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

Artikel: Einführungen
Autor: Howlad, W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058731

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: 26.04.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

ADMINISTRATION:
Zurich, Stauffacherquai 36 ◆ Téléphone 51.742
Chèques de postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVIIIe Année | N° 11 | Vendredi, 28 Mai 1937

Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen.

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV vom 5. Dezember 1936 in Aarau.

621.316.722 : 621.316.11

Die Diskussionsversammlung vom 5. Dezember in Aarau über «Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen» fand unter dem Vorsitz des Präsidenten des SEV, Herrn Direktor M. Schiesser, Baden, statt. Sie war von 150 Mitgliedern und Gästen besucht.

Wie der Vorsitzende einleitend bemerkte, wurde dieses Diskussionsthema nicht etwa gestellt, um anzuregen, die Qualität der marktgängigen Elektrizität so zu steigern, dass diese zum Luxusprodukt wird; im Gegenteil: man hoffte, dass sich aus der Diskussion für die Spannungsregulierung eine obere Grenze finden lässt, die mit wirtschaftlichen Mitteln im allgemeinen eingehalten werden kann.

Im folgenden werden die Referate und Diskussionsbeiträge nach folgender, etwa dem Versammlungsverlauf entsprechenden Reihenfolge veröffentlicht:

1. *Einführungen.*
   Referenten: Herren W. Howald, Winterthur (in deutscher Sprache), und M. Roesgen, Genf (in französischer Sprache).
2. *Einfluss der Spannungsschwankungen auf Anschlussobjekte.*
   Referenten: Herren Dr. Geiss, Eindhoven, und P. Seehaus, Schwanden.
3. *Der Betriebsstandpunkt.*
   Referenten: Herren M. Wettstein, Zürich, F. Aemmer, Innertkirchen, und F. Aeberhard, Langenthal.
4. *Mittel zur Spannungsregulierung.*
   Referenten: Herren H. Puppikofer, Zürich-Oerlikon, Prof. E. Juillard, Lausanne, T. Judith, Zürich, und H. Bossi, Baden.
5. *Allgemeine Diskussion.*

La journée de discussion sur «le maintien de la tension dans les réseaux à basse tension» se déroula le 5 décembre à Aarau, sous la présidence de Monsieur M. Schiesser, Baden, président de l'ASE. Elle rassembla 150 participants environ, membres et invités.

Comme le président le fit remarquer au début, le thème n'avait pas été choisi pour engager les distributeurs à améliorer la qualité de l'électricité vendue, de façon à en faire un produit de luxe; au contraire, on espérait que la discussion permette de trouver pour le réglage de la tension une limite supérieure encore compatible avec les exigences économiques.

Les conférences et interventions sont reproduites ci-après selon l'ordre suivant, correspondant à peu près à la marche de l'assemblée:

1° *Introduction*
   par Messieurs W. Howald, Winterthour (en allemand) et M. Roesgen, Genève (en français).
2° *Influence des variations de tension sur les appareils consommateurs,*
   par Messieurs Dr. Geiss, Eindhoven, et P. Seehaus, Schwanden.
3° *Le point de vue de l'exploitation,*
   par Messieurs M. Wettstein, Zurich, F. Aemmer, Innertkirchen, et F. Aeberhard, Langenthal.
4° *Moyens pour le réglage de la tension,*
   par Messieurs H. Puppikofer, Zurich-Oerlikon, E. Juillard, Lausanne, T. Judith, Zurich, et H. Bossi, Baden.
5° *Discussion générale.*

1. Einführungen.

Referat von *W. Howald*, Direktor des Elektrizitätswerkes Winterthur.

Zunächst werden die Grundbegriffe des Problemes des Spannungsabfalles kurz in Erinnerung gerufen und hierauf die Gründe dargelegt, welche die Elektrizitätswerke veranlassen, die Verteilspannung möglichst konstant zu halten. Die gebräuchlichsten Mittel der Spannungsregulierung werden erwähnt und die betriebstechnischen Möglichkeiten begründet, woraus allgemeine Grundsätze für den Einbau von Spannungsregulierungen abgeleitet werden. Am Beispiel des EW Winterthur werden diese Grundsätze und die Resultate der Spannungsregulierung erläutert. Schliesslich wird das Resultat einer Umfrage bekanntgegeben, die der Referent unter einer Reihe von Werken veranstaltete.

