

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 28 (1937)
Heft: 11

Artikel: Mittel zur Spannungsregulierung
Autor: Puppikofer, H. / Judith, T. / Bossi, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058734>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

4. Mittel zur Spannungsregulierung.

Referat von *H. Puppikofer*, Oberingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Mittel zur Regelung der Spannung in Sekundärnetzen sind äusserst mannigfaltig. Jede Konstruktion eignet sich besonders gut für eine bestimmte Aufgabe. Leider genügt aber keine der bekannten Lösungen gleichzeitig allen Anforderungen, so dass immer eine Auswahl entsprechend dem vorliegenden Problem vorgenommen werden muss. Sieht man von den passiven Reguliereinrichtungen (Kondensatoren usw.) ab, die durch Blindstromverschiebung auf die Spannung wirken, so kann man die bekannten aktiven Regler am zweckmässigsten einteilen in

- a) stufenweise regulierende Einrichtungen und
- b) kontinuierlich regulierende Einrichtungen.

a) Die *stufenweise regulierenden Einrichtungen* bestehen durchweg aus Transformatoren, z. B. einem Autotransformator mit Anzapfungen und einem Stufenschalter, der erlaubt, das Wechseln der Anzapfungen unter Last und auch automatisch vorzunehmen. Die primitivste Ausführung dieser Art ergibt nur eine einzige Spannungsstufe. In diesem Falle wird zur Reduktion der Dauerverluste ein «Booster» oder Serietransformator verwendet, dessen Seriewicklung in der zu regelnden Leitung und dessen Erregerwicklung entweder an die Spannung angeschlossen oder kurzgeschlossen ist. Dieser Regler gibt entweder alles oder nichts. Er wird durch

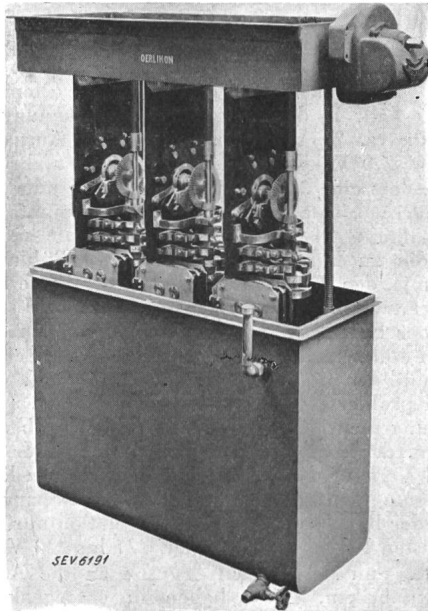


Fig. 1.
Stufenschalter für $\pm 6\%$ in 10 Stufen.

bekannte Firmen, z. B. die Ateliers de Constructions électriques de Charleroi, speziell in Frankreich und Belgien gebaut; er erhöht die Spannung in der Regel um $+10\%$. Dieser Apparat scheint wohl da verwendbar, wo die Belastung des Netzes sehr rasch zu- und abnimmt, so dass kein dauernder Zwischenzustand eintreten kann.

Für unsere empfindlicheren und gemischten Netze sind andere Einrichtungen nötig. Die naheliegendste Konstruktion ergab sich durch Vereinfachung der bewährten Stufenschalterkonstruktionen. Einen Schritt in dieser Richtung zeigt Fig. 1. Der Stufentransformator mit angebauteinem kleinem Plattenschalter Fig. 1a ist gebaut für 250 kVA und eine Regelung der Spannung von $\pm 6\%$ in 10 Stufen. Für kleinere Stufenzahlen ist der Serietransformator geeigneter, dessen Erregerwicklung entweder teilweise abgeschaltet oder durch einen kleinen regulierbaren Autotransformator gespeist wird. Fig. 2 zeigt das Schema eines Serietransformators, dessen Erregerwicklung zu- oder abgeschaltet wird, so dass eine Regelung der Netzspannung in ± 3 Stufen von 1,25 bis 2,5 % zustande kommt. Fig. 3 zeigt das Aeusserere eines solchen kompletten Netzreglers für 100 kVA Durchgangsleistung.

Die äusserste Feinheit der Stufenregelung wird bei jener, deutschen, Konstruktion erreicht, bei welcher ein Stromabnehmer auf den nackten Windungen der Sekundärwicklung

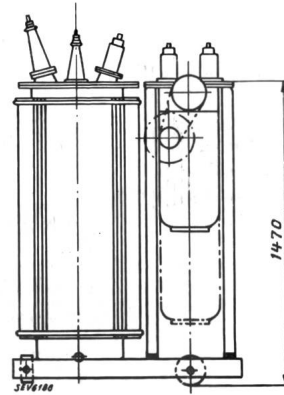


Fig. 1a.

Autotransformator mit angebauteinem Stufenschalter, 250 kVA, 400 V, $\pm 6\%$ in 10 Stufen.

gleitet. Die Bildung von Windungskurzschlüssen wird dadurch vermieden, dass der Stromabnehmer aus einer Rolle von Widerstandskohle besteht.

Allen stufenweise regulierenden Einrichtungen gemeinsam ist das Vorhandensein von Kontakteinrichtungen, die Stromkreise unterbrechen und schliessen müssen. Im Widerstreit

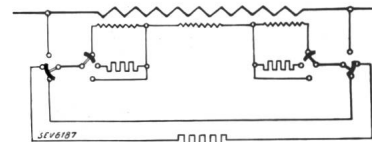


Fig. 2.

Schema eines Stufenreglers mit Serietransformator und umschaltbarer Erregerwicklung.

zwischen Preis und robuster Konstruktion muss immer ein Kompromiss gezogen werden, der die Lebensdauer der Einrichtung bestimmt.

b) Die *kontinuierlich regulierenden Einrichtungen* sind ein alter Traum des Elektrotechnikers. Im Buche von Arnold über die Transformatoren aus dem Jahre 1910 ist ein Regulier-Serietransformator der Westinghouse erwähnt, bei wel-

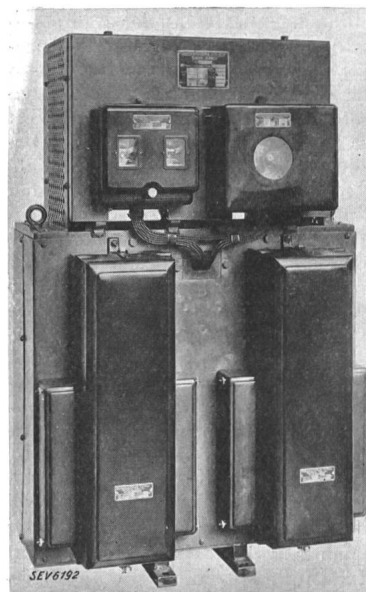


Fig. 3.

Aeusseres des Stufenreglers nach Fig. 2. 100 kVA, 400 V, ± 3 Stufen von 1,25 bis 2,5 %.

chem die Windungen von einem Schenkel auf den andern hinüber gewickelt werden können, in der Weise, dass z. B. die additiven Ampèrewindungen ab- und die subtraktiven Ampèrewindungen zunehmen. Bei dieser Lösung waren nur vier Luftspalte ähnlicher Grösse vorhanden, wie bei einem

gewöhnlichen Transformator. Aus der Beanspruchung der Isolation der ständig auf- und abrollenden Windungen ergaben sich aber so grosse konstruktive Schwierigkeiten, dass dieser Gedanke nicht weiter verfolgt wurde.

Eine andere Lösung wirkt, nämlich einem Drehspulinstrument, durch Variation des magnetischen Flusses einer Drehspule, die im Felde eines festen Magnetkörpers gedreht wird. Man findet diese Idee beim Regler der Cuénodwerke¹⁾ verwirklicht. Steht die Ebene der Drehspule senkrecht zur Kraftlinienrichtung, so wird darin die maximale Zusatzspannung induziert; steht sie parallel dazu, so wird praktisch nichts induziert. Dieser Regler ist naturgemäss ein einphasiger Apparat mit ziemlich grosser Streuinduktivität. Es muss hier aber betont werden, dass bei allen Reglern, die den Charakter von Serietransformatoren tragen, d. h. nur eine Zusatzspannung erzeugen, der hierzu nötige Magnetisierungsstrom mit dem Uebersetzungsverhältnis multipliziert werden muss, um mit dem Durchgangsstrom verglichen zu werden. Bei einem solchen Apparat, der beispielsweise bei 10 % Regulierspannung 40 % Magnetisierungsstrom aufweist, beträgt dieser Strom, auf die Primärseite bezogen, nur 4 % und der Leistungsfaktor, der sich bei induktionsfreier Belastung ergibt, erreicht doch den annehmbaren Wert von 0,999.

Die A.-G. Brown, Boveri & Cie. hat die alte Idee des Abwickelns wieder aufgegriffen und in geschickter Weise verwirklicht. Die Sekundärwicklung bleibt aber fest im Raume

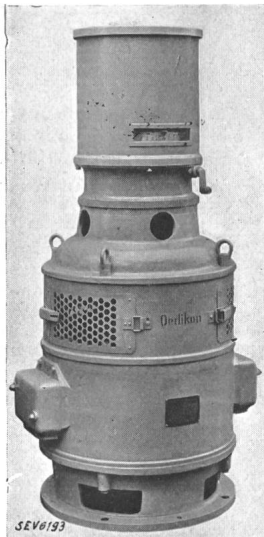


Fig. 4.

Netzregler mit Induktionsregler in Luft 100 kVA, 400 V, $\pm 10\%$, oder 30 kVA $\pm 30\%$

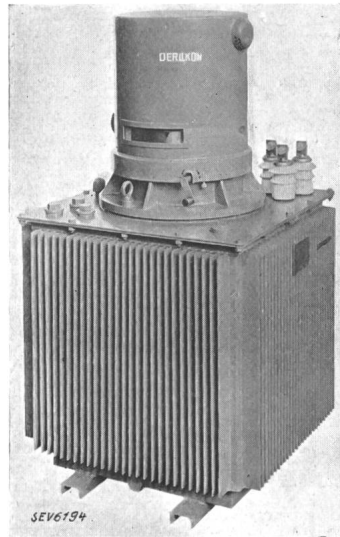


Fig. 5.

Netzregler mit Induktionsregler in Oel für Freiluftaufstellung 400 kVA, 400 V $\pm 5\%$. In der Haube befindet sich das Spannungsrelais Fig. 7.

und die Einstellung der wirksamen Windungszahl erfolgt durch einen Stromabnehmer, der sich um die Säulenaxe des Eisenkörpers dreht und isoliert durch einen Luftspalt hindurchgeführt wird. Der Brown-Boveri-Reguliertransformator wurde hier schon beschrieben²⁾. Der Apparat ist von Haus aus einphasig und hat bezüglich Magnetisierungsstrom ähnliche Eigenschaften wie der Cuénod-Regler oder wie ein Induktionsregler.

