichen Induktion. Um eine

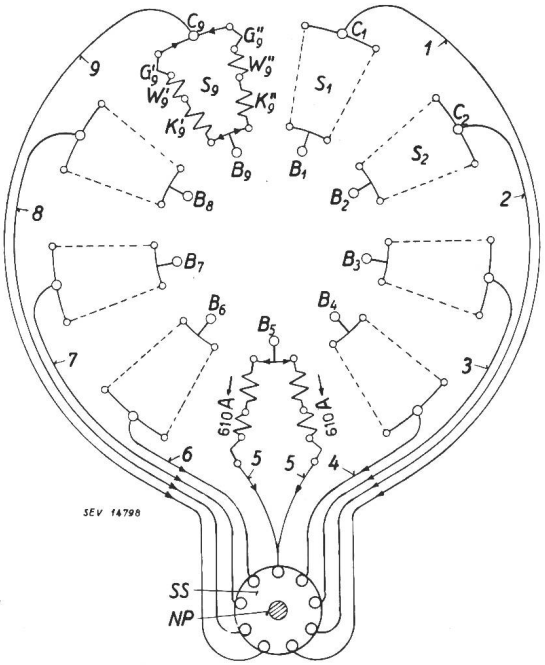

Fig. 6

Verbindungsschema der Wicklungen und Stromverteilung

$B_1 \ldots B_9$ Bürstenachsen gleicher Polarität
$K_1 \ldots K_9$ Kompensationswicklungen (je 14 Windungen pro Pol)
$W_1 \ldots W_9$ Wendepolwicklungen (je 8 Windungen pro Pol)
$G_1 \ldots G_9$ Gegenwicklungen (je 1 Windung pro Pol)
$S_1 \ldots S_9$ Sektoren, *1...9* Verbindungsleitungen
$C_1 \ldots C_2$ Anschlusspunkte der Sektoren, *SS* Sammelscheibe, *NP* Netzanschlusspunkt

---

[1]) siehe Bull. SEV Bd. 37(1946), Nr. 15, S. 435, Formel (7).

[2]) *Heinrich, Willy:* Das Bürstenproblem im Elektromaschinenbau. Diss. TH Breslau. München, 1929.

Auf den Seiten 158...160 dieses Buches verweist der Autor darauf, dass beim Sammelringsystem die dem Netzanschlusspunkt am nächsten liegenden Bürstenachsen überlastet werden.

gleiche Ausführung aller Leitungen *1...9* zu erhalten (Fig. 6), empfiehlt es sich, die Verbindungsstelle bei *C* zu öffnen und die Leitungen *1...4* und *6...9* doppelt zu verlegen, übereinstimmend mit denen des Sektors S_5. Es entstehen dann 18 Stromzweige, die sich in der Sammelscheibe vereinigen. Der Netzanschlusspunkt befindet sich zur Erzielung einer symmetrischen Belastung des Ankers im Mittelpunkt der Sammelscheibe. Die Leitungen sind über den rechten und linken Gehäuserücken derart zu verlegen, dass keine Lagerströme entstehen können. Die Ableitungen von den negativen Bürstenachsen zur negativen Sammelscheibe sind gleichartig anzuordnen und über den Bürstenbrückenkopf zu verlegen.

Die Windungszahlen der Kompensations- und Wendepolwicklungen erhält man aus:

$$N_{W+K} = \frac{13400}{610} = 22 \text{ Windungen.}$$

Nimmt man an, dass 85 % dieser Windungen zur Kompensation der Ankerrückwirkung verwendet werden sollen, erhält man:

$$N_K = \frac{10000 \cdot 0{,}85}{610} = 14 \text{ Windungen,}$$

$$N_W = 22 - 14 = 8 \text{ Windungen.}$$

Kompensation

Werden in einer Kompensationsnute je 2 und an den Polschuhflanken ebenfalls je 2 Stäbe angeordnet, so sind 12 Nuten pro Pol erforderlich. Die Ausführung der Nute erfolgt nach Fig. 7 mit einer Teilung der Kompensationsnuten in den Polschuhen

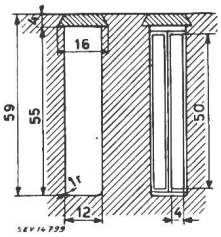

Fig. 7
Kompensationsnuten der Polschuhe

von 1 : 360. Die Schaltung der Kompensations-, Wendepol- und Gegenwicklung im Sektor 9 ist in Fig. 8 dargestellt. Bei einer Beanspruchung des Leiters von 3 A/mm² erhält man für die drei Wicklungen einen einheitlichen Leiterquerschnitt von 200 mm²; es ist dies ein Kupferband, das sich leicht bearbeiten lässt und sich besonders gut für die Herstellung der Wicklungen *W* und *K* eignet. Die Kompensationswicklung kann in einer Schablone angefertigt, um dann in die offenen Nuten eingelegt zu werden. Zur Befestigung dieser Wicklung in der Nute dient ein eiserner Verschlusskeil.