L'auteur rappelle tout abord les principes fondamentaux du problème de la chute de tension, pour exposer ensuite les raisons qui incitent les centrales d'électricité à maintenir aussi constante que possible la tension de distribution. Il cite les moyens les plus courants pour régler la tension, en examine les possibilités au point de vue de l'exploitation, et en tire des principes à appliquer lors du montage d'installations de réglage. Ces principes, ainsi que les résultats pratiques du réglage de la tension sont mis en lumière par l'exemple du réseau de la ville de Winterthour. L'auteur donne finalement les résultats d'une enquête qu'il a entreprise auprès d'un certain nombre de distributeurs.

Das Problem der Spannungsregulierung ist so alt wie die Technik der Elektrizitätserzeugung und -verteilung überhaupt, wenn es auch nicht in der heute zur Diskussion stehenden Form auftrat. Es war damals eher ein Problem der Spannungs*haltung*, während es heute einen ganzen, die Betriebsführung stark beeinflussenden Fragenkomplex darstellt, da der Vergrösserung des Cu-Querschnittes bald einmal wirtschaftliche Grenzen gesetzt sind.

Damit eine einheitlichere Auffassung über das Gebiet entsteht, sei ein kurzer physikalisch-historischer Exkurs gestattet. Ich werde daraufhin ver-

suchen, nach flüchtiger Erwähnung der eine Spannungsregulierung bedingenden Faktoren sowie der Mittel, welche diese Regulierung gestatten, das Problem von der betriebstechnischen Seite zu beleuchten, um an einem praktischen Beispiel die Möglichkeiten der Regulierung und deren Erfolg zu erläutern.

1. Physikalische Grundlagen.

Uns allen ist ja als Hauptschuldiger der Spannungsänderung das Ohmsche Gesetz bekannt, laut welchem der Spannungsabfall in einer Leitung proportional ist dem Strom I und dem Widerstand, also der Länge und umgekehrt proportional dem Querschnitt des Leiters. Stark wechselnde Belastung macht sich daher in langen Leitungen oder stark belasteten Netzen besonders unangenehm bemerkbar. Dies gilt für Gleichstrom; geht man auf das Gebiet des Wechselstromes über, so wird die Sache etwas komplizierter, denn es tritt ausser dem Ohmschen der induktive Widerstand auf. Der Spannungsabfall setzt sich damit aus der Ohmschen Komponente, die in Phase mit dem Strom liegt, und der um 90° elektrisch verschobenen induktiven Komponente zusammen. Es ist somit dieser Spannungsabfall

$$\Delta U = I\,(\mathfrak{R} + \mathfrak{X}) = I\,\sqrt{R^2 + X^2} = I \cdot Z$$

Hierbei hat der Impedanzabfall $I \cdot Z$ der Leitung eine bestimmte, feste Phasenverschiebung ψ gegenüber dem ohmschen Abfall (und damit dem Strom);

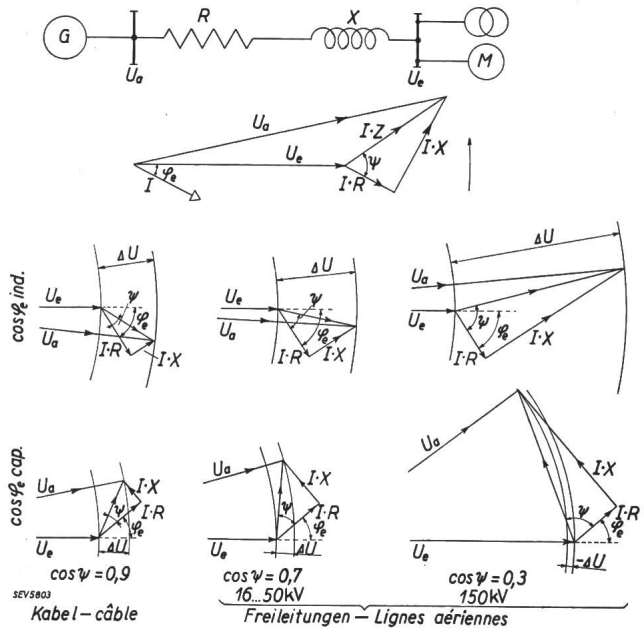

Fig. 1.
Spannungsabfall und Einfluss der Blindleistung.