Der einzige Netzregler, der gänzlich ohne jeden Kontakt arbeitet, ist der Induktionsregler. Er kann auch wegen der starken konzentrischen Bauart mit den kleinsten Luftspalten arbeiten, die je nach Typ 2 bis 5 Zehntelmillimeter betragen. Er eignet sich speziell für die dreiphasige Bauart und ist dann infolge des Wegfalls pulsierender Felder absolut geräuschlos. Die Maschinenfabrik Oerlikon hat diese ihre alte Spezialität auch den Bedürfnissen der Sekundärnetzregelung angepasst. Fig. 4 zeigt einen solchen Netzregler mit Luftkühlung, Fig. 5 einen ähnlichen mit Oelkühlung für Freiluftaufstellung. Das Neue liegt hier in der konstruktiven

¹⁾ Alle Rechte auf diesen Regler gingen am 1. Mai 1937 an die Ateliers de Sécheron über, siehe auch Seite 255.

²⁾ Diskussionsbeitrag Kübler, Bull. SEV 1934, Nr. 22, S. 597.

Vereinigung der verschiedenen Organe, die noch erläutert werden.

Betrachtet man kurz die verschiedenen aktiven Regler vom Standpunkt der Kostenfrage, so muss betont werden, dass die Stufenregler sowohl die kleinsten Anschaffungs- als auch Jahreskosten aufweisen. Sie haben die kleinsten Verluste und in der Regel auch die kleineren Magnetisierungsströme. Dafür ist aber bei den stufenlosen Reglern die Qualität der Regelung besser: sie ist kontinuierlich und kann

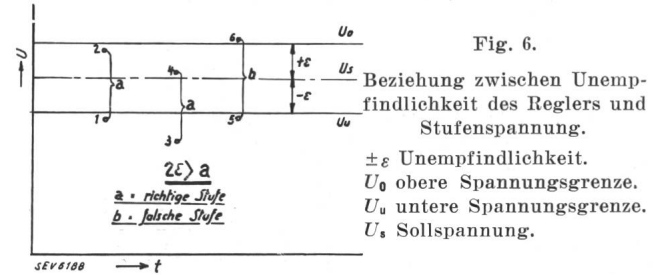


Fig. 6.

Beziehung zwischen Unempfindlichkeit des Reglers und Stufenspannung.

$\pm \epsilon$ Unempfindlichkeit.
 U_o obere Spannungsgrenze.
 U_u untere Spannungsgrenze.
 U_s Sollspannung.

bei einigen Ausführungen beliebig rasch gemacht werden. Ausserdem ist wegen des Wegfalles von schaltenden Kontakten die Lebensdauer zweifellos grösser und der Unterhalt geringer.

Bei jedem Netzregler sind noch zwei wichtige Organe vorhanden, nämlich das Messorgan und der Servomotor oder Antrieb. Das Messorgan oder Spannungsrelais stellt die Abweichung der Spannung vom Sollwert fest und veranlasst die Verstellung des Netzreglers durch den Servomotor. Die Anforderungen an das Messorgan sind verschieden, je nach Art des Netzreglers selbst. Jedes Messorgan hat eine bestimmte Unempfindlichkeit $\pm \epsilon$, die in Fig. 6 in einem Spannungszeitdiagramm angedeutet ist. Solange der Istwert der regulierten Spannung vom Sollwert U_s nicht mehr als $\pm \epsilon$ abweicht, bleibt der Regler in Ruhe. Ist die regulierte Spannung kleiner als U_n oder grösser als U_o , dann wird sie durch den Regler in das Unempfindlichkeitsband zurückgeführt. Bei einem Stufenregler mit der Stufenspannung a z. B. wird die Spannung von den Punkten 1 oder 3 zurückgeführt in das Band an die Punkte 2, bzw. 4. Hat der Stufenregler die

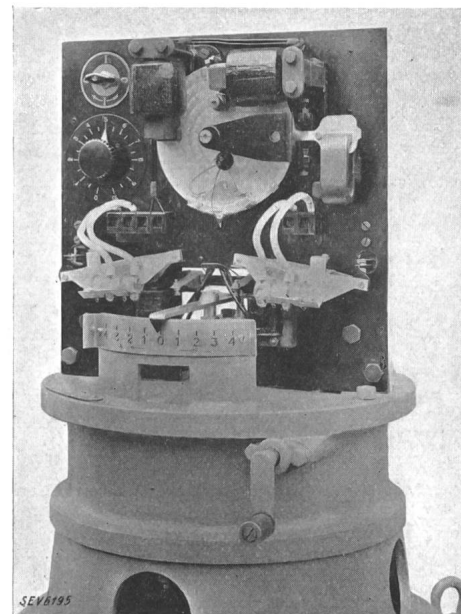


Fig. 7.

Spannungsrelais eines Netzreglers mit Quecksilberschützen.

Stufenspannung b , so wird eine knapp unter der unteren Grenze liegende Spannung 5 über die obere Grenze nach 6 korrigiert, was das sofortige Ansprechen des Reglers zur Rückkorrektur und sein Pendeln zur Folge haben wird. Man erkennt daraus, dass die Stufenspannung eine bestimmte Beziehung zur Unempfindlichkeit des Reglers haben muss. Besser gesagt, es muss die Reglerunempfindlichkeit 2ϵ grösser sein

als die Stufenspannung a . Da allgemein eine Stufenspannung von 1 bis 1,5 % als zulässiger Sprung anerkannt wurde, ergibt sich daraus, dass die Unempfindlichkeit des Messorganes von Stufenreglern 2 % und mehr betragen wird, was keine sonderlich hohe Leistung ist.

Bei einem stufenlosen Regler tritt für das Messorgan an Stelle der Stufenspannung diejenige Zusatzspannung, welche bei gegebener Antriebsgeschwindigkeit in der kürzest möglichen Kontaktzeit durch den Regler erzeugt werden kann.

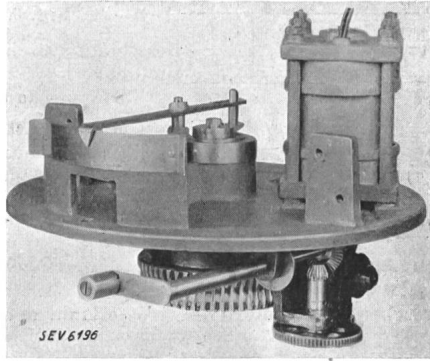


Fig. 8.

Antrieb eines Netzreglers mit Induktionsregler.

Bei Induktionsreglern kann die volle Empfindlichkeit des Messwerkes ausgenutzt werden, bei Antrieb durch Elektromotor für eine sehr genaue, bei Drucköltrieb ausserdem für eine sehr rasche Regelung. In der Regel werden die Spannungsrelais als Ferrarisinstrumente, ähnlich wie Zähler, gebaut. Ein solches Ferraris-Spannungsrelais zeigt Fig. 7. Es besitzt zwei Triebmagnete und einen Bremsmagnet. Als

wärmefehler auf 0,2...0,3 % heruntergebracht. Die Steuerwippe des Relais schaltet den elektrischen Antriebsmotor über die Schütze für Rechts- oder Linkslauf ein, wobei durch Hilfskontakte, die Widerstände im Spannungskreis steuern, das Messorgan in die Mittellage zurückgeführt wird. Die Schützenkontakte, für die ebenfalls Quecksilberschaltwippen verwendet wurden, sind mit dem Anker des Schützenmagneten nur federnd verbunden, so dass sie, durch Anschläge gesteuert, auch als Endschalter dienen können.

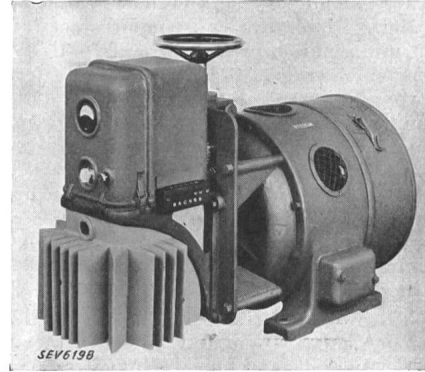


Fig. 10.

Netzregler mit Antrieb durch Oeldruckspannungsregler, 20 kVA, 220 V \pm 10 %.

Spannungsrelais mit besserem Wirkungsgrad, d. h. solche mit kleinerem Verbrauch und höherem Drehmoment und damit kleinerer Unempfindlichkeit, werden nach dem Motorprinzip gebaut. Ein solches Meßsystem wurde kürzlich hier beschrieben³⁾.

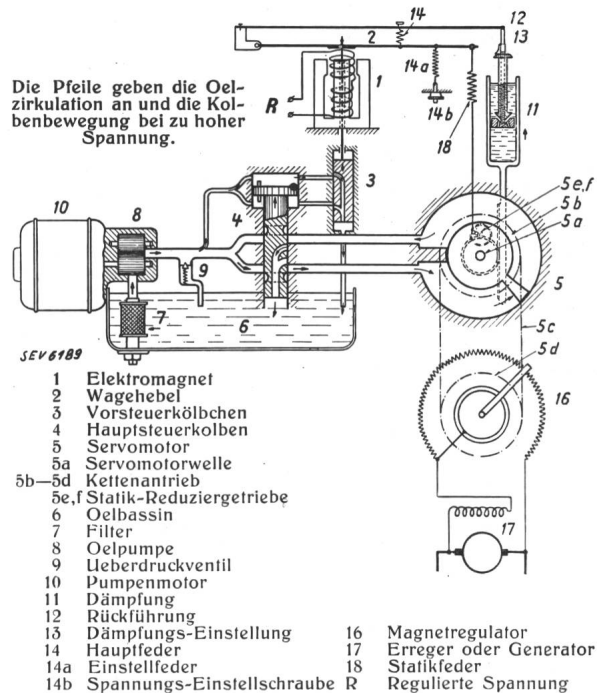
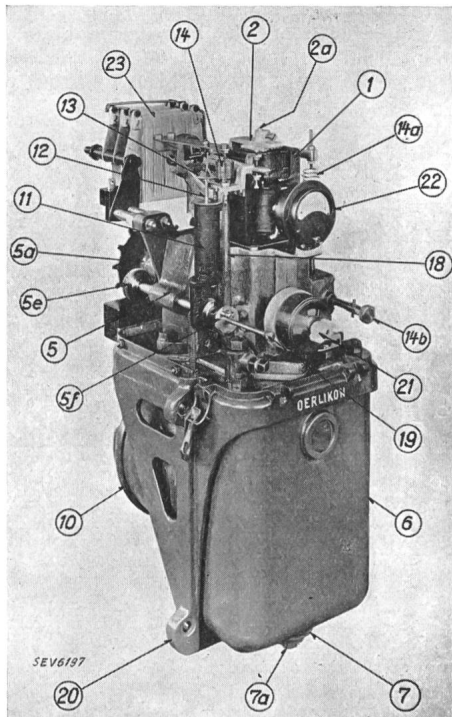


Fig. 9.

