Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 22 (1931)

Heft: 1

Artikel: Spannungsregulierung mit Transformatoren und unter Last schaltbaren Stufenschaltern

Autor: Grob, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058556

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

Spannungsregulierung mit Transformatoren und unter Last schaltbaren Stufenschaltern.

Referat von *W. Grob*, Oberingenieur, Baden.

621.314.214

Das an sich alte Prinzip der Spannungsregulierung mittels Transformatoren und Stufenschaltern — schon 1895 war dasselbe bekannt — hat in neuester Zeit auch bei höchsten Leistungen und Spannungen Anwendung gefunden. Der Autor zeigt, in welcher Weise dies geschehen ist und beschreibt die verschiedenen modernen Konstruktionen (hauptsächlich der Firma A.-G. Brown, Boveri & Co., Baden) und die einzelnen Teile der Regulierereinrichtung, die Regulierwicklung, den stromlos schaltenden Stufenschalter und den Funkenschalter. Ferner geht er auf die Verwendungsmöglichkeiten dieser Reguliertransformatoren ein.

In der Diskussion werden die Konstruktionen anderer schweizerischer Firmen (Maschinenfabrik Oerlikon, Ateliers de Sécheron) erwähnt und verschiedene Betriebsprobleme zur Sprache gebracht.

Le principe du réglage de la tension au moyen de transformateurs et d'interrupteurs à gradins, déjà ancien puisqu'il était connu en 1895, a été appliqué tout récemment aussi aux très fortes puissances et aux très hautes tensions. L'orateur expose comment ce progrès a été réalisé et décrit les différents types modernes des dispositifs de réglage, ceux de la maison Brown, Boveri et Cie en particulier, avec enroulement spécial, interrupteur à gradins passant à vide d'une touche à la suivante, interrupteur d'étincelles, etc. Il passe ensuite aux applications du transformateur de réglage.

Au cours de la discussion, différents orateurs présentent les solutions préconisées par d'autres maison suisses, Ateliers de construction Oerlikon, Ateliers de Sécheron, et soulèvent quelques problèmes d'exploitation.

I. Einleitung.

Die Spannungsregulierung mittels Transformatoren und unter Last schaltbaren Stufenschaltern ist im Grunde genommen schon längst bekannt.

Schon Gisbert Kapp beschreibt in seinem klassischen Buch: «Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom» vom Jahre *1895* den von ihm in England und unabhängig davon durch Stillwell in Amerika erfundenen Reguliertransformator mit Stufenschalter, den sog. *Booster*. Er verwendet ihn bereits in einem Kraftwerk zur individuellen Regulierung der abgehenden Leitungen und weist damals schon auf die Möglichkeit hin, den Stufenschalter mittels Relais und Motorsteuerung automatisch zu regulieren. Bei seinem Spannungserhöher verwendet er Stufenschalter in Form der bei Akkumulatorbatterien gebräuchlichen Zellenschalter, welche einen unterbrechungslosen Uebergang von einer Transformatorenanzapfung auf die andere gestattet. Kapp unterscheidet damals schon genau zwischen einem Reguliertransformator in Sparschaltung und Stufenschalter im Hauptstromkreis und zwischen einem Reguliertransformator in Form eines Serietransformators mit Regulierung auf der Erregerseite. Parallel dazu beschreibt Kapp in seinem erwähnten Buch ebenfalls schon die kontinuierliche Spannungsregelung mit Induktionsregler. In jener Zeit betrug die grösste Leistung, für die ein Drehstromtransformator gebaut werden konnte, ca. 200 kW.

Auch Arnold verweist in Band II seiner Wechselstromtechnik vom Jahre 1905 auf die Möglichkeit der Spannungsregulierung mittels Transformatoren mit Anzapfungen und unter Last schaltbaren Stufenschaltern und erwähnt in der 2. Auflage seines Buches von 1910 bereits Reguliertransformatoren mit getrennten Primär- und Sekundärwicklungen. Es waren also damals schon die beiden Hauptarten von Reguliertransformatoren bekannt.

Wenn wir trotzdem für die heutige Diskussionsversammlung das Thema der Spannungsregulierung mit Reguliertransformatoren gewählt haben, so geschah dies hauptsächlich aus dem Grunde, weil in der Zwischenzeit die Konstruktionen dieser Regulieraggregate entsprechend den zunehmenden Bedürfnissen der Betriebe bis zu den höchsten Leistungen und Spannungen ausgebaut wurden und weil im speziellen in den letzten Jahren ihre Verwendung auch in den grössten Ueberlandnetzen eine ausserordentliche Bedeutung erhalten hat.

In der Folge behandle ich vorerst den mechanischen und elektrischen Aufbau der Reguliertransformatoren, der Stufenschalter und der dazugehörigen Antriebe, um alsdann allgemein auf die verschiedenen Anwendungsgebiete derselben überzugehen.

II. Der Transformator und die Regulierwicklung.

Bei der Konstruktion der Reguliertransformatoren sind selbstredend alle Erfahrungen, wie sie bei den normalen Transformatoren ähnlicher Grösse im Laufe der Jahre gesammelt wurden, berücksichtigt. Grundsätzlich unterscheidet sich ja ein Reguliertransformator höchstens in der Anordnung der Regulierwicklung von einem gewöhnlichen mit Anzapfungen. Diese bedingt wegen des in den meisten Fällen grösseren Bereiches eine spezielle Anordnung, auf welche später eingetreten werden soll.

Die Reguliertransformatoren werden bei uns in der Schweiz entsprechend der europäischen Praxis meistens als *Kerntransformatoren* gebaut. Joche und Säulen sind aus legiertem bis hochlegiertem Blech und bei den grossen Einheiten mit *Querschlitzen* versehen, die eine intensive Kühlung auch der innersten Teile gewährleisten.

Dadurch sind *Eisenkrankheiten*, die eine Zeitlang die Betriebsleute zum Teil mit Recht beunruhigten, vermieden. Besondere Abschirmungen und Endbleche aus unmagnetischem Material verhüten die Entstehung zusätzlicher Verluste durch die Streuflüsse und bei Spannungsüberlastungen.

Die Wicklungen bestehen meistens aus kreisrunden und konzentrisch angeordneten Zylinderspulen; Scheibenwicklungen oder ovale Wicklungen benötigen bei grösseren Einheiten derart schwere Konstruktionen für ihre Abstützung, dass diese unwirtschaftlich werden, sofern sie wirklich die in einem grossen Netz auftretenden Kurzschlußströme

anstandslos aushalten sollen. Auch bei der Wicklung muss auf eine gute Kühlung aller Teile gesehen werden, wenn der Transformator eine genügende Lebensdauer erhalten soll. Dies wird erreicht durch spezielle Oelkanäle zwischen den Spulenlagen, derart, dass jede Windung auf mindestens zwei Seiten von Oel umspült und damit eine möglichst vollständige und gleichmässige Kühlung aller Wicklungsteile gewährleistet ist.

Bei *Kurzschluss* wird die Wicklung durch radiale und axiale Kräfte beansprucht. Die heute verwendeten Materialien lassen entsprechend der Untersuchung von Kübler immerhin schon Transformatoren bis zu Leistungen von 120 000 kVA zu, ohne dass die Radialbeanspruchungen zu hoch werden [1]). Etwas anderes ist es mit den *axialen Kurzschlusskräften*, besonders bei den Transformatoren mit Anzapfungen auf einer Wicklung. Doch auch hier ist es dem Konstrukteur gelungen, Wicklungsabstützungen und -anordnungen zu schaffen, die allen praktisch vorkommenden Beanspruchungen gewachsen sind, wobei vorzugsweise federnde Abstützungen benützt werden, die allgemein in *gleichmässig auf die Primär- und Sekundärwicklung* und in *individuell auf jede Wicklung* wirkende zu unterscheiden sind.

Für die *Durchführungsisolatoren* werden die allgemeinen, im Transformatorenbau üblichen, verwendet, bei höheren Spannungen entweder ölgefüllte Isolatoren oder Kondensatordurchführungen.

Auch die Durchbildung der *Oelkasten* ist gleich wie bei den Transformatoren ähnlicher Grösse, desgleichen die Spezialausführungen für *Aussenaufstellung* mit ihren üblichen Ausrüstungen, Oelkonservator und Sicherheitsventil.

Die *Kühlung* der Transformatoren erfolgt ebenfalls nach gleichen Grundsätzen wie bei normalen Leistungstransformatoren, und zwar unter Anwendung von *natürlicher Kühlung* durch Wellblechkasten oder angebaute Radiatoren bei den kleineren Einheiten und von *Wasserkühlung* mit Oelumlauf bei den höheren Leistungen. In neuerer Zeit werden auch Transformatoren bis zu den grössten Leistungen mit *künstlich ventilierten Kühlerbatterien* ausgerüstet, hauptsächlich in Fällen, in welchen kein Kühlwasser zur Verfügung steht oder wenn die Beschaffung von solchem zu teuer ist und damit die Wasserkühlung unwirtschaftlich wird.

Bei diesem Anlass sei auch die Berücksichtigung der Transportverhältnisse bei der Wahl der Transformatorentype erwähnt. Mit Ausnahme der extremsten Fälle wird es stets möglich sein, den komplett montierten Transformator in seinem eigenen Kasten auf einen Eisenbahntiefgangwagen zu verladen, sofern die angebauten Stufenschalter, die Kühlvorrichtung und die Isolatoren demontiert werden, in besonderen Fällen auch das Fahrgestell, der obere Kastenteil und das obere Joch. Dies bedingt jedoch, dass am Aufstellungsort des Transformators Zufahrtsgeleise und Abladevorrichtungen vorhanden sind oder dass die Zufahrtsstrassen zur betreffenden Transformatorenstation mit den entsprechenden Gewichten befahrbar sind. Trifft dies nicht zu, so muss der Transformator teilweise oder auch vollständig zerlegt spediert werden, was eine Neumontage an Ort und Stelle erheischt. Es darf ohne weiteres gesagt werden, dass in jedem Falle sich Mittel und Wege finden lassen, den Transport auch der grössten für uns in Betracht kommenden Einheiten durchzuführen, ohne dass man zur Aufteilung der Dreiphaseneinheiten in bei uns aus wirtschaftlichen Gründen nicht übliche Einphasentransformatoren schreitet.

Auch für den *elektrischen Aufbau* können die im allgemeinen Transformatorenbau gemachten Erfahrungen angewendet werden. Es betrifft dies in erster Linie die Wahl der *Induktion im Eisen*, die Wahl der *Kupferbeanspruchung* und diejenige der *Draht- und Wicklungsisolationen*. Es gelten auch hier die gleichen Grundsätze bezüglich der Erwärmung und Sprungwellenfestigkeit und die gleichen Mittel zur Verhütung zusätzlicher Verluste wie bei Leistungstransformatoren ähnlicher Grösse und Spannung.

Als neues Moment kommt hinzu, wie bereits erwähnt wurde, die Frage der *Anordnung der Regulierwicklung*, d. h. desjenigen Wicklungsteiles, der die Anzapfungen erhält. Es zeigt sich, dass man mit den bisherigen Dispositionen dieses Wicklungsteiles nicht mehr durchkommt, denn in den meisten Fällen ist der prozentuale Bereich desselben erheblich grösser als bei normalen Leistungstransformatoren. Rechnet man bei letztern mit Anzapfungen im Bereich von ± 5 %, so sind bei Reguliertransformatoren solche von ± 15 % und mehr heute keine Seltenheit. Wie bereits bei der Behandlung der Kurzschlussfestigkeit der Transformatoren erwähnt, ist diese in starkem Masse von der Unsymmetrie der Ampèrewindungsverteilung abhängig. Die Anordnung der Anzapfungen am Wicklungsende oder Sternpunkt oder in der Mitte der Säulenwicklung ist bei einem Regulierbereich von total über 8 bis 10 % wegen der Kurzschlussbeanspruchung meistens nicht möglich. Es muss also die Regulierwicklung entweder *über die ganze Säulenlänge* verteilt angeordnet werden, was zu zwei- oder mehrfach konzentrischer Anordnung führt, oder es muss zum Augsleich der Ampèrewindungen der Regulierwicklung eine sogenannte *Kompensations-* oder *Schubwicklung* gegenübergesetzt werden.

Fig. 1 zeigt die Anordnung einer Kompensationswicklung, die der Regulierwicklung gegenübergesetzt ist. In Fig. 2 ist die Regulierwicklung auf die ganze Säulenlänge verteilt. Beim Transformator in Sparschaltung entsteht dadurch eine zweifach konzentrische Wicklung, beim Transformator mit getrennten Wicklungen eine dreifach konzentrische. In Fig. 3 ist eine Wicklungsanordnung gezeigt, bei der die Regulierwicklung mit der zugehörigen Hauptwicklung untermischt ist. Es muss von Fall zu Fall untersucht werden, welcher Lösung der Vorzug gegeben werden muss.

[1]) Siehe Bull. SEV 1930, Nr. 14, S. 456.

Die Grösse der Stufenspannung und *die Anzahl der Stufen* hängt ab von den jeweiligen Betriebsbedingungen.

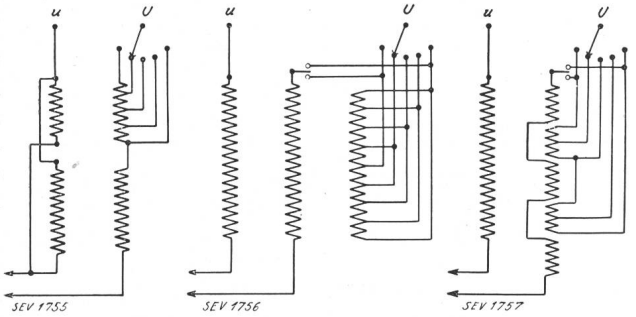

Fig. 1. Fig. 2. Fig. 3.
Prinzipielle Anordnungsmöglichkeiten der Regulierwicklung.

Im allgemeinen rechnet man bei Netztransformatoren mit 1 bis 4 % Stufenspannung, und zwar mit 1 bis 2 % bei den kleineren Einheiten, welche direkt auf das Niederspannungsnetz arbeiten. Versuche ergaben, dass Spannungssprünge bis 1,6 % bei der Regulierung durch kleine Ortstransformatoren für das direkt darangeschaltete Lichtnetz noch keine Unzulänglichkeiten ergaben. Bei grossen Reguliertransformatoren, also Einheiten, die für die Regulierung der Mittelspannung dienen, geht man bis zu einer Stufenspannung von 3 %.