Gegenwicklung

Es ist bekannt, dass der innere Spannungsabfall der kompensierten Maschine sehr klein ist, was den Parallelbetrieb mit andern Maschinen gleicher Bauart sehr erschwert, wenn nicht verunmöglicht. Um den Spannungsabfall zu vergrössern, versieht man die Hauptpole mit einer Zusatzwicklung *G*. Es reicht aus, wenn die durch diese Gegenwicklung bewirkte Spannungssenkung etwa 5 % der Nenn-

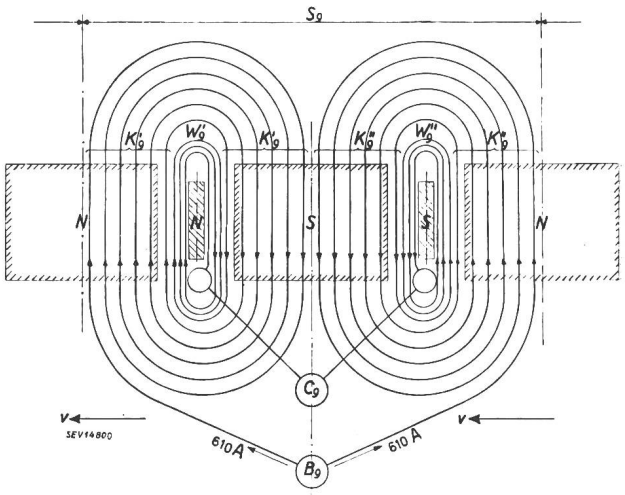

Fig. 8
Schaltung der Kompensations-, Wendepol- und Gegenwicklung des Sektors S_9
N Nordpole, *S* Südpole, *v* Drehsinn des Ankers
(weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6)

spannung *U* beträgt. Da die Berechnung der Erregung eine Durchflutung $\Theta_F = 12\,000$ A ergibt, betragen 5 % somit 600 A, was einer Windung pro Pol entspricht.

Spannungsabfälle

In den Wicklungen, Leitungen und Kohlebürsten treten folgende Spannungsabfälle auf:

Ankerwicklung: Mittlere Länge eines Ankerstabes: 1,33 m

Zahl der Stäbe in Serie pro Zweig: $S/2a = \frac{1170}{2 \cdot 18} = 32{,}5$

$$U_A = \frac{I}{2a} R_A = \frac{11000 \cdot 1{,}33 \cdot 32{,}5}{2 \cdot 18 \cdot 57 \cdot 50} = 4{,}6 \text{ V}$$

Kompensationswicklung: Mittlere Windungslänge: 2,3 m

$$U_K = \frac{I}{2p} R_K = \frac{11000 \cdot 2{,}3 \cdot 14}{2 \cdot 9 \cdot 200 \cdot 50} = 2 \text{ V}$$

Wendepolwicklung: Mittlere Länge einer Windung: 1,2 m

$$U_W = \frac{I}{2p} R_W = \frac{11000 \cdot 1{,}2 \cdot 8}{2 \cdot 9 \cdot 200 \cdot 50} = 0{,}6 \text{ V}$$

Gegenwicklung: Mittlere Länge einer Windung: 2 m

$$U_G = \frac{I}{2p} R_G = \frac{11000 \cdot 2}{2 \cdot 9 \cdot 200 \cdot 50} = 0{,}12 \text{ V}$$

Leitungen: Mittlere Länge: rund 10 m
$U_L = 1$ V (geschätzt)

Kohlebürsten: Elektrographitkohlen (Marke 8618), Auflagedruck 180 gr/cm²
$U_{K_0} = 3$ V (für zwei Bürsten in Serie)

Sämtliche Spannungsabfälle ergeben zusammen rund 11,3 V, oder rund 3,2 % der Nennspannung.

Felderregung

Der Generator wird fremd erregt.