Oeldruckspannungsregler.

KO-Regler mit abgenommenen Verschaltungen (links) und das Regulierschema (rechts).

Kontaktsystem ist auf der Ferrarisscheibe eine Quecksilberschaltröhre montiert, die derart gebaut wurde, dass sich der Quecksilbertropfen bis zum Kontaktschluss frei bewegen kann, so dass die Reibung auf das Minimum reduziert wird. Es lässt sich damit die Unempfindlichkeit auf $\pm 0,3$ % reduzieren. Durch eine Temperaturkompensation wurde der An-

Antrieb der Netzregler. Die häufigste und billigste Antriebsart, sowohl für Stufenregler als auch für stufenlose Netzregler, ist die mit Elektromotor. Das Spannungsrelais

³⁾ A. Gantenbein, Ein neues elektrisches Meßsystem für hochempfindliche und raschwirkende Regler und Relais. Bull. SEV 1936, Nr. 22, S. 636.

nach Fig. 7 gehört zu einem kleinen Induktionsregler, dessen Antrieb Fig. 8 zeigt. Er hat den denkbar einfachsten Aufbau und besteht nur aus dem kleinen vertikalaxigen Motor und

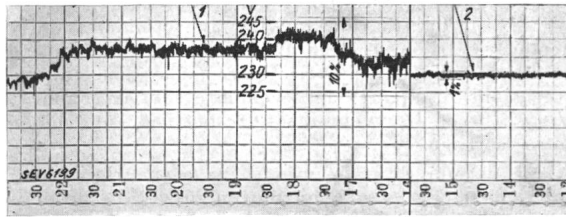


Fig. 11.

Streifen eines registrierenden Voltmeters, aufgenommen in einer Station mit (Kurve 2) und ohne (Kurve 1) KO-Netzregler mit Oeldruckantrieb (400 kVA extern 400 V \pm 5 %). Spannungsregulierdiagramm im Sekundär-Netz 380/220 V 50 Per./s. KO mit Induktions-Regler.

einem Doppelschneckenantrieb, der in einem Oelbassin versenkt wird. In Fig. 5 ist der Zusammenbau bei einem ölgekühlten Netzregler sichtbar.

Die Eignung eines Netzreglers zur Regelung von raschen Spannungsschwankungen, die z. B. durch Elektroöfen hervor-

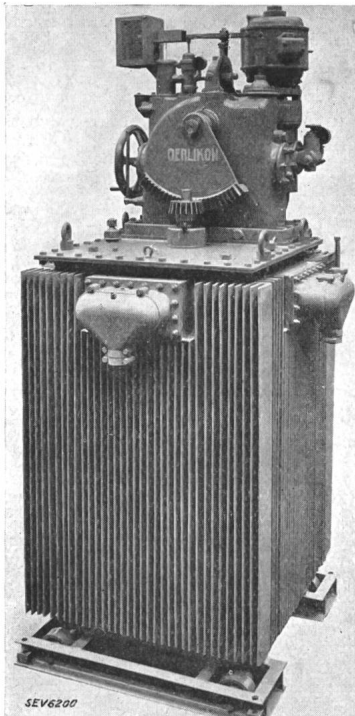


Fig. 12.

Induktionsregler mit Oeldruckantrieb für Speisepunktregelung 2000 kVA, 600 V \pm 4 %.

gerufen werden, ist aus der Zeit ersichtlich, die er braucht, um den ganzen Regulierbereich durchzugehen. Je kürzer diese Zeit, um so besser die Regulierung. Die nötigen kurzen Zeiten von 1 bis 2 Sekunden für Regulierbereiche von 20 bis 30 % sind nur mit Induktionsreglern mit Oeldruckantrieb

erreichbar. Der von Oerlikon entwickelte Oeldruckspannungsregler kann auch ohne weiteres zum direkten Verstellen eines Netzreglers gebraucht werden. Fig. 9 zeigt den Aufbau des Oeldruckspannungsreglers, bei welchem das Messorgan mit dem Antrieb organisch kombiniert ist. Er besteht aus dem Messorgan, der Oelpumpe, dem Steuerkolben, dem Hauptkolben und dem Servomotor. Der fertig zusammengebaute, schnellwirkende Netzregler ist in Fig. 10 abgebildet. Es sei zugegeben, dass der Preis eines Druckölantriebes so hoch ist, dass sich seine Anwendung nur in besondern Fällen rechtfertigt. Wo er aber zur Anwendung gelangt, lassen sich damit sehr gute Resultate erzielen, wie Fig. 11 zeigt. Das Unempfindlichkeitsband ist hier weniger als 1 % breit, so dass das Relais eine Unempfindlichkeit von \pm 0,3 bis höchstens \pm 0,4 aufweist.

Der Regler nach Fig. 12 tritt eigentlich aus der Reihe der Netzregler heraus. Es ist ein Induktionsregler von 2000 kVA mit Oeldruckantrieb. Da jedoch die Speisepunktregelung in schweizerischen städtischen Netzen sehr gebräuchlich ist, haben wir dieses Beispiel der Vollständigkeit halber hier noch beigefügt.

Schliesslich muss noch kurz auf die Verwendung von Netzreglern in Maschennetzen eingetreten werden. Werden, wie im Beispiel Fig. 13 angedeutet ist, die Sekundärseiten zweier Transformatorstationen I und II in einer reinen Verteilstation III zusammengeschlossen, so entsteht dasselbe, wie

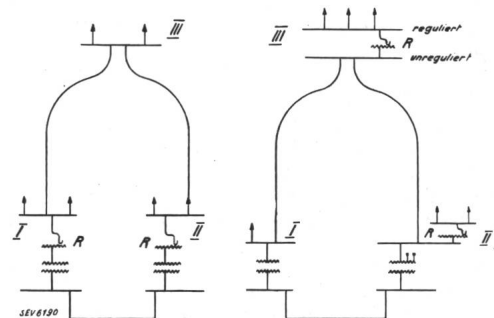


Fig. 13.

Spannungsregelung in vermaschten Netzen. Falsch (links) und richtig (rechts). R Netzregler.

bei der Parallelschaltung zweier Transformatoren. Für eine bestimmte Belastung und einen bestimmten $\cos \varphi$ kann durch Aenderung des Uebersetzungsverhältnisses die Differenz in der Reaktanz der Strompfade I—III und II—III ausgeglichen werden. Dieser Zustand kann mit den Netzreglern R in der Masche nie festgehalten werden, und so müssen, ungeachtet der Art des Netzreglers, Ausgleichströme fliessen, die natürlich zusätzliche Verluste hervorrufen. Bei Reglern, die den Spannungsvektor nur in der Grösse ändern, wird allein die Blindstromverteilung über die parallelen Wege verändert. Bei Induktionsreglern wird auch die Wirkstromverteilung betroffen. Das Ergebnis ist bei beiden dasselbe: zusätzliche Verluste. Die Abhilfe ist ausserordentlich einfach: Die Netzregler dürfen nicht in die Maschen, sondern nur in den Abzweigen der Maschen eingebaut werden. Die rechte Seite der Fig. 13 zeigt die richtige Schaltung.

Conférence de M. E. Juillard, professeur, Lausanne, pour la maison Cuénod S. A., Genève.

Les Ateliers H. Cuénod S. A. à Genève se sont donné pour tâche de construire un appareil sans aucun contact glissant, réalisant la modification de la tension de façon continue. Ces conditions ramènent évidemment au régulateur d'induction classique. Toutefois, la disposition d'enroulements subdivisés dans un grand nombre d'alvéoles rend l'appareil délicat lorsqu'il s'agit de petites puissances (1 à 10 kVA) et relativement coûteux. Aussi les Ateliers Cuénod ont-ils cherché à réaliser un régulateur d'induction avec bobines localisées, dont le nombre soit réduit au minimum. C'est ainsi qu'ils ont créé les appareils monophasés et triphasés dont les schémas de principe sont indiqués en fig 1 et 2.

Monsieur Puppikofer a indiqué dans son exposé le principe de ces appareils. Il est donc inutile d'y revenir. Je me bornerai à signaler quelques particularités.

L'appareil monophasé fournit une tension qui reste en phase avec la tension d'excitation; il se comporte en cela comme un transformateur sectionné. Dans la position de «tension nulle», c. à d. dans la position où le plan des spires du rotor est situé dans la direction générale des lignes de forces, le courant de ligne traversant le rotor produirait à lui tout seul un flux d'induction entrant par un bec polaire et ressortant par l'autre bec du même pôle. Ce flux d'induction créerait par sa variation une force électromotrice de self in-

duction et une chute de tension gênante; pour supprimer cet inconvénient, le constructeur a disposé la spire en circuit CC qui annihile ce flux.

Dans l'appareil triphasé, dont la fig. 2 donne le cas le plus simple, 3 pôles identiques sont disposés à 120° l'un de l'autre. La force électromotrice induite dans le rotor est nulle lorsque le plan des spires du rotor est normal à l'axe de symétrie entre deux pôles (position indiquée en fig. 2).

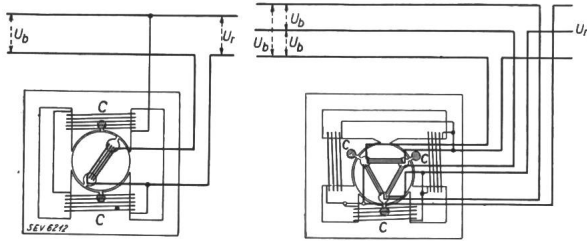


Fig. 1.

Fig. 2.

Schéma du régulateur monophasé (fig. 1) et triphasé (fig. 2). U_b tension brute. U_r tension réglée.

L'appareil comporte également une cage en court-circuit, pour les mêmes motifs que ci-dessus, et constituée par les trois barres CCC réunies électriquement entre elles. Contrairement au régulateur d'induction triphasé classique, la tension réglée dans l'appareil des Ateliers Cuénod, reste en phase, à très peu de chose près, avec la tension brute: la tension additionnelle varie ici surtout en grandeur, et pas en direction, ce qui est l'inverse du régulateur d'induction à champ tournant.

Au reste, la plupart des difficultés classiques du régulateur d'induction ordinaire qui se retrouvent dans les appareils de la Maison Cuénod, sont résolues de la même façon. Le courant d'excitation est limité par un entrefer aussi petit que possible; il peut du reste être compensé complètement lorsque cela en vaut la peine, par des capacités convenables. Le bruit, le ronflement dûs à l'aimentation variable d'un rotor mobile, sont éliminés par un centrage rigoureux et des appuis sans jeu. Au reste, je ne saurais mieux faire que de vous signaler que la Maison Sprecher et Schuh, qui s'est chargée de la vente de ces appareils, en a installé un ici même. Je vous engage à aller l'examiner. Vous verrez d'un coup d'œil, que l'appareil règle automatiquement la tension, à l'aide d'un voltmètre à contact par tube de mercure, et d'un petit moteur d'entraînement du rotor, le tout fixé sur le régulateur d'induction lui-même.