Für die Stufenzahl rechnet man normalerweise mit 6 bis 10 Stufen. Berücksichtigt man noch, dass man durch einfache Mittel es in der Hand hat, die Regulierwicklung zu- oder gegenzuschalten, so kommt man bei einem Reguliertransformator für die Niederspannungsverteilung bei 1,2 % Stufenspannung und 10 Stufen bereits auf einen Regulierbereich von ± 12 = 24 %, was wohl in den weitaus meisten Fällen ausreichen dürfte. Bei einem Reguliertransformator für die Mittelspannung und für 3 % Stufenspannung und 6 Stufen ergeben sich ± 18 % = 36 % Regulierbereich. Auch dieser Betrag ist sehr reichlich. Die beiden genannten Werte dürfen jedoch keineswegs als Grenzwerte aufgefasst werden. Der Transformator lässt bei richtiger Anordnung der Regulierwicklung ohne weiteres noch bedeutend höhere Regulierbereiche zu und auch bei den Stufenschaltern kann die Anzahl der Stufen oder die Stufenspannung gesteigert werden. Es sind dies jedoch Werte, die sich im Laufe der Zeit als zweckmässig erwiesen und die bereits zu einer gewissen Normalisierung der Stufenschalter geführt haben.

Die Frage der *Schaltung des Reguliertransformators*, ob er in *Sparschaltung* oder *mit getrennten Wicklungen* ausgeführt werden soll, hängt ab von seinem Verwendungszwecke und den betreffenden Netzverhältnissen. Das gleiche gilt für die Verwendung von Mehrwicklungstransformatoren, welche Fragen anlässlich der Besprechung über die Anwendungsgebiete behandelt werden sollen. Es sei hier nur vermerkt, dass der Konstrukteur auch in der Lösung der speziellen Fragen, wie sie der Aufbau eines Mehrwicklungstransformators mit sich bringt, den Anforderungen der Praxis genügen konnte, wie die vielen Beispiele ausgeführter und sich im Betrieb bewährender Einheiten beweisen.

Bei diesem Anlasse sei kurz die Frage behandelt, ob für Spannungsregulierung in Netzen Reguliertransformatoren mit unter Last schaltbaren Stufenschaltern oder Induktionsregler zu wählen sind. Ihre Beantwortung hängt natürlich ab von den speziellen Betriebsbedingungen, die gestellt werden. Es kann jedoch gesagt werden, dass bei beiden Systemen die Konstruktionen heute bereits eine Vervollkommnung und Betriebssicherheit erreicht haben, dass erst eine genauere Wirtschaftlichkeitsrechnung den Vorzug der einen Lösung vor der andern ergibt. Für hohe Spannungen und grosse Leistungen ist jedoch der Reguliertransformator dem Induktionsregler wirtschaftlich überlegen, wie nachstehende Betrachtung ergibt und wie bereits auch die Praxis gezeigt hat.

Mit dem *Induktionsregler* ist eine *kontinuierliche Spannungs-* oder *cos φ-Regulierung* möglich. *Der Reguliertransformator* dagegen gestattet nur eine *stufenweise Regulierung.*

Induktionsregler werden heute gebaut für Spannungen bis maximal ca. 20 kV. Für Regulierungen in Leitungen höherer Spannung muss also der Induktionsregler mit einem Serie- und einem Erregertransformator kombiniert werden.

Reguliertransformatoren lassen sich dagegen ohne weiteres für Spannungen bis 150 kV und mehr ausführen, also *für direkten Einbau* in die betreffende Leitung.

Beim Einfach-Induktionsregler erfolgt stets eine Verdrehung des Spannungsvektors, die abhängig ist von der Grösse der Regulierspannung und von der Stellung des Rotors und die in der Nähe der Mittellage ein Maximum erreicht. Bei der Regulierung in Netzen ist diese Verdrehung unter Umständen unerwünscht und man muss in solchen Fällen die entsprechend teurern Doppel-Induktionsregler verwenden. Der Reguliertransformator zeigt wie der Doppel-Induktionsregler praktisch keine Verdrehung der primären und sekundären Spannungsvektoren. Die geringe Verschiebung, hervorgerufen durch den Spannungsabfall, hat, wie bei gewöhnlichen Netzkupplungs-Transformatoren, keinen Einfluss.

Es gibt jedoch Fälle, in welchen der Induktionsregler nicht durch einen Reguliertransformator ersetzt werden kann. Es sei dabei verwiesen auf die Verwendung bei Hochspannungsprüftransformatoren, bei denen die kontinuierliche Spannungsregulierung unbedingtes Erfordernis ist. Auch für Eichzwecke, z. B. für Zähler, Instrumente, Lampen etc. ist der Induktionsregler unbedingt notwendig; ferner für Fälle, in welchen es sich darum handelt, Vektorverdrehungen zu erzeugen.

In Tabelle I sind die technischen Daten zweier Beispiele zusammengestellt, die speziell bei der höhern Spannung und Leistung die wirtschaftliche Ueberlegenheit des Reguliertransformators über den Induktionsregler darlegen. In einem Falle ist

Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Induktionsreglern und Reguliertransformatoren. Tabelle I.

		Induktionsregler	Regulier-transformator	Induktionsregler	Reguliertransformator	
					Sparschaltung	Getr. Wicklung
Durchgangsleistung	kVA	1000		20000		
Eigenleistung	kVA	180		3600	3600	20 000
Spannung	kV	11		110		
Regulierbereich	%	± 15	± 10 · 1,5	± 15	± 6 · 2,5	
Anordnung		Direkt eingebaut	Direkt eingebaut	Mit Serie- u. Erregertr.	Direkt eingebaut	
Verluste: Eisen	kW	4,5	1,25	100	24	65
Kupfer	kW	6,2	3,8	150	50	190
Wirkungsgrad $^1/_1$, cos φ = 1	%	98,94	99,47	98,77	99,63	98,76
$^1/_2$, cos φ = 1	%	98,66	99,56	98,55	99,54	98,91
$^1/_1$, cos φ = 0,8	%	98,68	99,37	98,47	99,63	98,46
$^1/_2$, cos φ = 0,8	%	98,33	99,45	98,19	99,54	98,63
Leerlaufstrom	ca. %	5	0,8	6,5	0,97	4,5
Kurzschlußspannung	ca. %	2,7	0,8	5,7	1,8	11
Preis inklusive Oel	%	100	60	100	50	80
Platzbedarf (Grundfläche)	%	100	90	100	45	80

die Spannungsregulierung in einem 10-kV-Netz von 1000 kVA, in einem zweiten Falle eine solche eines 110-kV-Netzes mit 20 000 kVA Durchgangsleistung berechnet, und zwar je für ± 15 % = 30 % Regulierbereich.

Fig. 4 zeigt einen aus dem Jahre 1905 stammenden Reguliertransformator, welcher bereits einen an den Transformator angebauten *Stufenschalter* besitzt. Eine für die damalige Zeit sehr bemerkenswerte Einheit wurde 1912 im Löntschwerk aufgestellt. Es handelt sich um einen Reguliertransformator von 5250 kVA, der als Kupplungstransformator zwischen dem 50-kV- und dem 25-kV-Netz diente. Seine 25-kV-Wicklung war mit einer Regulierwicklung ausgerüstet für ± 12 %, deren Anzapfungen mittels eines Stufenschalters mit Fernsteuerung unter Last umschaltbar waren. Dieser Reguliertransformator war bis vor wenigen Jahren im Betrieb, bis das 25-kV-Netz auf 50 kV umgeschaltet wurde. — In der Folge gingen jedoch die Konstrukteure dazu über, Transformator und Stufenschalter getrennt aufzustellen (Fig. 5). Diese Forderung dürfte hauptsächlich vom Transformatorenkonstrukteur ausgegangen sein, der mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit keine an- oder eingebauten Apparate an seinem Transformator wünschte, hauptsächlich nicht bei Einheiten für höhere Spannungen. Heute sind diese Einwände jedoch dank der gesammelten Betriebserfahrungen nicht mehr gültig, so dass jetzt allgemein die Stufenschalter mittlerer Spannungen (ca. 37 kV) in den Transformator eingebaut, für höhere Spannungen angebaut werden (Fig. 6). Ein solcher

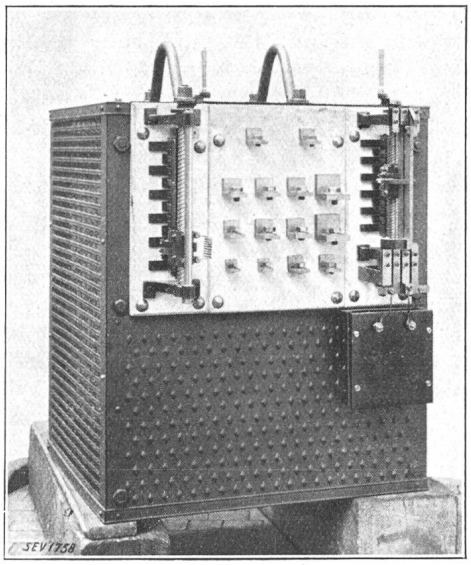

Fig. 4.
Einphasen-Reguliertransformator aus dem Jahre 1906 für einen Hochspannungsprüftransformator, 42,5 kVA, $\frac{100-550 \text{ V umschaltbar}}{0-370 \text{ V regulierbar mit 2 Stufenschaltern}}$, 25—100 Per/s.

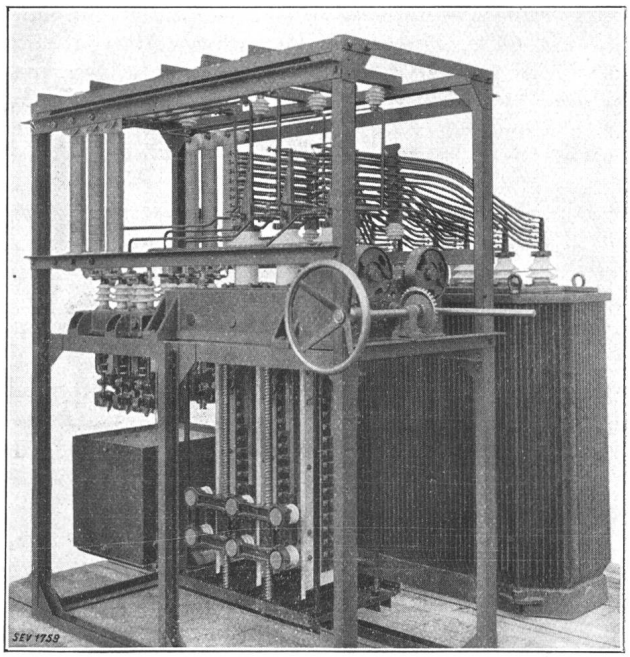

Fig. 5.
Reguliertransformator und Stufenschalter, 300 kVA durchgehend, 0—2875 V in ± 7 Stufen, verwendet mit einem Serietransformator in einem 20 kV Netz, Ausführung 1909.

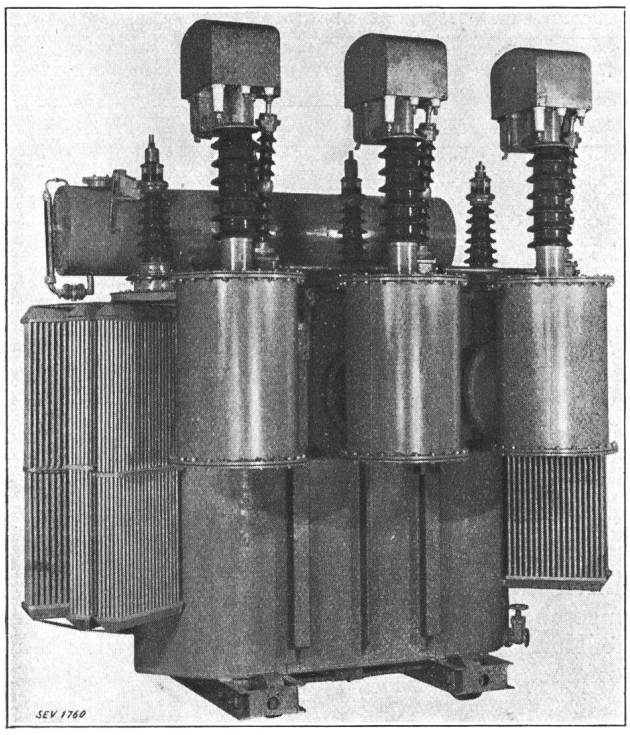

Fig. 6.
Dreiphasen-Reguliertransformator, 3800 kVA, 66 000/53 650 ± 6 × 900 V, Stern/Stern mit herausgeführtem Nullpunkt, 50 Per/s, mit angebautem Stufenschalter.

Transformator bildet dadurch viel mehr ein *einheitlich Ganzes.* Durch besondere Massnahmen kann auch dafür gesorgt werden, dass Transformator oder Stufenschalter einzeln für Revisionszwecke ausgebaut werden können.