Z ist also eine charakteristische Eigenschaft der Leitung. Ueberschlägig kann gesagt werden, dass diese innere Phasenverschiebung $\cos\psi = \frac{R}{Z}$ etwa folgende Werte hat:

für Kabel von ca. 3 . . . 50 kV	ca. 0,9
für Freileitungen von 16 . . . 50 kV	ca. 0,7
für Freileitungen von 150 kV	ca. 0,3
für Transformatoren	0,3 bis 0,1

Aus dem allgemeinen Diagramm zeigt sich, dass die Spannung am Anfang der Leitung (U_a) gegenüber der Spannung am Ende (U_e) phasenverschoben ist, und zwar um einen Winkel, der einerseits vom $\cos\varphi$ der Belastung, anderseits aber auch vom Impedanzwinkel ψ der Leitungskonstanten R und X abhängt.

Wie die für die einzelnen Leitungstypen gezeichneten Diagramme (Fig. 1) zeigen, ist bei induktiver Belastung der Leitungen der Einfluss der induktiven Komponente auf die Differenz der Spannung zwischen Anfang und Ende der Leitung sehr gross und überwiegt besonders bei Freileitungen für hohe Spannung. Fig. 1 zeigt aber auch, dass es gerade bei diesen Leitungen durch Leistungsfaktorverbesserung möglich ist, die Spannungshaltung stark zu beeinflussen [1]). So zeigt z. B. die 150-kV-Freileitung bei voreilendem Belastungsstrom eine kleinere Anfangs- als Endspannung. Dieser Punkt wird noch kurz zu berücksichtigen sein.

2. Die Gründe, welche zur Spannungsregulierung drängen.

Die Gründe, welche eine Spannungsregulierung erforderlich machen, sind einerseits objektiver Art, dann aber auch stark subjektiver Art.

Als objektive Gründe möchte ich alle diejenigen bezeichnen, welche auf dem Arbeiten der elektrischen Maschinen und Apparate oder auch der von elektrischen Maschinen und Apparaten bedienten andern Maschinen beruhen. Ich denke hierbei z. B. an die Veränderung der Charakteristik von Motoren mit ihrem Einfluss auf Papiermaschinen oder auf Maschinen der Textil- und Maschinenindustrie, wo z. B. die Güte des Gespinstes oder der Bearbeitung stark von der gleichbleibenden Geschwindigkeit abhängt.

Von gewissem Einfluss dürfte die Spannungshaltung auch auf die verschiedenen Wärmeanwendungen, z. B. in der Industrie zum Glühen und Härten nach genau vorgeschriebenem Temperaturprogramm, sein. Aber auch der Betriebsmann des kleinen Verteilwerkes wird schon Klagen darüber gehört haben, dass das «Kochen länger» gehe, die «Kochplatte nicht warm» werde, der «Heisswasserspeicher nicht aufheize».

Zu den subjektiven Gründen möchte ich den Einfluss der Spannung auf das Licht zählen. Jeder weiss aus eigener Erfahrung, wie unangenehm Zukkungen im Licht sind und wie bei schwankendem Licht die Augen rasch ermüden. Dass Ueberspannungen auch die Lebensdauer der Lampen sehr stark herabsetzen, darf ebenfalls als bekannt vorausgesetzt werden (objektiver Grund).

Wie gross alle diese Einflüsse sind, auf welche Gebiete sie sich überhaupt ausdehnen, soll in dieser Einleitung nicht weiter erörtert werden; es ist dies Sache der Diskussion. Ich möchte hier nur an die Arbeit von W. Werdenberg [2]) erinnern, wo versucht wurde, die «Reklamationsgrenze» zu ermitteln.

[1]) Bull. SEV 1936, Nr. 23, S. 653.
[2]) Bull. SEV 1935, Nr. 22, S. 609.