Permettez-moi maintenant, Messieurs, d'aborder une question d'ordre plus général parce qu'elle intéresse tous les genres de survolteurs à courant alternatif: la question des réseaux triphasés déséquilibrés. Dans quel cas faut-il faire usage d'un régulateur triphasé, et dans quel cas faut-il utiliser au contraire 2 ou 3 régulateurs monophasés?

1. Notions fondamentales.

Les 3 tensions composées d'une ligne triphasée sont dites «asymétriques» lorsque leurs valeurs efficaces diffèrent l'une de l'autre. Quelles que soient cependant ces différences, on sait que, si on représente ces 3 tensions par des vecteurs, la somme géométrique des 3 vecteurs est nulle: les 3 tensions

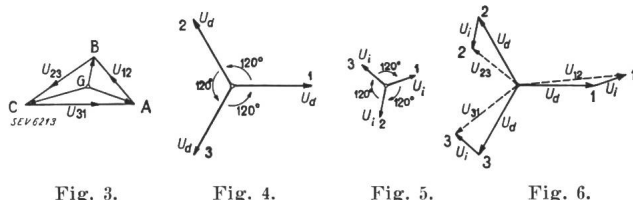


Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 5.

Fig. 6.

forment toujours un triangle (fig. 3). Les tensions simples de ce système asymétrique sont, comme on le sait, représentées par les vecteurs issus du centre de gravité de ce triangle: $GA = U_{s1}$; $GB = U_{s2}$; $GC = U_{s3}$. On sait aussi que tout système asymétrique de 3 tensions peut être considéré comme la superposition de 2 systèmes symétriques, l'un dit: *système direct*, U_d , dans lequel les tensions se succèdent dans le temps dans le même ordre que les tensions données;

l'autre, dit *système inverse*, U_i , dans lequel les tensions se succèdent dans l'ordre inverse.

Pratiquement, cela veut dire qu'appliquer au primaire d'un transformateur triphasé un système de 3 tensions asymétriques, cela revient à appliquer d'abord un système direct U_d (Fig. 4), qui fournira à vide au secondaire un même système symétrique U_d , et ensuite, un système inverse U_i (Fig. 5), qui donnera au secondaire un système inverse U_i . Les tensions résultantes au secondaire sont la somme des 2 tensions U_d et U_i , combinées respectivement comme le montre la fig. 6.

Cette décomposition d'un système asymétrique en 2 systèmes symétriques donne un moyen précis d'exprimer cette asymétrie. On appelle *degré d'asymétrie* le rapport de la valeur efficace de la tension inverse à la valeur efficace de la tension directe, soit:

$$\alpha = 100 \frac{U_i}{U_d} \%$$

Et l'on sait que les tensions vraies U_{12} , U_{23} , U_{31} , ne diffèrent jamais de plus de $\alpha \%$, en plus ou en moins, de la moyenne arithmétique des 3 tensions.

Lorsque l'asymétrie est inférieure à 20 %, les tensions directe et inverse sont données par des relations très simples.

La *valeur de la tension directe* est la moyenne arithmétique des 3 tensions données:

$$U_d = \frac{1}{3} (U_{12} + U_{23} + U_{31})$$

La valeur de la tension inverse est donnée par les écarts des tensions d'avec la moyenne.

Si:

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= (U_{12} - U_d) \\ \Delta_{23} &= (U_{23} - U_d) \\ \Delta_{31} &= (U_{31} - U_d) \end{aligned}$$

la tension inverse est alors:

$$U_i = \sqrt{\frac{2}{3} (\Delta_{12}^2 + \Delta_{23}^2 + \Delta_{31}^2)}$$

Exemple: Supposons qu'on ait mesuré les 3 tensions 204, 206, 190 V. La tension directe est dans ce cas:

$$U_d = \frac{1}{3} (204 + 206 + 190) = 200 \text{ V.}$$

La tension inverse est:

avec:

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= 204 - 200 = 4 \text{ V} \\ \Delta_{23} &= 206 - 200 = 6 \text{ V} \\ \Delta_{31} &= 190 - 200 = -10 \text{ V} \end{aligned}$$

$$U_i = \sqrt{\frac{2}{3} (4^2 + 6^2 + 10^2)} = 10,1 \text{ V.}$$

Et le degré d'asymétrie est:

$$\alpha = \frac{10,1}{200} \cdot 100 = 5,05 \%$$

Ce même degré d'asymétrie se retrouve sur les 3 tensions simples définies ci-dessus (tensions déterminées par le centre de gravité du triangle des tensions composées).

Or, un transformateur triphasé, quel que soit le couplage de ses enroulements primaire et secondaire, *transmet à vide intégralement au secondaire le degré d'asymétrie des tensions appliquées au primaire*. Il n'existe pas de couplage qui atténuerait cette asymétrie, à moins que les rapports de transformation des différentes phases soient différents les uns des autres.

Notons encore que les tensions simples, telles que définies plus haut par le centre de gravité du triangle des tensions composées, peuvent être mesurées aisément: il suffit de placer *en étoile* sur le réseau 3 impédances identiques (par ex. 3 résistances). Les tensions simples sont celles qu'on mesure entre le point neutre ainsi constitué et les 3 lignes.

2. Charges asymétriques. — Cas d'un système sans fil neutre.

S'il n'existe pas de retour par le neutre, les 3 courants de lignes, supposés différents les uns des autres, forment néanmoins un système asymétrique fermé, c. à d. que leur somme géométrique étant nulle, les 3 vecteurs courants forment un triangle.

Ces 3 vecteurs peuvent aussi être décomposés en un système symétrique de 3 courants directs I_d et de 3 courants inverses I_i . Et le degré d'asymétrie est également défini par le rapport:

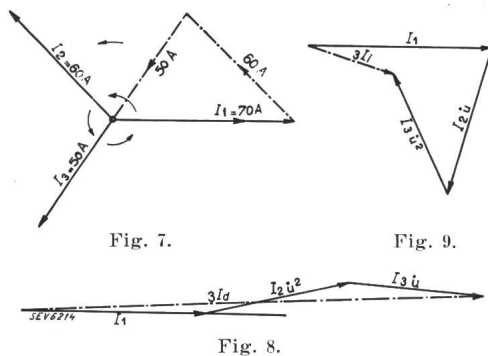
$$\alpha_i = 100 \frac{I_i}{I_d} \text{ ‰}$$

Ce degré d'asymétrie est très souvent considérable, de sorte que les formules simples citées plus haut sont inapplicables. Les 2 composantes directe et inverse sont données exactement par les relations:

$$\mathfrak{I}_d = \frac{1}{3} (\mathfrak{I}_1 + \mathfrak{I}_2 \dot{u}^2 + \mathfrak{I}_3 \dot{u})$$

$$\mathfrak{I}_i = \frac{1}{3} (\mathfrak{I}_1 + \mathfrak{I}_2 \dot{u} + \mathfrak{I}_3 \dot{u}^2)$$

expressions dans lesquelles $\mathfrak{I}_1, \mathfrak{I}_2, \mathfrak{I}_3$ sont les 3 vecteurs courants de ligne, les facteurs $\dot{u} = e^{j(120^\circ)}$ et $\dot{u}^2 = e^{j(240^\circ)}$ indiquent qu'il faut faire tourner le vecteur multiplié par \dot{u} d'un angle de 120° dans le sens de l'avance, \dot{u}^2 , d'un angle de 240° . Les 3 courants sont supposés se succéder dans la suite $\mathfrak{I}_3, \mathfrak{I}_2, \mathfrak{I}_1$.



Exemple: Soient les 3 courants de 70, 60, 50 A, représentés par le diagramme fig. 7; ils fournissent pour la composante directe $I_d = 59,7$ A, pour la composante inverse, $I_i = 11,7$ A (Fig. 8 et 9). L'asymétrie est ainsi de:

$$\alpha_i = 100 \frac{11,7}{59,7} = 19,5 \text{ ‰}$$

Chargé par le système direct, un transformateur triphasé assure 3 chutes de tension égales, qui se succèdent dans le sens direct; les 3 courants inverses provoquent de leur côté 3 chutes de tension égales se succédant dans le sens inverse; de sorte que la somme vectorielle de ces 3 groupes de chutes de tension produit 3 chutes de tension asymétriques, qui se soustraient géométriquement, disons vectoriellement, aux tensions asymétriques à vide.

Si donc le transformateur est alimenté par 3 tensions asymétriques et chargé lui-même asymétriquement, les tensions secondaires accuseront une asymétrie plus grande ou plus petite, selon que la charge asymétrique augmentera ou diminuera l'asymétrie des tensions primaires. On ne peut rien dire de plus, sinon que de recommander dans ce cas de placer la plus grande charge sur la tension la plus élevée pour atténuer autant que possible cette asymétrie secondaire. Mais cette asymétrie reste indépendante du mode de couplage des enroulements primaire et secondaire.

Les normes des Ingénieurs allemands (VDE 452, REM/1930) prescrivent, au paragraphe 15, que le degré d'asymétrie des tensions ne doit pas excéder 5 ‰.

3. Cas d'un système avec fil neutre.

S'il existe un retour par le neutre, le problème est plus compliqué. Aux deux systèmes de courants direct et inverse, calculés du reste au moyen des mêmes formules, valables aussi dans ce cas, s'ajoute comme 3^{me} composante un courant égal au $1/3$ du courant du fil neutre, dans chaque phase du transformateur.

Cette composante «monophasée» du courant n'a pas d'effet sur les tensions composées. Par contre, elle provoque une asymétrie des tensions simples qu'on peut exprimer par un déplacement du point neutre dans le triangle des 3 tensions composées.

Les 3 tensions simples n'émanent plus du centre de gravité, mais d'un autre point N (fig. 10), et présentent donc entre elles des différences pouvant dépasser de beaucoup le degré d'asymétrie des tensions composées.

Les normes allemandes citées plus haut exigent que le déplacement du point neutre NG ne dépasse pas 5 ‰ de la tension simple moyenne.

Ce déplacement du point neutre dépend par contre dans une très forte mesure du mode de couplage des enroulements d'excitation du survolteur.

4. Conclusions.

Et maintenant, revenons à la question posée au début de ces considérations. En résumé, on voit que:

1° Une ligne triphasée symétrique, mais chargée asymétriquement, et réglée par un régulateur triphasé, devient asymétrique du côté réglé, parce que les 3 chutes de tension sont inégales. Le constructeur doit veiller à ce que les chutes de tension du survolteur ne soient pas exagérées, et ne provoquent pas une asymétrie supérieure à 5 ‰.

2° Un survolteur triphasé transmet à vide intégralement du côté réglé l'asymétrie des tensions du côté brut.

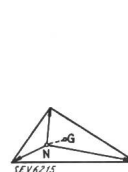


Fig. 10.