III. Der Stufenschalter.

Die Stufenschalter für Reguliertransformatoren wurden, wie bereits eingangs erwähnt, aus dem *Zellenschalter* entwickelt. Der unterbrechungslose Uebergang von einer Stufe zur andern wird dadurch erreicht, dass zuerst eine Hilfsbürste auf den nächstfolgenden Stufenkontakt aufläuft. Die betreffende Wicklungsstufe ist in diesem Moment über einen Ohmschen oder induktiven Widerstand, der zwischen Hilfskontakt und Hauptkontakt liegt, überbrückt. Dieser Widerstand wird zweckmässig so gewählt, dass er den Normalstrom der betreffenden Wicklung führt. Beim Weiterdrehen des Antriebs läuft die Hauptbürste alsdann vom ersten Stufenkontakt ab auf den zweiten Kontakt. Beim Weiterschalten wiederholt sich der Vorgang in gleicher Weise. Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass bei dieser einfachen ursprünglichen Form des Stufenschalters beim Ablaufen der Hauptbürste ein Lichtbogen entsteht, dessen Grösse abhängig ist von der Stufenspannung, vom Stufenwiderstand und von der Schaltgeschwindigkeit. Für grössere Spannungen und Leistungen musste deshalb eine Konstruktion gefunden werden, die diese Lichtbogenbildung an den Hauptkontakten vermeidet. Es gelang dies durch Unterteilung des Stufenschalters in einen stromlos schaltenden Teil, die sogenannten Hauptkontakte, und in einen die betreffende Stufe abschaltenden Teil, den Funkenschalter. Für letzteren werden vorzugsweise Schalter mit leicht ersetzbaren Abbrennkontakten verwendet. Die Funkenschalter werden von einer Nockenwelle gesteuert, was ein sehr rasches Schalten gestattet, so dass der Abstand auf ein Minimum reduziert ist. Den Schaltvorgang einer derartigen Ausführung zeigt Fig. 7 in den 6 charakteristischen Stellungen, die beim Uebergang von einer Stufe auf die nächstfolgende sukzessiv durchlaufen wird. In der Betriebsstellung liegen die Hauptbürsten und die Hilfsbürsten bei demselben Kontakt auf. Die Haupt- und Hilfsfunkenschalter sind geschlossen. Nach Einleiten der Schaltbewegung öffnet zunächst der Funkenschalter der Hilfsbürste (Zwischenstellung *a*); dann läuft die Hilfsbürste stromlos ab und auf den nächsten Kontakt auf (Zwischenstellung *b*). Nun schliesst sich der Funkenschalter und die betreffende Stufe der Regulierwicklung ist durch den Widerstand überbrückt (Zwischenstellung *c*). Im weitern Verlauf der Schaltbewegung öffnet zuerst der Bürstenschalter und dann der Funkenschalter der Hauptbürste und damit ist die betreffende Stufe über den Stufenwiderstand eingeschaltet (Zwischenstellung *d*). Hierauf läuft die Hauptbürste auf den nächsten Kontakt auf (Zwischenstellung *e*) und nunmehr schliessen sich Funkenschalter und Bürstenschalter der Hauptbürste. Damit ist der

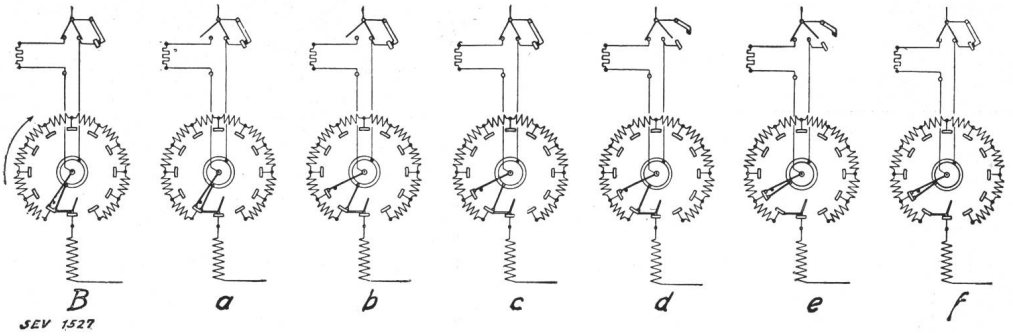

Fig. 7.
Schematische Darstellung der Arbeitsweise eines Stufenschalters.
B Betriebsstellung.
a Zwischenstellung I.
b Zwischenstellung II.
c Zwischenstellung III.
d Zwischenstellung IV.
e Zwischenstellung V.
f Betriebsstellung.

Schaltvorgang beendigt und der Regulierschalter in der zweiten Betriebsstellung.

Diese Art der Schaltung und Anordnung der Hauptkontakte und Funkenschalter hat u. a. folgende Vorteile:

Unter Oel finden nur mechanische Schaltvorgänge statt. Ein Verrussen des Transformatorenöles und die damit bedingte Verminderung seiner Durchschlagsfestigkeit ist dadurch absolut ausgeschlossen.

Die Hilfs- und Hauptbürsten müssen zuerst vollständig auf dem betreffenden Kontakt auflaufen, bevor eine Strombelastung stattfindet.

Die Distanzen zwischen den einzelnen Kontakten und die Grösse der Kontaktflächen selbst können genügend gross gewählt werden, so dass Ueberschläge bei allfällig auftretenden Ueberspannungen nicht vorkommen können.

Sämtliche Kontakte, an welchen Stromunterbrechungen stattfinden, sowie die Stufenwiderstände, sind ausserhalb des Transformators.

Die dem Abbrand unterworfenen Teile der Funkenschalter können leicht kontrolliert und wenn nötig ersetzt werden.

Beizufügen ist noch, dass das Umschalten der Regulierwicklung auf Zu- oder Gegenschaltung durch den in Fig. 7 ersichtlichen Umschalter erfolgt, der beim Durchlaufen der sogenannten Nullstellung mit der Hilfsbürste nach der einen oder andern Richtung umgelegt wird.

Eingehende Messungen ergaben, dass an den Haupt- und Hilfsbürsten auch nach 1,5 Millionen Schaltungen *keinerlei Abnützungen* konstatiert werden konnten, eine Verschlechterung des mit dem Transformatorenöl in Verbindung stehenden Oeles des Stufenschalters also nicht stattfindet. Die gleichen Versuche ergaben ferner, dass je nach Stufenspannung und Strom die Revision, resp. die *Auswechslung der Kontakte der Funkenschalter* erst nach ca. 80 000 bis 100 000 Schaltungen notwendig ist. Diese hohe Zahl wurde hauptsächlich auch erreicht durch die Verwendung von Ohmschen Widerständen, da diese gegenüber induktiven Widerständen beim Abschalten einen kleineren Lichtbogen, also einen kleineren Funkenschalterabbrand ergeben.

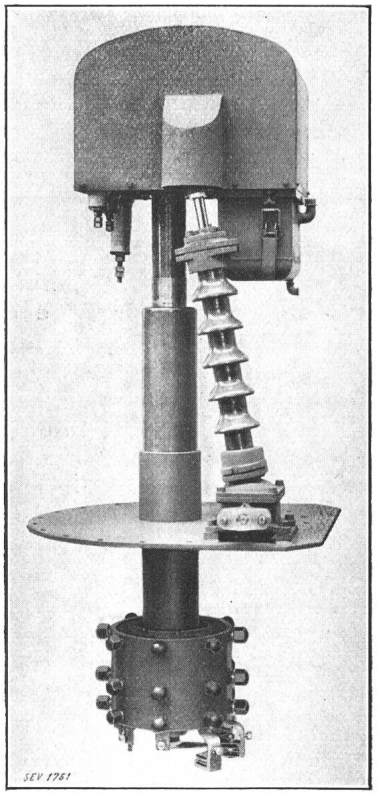

Fig. 8.
Einpoliger Stufenschalter, 50 kV, 400 A, Stufenzahl ± 8.

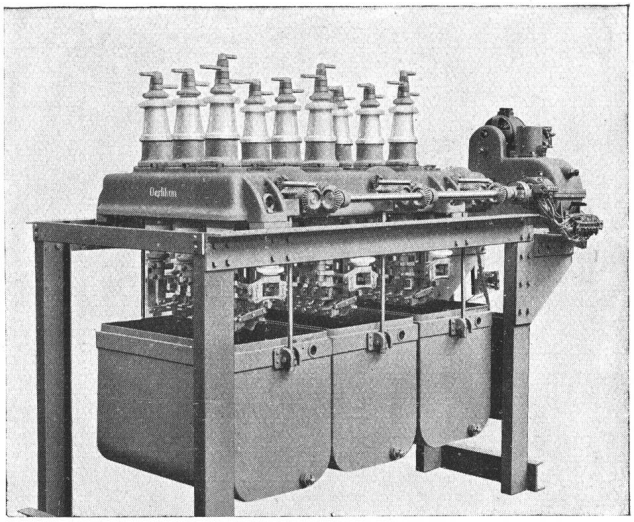

Fig. 9.
Dreiphasiger Stufenschalter in Oel, 28,5 kV, 300 A, ± 8 Stufen, mit Motorantrieb.

Weitere Stufenschalter-Konstruktionen verwenden an Stelle der Ohmschen Stufenwiderstände eine *Drosselspule*. Diese wird alsdann vorzugsweise als sogenannter *Spannungsteiler* benützt, wodurch bei gewissen Schaltungen die Anzahl der Anzapfungen im Transformator bei gleicher Stufenzahl auf die Hälfte reduziert werden kann.

In den letzten Jahren ist sowohl seitens der Betriebe als auch der Konstruktionsfirmen sehr intensiv an der Vervollkommnung der Stufenschalter gearbeitet worden, wie schon die zahlreichen Patentanmeldungen beweisen; aber nicht alle Lösungen dürften den Anforderungen des Betriebes, grösstmögliche Einfachheit in der Bedienung, absolute Sicherheit und leichte Zugänglichkeit der dem Verschleiss unterworfenen Teile und der Hauptkontakte, gerecht werden.

IV. Der Antrieb der Stufenschalter.

Es können folgende drei Hauptgruppen unterschieden werden:

1. Handantrieb,
2. Antrieb durch Fernsteuerung,
3. Automatische Steuerung.

Für den *Handantrieb* (Fig. 10) können die bei grösseren Oelschalterantrieben üblichen Konstruktionselemente benützt werden. Es hat sich dabei als vorteilhaft erwiesen, die Uebersetzung zwischen Kurbel und Stufenschalter so zu wählen, dass zum Schalten von einer Stufe auf die nächstfolgende eine volle Umdrehung der Handkurbel erforderlich ist und dass eine Drehung im Uhrzeigersinne stets eine Spannungserhöhung ergibt. Dabei wird das Drehmoment des Antriebsorganes meist mittels Kettengetriebe und Gelenkkupplung auf die Antriebswelle des Stufenschalters übertragen. Bei dem

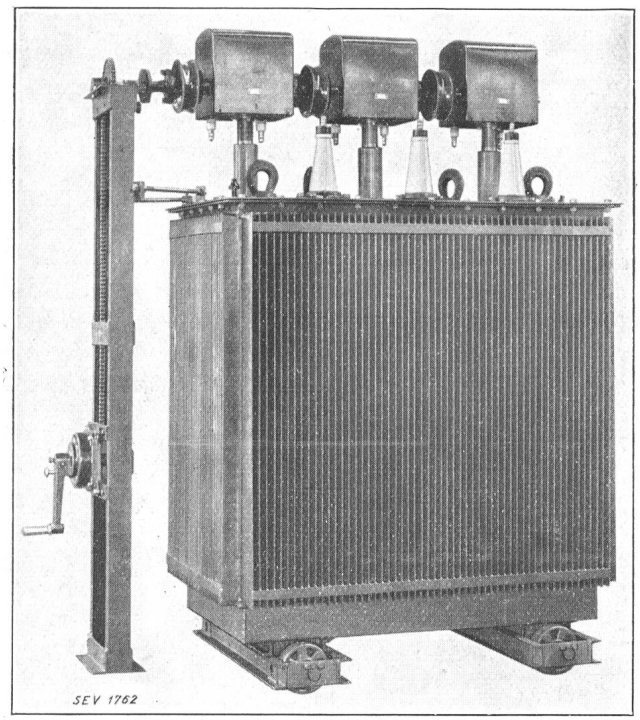

Fig. 10.
Dreipoliger Transformator in Sparschaltung, 4500 kVA durchgehend, 23 000 ± 6 × 400 V, 50 Per/s, mit eingebautem Stufenschalter für Handantrieb.

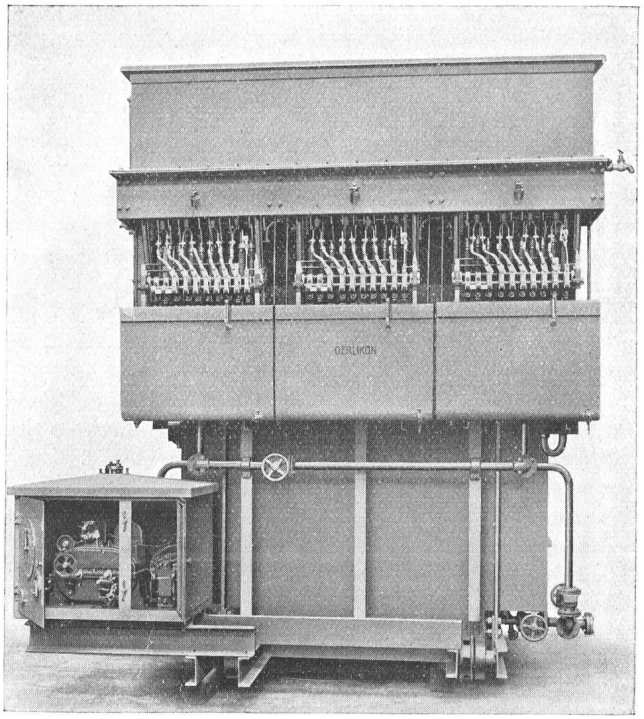

Fig. 11.
Dreipoliger Reguliertransformator, 8000 kVA, mit angebautem Stufenschalter, 16,5 kV, 300 A ± 10 Stufen, mit Motorantrieb.

in Fig. 10 abgebildeten Stufenschalter (10 bis 37 kV) sind die Antriebswellen der drei Stufenschalterpole unter sich mit der Antriebswelle durch Isolierkupplungen verbunden, während bei höheren Spannungen die drei Stufenschalterpole vorzugsweise mit Isolierstangen von einer gemeinschaftlichen Welle aus angetrieben werden, die mit der Welle des Antriebsständers durch eine Gelenkkupplung verbunden ist.

Jede Endstellung des Stufenschalters wird an der Kurbel durch eine fühlbare Raste markiert. Die Stellungen des Stufenschalters können an einer Anzeigescheibe am Antriebsständer abgelesen werden. Für die beiden Endstellungen des Stufenschalters sind im Antrieb feste Anschläge vorhanden, die ein Ueberdrehen in der betreffenden Richtung verhindern.

Die Wirkungsweise einer *Motorfernsteuerung* ist etwa folgende: Durch einen Kontaktgeber erhält eines von zwei Kontaktrelais Spannung, je nachdem die Spannung erhöht oder erniedrigt werden soll. Hierdurch schliessen die Kontakte des Relais den Motorstromkreis. Eine gegenseitige Verriegelung der beiden Kontaktrelais hat den Zweck, Fehlschaltungen zu vermeiden. Nach Vollendung einer Umdrehung wird das mechanisch gehaltene Kontaktrelais freigegeben und öffnet den Motorstromkreis. Ein Endschalter verhindert ein Schalten des Stufenschalters über die Endstufe hinaus. Die Einrichtung ist so getroffen, dass auch bei kurzzeitigem Schliessen des Kontaktgebers der Motorfernantrieb eine volle Schaltung von einer auf die nächste Stufe ausführen muss.

Auf dem Motorantrieb ist eine Stellungsanzeigevorrichtung aufgebaut, deren Betätigung von der Stufenschalterwelle aus erfolgt. Die einzelnen Stufenstellungen können dadurch im Kommandoraum an einer entsprechenden Anzeigevorrichtung abgelesen werden. Zur Kontrolle des Schaltvorganges von Stufe zu Stufe dienen Signallampen, die so gespeist werden können, dass sie aufleuchten oder erlöschen, wenn der Schalter eine Schaltbewegung vollzogen hat.