3. Die Mittel der Spannungsregulierung.

So vielseitig die Einflüsse der Spannungshaltung auf den ganzen Betrieb eines Werkes sind, so vielseitig sind auch die Mittel zu ihrer Verbesserung.

a) Die älteste Methode ist die Regulierung der Spannung am Nebenschlusswiderstand des Gleichstrom-Generators. In den Betrieb der Wechselstromversorgung übernommen, führte diese Methode zuerst zu Erfolg, versagte aber, als mehrere Werke zusammengeschlossen wurden, indem ganz unerwünschte Blindleistungsverschiebungen auftraten, die die Verhältnisse sogar verschlimmern konnten.

b) Die Vermaschung der Netze vergrössert den zur Verfügung stehenden Leitungsquerschnitt und vermindert dadurch den Spannungsabfall.

c) Wie bei der Betrachtung des Spannungsabfalldiagramms bereits angedeutet wurde, bildet die Erzeugung von voreilendem Blindstrom ein weiteres Mittel der Spannungsregulierung. Es kommt vor allem im grossen Maßstab für die Uebertragung von grossen und grössten Leistungen auf weite Entfernungen in Betracht.

So sei erwähnt, dass die 220-kV-Leitungen in den USA, welche einige 100 000 kW auf Distanzen von 400 ... 600 km übertragen, am Empfangsort mit angehängten «Synchronkondensatoren» (Synchronmotoren nur für Blindleistungserzeugung) so betrieben werden, dass Anfangs- und Endspannung gleich hoch sind [3]). Bei Vollast arbeiten die Maschinen übererregt, bei kleiner Netzlast stark untererregt, um dann mit ihrem schlechten cos φ die Spannung herunterzudrücken. Bei Leerlauf der Leitung würde bei normaler Anfangsspannung die Endspannung ohne dieses Hilfsmittel auf den doppelten Wert steigen.

Dass auch bei kleineren Verhältnissen mit der Erzeugung von Blindleistung viel erreicht werden kann, zeigt ein Beispiel aus dem EW Winterthur. Hier wurden letzten Winter im Zentrum der Stadt statische Kondensatoren mit einer Blindleistung von 900 kVar in Betrieb genommen. Das Resultat war, dass ein früheres Spannungsloch, das im Winter zwischen 18 und 20 h bei Anwachsen der Lichtbelastung eintrat, von 206 V auf 214 V, also um ganze 8 V verbessert wurde. Die Sache ist so, dass um diese Zeit die induktive gewerbliche Motorenbelastung zurückgeht und die Blindleistung der Kondensatoren nicht mehr für deren Kompensation verbraucht wird, so dass sie die Netzspannung erhöht.

d) Die weiteren Mittel zur Spannungsregulierung sind transformatorischer Natur. So sind einerseits Transformatoren mit Anzapfungen, spannungslos oder unter Last schaltbar, im Betrieb, ferner Drehtransformatoren (Induktionsregler) zur stufenlosen Regulierung und schliesslich Serietransformatoren, deren Erregung von aussen her beeinflusst werden kann.

Es ist ebenfalls nicht Zweck dieses Referates, alle Vor- und Nachteile der einzelnen Mittel zu behandeln. Unsere Fachleute dieses Spezialgebietes werden diese Erklärungen in kompetenterer Weise geben.

[3]) Bull. SEV 1929, Nr. 15, S. 477, und Nr. 16, S. 517.

4. Die betriebstechnische Seite der Spannungsregulierung.

Ich habe bereits erwähnt, dass bei einfachen Verhältnissen die Kompensation des Spannungsabfalles der Leitung durch Erhöhung der Anfangsspannung erfolgte. Dadurch erhält der Abonnent am Anfang der Leitung etwas zu hohe Spannung, derjenige in der Mitte richtige, und derjenige am Ende etwas zu niedrige Spannung. Nimmt man nun an, dass die Leitung so lang ist, dass diese Regelung nicht genügt, so muss z. B. dem Abonnenten in der Mitte (Fig. 2) etwas zu hohe, dem am Ende etwas zu geringe Spannung gegeben werden. Für den Abonnenten am Anfang ist dann ein separater Betrieb ab eigener Sammelschiene mit geringerer Spannung, oder, weil das meist unwirtschaftlich ist, ein Regulierorgan nötig.