Erregerspannung: $U_E = 440$ V

Durchflutung der Magnetspule: $\Theta_F = 12000$ A

Mittlere Länge einer Windung: $l_m = \frac{2(53+27)+3\cdot\pi}{100} = 1{,}7$ m

Leiterquerschnitt:

$$q_m = \frac{l_m\,\Theta_F\,2p}{U_E\,50} = \frac{1{,}7\cdot 12000\cdot 2\cdot 9}{440\cdot 50} = 17\ \text{mm}^2$$

Windungen pro Lage: 60
Lagen: 5
Windungen pro Spule: $N_E = 300$
Maximalstrom:

$$I_{E\,max} = \frac{U_E\,q_m\,50}{l_m\,N_E\,2p} = \frac{440\cdot 18\cdot 50}{1{,}7\cdot 300\cdot 2\cdot 9} = 43\ \text{A}$$

Normalstrom: $I_E = 12000/300 = 40$ A

Beanspruchung: $\sigma_m \approx 2{,}2$ A/mm²

Kupfergewichte

Ankerwicklung mit Ausgleichsringen: $G_A = 900$ kg

Kompensationswicklung:
$G_K = 2{,}3\cdot 14\cdot 200\cdot 18\cdot 9\cdot 10^{-3} = 1050$ kg

Wendepolwicklung:
$G_W = 1{,}2\cdot 8\cdot 200\cdot 18\cdot 9\cdot 10^{-3} = 310$ kg

Gegenwicklung:
$G_G = 2\cdot 1\cdot 200\cdot 18\cdot 9\cdot 10^{-3} = 70$ kg

Erregerwicklung:
$G_E = 1{,}7\cdot 300\cdot 18\cdot 18\cdot 9\cdot 10^{-3} = 1500$ kg

total: 3830 kg

Verluste

Kupferverluste:	11,3 · 11 000	= 140 kW
Erregerverluste:	440 · 40	= 18 kW
Bürstenreibungsverluste (Koeff. 0,15 δR):		= 19 kW
Eisen-, Lagerreibungs- und Ventilations-Verluste:		= 93 kW
total: P_v		= 270 kW

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad bei Vollbelastung berechnet sich zu:

$$\eta = \frac{3850}{3850+270} \approx 0{,}935$$

Kühlung

Um die Erwärmung der Maschine auf das zulässige Mass zu halten und unter Hinweis auf die ziemlich hohe Ausnützung des Kupfermaterials ist es angezeigt, ein Schleudergebläse (Zentrifugalventilator) vorzusehen. Zu diesem Zwecke wäre die Maschine zu kapseln. Es kann das System der Eigen- oder Fremdbelüftung verwendet werden. Im Lüftungskanal kann auch eine Umstellvorrichtung angebracht werden, die es ermöglicht, die abströmende Warmluft zur Heizung des Maschinenraumes auszunützen. Die zur Wärmeabfuhr erforderliche Frischluftmenge beträgt etwa 15 m³/s.

Kommutation

Die drei kritischen Spannungsgrössen, nämlich die Reaktanz-, Lamellen- und Bürstenspannung berechnen sich zu:

$$U_R = 2\cdot 43\cdot 40\cdot 380\cdot 6\cdot 9/18\cdot 10^{-6} = 4\ \text{V}$$

Bei Annahme eines Verkleinerungsfaktors $\gamma = 0{,}5$ erhält man den Streufeldfaktor [3]):

$$g = 0{,}27\ (0{,}96 - 0{,}63)\cdot 0{,}5 = 0{,}045$$

$$U_L = \frac{350\,(0{,}5-0{,}045)\cdot 4\cdot 9}{585\cdot 0{,}63} = 15{,}6\ \text{V}$$

$$U_B = 0{,}045\cdot 350\cdot 3^2\left(\frac{300}{200}\right)^2\cdot\frac{1}{(52{,}3-33)^2} = 0{,}86\ \text{V}$$

$$U_{B\,lim} = 3\cdot 0{,}5 = 1{,}5\ \text{V}$$

Das sind lauter Werte, die weit unter dem zulässigen Grenzwert liegen und die daher eine gewisse Sicherheit für funkenfreien Lauf der Bürsten bieten.