Der Stufenschalter kann auch *automatisch* in Abhängigkeit von der zu regulierenden Spannung oder von dem zu regulierenden $\cos \varphi$ gesteuert werden. Dies wird durch den Ersatz des Kontaktgebers durch ein spannungsempfindliches oder $\cos \varphi$ empfindliches Steuerrelais erreicht. Damit ist es z. B. möglich, eine ankommende veränderliche Spannung am Transformator oder in einem bestimmten Netzpunkt auf eine konstante Spannung einzuregulieren, oder unter gewissen Voraussetzungen die Phasenverschiebung der durchgehenden Leistung bei Kupplungstransformatoren auf einen bestimmten Wert automatisch zu regulieren. Um ein allzuhäufiges Ansprechen der Reguliereinrichtungen zu vermeiden, kann ein Zeitrelais zwischengeschaltet werden, das den Steuerstromkreis erst nach einer gewissen Zeit schliesst.

Beim Motorantrieb eines Stufenschalters rechnet man für den Uebergang von einer Stellung auf die nächste mit einer Zeitdauer von 0,5 bis 2 Sekunden. Der Stufenwiderstand ist nur während eines Bruchteiles dieser Zeit eingeschaltet. Da er

normalerweise für ca. 10 Sekunden Dauerbelastung bemessen wird, so kann also von einer vielfachen Sicherheit für denselben gesprochen werden. Es steht jedoch nichts im Wege, den Stufenwiderstand grösser, also für eine längere Belastungsdauer zu bemessen, nur kann alsdann wegen den grossen Dimensionen eine separate Aufstellung zur Bedingung werden.

Beim einfachen Motorantrieb ist es möglich, dass z. B. durch eine Störung im Hilfsstromkreis (Ausbleiben der Spannung) während eines Schaltvorganges der Stufenschalter auf einer Zwischenstellung stehen bleibt. Ist der Stufenwiderstand für Dauerbelastung bemessen, so hat dies keine weitern Folgen, als dass der Wärter, durch das Nichtfunktionieren des Stellungsanzeigers oder der Signallampe darauf aufmerksam gemacht, den Stufenschalter von Hand weiterzuschalten hat. Sind die Stufenwiderstände dagegen nur für Momentanbelastung vorgesehen, so würden sie bei einer solchen Störung verbrennen. Man hat sich hier so geholfen, dass das Hängenbleiben des Stufenschalters durch ein Hilfsrelais angezeigt und gleichzeitig die Hauptölschalter ausgeschaltet werden.

Eine weitere Störung kann hinzutreten, wenn die Spannung des Hilfsstromkreises soweit gesunken ist, dass der Steuermotor des Antriebes nicht mehr durchziehen würde. In diesem Fall muss schon die Einleitung einer Schaltbewegung verhindert werden, was durch Einfügen eines Minimal-Spannungsrelais in den Steuerstromkreis erreicht wird, das die Fernsteuerung unterbricht und gleichzeitig die Störung meldet.

Glücklicherweise sind jedoch Störungen in den Hilfsstromkreisen bei einer modernen Anlage selten, so dass die vorgenannten, für den Betrieb höchst unerwünschten Sperrungen oder Auslösungen nur äusserst selten zu gewärtigen sind. Um sie ganz zu umgehen, wurden sog. *Kraftspeicherantriebe* gebaut. Bei diesen wird zuerst durch einen ferngesteuerten Motor eine Feder gespannt, oder ein Gewicht gehoben, ähnlich wie es bei grossen Oelschalterantrieben schon angewendet wurde. Der Kraftspeicher besorgt alsdann den eigentlichen Schaltvorgang des Stufenschalters. Tritt also eine Störung im Hilfsstromkreis auf, so wird z. B. das Gewicht nicht vollständig gehoben und die Schaltung des Stufenschalters gar nicht eingeleitet. Ein Stehenbleiben des Stufenschalters auf einer Zwischenstellung ist damit vollständig ausgeschlossen. Auch solche Antriebe liegen bereits ausgeführt vor und haben sich bewährt.

Ausserdem ist es notwendig, die Stufenschalter gegen eine Betätigung bei Kurzschluss zu schützen, was besonders bei den automatischen Spannungssteuerungen nötig ist, da diese ja gerade bei sehr hoher Ueberlastung oder bei einem Kurzschluss zufolge der eintretenden Spannungsreduktion ansprechen würden. Aus diesem Grunde werden bei solchen Steuerungen Ueberstromschutzrelais eingebaut, die entsprechend ihrer Einstellung von einer bestimmten Stromstärke an die Steuerung sperren, indem sie den Steuerstromkreis unterbrechen. Die gleichen Relais werden auch zur Auslösung der Oelschalter benützt, wenn ein unzulässiger Ueberstrom oder ein Kurzschluss während einer Schaltbewegung eintritt. Für den Stufenschalter selbst ist bei richtiger Dimensionierung und Anordnung der Kontakte eine momentane Stromüberlastung oder ein Kurzschluss unschädlich, sofern er in diesem Moment nicht geschaltet wird.

Es ist möglich, zwei oder mehrere derartige Antriebe elektrisch zu kuppeln und die Reguliertransformatoren im Parellelbetrieb gleichzeitig mit einem Kontaktgeber zu steuern. In diesem Falle erhält z. B. jeder Stufenschalterantrieb ein Fallklappenrelais, das ein gemeinschaftliches Kontaktrelais betätigt. Dieses verhindert, dass durch den Kontaktgeber eine weitere Stufe geschaltet wird, bevor auch die übrigen Stufenschalter auf der zuerst gesteuerten Stufe angelangt sind. Dadurch wird vermieden, dass die Stufenschalter auseinander laufen, was für einen Parallelbetrieb selbstredend unzulässig wäre. In ähnlicher Weise wird vorgegangen bei der automatischen Steuerung mehrerer parallel geschalteter Reguliertransformatoren.

Arbeiten in einer grösseren Unterstation mehrere Reguliertransformatoren auf zwei getrennte Sammelschienensysteme mit verschiedener Spannungshaltung, so ist auch hier der Parallelbetrieb und die gleichzeitige Steuerung der betreffenden Transformatoren durchführbar, wenn die betreffenden Trenner der Sammelschienensysteme mit sogenannten Systemschaltern gekuppelt werden. Beim Schliessen der Trenner wird gleichzeitig dieser Systemschalter der betreffenden Einheit betätigt und damit der zugehörige Kontaktgeber des gewählten Systemes angeschlossen. Nachdem die Kontrolle am Stellungsgleichheitsanzeiger ergeben hat, dass die neu hinzuzuschaltende Einheit auf der gleichen Stufe steht wie die im Betrieb befindlichen Einheiten, kann mittels Oelschalter parallel geschaltet werden und die zwei oder mehr Einheiten alsdann in der bekannten Weise von einem beliebigen Kontaktgeber der betreffenden Systeme aus gemeinschaftlich gesteuert werden.

Von den *Sonderausführungen* von Stufenschaltern sind diejenigen für hohe Stromstärken und kleine Spannungen zu erwähnen, die als Stufenschalter in Luft ausgeführt werden können, wie Fig. 12 zeigt.

Bei Gleichrichteranlagen verwendet man häufig Reguliertransformatoren mit *phasenweiser Stufenschaltung* zur Regulierung der Gleichstromspannung. Die drei Stufenschalter werden hier nicht gleichzeitig betätigt; durch den Einbau von Einzahngetrieben zwischen den drei Stufenschaltern wird erreicht, dass sukzessive der Stufenschalter der ersten, dann der zweiten, dann der dritten und alsdann wieder der ersten Phase usw. betätigt wird. Man erhält dadurch eine dreimal feinere Regulierung der Gleichstromspannung als bei simultaner Schaltung aller Phasen. Bei Dreiphasen-Regulier-

transformatoren für Netze ist diese Schaltung unzulässig, da sie eine Unsymmetrie des Spannungsdreieckes ergibt.

Ferner sind die Stufenschalter für *Lokomotiv-Transformatoren* zur Regulierung der Motorspannung zu erwähnen. Auch hier verfügt man bereits über jahrelange Erfahrungen und Konstruktionen, die jedem Betriebsbedürfnis gerecht werden. Die bisherigen Ausführungen verwenden die Stufenschalter auf der Niederspannungsseite; neuerdings werden sie auch auf der Oberspannungsseite (15 kV) angewendet.

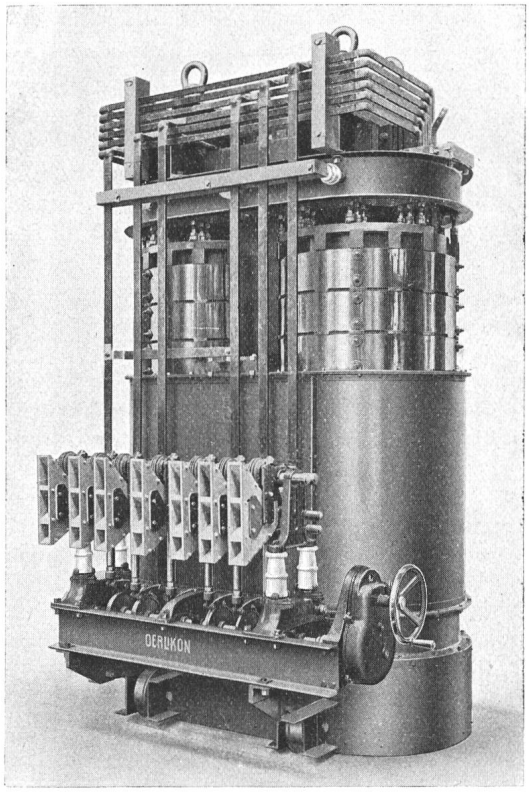

Fig. 12.
Einphasen-Ofentransformator mit Stufenschalter in Luft, 10 kV, 250 A ± 10 Stufen.

V. Anwendungen von Reguliertransformatoren.

Entsprechend ihrem Aufstellungsort können wir die Reguliertransformatoren in drei Hauptgruppen unterteilen:

1. Reguliertransformatoren für Kraftwerke;
2. Netzkupplungstransformatoren mit Stufenschaltern;
3. Spannungsregulierung mittels Reguliertransformatoren am Verbrauchsort.

Durch den Zusammenschluss der Netze hat die *Spannungsregulierung in den Kraftwerken* eine ganz besondere Bedeutung erhalten, hängt doch von ihr die Verteilung der Blindleistung ab. Will man z. B. in einem Kraftwerk aus Gründen der Wirtschaftlichkeit eine Unterteilung in separate Betriebe mit verschiedener Spannungshaltung vermeiden, so kann dies in einfacher Weise durch Aufstellung von Reguliertransformatoren geschehen. Dabei ist es sowohl möglich, die Haupttransformatoren mit Stufenschaltern auszurüsten oder bei Energieabgabe von einer Hochspannungssammelschiene aus besondere Regulieraggregate mit unter Last schaltbaren Stufenschaltern aufzustellen. Die Grösse des Regulierbereiches und die Höhe der einzelnen Stufenspannungen richtet sich nach den verlangten Grenzspannungen und ist von Fall zu Fall nach den betreffenden Verhältnissen zu bestimmen.

Soll von einem Werk aus ein besonderes Absatzgebiet z. B. ab den Niederspannungssammelschienen mit einer vom Hauptversorgungsgebiet unabhängigen Spannungshaltung beliefert werden, so werden hiefür ebenfalls vorteilhaft Reguliertransformatoren verwendet. Dies ist besonders in solchen Fällen gemacht worden, in denen ein Mittelspannungsnetz der näheren Umgebung des Kraftwerkes zu versorgen ist. Um bei einer solchen Anordnung die auftretenden Ueberspannungen des betreffenden Netzes von den Generatorsammelschienen fernzuhalten, werden vorteilhafterweise sogenannte 1 : 1 Transformatoren mit Spannungsregulierung auf der Primär- oder Sekundärseite benützt, d. h. Transformatoren mit getrennten Wicklungen. Transformatoren in Sparschaltung wären hier zwar bedeutend billiger, hätten aber wegen der direkten metallischen Kupplung des Netzes mit den Generatorsammelschienen für das Kraftwerk eine Reduktion der Betriebssicherheit zur Folge.

Auch für die *Eigenverbrauchsanlage* eines Kraftwerkes können Reguliertransformatoren gute Dienste leisten, indem sie die Konstanthaltung der Spannung, unabhängig von der Regulierung der Generatorspannung ermöglichen.

Ganz besonders aber wurden in den letzten Jahren die Reguliertransformatoren in den *Netzkupplungsstationen* verwendet. Sie bilden ein heute fast unentbehrliches Mittel für die Spannungsregulierung in den Kuppelstellen und für die damit zusammenhängende Blindlastverteilung zwischen den beiden Netzen, wenn z. B. in den betreffenden Kraftwerken die Spannung auf einem konstanten Wert gehalten wird. Im Bulletin 1930, Nr. 15, hat Grieb eingehend darauf hingewiesen, dass erst eine genaue Untersuchung an Hand der allgemeinen Spannungshaltung im Netz und unter Berücksichtigung der betreffenden Leitungsimpedanzen die Bestätigung ergibt, ob der auf Grund der Angaben für die Durchgangsleistung und die maximale Zusatzspannung entworfene Kupplungs-Reguliertransformator richtig bemessen ist, d. h. ob sich durch den zufolge der Spannungsregulierung maximal auftretenden Blindstrom nicht eine Ueberlastung für den Kupplungstransformator ergibt.

In der gleichen Arbeit ist auch bereits bewiesen worden, dass bei einem Reguliertransformator für $\cos\varphi$ - Regulierung die betreffenden Netzverhältnisse für die Bestimmung der mittleren Phasenverschiebung und die Toleranz für die Einhaltung des vorgeschriebenen $\cos\varphi$ zu berücksichtigen sind. Ein Beispiel hiefür bietet ein Reguliertransformator, welcher in der nächsten Zeit in der Schweiz

aufgestellt wird. Es handelt sich um einen Kupplungstransformator von 11 000 kVA mit getrennten Wicklungen, einem Uebersetzungsverhältnis von 64 700 ± 10 × 1070/72 800 V, Schaltung Stern/Stern, Frequenz 50. Die rechnerische Bestimmung der Ausgleichsblindleistung bei Uebergang von einer Stufe auf die nächstfolgende zeigte, dass der cos φ im ungünstigsten Falle, d. h. bei Vollastbetrieb mit 11 000 kVA und cos φ = 0,8, um etwa ± 0,015 Einheiten schwankt. Da bei der Berechnung auf der einen Netzseite ein unendlich starkes Netz vorausgesetzt wurde, was jedoch in Wirklichkeit nicht zutrifft, sind tatsächlich noch kleinere Schwankungen der Phasenschiebung zu erwarten.