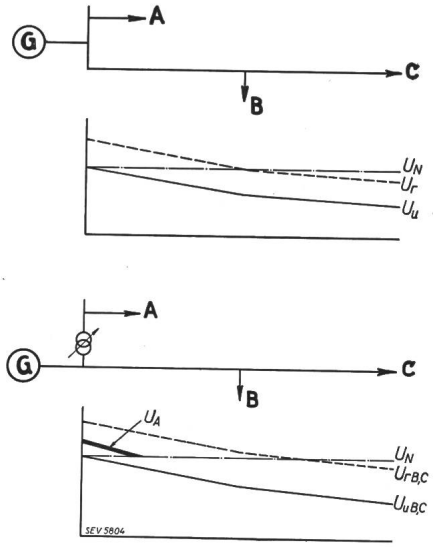

Fig. 2.
Einfluss der Spannungsregulierung.
U_N Sollspannung.
U_r Regulierte Spannung.
U_u Unregulierte Spannung
$U_{rB,C}$ Regul. Spannung für B und C.
$U_{uB,C}$ Unregel. Spann. für B und C.
U_A Spannung für A.

Liegen nicht mehr diese einfachen Verhältnisse der einzelnen Stichleitungen vor, sondern ein ganzes Netz, so wird das Problem kompliziert. Musste schon der Abnehmer am Anfang der einfachen Leitung mit einer Spannungserhöhung rechnen, so ist beim vermaschten Netz die Bildung eines gewissen Spannungsniveaus überhaupt unsicher, weil dieses sich unter dem Einfluss der Belastungsverhältnisse fortwährend verschiebt.

Damit erhebt sich die Frage: Was soll und wo soll reguliert werden? Im heutigen schweizerischen Grossnetzbetrieb gibt es bis zum Verbraucher vier Spannungen: Die 150-kV-Uebertragung, die 45-kV-Grossverteilung, die 8- oder 16-kV-Zwischenspannung und die 380/220-V-Sekundärverteilung. Damit sind auch die Möglichkeiten, wo und wie reguliert werden soll, ausserordentlich zahlreich.

Am Anfang der Leitung hat man durch Spannungsänderung an den Generatoren eine gewisse Möglichkeit, die Netzspannung zu beeinflussen. Aber wenn man auch hier, z. B. durch Regulieren nach einem gewissen Programm, das z. B. die Spannung der Belastungskurve angleicht, einen gewissen Ausgleich erreichen kann, so genügt dieser Ausgleich doch nicht für jeden Abonnenten und für alle Verhältnisse. Wie in Fig. 2 gezeigt wurde, wer-

den sich immer wieder Stellen finden, wo die Spannung zu gewissen Zeiten zu hoch oder zu niedrig ist.

Geht man zum andern Extrem über, d. h. gibt man jedem Abonnenten sein eigenes Regulierorgan und bekümmert sich sonst in keiner Weise um die Netzspannungen, ausser dass sie ungefähr auf dem Nennwert gehalten werden, so dürfte das in bezug auf Spannungshaltung wohl dem Idealfall entsprechen und theoretisch eine schöne Lösung darstellen. Praktisch, d. h. vom Betriebsstandpunkt aus, wäre wohl auch nicht sehr viel dagegen einzuwenden, sobald der Abonnent für den Apparat aufkäme. Dagegen würde sich aber der Abonnent mit Recht auflehnen; er verlangt, dass das Werk ihm die Ware

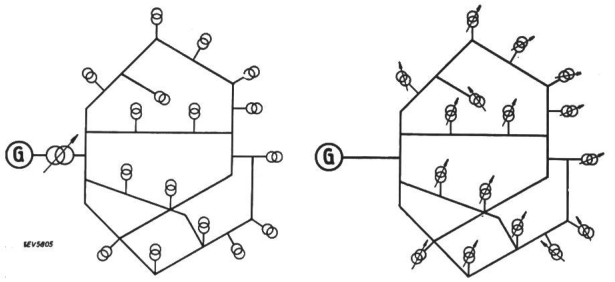

Fig. 3.
Grenzbedingungen der Spannungsregulierung.