Der Uebergangswiderstand von der Kontaktfläche der Bürste zum Kollektor ist eine Funktion der Grösse der Kontaktfläche. Je kleiner diese ist, um so grösser ist der Uebergangswiderstand. Sind alle Bürsten gut eingeschliffen, wird auch der Uebergangswiderstand bei allen Bürsten gleicher Polarität die gleiche Grösse haben, so dass die Stromverteilung ideal wird. Das Bild ändert sich aber gründlich, wenn diese Voraussetzung nicht zutrifft. Am ungünstigsten liegen die Verhältnisse bei der Inbetriebsetzung von Hochstrommaschinen. Da in den meisten Fällen zu wenig Zeit für das Einlaufen der Bürsten zur Verfügung steht, wird unbekümmert um die Grösse der erreichten Lauffläche die Maschine gleich zu hoch belastet. In der relativ kleinen Lauffläche wird demzufolge das Bürstenmaterial überbeansprucht, wodurch die Leitfähigkeit der Kohle eine örtliche Aenderung erfährt. Es ist möglich, dass sich später bei günstigen Bedingungen die überbeanspruchten Laufflächen wieder glätten werden. Dagegen wird sich bei Fortdauer der unzulässigen Belastung die Ueberbeanspruchung des Kohlenmaterials weiter ausbreiten, so dass es zu einer befriedigenden Kommutierung nicht mehr kommen kann.

Um solche Vorkommnisse zu verhindern, sollte folgende Regel beachtet werden: In der Zeit der Inbetriebsetzung ist die Maschine nur mit einem Höchststrom zu belasten, der gleich ist dem durch die Verhältniszahl Lauffläche/Oberfläche verkleinerten Nennstrom I. Um die Verhältniszahl feststellen zu können, braucht man nur eine Kohle jeder Achse anzuschauen, es kann dann die Fläche der Glanzstelle zur ganzen Oberfläche leicht abgeschätzt werden. Je nach dem Zustand der Kontaktoberfläche, dem Bürstenmaterial, dem Bürstendruck, der Reibungszahl und der Kollektorgeschwindigkeit kann das vollständige Einlaufen der Bürsten bei täglich 18stündiger Laufdauer unter Umständen mehr als 3 Wochen in Anspruch nehmen.

[3]) Berechnung des Faktors g, siehe Bull. SEV Bd. 36 (1945), Nr. 15, S. 441 u. 442.

Nachtrag

Es ist nicht ausgeschlossen, dass ebenfalls bei den Einphasen-Bahnmotoren grosser Leistung Ueberströme an den in nächster Nähe des Netzanschlusspunktes befindlichen Kohlebürsten vorkommen, ist ja die Bauart der im Entwurf beschriebenen Hochstrommaschine mit derjenigen des Einphasen-Kollektormotors verwandt. Vielleicht könnte durch die Sektorenschaltung der Wendepol- und Kompensationswicklung die Güte der Stromverteilung auf die Bürstenachsen eine Erhöhung erfahren.

Adresse des Autors:
Emil Dick, Oberingenieur, Gümligen (BE).

«La consommation d'énergie électrique en Suisse dans les ménages, le commerce et l'artisanat, en 1944 et 1945»

Par le Secrétariat de l'UCS (*K. Jahn*)
Bull. ASE t. 39(1948), n° 1, p. 1...8

—

Rectification

Une erreur s'est glissée dans la figure 3, page 4. Conformément aux chiffres 3 et 4 du tableau II (page 2), la partie hâchurée de la dernière colonne à droite pour l'année 1945 doit s'arrêter à 586 GWh, au lieu de 685 et la partie blanche de la même colonne à 790 GWh, au lieu de 890.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

500-kV-Versuchsanlage für Höchstspannungsprobleme

[Nach: 500-kV Test Lines Energized to Begin Research Program. Electr. Wld. Bd. 128(1947), Nr. 15, S. 84...86, und: 500-kV Test Program Studies Higher Voltage Transmission. Electr. Wld. Bd. 128(1947), Nr. 19, S. 92...95, u. S. 178...179.]

621.315.1.027.7(73)

Die wirtschaftliche Entwicklung für die Uebertragung grösster Leistungen weist auf die Notwendigkeit hin, höhere Spannungen, als bisher gebräuchlich waren, zu verwenden [1]). Dabei wachsen aber die Anlagekosten in ausserordentlich hohem Masse, so dass sich eingehende Versuche über die bei hohen Spannungen absolut erforderlichen Isolationsniveaus aufdrängen. Aus diesem Grund wurde am 1. Oktober 1947 in Brillant, Ohio, in der Nähe des Tidd-Kraftwerkes der American Gas & Electric Co eine Grossversuchsanlage in Betrieb gesetzt, welche erlaubt, die Uebertragungsverhältnisse bei Spannungen von 265...500 kV experimentell zu untersuchen.