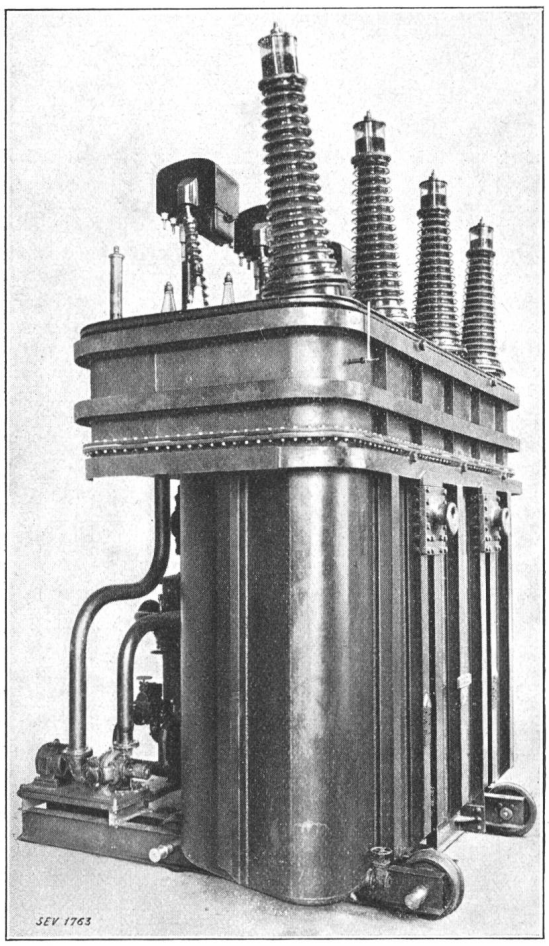

Fig. 13.
Dreiwicklungs-Regulier-Transformator für äussere Wasserkühlung, 20 000 kVA, 150 000/48 750 ± 3 × 1700/8000 V, 50 Per/s, mit eingebautem Stufenschalter.

Bei den Reguliertransformatoren für Netzkupplung ist es gleichgültig, ob der betreffende Transformator für die Kupplung zweier Netze mit stark verschiedener Spannung (z. B. 150 und 50 kV) oder für zwei Netze mit ähnlicher Spannung verwendet werden soll. Im ersten Falle kommen nur Transformatoren mit getrennten Wicklungen in Frage. Vorzugsweise wird dabei die Regulierwicklung mit dem Stufenschalter auf der Seite mit der niedrigeren Spannung angeordnet. Es können jedoch auch Fälle auftreten, bei welchen die Regulierwicklung auf der Höchstspannungsseite wirtschaftlicher ist, besonders dann, wenn die auszuregulierenden Spannungsschwankungen hauptsächlich auf dieser Seite vorkommen.

Kupplungstransformatoren für Netze gleicher oder ähnlicher Spannung werden vorzugsweise in Sparschaltung gebaut. Bestimmend hiefür ist, ob die beiden Netze zufolge ihrer gleichartigen Beschaffenheit (Isolationsfestigkeit, gleicher Erdschlußschutz und ähnliche atmosphärische Verhältnisse in den Netzgebieten und dementsprechend ähnliche Ueberspannungsverhältnisse usw.) einen metallischen Zusammenschluss zulassen. Ferner ist nachzurechnen, ob ein Reguliertransformator in Sparschaltung noch genügend kurzschlußsicher gebaut werden kann, weil sich ja seine Kurzschlussspannung im Verhältnis seiner Eigenleistung zur Durchgangsleistung reduziert. Dabei muss die Impedanz der vorgeschalteten Leitung mit berücksichtigt werden, ist sie doch in vielen Fällen ein Vielfaches der Transformatorimpedanz oder sogar der allein bestimmende Wert für den maximalen Kurzschlußstrom. Es ist dabei denkbar, dass ein Transformator in Sparschaltung auch mit allen zur Verfügung stehenden Konstruktionsmitteln nicht genügend kurzschlussfest gebaut werden kann, so dass ihm eine Kurzschlussdrosselspule vorgeschaltet werden muss, sofern man nicht auf Grund einer eingehenden Wirtschaftlichkeitsrechnung eine Ausführung des betreffenden Transformators mit zwei getrennten Wicklungen vorziehen muss.

In neuerer Zeit treten auch Fälle auf, in welchen die Kupplung von drei oder sogar von vier Netzen verschiedener Spannung an einem Punkt gefordert wird. Auch hier werden vorteilhaft Mehrwicklungstransformatoren mit Stufenschalter verwendet, und es ist den Konstrukteuren gelungen, auch für solche Fälle Reguliertransformatoren zu bauen, die den höchsten Anforderungen entsprechen.

Mehrwicklungstransformatoren mit Stufenschaltern werden auch häufig in solchen Netzkupplungsstationen angewendet, in welchen es sich darum handelt, gleichzeitig mit Hilfe eines Phasenkompensators die Blindleistungsverhältnisse zu verbessern. Die dritte Wicklung wird dabei so ausgeführt, dass sie direkt an den betreffenden Phasenschieber angeschlossen werden kann.

Wenn in einem Netz die Spannungsverzerrung durch die 3. Harmonische vermieden werden soll oder bei Anschluss von Dissonanzlöschspulen an Stern/Stern geschaltete Transformatoren, wird mit Vorteil der betreffende Transformator mit einer Tertiärwicklung ausgerüstet, die in Dreieck zu schalten ist.

An dieser Stelle seien noch die sogenannten *Quertransformatoren* erwähnt. Sie dienen zur Verteilung der Wirkleistungen in Ringnetzen und werden vorzugsweise an Stelle von Induktionsreglern ebenfalls mit Regulierwicklung und Stufenschalter ausgerüstet, um eine Reguliermöglichkeit zu erhalten. Dies setzt auf alle Fälle auch eine entsprechende Verständigung zwischen den Energie liefernden Kraftwerken der gekuppelten Netze

voraus. Auch hier kann auf den Aufsatz von Grieb im Bulletin 1930, Nr. 15, verwiesen werden.

Ein weiteres Verwendungsgebiet für Regulier-transformatoren ist die *Aufstellung am Verbrauchsort.* Sollen an einem Hauptverteilungspunkt für Mittel- oder Niederspannung die zufolge der Belastungsänderungen im primären oder sekundären Netz auftretenden Spannungsschwankungen ausreguliert werden, so können vorteilhaft Regulier-transformatoren verwendet werden.

Die Schaffung billiger und dadurch wirtschaftlicher Stufenschalter für Transformatoren kleiner Leistung wird vielerorts intensiv studiert, zum Teil liegen auch bereits schon bewährte Ausführungen vor. Das Umklemmen oder Umschalten auf die gewünschte Transformatorenanzapfung erforderte bei der bis vor kurzem üblichen Anordnung mit über Deckel geführten Anzapfungen oder mit Anzapfschalter stets ein kurzzeitiges Abschalten des Transformators. Durch den Stufenschalter wird dies vermieden; der Uebergang erfolgt unterbrechungslos.

Reguliertransformatoren werden auch in *Umformerstationen* mit Einankerumformern oder Gleichrichtern seit langem angewendet. Durch das unterbrechungslose Aendern des Uebersetzungsverhältnisses des Transformators mit Hilfe seiner Regulierwicklung und eines Stufenschalters, meist auf der Primärseite, ist die Möglichkeit gegeben, die Gleichstromspannung, welche zur aufgedrückten Wechselstromspannung stets in einem ganz bestimmten konstanten Verhältnis steht, beliebig zu ändern. Beispiele sind: Umformeranlagen für Bahn- und Trambetriebe, für elektro-chemische Zwecke, für Batterieladestationen usw.

Die vorstehenden Ausführungen hatten den Zweck, zu zeigen, dass die Konstrukteure im Elektromaschinenbau heute in der Lage sind, einen absolut betriebssicheren und wirtschaftlichen Apparat zu liefern, der überall da angewendet werden kann, wo es sich um die unterbrechungslose Spannungsregulierung eines Netzes oder einer Umformergruppe handelt.

Der *Vorsitzende* dankt dem Referenten für seinen Vortrag und eröffnet die

Diskussion [1]).

Puppikofer, MFO, Oerlikon, führt folgendes aus: «Die Bilder, welche die Maschinenfabrik Oerlikon (MFO) Herrn Grob zu seinem Vortrage zur Verfügung stellen konnte (Fig. 9, 11 u. 12) betreffen ausnahmslos Stufenschalter, welche mit Ueberschaltdrosselspule arbeiten. Es ist dies jedoch nicht das einzige System der Stufenregelung, das die Maschinenfabrik Oerlikon anwendet. Vor 20 Jahren wurden unter anderm auch an die Société Neuchâteloise d'Electricité Reguliertransformatoren geliefert, die mit Stufenschaltern zusammengebaut waren. Dieser Stufenschaltertyp weist, wie Fig. 14 zeigt, bereits alle Merkmale auf, die heute in der Patentliteratur dieses Gegenstandes eine Hauptrolle spielen. Er ist unterteilt in Anzapfschalter und Funkenschalter. Für jede Anzapfung des Transformators sind zwei Anschlüsse am Stufenschalter vorhanden. Dieser besteht aus zwei nur für Stromlosschaltung bemessenen Anzapfschaltern mit je zwei Schleifbürsten, wovon eine über den Funkenschalter zu einem Ueberschaltwiderstand und die andere ebenfalls über den Funkenschalter direkt zur abgehenden Leitung führt.

Die MFO wendet dieses Prinzip der Stufenschaltung ebenfalls wieder bei den Höchstspannungen an. Warum sie für kleinere und mittlere Hochspannungen ein anderes System vorzieht, sei an Hand der Fig. 15 kurz erläutert. Es sind

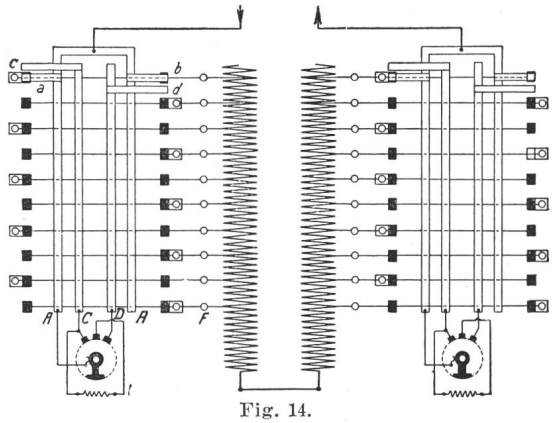

Fig. 14.
Schema eines Reguliertransformators mit zwei Stufenschaltern, 100 kVA.

darin die beiden typischen Schaltungen für Stufenregulierung dargestellt. Links findet sich die oben erwähnte Schaltung mit Ueberschaltwiderstand, rechts diejenige mit Ueberschaltdrosselspule. Man mag nun den Stufenschalter konstruktiv ausbilden wie man will: während des Umschaltens des Hauptkontaktes (wie in der Figur am Anzapfschalter A_{II} rechts) muss der Widerstand R den ganzen Belastungsstrom des Transformators führen. Er nimmt in diesem Moment das Produkt Belastungsstrom mal Stufenspannung als Wirkleistung auf. Es ist ganz klar, dass man, um auf vernünftige Abmessungen zu kommen, den Widerstand nur für ganz kurze Belastungszeit berechnen kann. Da es sich um Bruchteile von Sekunden handelt, muss durch besondere, sichere Mittel verhindert werden, dass er länger als während dieser Zeit belastet wird.

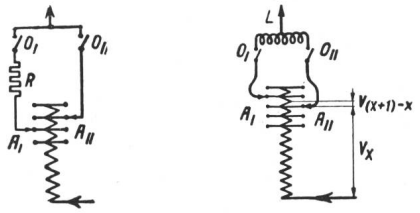

Fig. 15.
Typische Schaltungen für Stufenregulierung.
Vx = Stufenspannung auf Stellung x.
V (x+1) — x = Spannungsdifferenz zwischen 2 Stellungen = Stufe.

Bei der Schaltung mit Ueberschaltwiderstand erhält man nur soviel Spannungsstufen, als der Transformator Anzapfungen hat.

Da die Ueberschaltdrosselspule als Spannungsteiler ausgeführt ist, *kann man also tatsächlich,* wie Herr Grob erklärte, *mit der gleichen Anzahl von Anzapfungen doppelt soviel Spannungsstufen wie bei der Widerstandsschaltung haben.* Die Benützung von Ueberschaltdrosselspulen mit Mittelanzapfung bedeutet daher für die Konstruktion des Transformators eine wesentliche Erleichterung.

Die Ueberschaltspule nimmt als Induktivität in der Zwischenstellung, wo sie einseitig vom ganzen Belastungsstrom durchflossen wird, nur eine sehr geringe Wirkleistung auf, und da ihre Sättigung entsprechend gewählt wird, kann sie ohne Gefahr für die Regulieranlage ¼ h bis zu ½ h in diesem Zustande bleiben. Die Ueberschaltspule wird daher häufig direkt in den Kasten des Transformators eingebaut. Sollte aus irgend einem Grunde der Stufenschalter in einer solchen Zwischenstellung stecken bleiben, so ist genügend Zeit für einen Eingriff vorhanden, und es muss, was für

[1]) Die Voten wurden nachträglich von den betreffenden Autoren schriftlich formuliert, resp. eingesehen.

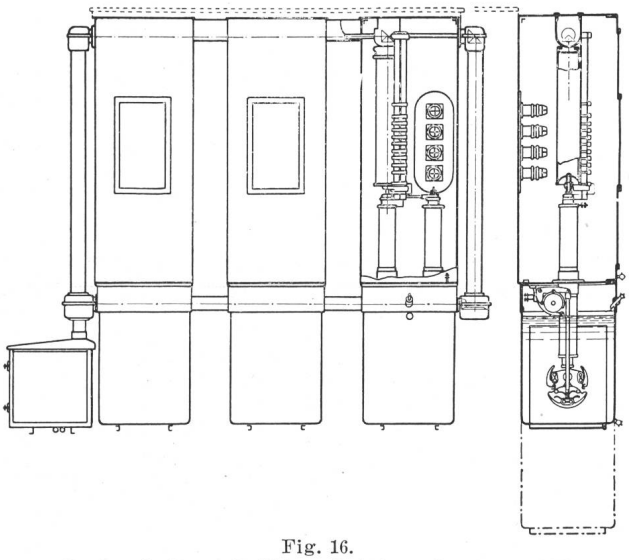

Fig. 16.
Stufenschalter mit Ueberschaltdrosselspule, 62 kV.

den Betrieb äusserst wichtig ist, die Stromlieferung eventuell gar nicht unterbrochen werden.

Bei den Höchstspannungen (als solche sind die Spannungen über 100 kV verstanden) tritt bei der Konstruktion der Stufenschalter das Isolationsproblem in den Vordergrund. Die Kosten für die Unterbringung und Isolierung der Ueberschaltdrosselspule werden so hoch, dass man es aus wirtschaftlichen Gründen für vorteilhafter findet, die Schaltung mit Ueberschalt*widerstand* wieder anzuwenden. Die obere Spannungsgrenze für die Anwendung der Ueberschaltdrosselspulen liegt bei 80 bis 90 kV.