Gesamtregulierung.	Einzelregulierung.
$P_{Regler} = (0{,}12 \ldots 0{,}14)\ P_{Anschluss}$	$P_{Regler} = (0{,}6 \ldots 0{,}8)\ P_{Anschluss}$

«Elektrizität» in gebrauchsfertiger Form liefert. Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus muss daher diese Lösung beim heutigen Stand der Technik ganz verworfen werden. Man denke nur an Unterhalt und Bedienung, ganz abgesehen von den zu investierenden Kapitalien (Fig. 3).

Da, wie dargelegt wurde, weder die Lösung, dass die Gesamtheit aller Abnehmer miteinander, noch jeder einzeln für sich reguliert werden kann, möglich ist, so muss sich auch hier die Lösung als Kompromiss ergeben. Die Abonnenten werden also gruppenweise zusammengeschlossen und reguliert werden müssen.

Damit erhebt sich nun eine neue Schwierigkeit, die betriebstechnischer Natur ist. Elektrische Leitungen, speziell solche kleinerer und mittlerer Hochspannung, sind Störungen aller Art ausgesetzt. Diese können sowohl elektrischer (Gewitter) als auch mechanischer Art sein (Baumfall, Stangenbruch usw.). Da möglichst ununterbrochene Bedienung der Abonnenten das Ideal der Betriebsführung darstellt, so werden die Leitungen im Ring geschaltet, es werden auch Querverbindungen erstellt, kurz die Netze werden vermascht.

Diese Vermaschung hatte zu Beginn zur Folge, dass zuerst genügend Querschnitt zur Verfügung stand, um den Einfluss der Leitung in bezug auf Spannungsabfall so vernachlässigbar zu gestalten, dass die Frage der künstlichen Spannungsregulierung hier gar nicht in Betracht fiel. Die Intensivierung der Elektrizitätsanwendung und der verbesserte Relaisschutz brachten auch darin eine Aenderung. Die verfügbaren Querschnitte wurden nach und nach besser ausgenützt; damit stieg aber auch der Einfluss der Leitung auf die Spannungshaltung.

Nun kann man natürlich in einem solchen vermaschten Netz nicht willkürlich an irgendeiner Stelle ein Organ für die Spannungsregulierung einsetzen. Der Erfolg wäre nicht nur die gewünschte örtliche Erhöhung der Spannung, sondern auch eine Verschiebung der Blindleistungen, bis das Spannungsgleichgewicht des Systems wieder erreicht ist, wodurch an anderen Netzstellen Spannungssenkungen hervorgerufen würden.

Aus der Betrachtung aller dieser verschiedenen Punkte lassen sich ungefähr folgende allgemeine Grundsätze für den Einbau einer Spannungsregulierung aufstellen.

1. Organe zur Spannungsregulierung sind, wenn möglich, für eine Mehrzahl von Abnehmern gemeinsam einzubauen. Je mehr Abnehmer über das gleiche Organ bedient werden, desto geringer ist dessen Grösse im Verhältnis zum Anschlusswert der ganzen Gruppe, um so grösser aber auch die Wahrscheinlichkeit verschiedener Spannungen bei den einzelnen Abnehmern.

2. Organe zur Spannungsregulierung können nur da eingebaut werden, wo von einem zusammenhängenden Netzteil in einen andern selbständigen Netzteil übergegangen wird.

3. Liegt ein spannungsregulierendes Organ in der Verbindung zweier synchron laufender Netze, so muss die Regulierung nach Leistungsfaktor erfolgen. Damit sind beide Netze in ihrer Spannungshaltung unabhängig und eine unbeabsichtigte, nicht kontrollierbare Blindleistungsverschiebung wird vermieden.

4. Arbeiten spannungsregulierende Organe von verschiedenen Speisepunkten aus auf das gleiche zusammengeschaltete Netz, so muss ein Organ als führend auf Spannungshaltung regulieren. Die übrigen Organe haben auf Leistungsfaktor zu regulieren.