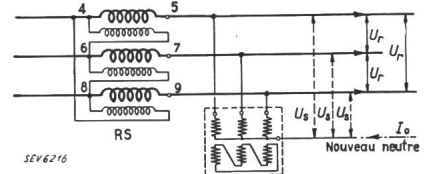


Fig. 11.

3° Une ligne triphasée asymétrique et chargée asymétriquement, peut présenter du côté réglé une asymétrie plus grande ou plus petite que du côté brut, selon la répartition des charges. Elle conserve le même degré d'asymétrie si les charges sont symétriques.

4° Si la ligne triphasée comporte un fil neutre, le survolteur triphasé doit être établi de façon que le point neutre côté réglé ne soit pas (ou excessivement peu) déplacé. (Couplage en triangle des enroulements d'excitation, par ex.).

De sorte que nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

Lorsque le degré d'asymétrie d'une ligne triphasée est inférieur à 5 ‰ du côté brut, on peut faire usage d'un régulateur triphasé.

Cet appareil possédera des chutes de tension assez petites, qui n'exagéreront pas outre mesure l'asymétrie du côté réglé. En outre, le couplage de ses enroulements d'excitation sera effectué de façon que le point neutre ne soit pas déplacé.

Enfin, l'appareil de mesure, lorsque le survolteur est automatique, doit mesurer la tension moyenne, et non pas une seule des 3 tensions de ligne.

Lorsqu'au contraire, le degré d'asymétrie côté brut est supérieur à 5 ‰, il est indispensable de faire usage:

a) De 3 appareils monophasés, s'il s'agit de rétablir la symétrie et de maintenir la tension à une valeur déterminée.

b) De 2 appareils monophasés seulement, s'il ne s'agit que de rétablir la symétrie, sans égard à la valeur de la tension.

Dans ces 2 derniers cas, le potentiel du fil neutre doit être reconstitué du côté réglé. On y arrive, par exemple, par l'emploi d'une bobine de réactance triphasée avec enroulement en étoile et secondaire équilibré (Fig. 11).

Referat von Th. Judith, Ingenieur der Fa. Spälti Söhne & Co., Zürich.

Neben der Störungsfreiheit der Energielieferung ist die Versorgung der Bezüger mit konstanter Verbraucherspannung eine der wichtigsten Aufgaben der Elektrizitätswerke. Der Kernpunkt des Problems der Spannungshaltung liegt in der Gleichhaltung der Spannung an der Verbraucherstelle. Die praktische Anwendung von Einrichtungen zum Ausgleich von Spannungsschwankungen zeigt eindeutig, dass sich die Spannungsverhältnisse in Verteilnetzen nur dann für den Bezüger günstig auswirken, wenn die Regelorgane möglichst nahe an die Verbraucherstellen in die Netzleitung eingebaut werden.

Wie auch bereits erwähnt wurde, würde der Einbau von Regelorganen unmittelbar an der Verbraucherstelle dem Idealfall entsprechen. Diese Lösung ist leider vom wirtschaftlichen Standpunkt aus noch nicht annehmbar. Die in zulässigen Grenzen zu haltende Abweichung der Spannung an der Verbraucherstelle bedingt jedoch in den meisten Fällen, kleinere Netzabschnitte, Stiehleitungen, einzelne Häusergruppen und Industrieanlagen für sich auszuregeln, d. h. deren Verteilspannung automatisch konstant zu halten und sie von der Spannung der Speiseleitung in bestimmten Grenzen unabhängig zu machen.

Die Netzzustände und Betriebsbedingungen der Verteilnetze sind nun sehr verschieden. Ein vollständiges Drehstromsystem besteht aus sechs Spannungen. Von den sechs Spannungen des Drehstromnetzes können immer nur drei Spannungen gleichgehalten werden, nämlich die drei verketteten oder die drei Stern-Spannungen. Dabei spielt die Art der Belastung — symmetrische oder unsymmetrische — eine grosse Rolle. Einrichtungen zur automatischen Gleichhaltung der Verteilnetzspannung müssen also der Verschiedenheit der Betriebszustände angepasst sein. Es kommen Regleinrichtungen für symmetrische Regelung der drei verketteten Spannungen gleichzeitig, für die Regelung der drei Sternspannungen unabhängig voneinander oder einzelne Einphasenregler zur Anwendung. Die Art der Anwendung und die Anforderungen des Betriebes sind nun dem Konstrukteur die wichtigsten Richtlinien für den Entwurf von Spannungsregleinrichtungen. Folgende Bedingungen sollten massgebend sein:

1. Leichte Einbaumöglichkeit in bestehende Leitungsanlagen bei geringstem Platzbedarf.
2. Vollautomatischer Ausgleich der Spannungsschwankungen.
3. Höchste Betriebssicherheit.
4. Wartungsfreies Arbeiten.
5. Keine Aenderung der Phasenlage.
6. Geringster Eigenverbrauch.

Ein Spannungsregler, der diesen Bedingungen genügt, wird dem Bezüger wirklich dienen, ohne die Wirtschaftlichkeit der Netzanlage allzustark zu beeinflussen.

Durch eingehendes Studium der Netzspannungsverhältnisse und praktische Versuche mit Niederspannungsreglern entwickelte die Firma Spälti Söhne & Co., Zürich, ein Regulierprinzip, das, in bezug auf höchste Betriebssicherheit und geringsten Eigenverbrauch den Anforderungen in jeder Beziehung gerecht wird. Dieses Prinzip fällt unter die Kategorie Serie-Transformatoren, deren Erregung von aussen her beeinflusst werden kann (sog. indirekte Regelung, wie Fig. 1 zeigt).

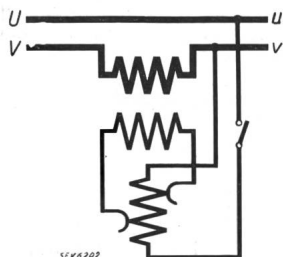


Fig. 1.

Zur Erzeugung einer Zusatz- oder Gegenspannung im Netz dient ein in den Zug der Netzleitung eingeschalteter Serie-Transformator. Bei der einen Ausführung (Normal-Ausführung) wird dieser Serie-Transformator von einem als Stufenspannungsteiler geschalteten Spartransformator erregt. Bei der andern (Spezial-Ausführung) wird die veränderliche Erregerspannung mit einem Hilfs-Drehtransformator erzeugt. In bezug auf Betriebssicherheit hat diese prinzipielle Schaltung des Spannungsreglers den ersichtlichen Vorteil, dass im

Zug der Netzleitung (Hauptstromkreis) keine Kontaktstellen und keine die Kurzschlussfestigkeit und Ueberspannungssicherheit herabsetzende oder wartungsbedürftige Organe vorhanden sind.

Die Ausführung mit Serie-Transformator und Stufenspannungsteiler hat auch den Vorteil, dass der Eigenverbrauch dieser Einrichtung der technisch geringstmögliche ist, d. h. die Leerlaufverluste entsprechen ungefähr denselben eines modernen, für die gleiche Durchgangsleistung dimensionierten Auto-Transformators. Durch die spezielle Ausbildung des Stufenspannungsteilers und des Regelschalters lässt sich die Erregerspannung feinstufig regulieren, so dass das Ueberschalten keine Zuckungen im elektrischen Licht verursacht.

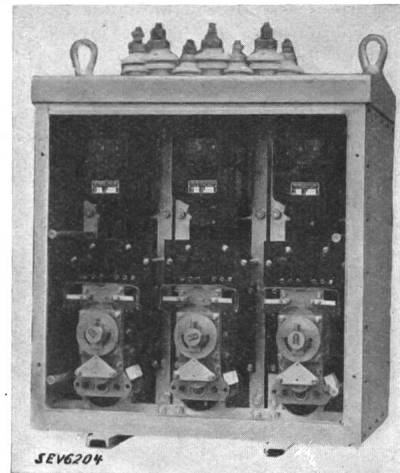


Fig. 2.

Nivo-Regler für 50 kVA Durchgangsleistung, geöffnet.

Die Ausführung mit Serie-Transformator und Hilfs-Drehtransformator besitzt den Vorteil der stufenlosen Regulierung, aber den Nachteil des weit grösseren Eigenverbrauches und der grösseren Herstellungskosten. Diese Ausführung kommt deshalb nur dort zur Anwendung, wo eine stufenlose Spannungsregelung unbedingt erforderlich ist.

Durch Abtrennen der Erregerspannung vom Netz mit Schaltautomat kann die Steuerapparatur und der Erregerspannungsspannungslos gemacht werden. Der Spannungsregler kann dadurch jederzeit ausser Betrieb gesetzt

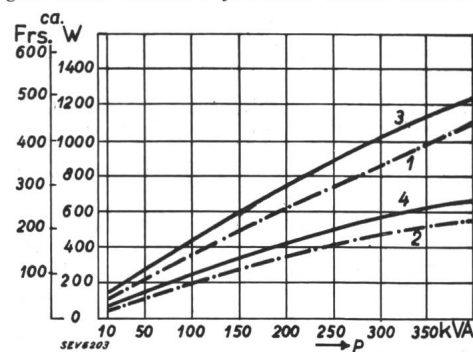


Fig. 3.

- Kurve 3: Wattverluste bei Vollast in Funktion der Durchgangsleistung.
 Kurve 4: Wattverluste bei Leerlauf.
 Kurve 1: Kosten der Verlustenergie pro Jahr bei Vollast (bei 4 Rp./kWh).
 Kurve 2: Kosten der Verlustenergie pro Jahr bei Leerlauf.

werden, ohne dass der Hauptstromkreis abgeschaltet werden muss; die Energieübertragung erleidet also keinen Unterbruch.

Die Verstellung des Regulierschalters oder des Drehtransformators erfolgt durch einen vom Spannungsrelais gesteuerten Kurzschlussankermotor. Die Zeit vom Moment des Ansprechens des Spannungsrelais auf Spannungsabweichung

bis zum vollzogenen Ausgleich kann bei dieser Regeleinrichtung von 5 bis 40 s eingestellt werden. Für Verteilnetz- und Gruppenregulierung wird normalerweise eine Verzögerungszeit von 20 s eingestellt.

Dadurch, dass sich die zur automatischen Regulierung nötigen Elemente, wie Stufenschalter oder Hilfsdrehtransformator, im Erregerstromkreis befinden und einen verhältnismässig kleinen Strom führen, werden diese konstruktiv einfach und in ihren Abmessungen klein. Dieser Punkt ist für die Konstruktion einer wartungsfrei arbeitenden Steuerautomatik von grosser Bedeutung.