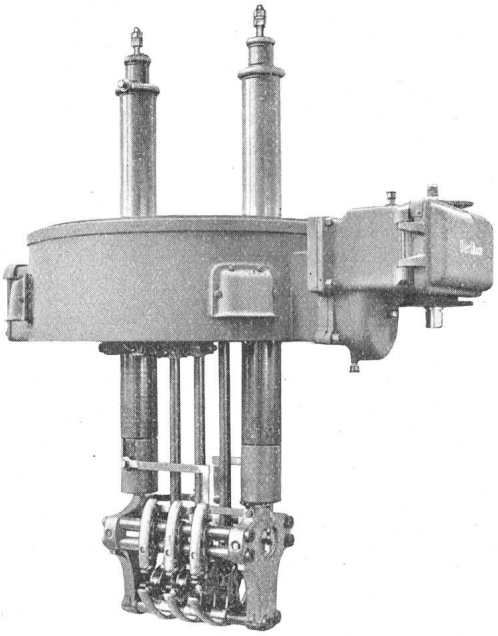

Fig. 17.
Funkenschalter.

Fig. 16 zeigt den konstruktiven Aufbau eines Stufenschalters mit Ueberschaltdrosselspule für eine Nennspannung von 62 kV. Er gehört zu einem Reguliertransformator von 10 000 kVA mit der Uebersetzung von 135/62 kV und reguliert in ± 10 Stufen von 2 %. Jede Phase des Stufenschalters ist getrennt untergebracht. Der Anzapfschalter ist als Walzenschalter ausgebildet und mit seinem Kasten direkt am Transformatorkessel angebaut. Der Funkenschalter hängt derart am Anzapfschalter, dass der Boden des letzteren den Deckel des ersteren bildet. Der Funkenschalter ist als richtiger Oelschalter mit doppelter Momentunterbrechung gebaut. Sein Kessel kann zu Revisionszwecken hinuntergelassen werden. Fig. 17 zeigt den Funkenschalter und Fig. 18 den Anzapfschalter des in Fig. 16 abgebildeten Stufenschalters. Dieser Transformator mit Schalter wird zur Zeit in den Werkstätten der MFO für die Abnahmeproben bereit gemacht. Ein anderes Regulieraggregat mit ähnlichen Spannungen, aber für 30 000 kVA, ist zur Zeit in den französischen Werkstätten in Ornans in Fertigstellung.

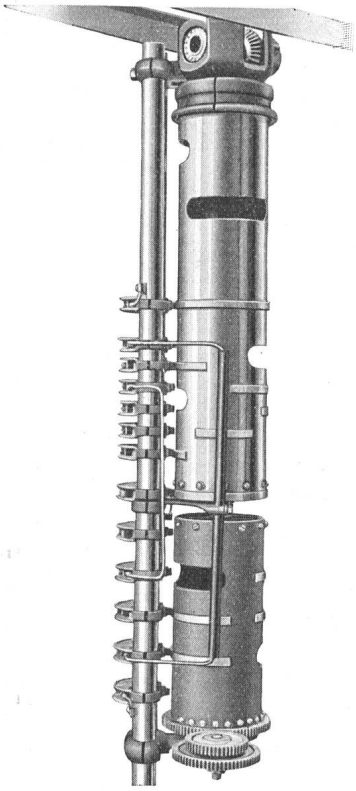

Fig. 18.
Anzapfschalter.

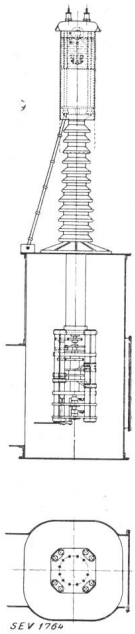

Fig. 19.
Stufenschalter für Höchstspannungen.

In Fig. 19 ist der neueste Stufenschalter der MFO für Höchstspannungen nach dem erwähnten Prinzip mit Ueberschaltwiderstand dargestellt. Für die Isolation des ganzen einphasigen Stufenschalters ist ein einziger Isolator vorgesehen, der gleichzeitig als Klemme des Transformators dient. Unten an diesem Isolator ist der Anzapfschalter oder Wähler angebracht mit der Reversierwalze. Oben trägt der Isolator den Funkenschalter. Dieser ist wieder als Oelschalter mit doppelter Momentunterbrechung ausgebildet. Trotz der mit dem Isolator streng koaxialen Aufstellung dieses Oelschalters kann der Kessel nach Abschalten und Spannungslosmachen des Transformators zur Revision heruntergelassen werden. Der dreiphasige Stufenschalter besteht aus drei solchen Aggregaten, die an den Transformatorkessel angebaut werden.

Ausser den erwähnten Punkten rein konstruktiver Natur sind mit der Verwendung von Stufenschaltern noch eine Reihe wichtiger Fragen aufgetaucht, die mehr auf schaltungstechnischem Gebiete liegen. Es müssen z. B. beliebig viele Stufenschalter parallel arbeiten können, ohne dass infolge fehlerhafter Manöver schädliche Ausgleichströme entstehen. Die Zuschaltung eines Stufentransformators erfolgt erst, nachdem er an Hand der Stellungslampen und des Stellungszeigers in die gleiche Stellung gebracht wurde. Sobald der Oelschalter dieses Transformators geschlossen wird, ist er nicht nur mit den Hauptstromkreisen, sondern auch mit seinen Hilfskreisen mit den bereits im Betriebe befindlichen Einheiten parallel geschaltet (Fig. 20).

Sobald man also den Steuerschalter irgend einer dieser Einheiten betätigt, werden alle miteinander gesteuert. Die Steuerung erfolgt nur, wenn alle Stufenschalter sich in der fertigen Stellung befinden. Sobald ein Schalter aus irgend einem Grunde stecken bleibt, werden alle Antriebe abgeschaltet, bis der Fehler behoben ist.

Die wichtigsten Probleme bei Stufentransformatoren ergeben sich bei ihrer Verwendung zur automatischen Regulierung. Es sind hier zwei ganz getrennte Fälle zu unterscheiden. Entweder fliesst die elektrische Energie nur in einer bestimmten Richtung durch den Transformator hindurch oder die Richtung wechselt, je nach dem Betriebszustand. Im ersten Falle wird es sich stets um besondere Netzteile handeln, deren Spannung unabhängig von der Spannung des Anschlusspunktes reguliert resp. konstant gehalten werden soll. Es trifft dies ganz besonders häufig zu bei grossen Kraftwerken, die auf ein grosses Ueberlandnetz arbeiten und daneben mit einer Zwischenspannung ein naheliegendes Ortsnetz speisen. Die MFO verwendet hierfür eine Reglertype, die sich schon längere Zeit bei den Induktionsregleranlagen bestens bewährt hat (Fig. 21). Es ist dies ein Schützenregler mit einem oben sichtbaren Ferrarisystem als spannungsempfindliches Organ. Unterhalb sind die Quecksilberschützen ersichtlich. Die Rückführung des spannungsempfindlichen Organs erfolgt wie üblich elektrisch.

Für die automatische Regulierung eines Stufenschalters auf Spannung sind, was bisher noch nicht erwähnt worden ist, einige Organe mehr notwendig als bei der Regelung mit Induktionsregler. Die Schalthäufigkeit des Stufenschalters darf nicht so hoch werden, dass die Schaltgase aus dem Oelkessel nicht mehr abziehen können. Um Schäden zu verhüten, wird durch ein Kletterrelais über ein Zeitrelais die Regulierung eine Zeitlang gesperrt, sobald die Anzahl Schaltungen pro Zeiteinheit eine bestimmte Grenze überschreitet (Fig. 22).

Kann die Energie in beiden Richtungen durch den Transformator fliessen, so haben wir den Fall einer Kuppelleitung zwischen zwei Kraftwerken. Dann wird eine Regelung auf den Leistungsfaktor am Platze sein. Die MFO, die als erste schon vor Jahren die automatische Regelung auf $\cos\varphi$ durch Induktionsregler entwickelte, hat diese Regelungsart auch auf Stufentransformatoren ausgedehnt.

Dieselbe Regelung auf konstanten $\cos\varphi$ wie bei Induktionsreglern kann bei Stufenschaltern nicht angewendet werden, da der Stufenschalter nicht schärfer einregulieren kann, als seiner Stufenspannung entspricht. Es ist daher notwendig, zu einer anderen Regelungsart überzugehen, die diesem Umstande Rechnung trägt: zur Regelung auf eine minimale Blindleistung. Der Regler verstellt den Stufenschalter, sobald die durchgehende Blindleistung gegenüber der Sollleistung um den Wert differiert, der der Stufenspannung resp. der Einstellung entspricht.

Der Blindleistungsregler der MFO (Fig. 23) ist ebenfalls ein Schützenregler. Das leistungsempfindliche Organ be-

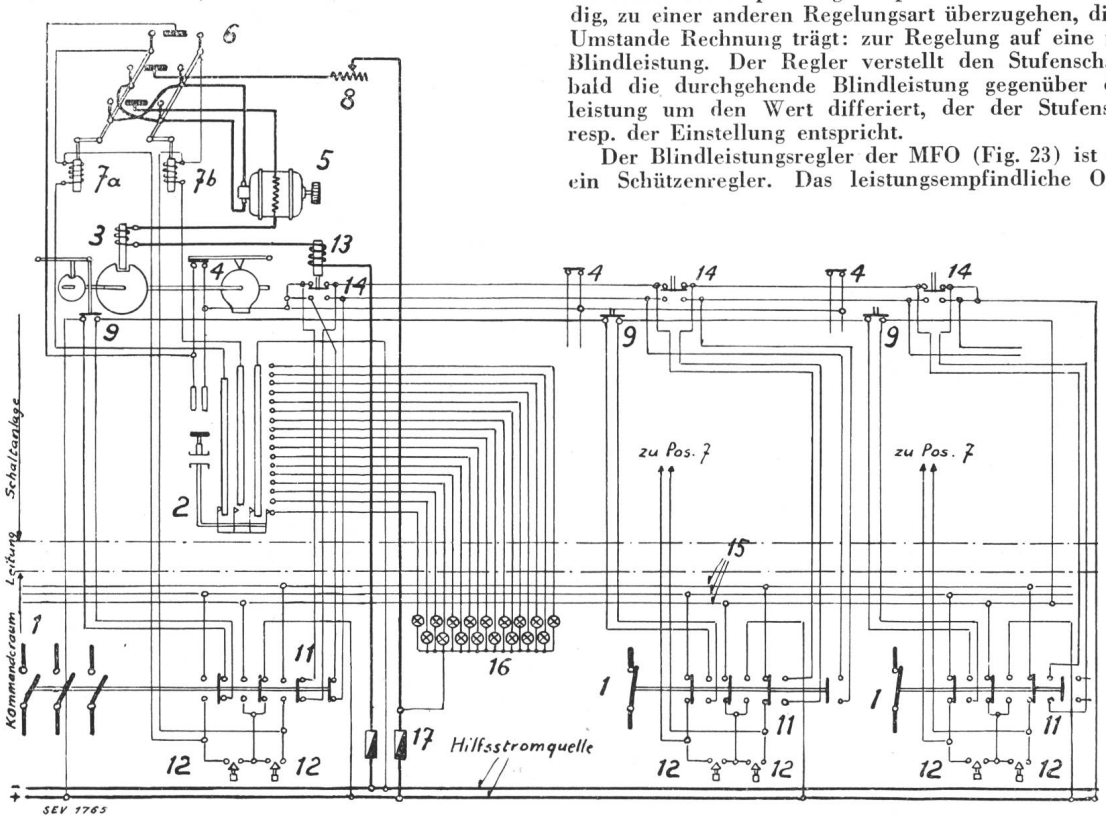

Fig. 20.
Schema für die Schaltung bei Parallellauf von Stufentransformatoren.

1 Oelschalter
2 Endschalter für letzte Stufe und Signallampenumschalter
3 Klinkenmagnet
4 Endschalter für Einzelstufe
5 Antriebsmotor
6 Wendehüpfer
7a, b Spulen des Wendehüpfers
8 Vorschaltwiderstand
9 Verriegelungskontakt
10 Signallampen
11 Hilfsumschalter an Pos. 1
12 Doppelknopf-Umschalter
13 Minimalstromrelais
14 Verriegelungskont. an Pos. 13
15 Hilfssammelschienen
16 Signallampentableau
17 Sicherungen d. Motorkreises

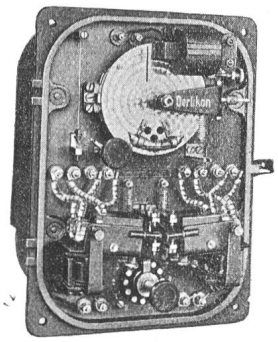

Fig. 21.
Automatischer Schützenregler für Stufentransformator.

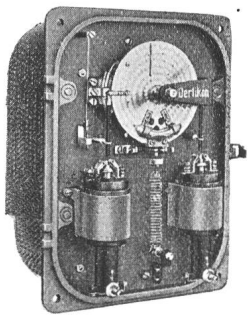

Fig. 23.
Blindleistungsregler.

findet sich hinter der Frontplatte. Vorne sind der Quecksilberumschalter und die zwei Hilfshüpfer sichtbar. Diese sind so gedämpft, dass ihre Bewegung ein getreues Abbild der Bewegung des Stufenschalters ergibt, so dass eine zuverlässige Rückführung des empfindlichen Organs direkt mechanisch gemacht werden konnte.

Auch hier sind Vorkehrungen getroffen, um eine zu grosse Schalthäufigkeit zu verhindern (Fig. 24). Es wurde

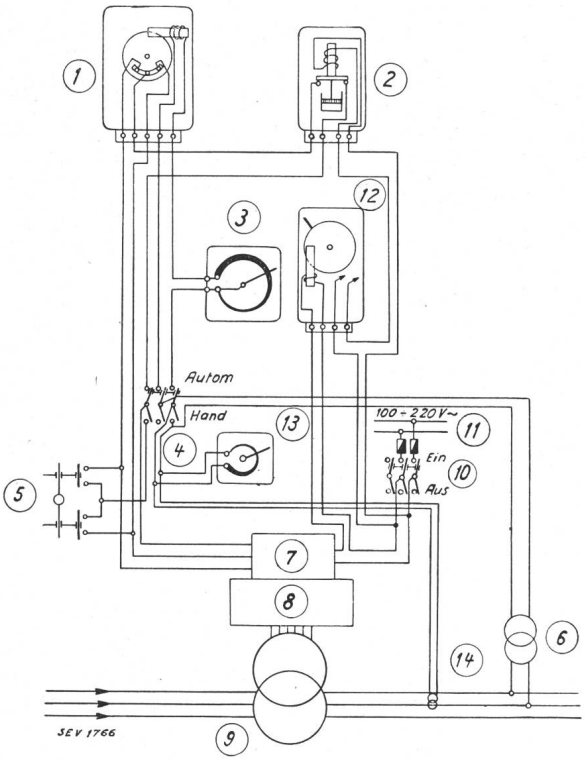

Fig. 22.
Schema für die automatische Regulierung auf Spannung mittels Stufentransformator.