Die Veranstalter dieser Versuche sind der Ansicht, dass oberhalb einer Betriebsspannung von 230 kV der Nullpunkt aller Transformatoren fest geerdet sein muss, damit in erster Linie Ueberspannungsableiter für geringere Spannung eingebaut werden können. Wenn zugleich Schalter von sehr kurzer Unterbrechungszeit verwendet werden, so glaubt man, das Isolationsniveau im Verhältnis zur Betriebsspannung tiefer ansetzen zu können, als dies bei kleineren Spannungen der Fall ist. Dadurch würde eine nicht unbeträchtliche Kostenverringerung erzielt. Man rechnet mit ungefähr folgenden Werten:

Nennspannung bzw. höchste Betriebsspannung U_n kV	Isolationsniveau U_i kV	U_i / U_n
230	950	4,13
287	1050	3,65
345	1200	3,47
402	1400	3,47
460	1550	3,37

Daraus wird geschlossen, dass für 345 kV eine Isolatorenkette aus 20 Elementen und für 460 kV eine Isolatorenkette aus 24 Elementen genügend sein werden. Dadurch werden beträchtliche Einsparungen an den Leitungskosten ermöglicht. Zugleich werden die elektrischen Konstanten günstiger, während jedoch die Koronaverluste steigen. Die Untersuchung wird sich daher im besonderen auf die Messung der Koronaverluste bei den verschiedenen Witterungsbedingungen und bei verschiedener Anordnung der Leiter ausdehnen. Man rechnet, dass diese Verluste bei 345 kV ca. 0,4...0,6 kW/km, bei 400 kV ca. 0,5...0,8 kW/km und bei 460 kV ca. 0,8...1,1 kW/km betragen dürfen.

[1]) vgl. *Ailleret P.*: Position, sur le plan international, du choix des tensions supérieures à 220 kV. Bull. SEV Bd. 38(1947), Nr. 23, S. 719...722.

Beschreibung der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage wird durch drei Einphasentransformatoren von 5000 kVA Gruppenleistung gespeist. Diese weisen nur eine Oberspannungsdurchführung und fest geerdeten Nullpunkt auf. Beide Wicklungen sind mit Anzapfschalter ausgerüstet, so dass in spannungslosem Zustand das gewünschte Uebersetzungsverhältnis für eine Versuchsspannung von 245...500 kV eingestellt werden kann. Die im Dreieck geschaltete 69-kV-Unterspannungswicklung enthält dabei die groben Stufen, während die Feineinstellung an der Oberspannungswicklung erfolgt. Im ganzen sind 24 Stufen vorhanden.

Auf den Oberspannungsdurchführungen sitzen Messkasten, welche je 3 Wattmeter für die Messung der einzelnen Phasenverluste von drei Leitungen, 1 Voltmeter, sowie je 1 Registrieramperemeter mit 7,5 cm und 225 cm Papiergeschwindigkeit pro Stunde enthalten. Diese Instrumente können mittels Fernrohr von einem 20 m entfernten Beobachtungsturm aus abgelesen werden. Der Messbereich erstreckt sich von 100 W bis 60 kW.

An die Transformatoren ist eine Sammelschienenanlage von 150 × 65 m Grundfläche angeschlossen, die einen ölarmen G-E-Schalter des auf der 287-kV-Uebertragung verwendeten Typs enthält. Dieser weist bei 360 kV Sternspannung eine dreiphasige Abschaltleistung von 10 000 MVA auf. Bei der Abschaltbewegung wird gleichzeitig mit der Kontakt-

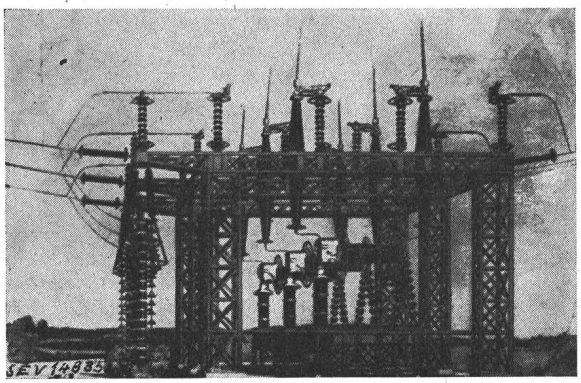

Fig. 1
500-kV-Schaltanlage mit General-Electric-Schaltern

trennung durch einen Kolben frisches Oel auf den Lichtbogen gespritzt und so die rasche Löschung erzwungen (Fig. 1).

Die Sammelschienen bestehen aus 50-mm-Hohlseil, aufgehängt an Ketten aus 26 Elementen, und tragen im Innern die Messwandler-Sekundärleitungen der Durchführungsstromwandler.

Ferner sind in der Sammelschienenanlage auch die Ueberspannungsableiter montiert.