Solche Regeleinrichtungen werden für Aufstellung in Innenräumen oder im Freien hergestellt. Im allseitig verschlossenen, mit Ventilationseinrichtungen versehenen Reglergehäuse befinden sich die Transformatoren mit Trockenisolierung, ein Hilfsstrom-Schaltkasten oder Stöpselsicherungen und die gesamte Steuerautomatik. Das Spannungsrelais ist als empfindlichster Teil des Reglers ausserdem gegen Staub und Feuchtigkeit besonders geschützt. Der Regelschalter arbeitet wartungsfrei, mechanische Störungen durch Verschmutzen und Verrosten sind ausgeschlossen (Fig. 2). Ferner werden Drehstromregler als Einrichtungen für symmetrische

Reglung aller drei verketteten Spannungen gleichzeitig oder als Einrichtungen für die Regelung der drei Phasenspannungen unabhängig voneinander hergestellt. In letzter Ausführung besitzt die Einrichtung drei Steuerautomatiken, wobei die Spannungsrelais jeweils zwischen Phase und Nulleiter geschaltet sind (Fig. 2).

Der totale Eigenverbrauch, also einschliesslich Verbrauch der Steuerapparatur ist sehr gering. Die Verlustkurven für Drehstrom-Spannungsregler für symmetrische Regelung bei Leerlauf und bei Vollast, bezogen auf die Durchgangsleistung und einen Regelbereich von $\pm 10\%$, sind aus Fig. 3 ersichtlich. (Bei $3 \times$ Einphasen-Reglung ist der Eigenverbrauch etwa 15% grösser.) Z. B. beträgt der gesamte Eigenverbrauch eines Drehstromreglers für 100 kVA Durchgangsleistung und $\pm 10\%$ Regelbereich bei Vollast ca. 440 W ($0,43\%$), der Leerlaufverlust ca. 240 W ($0,24\%$).

Zum Schluss möchte ich erwähnen, dass solche Nieder-volt-Regler («Nivo-Regler») für die Verwendung zur Netz-Gruppenregulierung oder Regelung an der Verbraucherstelle selbst in verschiedenen Einheiten, in Ausführung für Durchgangsleistungen von $0,1 \dots 20$ kVA als Einphasen- und von $1 \dots 500$ kVA als Drehstromregler hergestellt werden.

Referat von H. Bossi, Ingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden.

Ich möchte lediglich die Gründe aufführen, die Brown, Boveri seinerzeit veranlassten, eine Lösung für kontinuierliche, d. h. stufenlose Regulierung in Niederspannungsnetzen zu suchen. Anschliessend wird die entsprechende Konstruktion kurz erläutert.

Wie aus dem Artikel über zulässige Spannungsschwankungen im Bulletin des SEV 1935, Nr. 22, und auch aus den verschiedenen Referaten hervorgeht, reagiert der Mensch sehr empfindlich auf geringe, aber rasche Spannungsschwankungen, während er langsame erst bei bedeutend grösseren Werten empfindet. Den Untersuchungen von Werdenberg, welche im erwähnten Bulletin zusammengestellt sind, ist zu entnehmen, dass rasche Spannungsänderungen im Betrage von ca. $0,7 \dots 1,2\%$ der Normalspannung bereits bemerkt werden, während dies bei langsamen Spannungsschwankungen erst bei $2,0 \dots 4,6\%$ der Fall ist, also erst bei etwa der doppelten Grösse der Spannungsschwankung. Bei raschen Spannungsänderungen kamen Reklamationen vor bei Schwankungen von $1,66 \dots 2,9\%$ der Normalspannung, während langsame erst bei Werten von $3,0 \dots 6,5\%$ Anlass zu Reklamationen gaben, also auch hier ziemlich deutlich das Verhältnis $1 : 2$.

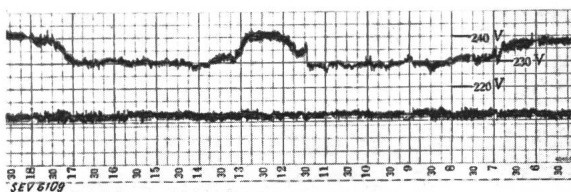


Fig. 1.

Spannungsdigramme aus dem Netz des EW Langenthal, oben unreguliert, unten reguliert.

Es führt dies ohne weiteres zur Ueberlegung, dass analog dazu eine langsame, aber kontinuierliche Regelung bestimmt weniger zusätzliche Störungsfaktoren ins Netz bringt als eine Regulierung in Stufen, deren Zahl aus wirtschaftlichen Gründen im allgemeinen beschränkt ist, und die deshalb Zuckungen im Licht hervorrufen. Sieht man vorläufig davon ab, dass die Zahl der Reguliervorgänge pro Tag bei stufenweiser Regulierung beschränkt werden muss, nimmt man also an, dass die Konstanzhaltung der Spannung bei beiden Regulierarten gleich befriedigend sei, so scheint der erwähnte Punkt allein schon ausschlaggebend.

In Wirklichkeit muss, wie bereits erwähnt, die Zahl der Reguliervorgänge bei Stufenregulierung beschränkt werden, um zu häufiges Auswechseln der entsprechenden Kontakte zu vermeiden. Aus einer Mitteilung der AEG in der ETZ 1934 geht hervor, dass z. B. nach ca. $20\,000 \dots 50\,000$ Schal-

tungen ein Auswechseln der entsprechenden Stufenschalterkontakte nötig wird.

Fig. 1 ist die Wiedergabe von 2 Spannungskurven, aufgenommen im Netz der Gemeinde Langenthal, das vom EW Wynau gespeist wird. Die obere Kurve zeigt die unregulierte Spannungskurve, während die untere die mit Brown-Boveri-Netzregler regulierte Spannung darstellt. Die gleichen Kurven sind im Artikel des Herrn Aeberhard im Bulletin SEV 1935, Nr. 22, enthalten. Um zu diesem Resultat zu gelangen, arbeitet der Regler mit ca. 1000 Schaltungen pro Tag. Seine Empfindlichkeit war dabei auf $\pm 1\%$ eingestellt, d. h. das Steuerrelais spricht an, sobald die Spannung den Sollwert um 1% übersteigt oder um 1% unterschreitet. Dieses Ansprechen des Steuerrelais erfolgt momentan, ohne Zeitverzögerungselement. Stellt man sich die gleiche Schaltzahl mit einem Stufenschalter vor, bei dem nach $20\,000 \dots 50\,000$ Schaltungen ein Ersatz der Kontakte erfolgen muss, so beträgt die Lebensdauer dieser Kontakte bei der gleichen Schalzhäufigkeit $20 \dots 50$ Tage. Es ist klar, dass solche Apparate aus diesem Grunde mit einem Zeitverzögerungselement ausgerüstet werden müssen. Das gleiche Netz besitzt z. B. solche mit einer Verzögerung von 1 min, wodurch bei Ansprechen bei $\pm 1,5\%$ Spannungsänderung die Schaltungen auf ca. 12 pro Tag begrenzt werden. Eine solche Regelung kann qualitativ nicht gleich gut sein, wie eine mit kontinuierlicher Regelung.

Die Einstellung der Empfindlichkeit auf $\pm 1\%$ entspricht den häufigsten Netzverhältnissen und ergibt Schalzhäufigkeiten zwischen $200 \dots 1000$ Schaltungen pro Tag. Diese Schalzhäufigkeit ist selbstverständlich nicht nur von der Empfindlichkeit des Reglers abhängig, sondern auch vom Betriebscharakter des Netzes. Das Netz der Gemeinde Langenthal ist infolge von Holzbearbeitungsmaschinen sehr unruhig. Im Netz der Stadt Winterthur z. B. reduziert sich die Schaltzahl bei Einstellung der Steuerrelais auf eine Empfindlichkeit von $1,8\%$ und bei einem im Vergleich zu Langenthal ruhigen Betrieb auf ca. 80 Schaltungen pro Tag. Man wird deshalb von Fall zu Fall den günstigsten Wert für die Empfindlichkeit wählen müssen. Es ist dies leicht möglich, indem auch während des Betriebes die Empfindlichkeit am Relais in den Grenzen von $0,2\%$ bis 3% eingestellt werden kann.

Fig. 2 zeigt Registrierstreifen der Spannung in einer Glühlampenfabrik, von der Licht A.-G. Goldau freundlich zur Verfügung gestellt, und zwar zeigt das Bild a die Spannung bei einer Empfindlichkeit des Relais von $\pm 0,2\%$ und b bei einer Empfindlichkeit von $\pm 0,3\%$; c stellt die unregulierte Spannung dar und gibt ein Bild der Arbeit des Reglers. Bei der Empfindlichkeit von $\pm 0,2\%$ beträgt die Schalzhäufigkeit ein bis mehrere Schaltungen pro min, d. h. bis zu 2000 Schaltungen pro Tag. Der Regler befindet sich seit ca. $1\frac{1}{2}$ Jahren im Betrieb. Die feine Einstellung ist

nötig, weil die Glühlampenprüfung sehr genaue Spannungshaltung erfordert.

Die Regelung in diesen Netzen erfolgt in einem Bereich von $\pm 8,5\%$ der normalen Spannung. Für den gleichen Bereich arbeitet einer der Stufenregler mit z. B. nur zwei Stufen nach aufwärts und abwärts.

Die hohe zulässige Schaltzahl beim Netzregler Brown, Boveri beruht darauf, dass zur Spannungsregelung Rollkontakte auf einer nackten Kupferspirale unter Oel ohne Strom-

stufenlos von der zweifachen zur dreifachen Windungsspannung gestiegen.

Das gleiche erzielt man beim Reguliertransformator Brown, Boveri mit der Rotationsbewegung eines radialen Leiters, um die Mittelaxe des bewickelten Schenkels des Eisenkerns (Fig. 4). Zu diesem Zwecke ist im bewickelten Schenkel ein der Dicke des Mitnehmers entsprechender freier Spalt vorgesehen. Der Eisenkern ist dabei als Manteltyp mit zweiseitigem magnetischem Rückschluss ausgebildet. Fig. 5

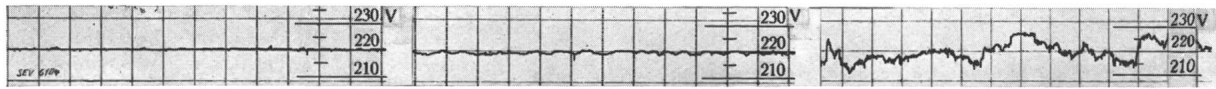


Fig. 2a.

Fig. 2b.

Fig. 2c.

Spannungsdiagramme aus einer Glühlampenfabrik.

a Reglerempfindlichkeit $\pm 0,2\%$.

b Reglerempfindlichkeit $\pm 0,3\%$.

c Unregulierte Spannung.

unterbrechung verschoben werden. Wie bisherige Betriebs- erfahrungen ergaben, zeigen sich auch nach langer Betriebs- dauer keine nennenswerte Abnützungen. Bei den Entwick- lungsversuchen wurde an einem 1000-A-Modell nach insge- samt einer Million Hin- und Herbewegungen zwischen zwei Leiterschienen noch keine messbare Abnutzung festgestellt. Im ungünstigsten Falle, d. h. bei ruhendem Stromabnehmer, beträgt die Erwärmung der Rollen im Oel ca. 20°C . Die Betätigung dieser Rollkontakte, die am Ende eines Mitneh- mers befestigt sind, erfolgt durch einen Motor über ein Ge- triebe, bei der alten Ausführung über ein Kettenrad. Dieser Motor wird durch kräftige Zwischenrelais eingeschaltet, die vom hochempfindlichen spannungsabhängigen Steuerrelais aus gesteuert werden. Dessen Hilfskontakte haben also ledig- lich den kleinen Steuerstrom der Hilfsrelais zu bewältigen, woraus die grosse Schaltzahl sich leicht erklären lässt. Sie bildet also auch keine Gefahr und keine Nachteile für die Steuerapparatur.