1 Spannungsregler
2 Zeitsperr-Relais
3 Einstellwiderstand
4 Umschalter Type U_3
5 Druckknopfschalter
6 Spannungswandler
7 Reversierschalter
8 Stufenschalter
9 Stufentransformator
10 Schalter U_3
11 Hilfsstromkreis
12 Schutzrelais
13 Einstellwiderstand } für Kompoundierung
14 Stromwandler

dies dadurch erreicht, dass das früher erwähnte Kletterrelais hier die Empfindlichkeit des Regelorgans heruntersetzt. Es wird also die ganze Einrichtung nur noch bei grösseren Schwankungen der Blindleistung, also seltener, ansprechen.

Zum Schluss sei noch darauf aufmerksam gemacht, dass der Stufenschalter keineswegs den Induktionsregler verdrängen wird. Sie haben beide ihre ganz besonderen Anwendungsgebiete. Für die hohen Spannungen kommt nur der Stufenschalter in Betracht. Ueberall da, wo der Induktionsregler direkt ohne Transformator eingebaut werden kann, da, wo es auf rasches und ganz scharfes Regulieren ankommt, ist der Induktionsregler am Platze.

Ausserdem soll nicht vergessen werden, dass durch den Stufenschalter eine Mehrzahl von Kontakten in die Stromkreise hineingebracht werden, die, wie der Betriebsingenieur weiss, alle einer gewissen Wartung und Kontrolle bedürfen. Es wird sich daher auch bei grossen Strömen wieder empfehlen, den Induktionsregler zu verwenden.»

Prof. Dr. *B. Bauer*, ETH Zürich, glaubt, dass bei automatisch betriebenen Reguliertransformatoren in Sparschaltung ein Parallelbetrieb kaum möglich ist.

E. Meyer, Strassburg, macht auf die in der Praxis schon wiederholt vorgekommenen Störungen infolge Steckenbleiben der Stufenschalter in einer Zwischenstellung aufmerksam und wünscht, dass die Konstruktionsfirmen diesem Punkte mehr Aufmerksamkeit schenken. Er stellt sodann die Frage, ob bei Drehstrom bei höheren Spannungen (z. B. 150 kV) noch dreiphasige oder aber drei einphasige Reguliertransformatoren üblich sind.

P. Perrochet, Basel, führt folgendes aus: «L'emploi des transformateurs de réglage de tension avec interrupteur à gradins, dont le prix d'acquisition est notablement inférieur

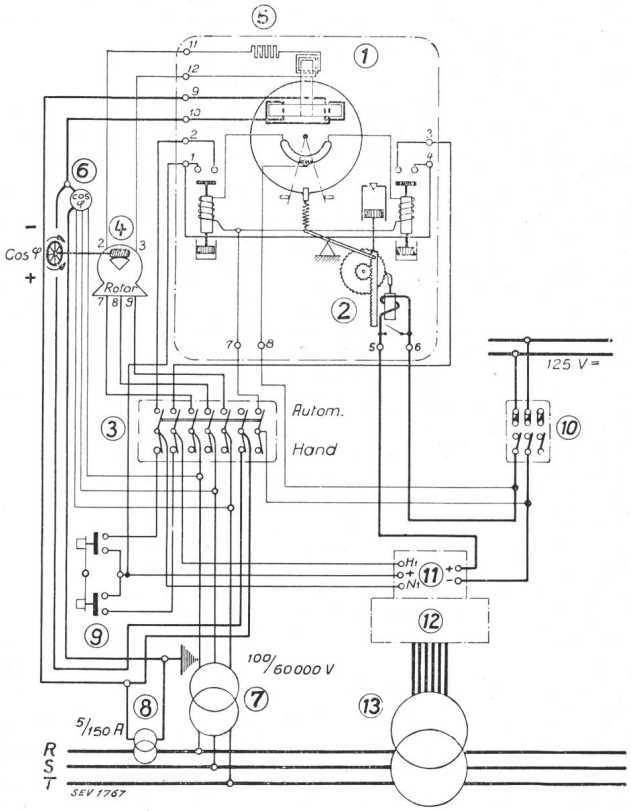

Fig. 24.
Schema für automatische Regulierung auf minimale Blindleistung.

1 Regler
2 Kletterrelais
3 Umschalter
4 Phasenregler
5 Widerstand
6 Cos φ Meter
7 Spannungswandler
8 Stromwandler
9 Druckknopfumschaltung
10 Schaltkasten
11 Reversierschalter
12 Stufenschalter
13 Stufentransformator

à celui de régulateurs d'induction, tend à se généraliser, et cela le serait dans une plus large mesure encore, si certains frais accessoires pouvaient être évités. En faisant cette remarque, j'ai en vue le réglage de la tension aux extrémités des différentes dérivations souvent assez longues et par conséquent sujettes à des variations de tension importantes, par suite d'extensions non prévues à l'origine, des réseaux à hautes tensions moyennes, disons, pour fixer les idées, des réseaux dont la tension est comprise entre 20 000 et 60 000 V. Dans la plupart de ces cas-là, l'introduction d'un réglage de la tension au bout des lignes se fait après coup, lorsque les sous-stations de transformation sont déjà construites. Les exploitants qui désirent adjoindre un réglage de la tension en ces points-là, doivent envisager des dépenses relativement considérables, comportant non seulement l'acquisition des appareils de réglage proprement dits, mais aussi celle des appareils accessoires. Parmi ces derniers, le plus important comme prix est le disjoncteur à huile, tant pour lui-même que pour les frais d'installation qu'il comporte. Je me permets donc de demander à M. Grob, si la construction et tout spécialement l'isolement des transformateurs de réglage (j'ai en vue ici surtout les auto-transformateurs) et des interrupteurs à gradins est telle qu'on pense se passer, pour les tensions que j'ai mentionnées (20 000 à 60 000 V) du disjoncteur à huile précédant ces appareils et se contenter de simples sectionneurs, restant bien entendu que les disjoncteurs se trouvent déjà présents sur le côté réglé de la tension dans les sous-stations existantes?»

Marty, BKW, Bern, weist darauf hin, dass in der Praxis damit gerechnet werden muss, dass während einer Schaltbewegung ein durchgehender Kurzschluss auftreten kann und dass in diesem Falle eine Abschaltung des Transformators, weil die Funkenschalter nur für Normalstrom berechnet sind, für den Betrieb sehr nachteilig ist. Das Blockieren des Stufenschalterantriebes bei Auftreten eines Ueberstromes, währenddem sich also der Stufenschalter in einer Betriebsstellung befindet, sieht der Sprechende nicht als nachteilig an. Der Stufenschalterantrieb muss so ausgeführt werden, dass ein Stehenbleiben in einer Zwischenstellung sicher vermieden bleibt.

Grob, BBC, Baden, beantwortet als Referent die verschiedenen Voten wie folgt:

Zum Votum Bauer: Bei Reguliertransformatoren in Sparschaltung kommt ein Parallelbetrieb nur selten vor, und hier nur bei relativ kleinen Leistungen. Zwei Autotransformatoren genau gleicher Leistung und genau gleich gebaut, können ohne weiteres parallel geschaltet werden. Dagegen ist die Parallelschaltung von Autotransformatoren ungleicher Leistung unter Umständen nicht möglich, gleichgültig, ob es sich um automatischen oder nichtautomatischen Betrieb handelt.

Zum Votum Meyer: Ein Steckenbleiben der Stufenschalter in einer Zwischenstellung wird von der Firma BBC in der Weise verhindert, dass die Schaltung nicht direkt durch den Antriebsmotor, sondern durch eine Feder oder ein Gewicht bewirkt wird. Der Antriebsmotor spannt die Feder oder hebt das Gewicht, und, wenn auf diese Weise eine zur Ueberführung des Stufenschalters von der einen Stellung in die andere genügende Energie aufgespeichert worden ist, wird der Motor entkuppelt und die Schaltung ausgeführt. — Zur Frage der Anwendung von dreiphasigen oder drei einphasigen Reguliertransformatoren bei höheren Spannungen bemerkt der Sprechende, dass dies lediglich von der Transport- und der Montagemöglichkeit am Aufstellungsorte abhängt. Die Firma BBC hat Drehstromreguliertransformatoren schon bis zu 160 kV gebaut.

Zum Votum Perrochet: Die Reguliertransformatoren werden, wie bereits betont, genau nach den gleichen Grundsätzen gebaut wie die normalen Hochspannungstransformatoren. Wir haben also genau die gleichen Sicherheiten gegen Ueberspannungen usw. Im vorliegenden Falle wird zweckmässig der Reguliertransformator zwischen dem vorhandenen Oelschalter und dem Haupttransformator eingebaut. Ein weiterer Oelschalter ist nicht nötig. Bei Anschluss von Transformatorenstationen relativ geringer Leistung an Ueberlandleitungen steht man oft vor der Frage, ob sich die Aufstellung eines Hochspannungsölschalters betriebstechnisch und wirtschaftlich rechtfertigen lässt. Dabei ist es gleichgültig, ob die betreffende Transformatorenstation nur einen Haupttransformator oder auch einen Reguliertransformator enthält. In gewissen Fällen hat man sich damit geholfen, dass die betreffende Station oberspannungsseitig mit abschaltbaren Trennsicherungen und unterspannungsseitig mit einem Niederspannungsschalter ausgerüstet wurde. Bei Ueberlastung löst der Niederspannungsschalter aus, bei einem allfälligen Kurzschluss in der betreffenden Station schaltet die Hochspannungssicherung diese ab.

Zum Votum Marty: Das Schalten eines Stufenschalters während eines Kurzschlusses kommt nach Ansicht des Sprechenden sehr selten vor. Bei automatischer Steuerung kann dies vorkommen, wenn nicht durch besondere Massnahmen dafür gesorgt wird, dass bei Kurzschluss der Stufenschalter blockiert wird. Die Stufenschalter so zu bauen, dass sie auch Kurzschlüsse schalten können, hält der Sprechende für möglich. Der Funkenschalter ist dann so gross zu bemessen, dass er die Stufenleistung des betreffenden Kurzschlusses bewältigen kann. Er erhält also die Grösse eines Oelschalters entsprechender Leistung. Die Abschaltleistung des Funkenschalters ist aber unter allen Umständen nur ein verhältnismässig kleiner Bruchteil der Abschaltleistung des Hauptschalters, z. B. bei 1,5 % Stufenspannung und zehnfachem Kurzschlußstrom = 15 %.

Schiesser, BBC, Baden, schliesst sich den Ausführungen des Vorredners an. Funkenschalter können so gebaut werden, dass sie auch Kurzschlüsse zu schalten vermögen, ohne dabei Schaden zu nehmen; sie werden aber dann bedeutend grösser und teurer und können nicht mehr auf den Isolatoren der Transformatoren angebracht werden, sondern erfordern eine getrennte Aufstellung.

Puppikofer, MFO, antwortet auf das Votum Marty: «Die MFO stellt sich ganz eindeutig auf den Standpunkt, dass der Stufentransformator mit dem Stufenschalter bei durchgehenden Kurzschlüssen im Betrieb bleiben soll. Es wird nicht zu vermeiden sein, dass der Stufenschalter bei durchgehenden Kurzschlüssen *einmal schaltet*, da der Kurzschluss während der Bewegung des Schalters entstehen kann. Der Schalter muss eben so gebaut sein, dass er den Kurzschluss aushalten kann. Speziell muss der Funkenschalter die durch den Kurzschlußstrom vermehrte Abschaltarbeit bewältigen können. Die Stufenschalter auf den vom Sprechenden gezeigten Bildern waren so gebaut, dass sie diesen Beanspruchungen gewachsen sind. Weitere Bewegungen des Schalters werden dann durch ein mit kurzer Eigenzeit ansprechendes Blockierrelais verhindert. Der Transformator bleibt aber im Stromkreis.»

Zum Votum Meyer bemerkt *Puppikofer* folgendes: «Um das Steckenbleiben von Stufenschaltern mit Sicherheit zu vermeiden, hat die MFO einen besonderen Antrieb entwickelt; er steht zur Zeit vor der Fertigstellung. Bei diesem Antrieb wird im ersten Drittel der Bewegung durch den Antriebsmotor eine Feder gespannt und erst hernach der Stufenschalter in die nächste Stellung gebracht, während sich die Feder ohne Arbeit entspannt. Bleibt der Strom des Motors aus, nachdem sich der Schalter zu bewegen beginnt, so wird er durch die gespannte Feder in die nächste Stellung gebracht. Der Nachteil des Federkraftspeichers, die schlagweise Betätigung, ist hierdurch für den normalen Betrieb umgangen. Die Feder tritt bloss in Notfällen in Aktion.»

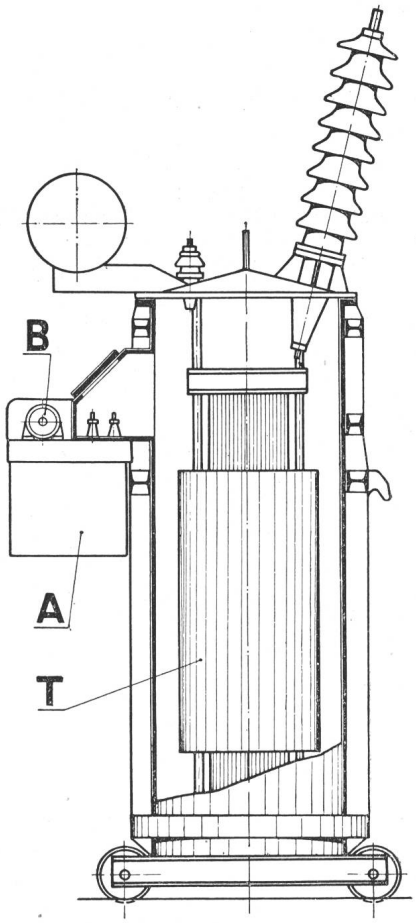

Fig. 25.
Dreiphasen-Transformator 12'00 kVA, 88/150 kV, 50 Per/s mit Spannungsregulierung. Approx. Dispositionszeichnung.
T = Haupttransformator.
A = Stufenschalterkasten mit Kübelablassvorrichtung.
B = Antriebsmotor mit Antriebskasten.

Meyer, Strassburg, hebt als Vorteil der Reguliertransformatoren der Firma Sécheron, Genf, hervor, dass bei einem Defekt an dem zur Regulierung dienenden Teil dieser losgelöst und der eigentliche Transformator wie ein normaler Transformator weiter verwendet werden kann. Er erkundigt sich sodann, ob die Werke schon Erfahrungen mit solchen Transformatoren besitzen.