Das Problem der stufenlosen Spannungsregelung sei an- hand der Fig. 3 erläutert, die den Querschnitt durch das Eisengestell eines beliebigen Transformators zeigt. Um die eine Säule ist die Sekundärwicklung dargestellt, die den im

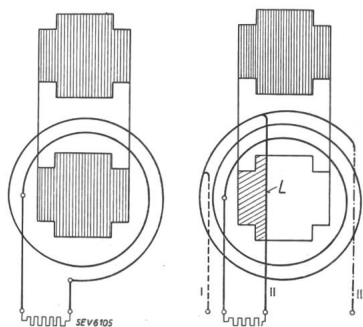


Fig. 3.

Prinzip der stufen- losen Regulierung.

Eisenquerschnitt konzentrierten magnetischen Fluss um- schlingt. Aus dem Bild links sieht man, dass die Anzapfun- gen ganz beliebig auf dem Umfange der Wicklung ange- bracht werden können. Die angebrochene Windung wird je- doch stets durch den äusseren Strompfad zu einer geschlos- senen ergänzt. Es sind sekundär, konstante Primärspannung vorausgesetzt, nur abgestufte Spannungen erhältlich, entspre- chend der Spannung pro Windung. Eine wirklich stufenlose Regulierung ist nur möglich, wenn ein beweglicher Teil des Strompfades den magnetischen Kreislauf durchschneidet. Angenommen, der eine Schenkel des Transformators sei durch einen schmalen Luftspalt unterbrochen, der gerade dem Lei- ter den Durchgang gestattet, dann gibt es neben den Um- schlingungen des ganzen Magnetflusses noch eine Umschlin- gung eines veränderlichen Teiles desselben. Diese Verhält- nisse sind im Bild rechts dargestellt. Je mehr sich der be- wegliche Leiter L von links nach rechts bewegt, um so grö- ser wird der von der letzten Windung umschlossene Magnet- fluss, und zwar steigt er stufenlos von Null bis zum vollen Wert. Aus der zweifachen Umschlingung bei Stellung I ist eine dreifache Umschlingung nach Durchschneiden des Flusses in Stellung III geworden. Die Spannung ist also

zeigt den Rollenstromabnehmer auf der äussersten Windung, in der Stellung 0. Die Spannung ist 0, trotzdem bereits ein Teil der äusseren Windung eingeschaltet ist, und zwar deshalb, weil auf dem Wege von der Klemme U über den Stromab- nehmer und Durchleiter d und die in einem Loch in der

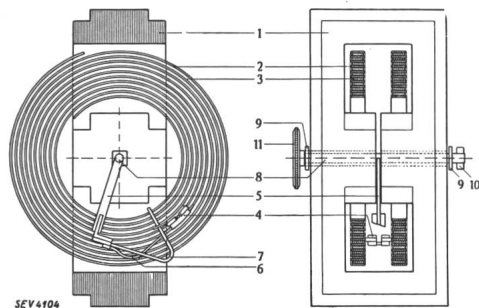


Fig. 4.

Brown-Boveri-Reguliertransformator.

1 Kern. 2 Regulierwicklung. 3 Erregerwicklung. 4 Strom- abnehmer. 5 Mitnehmerarm. 8 Drehachse.

Kernmitte befindliche leitende Drehaxe axial zum Kern hinaus zur Klemme V und über die Belastung zurück gar keine magnetischen Kraftlinien umschlossen werden. Der magnetische Fluss im bewickelten Schenkel teilt sich nämlich in der Ebene a—b in zwei Hälften, wovon die eine über das obere und die andere über das untere Joch sich schliesst. Der Durchleiter steht somit in Stellung I in der Trennungsebene. Durch die Drehung des Durchleiters samt Rollenstromabnehmer in die nächste Stellung II werden von der oberen Flusshälfte die im durchschnittenen Kernsektor be-

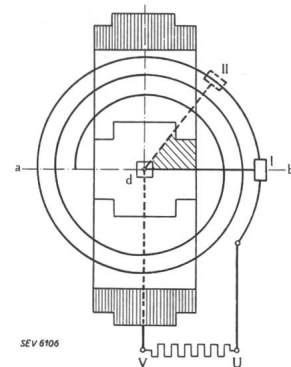


Fig. 5.

Wirkungsweise des Reglers Fig. 4.

findlichen magnetischen Kraftlinien umschlungen und es ist die diesem Teilfluss entsprechende Spannung erreicht. Es ist leicht einzusehen, dass bei Drehung des Durchleiters die Spannung jederzeit proportional der vom Durchleiter über- strichenen Sektorfläche ist. Wäre der Kernquerschnitt kreis- rund, so müsste die Spannung, aufgetragen in Funktion des Drehwinkels, absolut geradlinig ansteigen. Dass dies im Leerlauf praktisch der Fall ist, auch bei mehrfach abgesetz- ten Querschnitten, zeigt Fig. 6, wo das Ergebnis von Mes- sungen an einem ausgeführten Reguliertransformator darge-

stellt ist. Kurve 2 zeigt dasselbe bei Belastung. Durch die ungleiche Umschlingung von Querschnitten wird hier der Ampèrewindungsausgleich gestört, indem zeitweise ein Ueberschuss, zeitweise ein Manko an Magnetisierungswindungen entsteht. Infolge der Sättigungswirkung und in Anbetracht der immerhin beträchtlichen konstanten primären Windungszahl ist die Verlagerung jedoch nicht sehr gross; Kurve 2

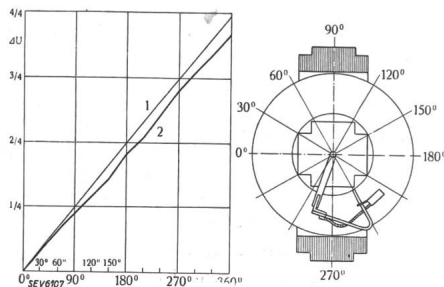


Fig. 6.

Spannungsverlauf des Reglers Fig. 4 in Funktion des Drehwinkels:
1 bei Leerlauf und 2 bei Belastung.

ist praktisch auch eine Gerade. Wenn man berücksichtigt, dass für den ganzen Regulierbereich 12...22 Windungen vorhanden sind, die in ca. 40...60 s durchlaufen werden, sind diese Abweichungen praktisch belanglos.

Der Regler besitzt in seiner jetzigen Ausführung einen Leerlaufstrom von 5...6%, bezogen auf den Durchgangsstrom; verglichen mit Transformatoren bis zur Grössenordnung von 400 kVA, die Leerlaufströme von 3...10% besitzen, ist das Resultat befriedigend.

Fig. 7 zeigt die Schaltung. Stark ausgezogen ist die Regulierwicklung, eine blanke, spiralförmig aufgewundene Kupferwicklung. Schwach ausgezogen ist die Erregerwicklung, die je zwischen zwei Windungen der Regulierwicklung eingebettet ist. Die Erregerwicklung ist so geschaltet und mit Anzapfungen versehen, dass man sie den verschiedenen Normalspannungen anpassen kann.

Der Regler besteht aus drei einphasigen Autotransformatoren, welche durch eine gemeinsame Antriebsachse gleich-

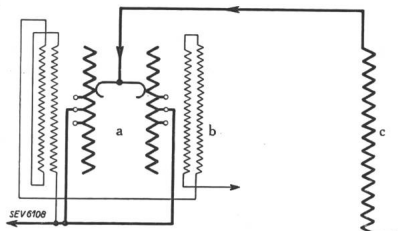


Fig. 7.

Schaltung des Reglers Fig. 4.
a Regulierwicklung.
b Erregerwicklung.
c Wicklung des Betriebstransformators.

zeitig in Abhängigkeit der verketteten Spannung gesteuert werden. Diese Regulierart genügt in allen Netzen mit ungefähr gleicher Belastungs- und Spannungsverteilung. In ganz seltenen Fällen, hauptsächlich im Auslande, mussten an Stelle der gemeinsam gesteuerten drei Einphasenelemente drei individuell gesteuerte Einphasenregler verwendet werden. Da diese Lösung wegen der dreimal vorkommenden Steuerorgane teuer zu stehen kommt, wurden in einigen Fällen die Netzregler lediglich mit einer Ausgleichspule versehen, mit deren Hilfe die Belastung des Nullpunktes auf die drei Phasen verteilt wird.

Fig. 8 zeigt die erste Ausführungsform mit der üblichen Ausführung des Spannungsrelais. In Fig. 9 ist bereits das jetzige Steuerrelais zu sehen, ein Ferraris-Zähler in Voltmeter-Schaltung, dessen Empfindlichkeit von 0,2...3% einstellbar ist. Die äussere Form des Regulier-Transformators entspricht der bisherigen Ausführung des Typs für 100, 200 und 400 kVA, bzw. 150, 300 und 600 A Durchgangsstrom. Fig. 10 zeigt den kleinsten Typ für 30 kVA Durchgangsleistung bei 46 A Durchgangsstrom und 380 V.

Die Reguliertransformatoren werden in Zukunft in dieser vertikalen Anordnung der einzelnen Elemente ausgeführt. Durch diese Anordnung wird die nötige Grundfläche reduziert, was bisher häufig von den Betriebsleitern gewünscht wurde. Bei der Erwähnung der Zahl 600 A wird man über

die Betriebstüchtigkeit der Rollenstromabnehmer vielleicht Bedenken haben. Dass diese Bedenken unbegründet sind, möge die neueste Anwendung der stufenlosen Reguliertransformatoren zeigen, ein Bahn-Reguliertransformator für einen Schnelltriebwagen der Strecke Genf-Zürich der SBB. Dessen Dauerstrom beträgt 1600 A. Der Betrieb erfordert eine Schaltzahl von ca. 2000 pro Tag. Die Erregerwicklung (Primär)

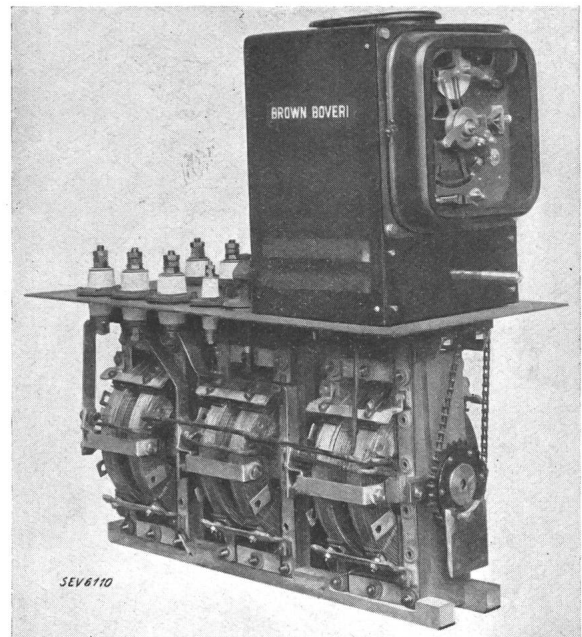


Fig. 8.

Erste Ausführung des Reglers Fig. 4 mit aufgesetztem Spannungsrelais.

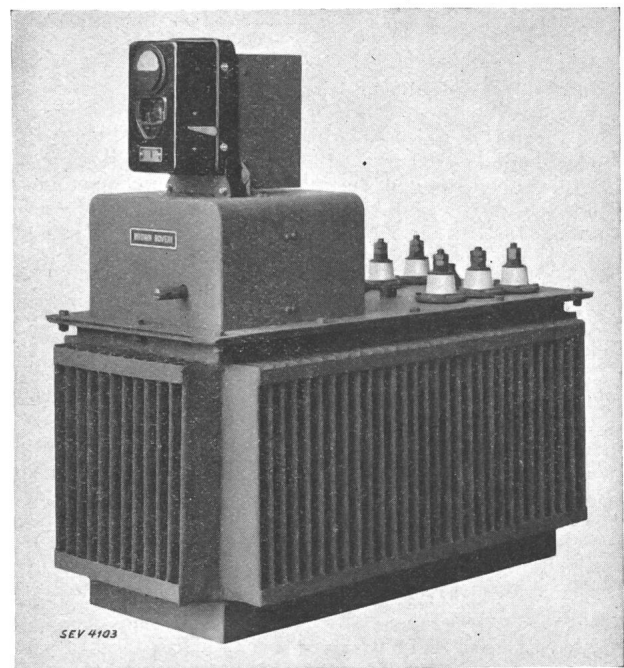


Fig. 9.

Drehstrom-Regler heutiger Bauart, 200 kVA, 435 bis 365/400 V, mit Antrieb und Relais.

ist von der Regulierwicklung getrennt. Er transformiert: 15 000 V Fahrdrat auf 0...450 V Motorspannung. Die beiden Regulierwicklungen sind hier in Serie geschaltet; bei den normalen Reglern sind sie parallel geschaltet. Bei Parallelschaltung können die Rollenträger so ausgebildet werden, dass sie für den Stromdurchgang eine Schleife bilden,

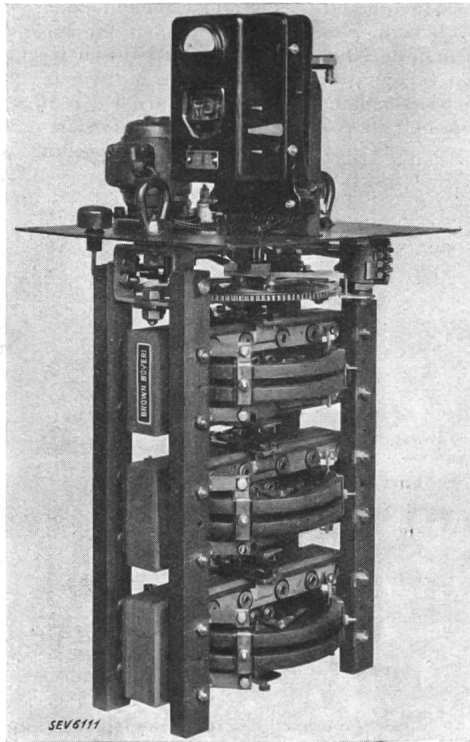


Fig. 10.

Netzregler 30 kVA, 46 A Durchgangsstrom.

die bei erhöhtem Stromdurchgang eine zusätzliche Pressung erzeugt. Dadurch ist auch bei Kurzschluss ein sicherer Kontakt gewährleistet. Erste schwache Kontaktabhebungen konnten bei Versuchen mit einem 1000-A-Modell erst bei 33 000 A festgestellt werden.

Zum Schlusse sei der Hinweis gestattet, dass diese Reguliertransformatoren sowohl als Zusatz-Transformatoren zu neuen Transformatoren wie auch in bestehenden Anlagen aufgestellt werden können. Der Regler wird entweder für gemeinsame Spannungsregelung mehrerer abgehender Leitungen verwendet oder dann für die Regulierung nur einer Leitung. Bei Regulierung nur einer Leitung kann die Regulierung beim Verbraucher selbst stattfinden oder am Anfange der Leitung. Je nachdem wird man auf konstante Spannung regulieren oder den Regler kompondieren. Diese Kompondierung erfolgt in sehr einfacher Weise dadurch, dass in die Leitung ein Stromwandler eingebaut wird, mit dessen Hilfe in das Spannungssystem des Steuerrelais eine Gegenspannung eingeführt wird, die eine Erhöhung der regulierten Netzspannung in Funktion der Durchgangsstromstärke bewirkt.

Bei Parallelarbeit von Netzreglern in der gleichen Unterstation oder über kurze Zwischenleitungen wird für die Stabilisierung eine analoge Anordnung wie für die Kompondierung verwendet. Mit Hilfe der Stromwandler wird aber nicht eine Gegenspannung, sondern eine Zusatzspannung in das Spannungssystem des Steuerrelais eingeführt. Diese bewirkt eine Erniedrigung der Spannung in Funktion des Ausgleichstromes. Dadurch kann ein absolut stabiler Betrieb gewährleistet werden.

Bis jetzt wurden über 100 Regler aller Leistungen ausgeführt, wovon einzelne bereits drei Jahre in ununterbrochenem Betriebe sind.

5. Allgemeine Diskussion.

Nachdem der **Vorsitzende**, Herr Direktor *M. Schiesser*, Präsident des SEV, allen Herren Vortragenden den gebührenden Dank ausgesprochen hat, eröffnet er die allgemeine Diskussion.

Herr **W. Werdenberg**, Ingenieur der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich¹⁾: Herr Dr. Geiss hat in seinem interessanten Vortrag sehr anschaulich gezeigt, wie es bei Glühlampen physikalisch unmöglich ist, die vom Fabrikanten garantierten Eigenschaften für Ueber- und Unterspannungen einzuhalten, d. h. wie die Naturgesetze nur erlauben, bei der Spannung, für die die Glühlampe gebaut ist, also bei Nennspannung, die vom Hersteller versprochenen Werte der Lebensdauer etc. zu erreichen. Auch andere Verbrauchsapparate verhalten sich natürlich in ähnlicher Weise, nur werden bei diesen andern Verbrauchsgeräten die Spannungsabweichungen nicht in dem Masse empfunden, wie bei der Glühlampe. Die von Herrn Dr. Geiss an die Energie liefernden Werke gerichtete Bitte, die Spannung, für die die Geräte gebaut sind, möglichst einzuhalten, kann ich deshalb nur unterstützen. Auch ich bin überzeugt, dass es falsch ist, wenn das Werk vom Fabrikanten verlangt, dass bei Spannungsabweichungen von $x\%$ beispielsweise die garantierte Lebensdauer der Glühlampe auch noch eingehalten werden soll. Vielmehr muss das Werk dem Fabrikanten der Anschlussobjekte angeben, für welche Spannung das Anschlussobjekt zu bauen ist. Auf diese Spannungsangabe möchte ich nun etwas näher eingehen.

Um eine gewisse Einheitlichkeit in den Spannungen, die von den Werken beim Verbraucher möglichst einzuhalten sind, zu erreichen und um dem Fabrikanten die Aufgabe zu erleichtern, wurden die Nennspannungen seinerzeit vom SEV normalisiert. Nach den Spannungsnormen des SEV müssen die beim Verbraucher vorhandenen Betriebsspannungen möglichst gleich den Nennspannungen sein. Es ist darum ein grundsätzlicher Widerspruch, von einem Verteilnetz zu behaupten, die Nennspannung sei 220 V, dabei aber auf 230 V Betriebsspannung zu regulieren. Entweder muss von einem solchen Netz gesagt werden, es besitze eine Nennspannung von 230 V, oder, wenn die Nennspannung 220 V angegeben wird, so ist eben die Spannungsregulierung unrichtig. Es ist daher Aufgabe jedes Elektrizitätswerkes mit sog. normali-

sierten Netzen, die Nennspannungen möglichst einzuhalten. Darum glaube ich auch, dass die von Herrn Dr. Geiss angelegte Definition einer «Netzspannung» gar nicht nötig ist. Es wird genügen, wenn die Elektrizitätswerke vermeiden, mit der Nennspannung im angegebenen Sinn Missbrauch zu treiben.

Eine genaue Einhaltung der Nennspannung bei allen seinen Verbrauchern wird natürlich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen keinem Werke möglich sein; die Kosten einer derartigen Spannungsregulierung wären für das Elektrizitätswerk untragbar. In der Praxis wird es stets Abweichungen von der einzuhaltenden Spannung geben. Es wäre deshalb zuerst einmal zu bestimmen, was für Abweichungen zulässig sind. Es ist aber zu berücksichtigen, dass es sich hier nicht um die kurzzeitigen, nur Sekunden langen Abweichungen (sog. Spannungsschwankungen), sondern längere Zeit dauernde Abweichungen (sog. Spannungsänderungen) handelt.

Am Beispiel der besonders empfindlichen Lebensdauer einer Glühlampe will ich nun zeigen, dass die Grösse der Abweichung allein gar nicht von ausschlaggebender Bedeutung ist, dass vielmehr die zeitliche Dauer der verschiedenen Spannungen wichtig ist. Die nachfolgenden Betrachtungen bleiben für die Lichtausbeute oder für andere spannungsabhängige Eigenschaften irgendwelcher anderer Anschlussobjekte grundsätzlich gleich.

Wir wollen uns vorstellen, dass alle an der Glühlampe auftretenden Spannungen über das ganze Jahr, aber nur dann, wenn die Glühlampe brennt, gemessen werden. Die derart gemessenen Spannungen ordnen wir nach Grösse und tragen die zeitliche Dauer dieser Spannungen in der bekannten Art einer Häufigkeitskurve auf.

In der Figur 1 ist eine solche Häufigkeitskurve *B*, wie sie in der Praxis ohne weiteres vorkommen kann, aufgezeichnet. Als Abszisse sind die Spannungsabweichungen in % der Nennspannung aufgetragen. Der Zeitmaßstab der Ordinate ist für die folgenden Betrachtungen ohne Bedeutung. Ueber der gleichen Abszisse ist auch die Lebensdauer der Glühlampe in % der Nennlebensdauer dargestellt. Wir dividieren

¹⁾ Der Beitrag wurde teilweise nachträglich ergänzt.