Dr. *Hess, Zürich*, macht darauf aufmerksam, dass die unerwünschte Beigabe der Anzapfungen auf der Hochspannungsseite von Transformatoren in gewissen Fällen vermieden werden kann, wenn man diese Anzapfungen in die im Referate des Herrn Grob erwähnten Schubwicklungen verlegt, für welche eine von den Netzbedingungen unabhängige beliebige Spannung gewählt werden kann. Eine zweite Lösung für den gleichen Zweck bietet die Möglichkeit, den magnetischen Kreis in der Weise zu unterteilen, dass die Schubwicklung den Kraftfluss von einem der beiden Kreise zum andern schiebt und hierdurch die Spannungsregulierung des induzierten Hochspannungskreises bewirkt.

Kleiner, Kraftwerke Oberhasli, Innertkirchen, kommt auf die durch die Stufenschalter hervorgerufenen Ueberspannungen zu sprechen, die nach seiner Ansicht in Netzen relativ niedriger Spannung (wie z. B. Stadtnetzen mit 3000 V) eine Rolle spielen könnten, während in Hochspannungsnetzen die Ueberspannungen atmosphärischer Natur wohl von grösserer Bedeutung sind. Er stellt die Frage, ob die Konstruktionsfirmen in dieser Richtung Untersuchungen und Berechnungen durchgeführt hätten, überhaupt, wie sie sich zu dieser Frage stellen.

Dr. *Kopeliovitch*, BBC, Baden, antwortet auf die von Kleiner gestellte Frage, dass Stufenschalter in der Praxis zu keinen grossen Ueberspannungen Anlass geben können, besonders nicht in Niederspannungsnetzen, weil die vom Stufenschalter erzeugten Schwingungen durch die an das Netz angeschlossenen vielen Verbraucher stark gedämpft werden. Anderseits erfolgt die Umschaltung eigentlich ohne Stromunterbrechung im Hauptkreis, so dass die Ausgleichsvorgänge sowie die Schwingungen, welche sie begleiten, nicht angefacht werden können. Er stellt sodann die Gegenfrage, ob irgendwelche Erfahrungen und Beobachtungen der Werke vorliegen, was Kleiner verneint, da er selbst zu wenig spezielle Erfahrungen mit niedrigen Spannungen habe.

Rochat, Sécheron, Genf, berichtet über die Spannungsregulieranlagen von Uebertragungsleitungen mittels Stufentransformatoren der Sécheronwerke: «Nach einer kurzen Uebergangsperiode, während welcher die Sécheronwerke reiche Erfahrungen im Stufenschalterbau gesammelt haben — siehe Schweizer. Technische Zeitschrift 1928, Nr. 37 —, werden die Spannungsregulieranlagen von Uebertragungsleitungen bei dieser Firma nunmehr aus den folgenden Bestandteilen gebildet:

a) 1 Reguliertransformator mit Anzapfungen, wobei die Regulierwicklung stets symmetrisch zur in der Kernmitte gedachten Horizontalebene angeordnet ist;

b) 1 Stufenschalter in Oelbad; derselbe wird allgemein in einem Anbau des Transformatorkessels (oder des Kesseldeckels) angeordnet, z. B. nach Fig. 25, welche einen zur Zeit in vorgeschrittener Ausführung befindlichen Transformator darstellt. Als Schaltorgan werden für grössere Schaltleistungen mittels Nockenwelle angetriebene Hüpfer angewendet;

c) 1 Ueberschaltorgan. Als Ueberschaltorgan kommt, bei relativ grosser Stufenzahl und verhältnismässig niedriger Netzspannung, eine als Spannungsteiler wirkende Drosselspule, bei kleiner Stufenzahl und hoher Spannung kommen Ueberschaltwiderstände zur Anwendung.

Die von den Sécheronwerken im Lokomotivbau gesammelten Erfahrungen (die bei der Lokomotivensteuerung vorkommenden Abschalt- und Ueberschaltleistungen sind meistens bedeutend grösser als bei den Reguliertransformatoren) haben es erlaubt, für das Reguliersystem mechanisch und elektrisch überaus robuste Konstruktionen auszubilden, welche die bei den heftigsten Kurzschlüssen vorkommenden Beanspruchungen anstandslos aushalten und welche ohne Bedenken für Spannungen bis zu 50 000 V angewendet werden können. Für höhere Spannungen kann selbstverständlich das gleiche System ausgebaut werden; die Abmessungen des Stufenschalters werden dabei recht beträchtlich, was die Anlage erheblich verteuert.

Die Spannungsregulieranlagen mit Stufentransformatoren und unter Last bedienbaren Stufenschaltern können demgemäss nach dem Sécheronsystem für jede Leistung und Spannung anstandslos gebaut werden. Die Frage, ob es nicht angezeigt wäre, die Regulieranlage vom spannungsumformenden Teil bei Grosstransformatoren für höchste Spannungen vollständig abzutrennen, kann nur vom Standpunkt des Betriebsingenieurs aus beantwortet werden.

Dabei würden am Haupttransformator keine Anzapfungen angebracht werden, was insofern einen Vorteil bedeutet, als trotz der peinlichsten Vorsicht die Anzapfungen stets gegenüber den einfachen, durchlaufenden Wicklungen einen empfindlichen Punkt bilden. Die ein Ganzes bildende Regulieranlage kann bei Störung, ohne den Betrieb zu unterbrechen, ausser Betrieb gesetzt werden. Die dazu erforderliche Apparatur ist nicht kompliziert. Wird eine Doppeltransformierung nach Fig. 26 angewendet, so kann die ganze eigentliche Regulieeinrichtung dem Einfluss der Hochspannung entzogen und die Stromstärke im Stufenschalter frei gewählt werden.

Die oben skizzierte Lösung ist selbstverständlich etwas teurer als die Anbringung der Regulieeinrichtung am Haupttransformator. Ihre betriebstechnischen Vorteile scheinen jedoch so bedeutend, dass es unserer Ansicht nach angebracht ist, die diesbezügliche Preiszunahme in Kauf zu nehmen.»

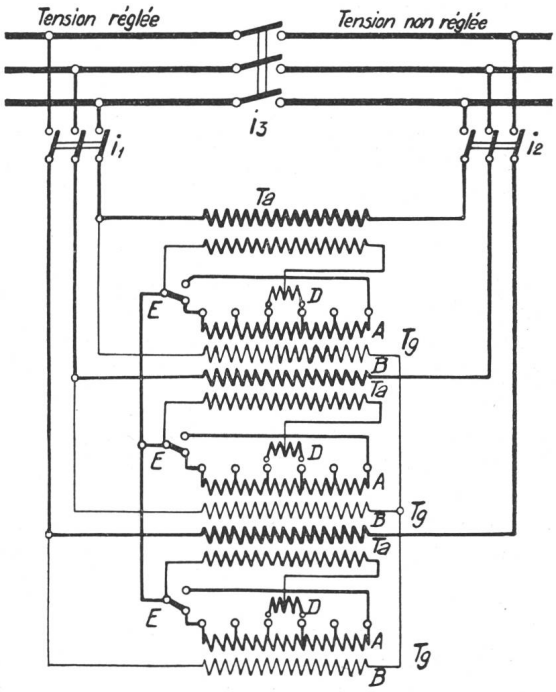

Fig. 26.
Schema einer Regulieranlage mit Doppeltransformierung.

Der *Vorsitzende* verdankt den Diskussionsrednern die Voten, mit denen sie ihr Interesse am behandelten Thema bekundet haben.

Herr Dr. *W. Hess* schreibt uns nachträglich, in Ergänzung seines Votums (siehe oben): «In Ergänzung meiner Bemerkungen zu der Frage der Spannungsregelung von Anzapftransformatoren unter Zuhilfenahme der sogenannten Schubwicklungen, möchte ich noch ausführen, dass diese tertiär angeordneten Schubwicklungen in prinzipiell verschiedener Weise für den gedachten Zweck Verwendung finden können.

Einmal kann hierfür die variable Streuung durch Anordnung einer der gewollten Stufenzahl entsprechenden Anzahl Schubkreise dienstbar gemacht werden; in diesem Falle erhalten alle parallel zu schaltenden Schubwicklungen die

gleiche Windungszahl. Anderseits kann aber auch durch variable Windungszahl der aufeinander arbeitenden Schubkreise der Kraftfluss beeinflusst und auf diesem Wege die zu regulierende Sekundärspannung variiert werden. In beiden Fällen können also die Anzapfungen auf der Primär- oder Sekundärseite wegfallen, und die Schubwicklungen können, da man in der Wahl der Windungszahl resp. Spannung frei ist, mit Niederspannungsstufenschaltern auf einen weiten Leistungsbereich in Verbindung gebracht werden.

Im ersterwähnten Falle, d. h. bei Verwendung variabler Streuung, gibt es eine Grenze, oberhalb welcher die durch die Unsymmetrie der Wicklungen in ihrer axialen Ausdehnung hervorgerufenen dynamischen Kräfte nicht mehr durch die Abstützungen bewältigt werden können. In diesem Falle wird es notwendig, den durch die Streuung abgedrängten Kraftlinien durch Einbau von Rückschlusskernen bestimmte Wege zu weisen, wodurch, wie erwähnt, einerseits die Kraftwirkungen der gegeneinander unsymmetrisch gelagerten Wicklungen reduziert und anderseits die durch die Streuung hervorgerufenen zusätzlichen Verluste auf zusätzliche Werte gebracht werden können. Immerhin bedeutet der gänzliche Wegfall von Anzapfungen, dass sowohl die Primär- wie auch die Sekundärwicklung infolge ihrer glatten Oberfläche sehr wirksam abgestützt werden können. Das gleiche trifft in noch höherem Masse für die Schubwicklung zu infolge der verhältnismässig geringen Windungszahlen und grossen Kupferquerschnitte. Die Benützung der variablen Streuung für die Spannungsregelung führt zu der Forderung, dass die Belastung nicht in allzuweiten Grenzen schwanken soll, wenn nicht die maximal auferlegte Streuung weit über das Mass der prozentualen Spannungsveränderlichkeit gesteigert werden soll. Als ein weiterer Nachteil kann die Variation der Transformatorreaktanz bezeichnet werden, welcher in der Wahl des Relaisschutzes Rechnung getragen werden muss. Sehr günstig wird sich hingegen diese Reguliermethode hinsichtlich der Netzkurzschlüsse verhalten. Diese Eigenschaft, verbunden mit dem Wegfall von Anschlüssen an die Arbeitswicklungen, sowie schliesslich die Anpassungsfähigkeit der Schubwicklungsspannung an die vereinfachte Regulierapparatur lassen das System in vielen, wenn auch nicht allen Fällen, als verwendungsfähig erscheinen.

Die zweite, oben erwähnte Reguliermethode, welche auf der Beeinflussung des Kraftflusses durch die Schubwicklungen beruht, ist im Prinzip theoretisch bereits sehr eingehend im Bulletin behandelt worden (vgl. Wirz, Transformatoren mit Wicklungen in Kaskadenschaltung, Bulletin 1927, Nr. 5). Die dort behandelte Einwirkung der Schubwicklung (Kaskadenwicklung genannt) auf das Zusammenarbeiten verteilter Primär- und Sekundärwicklungen beim Einphasentransformator lässt sich sinngemäss auch auf den hier in Betracht fallenden Drehstromkerntransformator übertragen.» (Fortsetzung folgt.)

La Situation financière des entreprises suisses de production et de distribution d'énergie électrique.

Par *O. Ganguillet*, Ingénieur, Secrétaire de l'Union de Centrales Suisses d'Electricité, Zurich.

621.311.00.3(494)

Seit einigen Jahren werden im Bulletin regelmässig Auszüge aus den Geschäftsberichten bedeutenderer schweizerischer Elektrizitätswerke publiziert, soweit als möglich nach einheitlichem Schema. Die folgenden Tabellen sind eine Zusammenstellung der vergleichbaren Zahlen dieser Berichte und geben einen Ueberblick über die heutige finanzielle Lage der schweizerischen Energieversorgung. Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass unsere Elektrizitätswerke vorsichtig und im wohlverstandenen Interesse der Energiekonsumenten, d. h. der Allgemeinheit unseres Landes, verwaltet werden.

Depuis quelques années le Bulletin publie régulièrement des extraits de rapports de gestion de centrales électriques suisses importantes, autant que possible suivant un schéma uniforme. Les tableaux suivants sont un résumé des chiffres comparables relevés dans ces rapports; ils donnent une idée de la situation financière actuelle des entreprises de production d'énergie en Suisse et montrent que nos centrales sont administrées prudemment et dans l'intérêt bien compris du consommateur c'est-à-dire de la collectivité du pays tout entier.

Pour nous rendre compte de la situation financière et de la tendance poursuivie par les entreprises suisses de production et de distribution d'énergie électrique, nous avons depuis 8 ans fait des extraits des rapports de gestion des principales entreprises et réuni en des tableaux les chiffres les plus suggestifs.

Vu que le genre des entreprises diffère beaucoup de l'une à l'autre, nous les avons groupées en 4 catégories différentes, chaque catégorie ne comprenant alors que des entreprises de nature comparable.

La catégorie A comprend des entreprises qui livrent, sinon la totalité, du moins la majeure partie de leur production à des revendeurs, sous haute tension, comme par exemple l'entreprise d'Olten-Aarburg, les Forces Motrices du Nord-Est, l'Usine de Brusio, etc.

La catégorie B comprend des producteurs d'énergie qui vendent en gros et en détail, dont la clientèle est mixte, partie revendeurs achetant sous haute tension, partie petits abonnés alimentés à basse tension. Entrent dans cette catégorie les Forces Motrices Bernoises, les Entreprises Electriques Fribourgeoises, etc.

La catégorie C comprend les principales entreprises municipales qui vendent à basse tension l'énergie qu'elles produisent pour la plus grande partie elles-mêmes. Entrent dans cette catégorie les principales villes.

La catégorie D comprend des entreprises à distribution régionale ne produisant pas leur énergie elles-mêmes (ou tout au plus pour une très faible fraction). Entrent dans cette catégorie les entreprises cantonales de la Suisse orientale et les deux entreprises coopératives du Nord-Ouest.

Les tableaux qui se rapportent aux catégories A, B et D donnent des chiffres concernant la production, le capital encore à rémunérer, les amortissements, les recettes réalisées et le prix moyen de vente par kWh produit ou acheté.

Le tableau se rapportant à la catégorie C (entreprises municipales) indique en plus les sommes qui ont été versées dans les caisses communales et la réduction possible du prix de vente si l'on avait renoncé à percevoir cet impôt indirect.