5. Erfolgt in einem Fall nach 4 infolge einer Störung die Auslösung so, dass eine Station, die auf Leistungsfaktor regulierte, plötzlich einen selbständigen Netzteil speist, so muss entweder der Regler gesperrt werden oder das Steuerorgan sofort von Leistungsfaktor- auf Spannungs-Regulierung umschalten.

6. In der gleichen Station können Regulierorgane beidseitig parallel geschaltet betrieben werden und auf Spannung regulieren. Zu diesem Zweck ist aber eine Stabilisierungsschaltung zwischen den einzelnen Reglern nötig.

Mit diesen Grundsätzen dürften die prinzipiellen Erfordernisse betrieblicher Natur festgehalten sein. Es wird darin nicht bestimmt, ob es sich um ein Ueberland- oder ein Stadtnetz handelt. Die Regulierungsmöglichkeit ist bei beiden gleich. Sie wird sich je nach Erfordernis und Wirtschaftlichkeit auf der einen oder andern Spannungsstufe vollziehen.

In Fig. 4 ist ein solches Supernetz dargestellt.

Ein Höchstspannungsnetz, dessen Anfangsspannung nach der Belastung programmartig reguliert wird, speist ein Verteilnetz von 50 kV in verschiedenen Sektoren. Speist dieses Netz z. B. im Sektor A ein wenig ausgedehntes Gebiet mit engbegrenzter 16-kV- und 380/220-kV-Verteilung, deren

Einfluss auf die Spannungshaltung gering ist, so wird die Regulierung mit Vorteil am 150/45-kV-Transformator vorgenommen. Zeigt dabei eine einzelne 16-kV-Leitung ungünstige Verhältnisse, z. B. infolge der Länge oder Belastungsart, so wird hier eine Einzelregulierung angebracht sein. Ob diese 16-kV-seitig oder durch den 16 000/380-V-Transformator oder mit Sekundärregler erfolgt, ist eine Detailfrage, deren Grundlagen ebenfalls durch die Diskussion geklärt werden können.

Wird die 150/45-kV-Regulierung nicht nach Leistungsfaktor gesteuert, so sind die Generatoren im Sektor A entsprechend zu erregen.

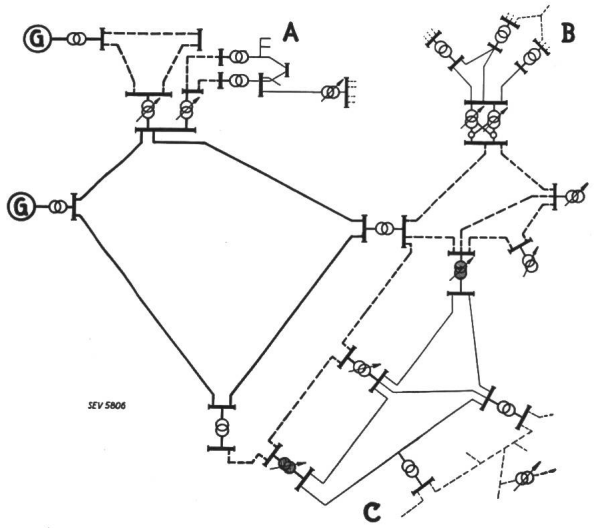

Fig. 4.
Super-Netz mit Spannungsregulierung.

— 150 kV.
---- 45 kV.
— 16 kV.
----- 380/220 V.
Spannungsregulierung.
cos φ-Regulierung.
Stabilisierung.

Speisen diese 150/45-kV-Stationen dagegen ein zusammenhängendes Netz wie im Sektor B, so kommt die Regulierung besser in die Stufe 45/16 kV. Dabei darf das 16-kV-Netz nur von dieser einen Station aus gespeist werden. Sind mehrere Reglergruppen vorhanden, so müssen diese gegenseitig stabilisiert werden.

Ist endlich das 16-kV-Netz ebenfalls zusammengeschaltet wie in Sektor C, so übernimmt die führende Station mit ihrem Regler die Spannungshaltung; die übrigen Stationen regeln auf cos φ.

In allen Fällen kann es nötig werden, die Spannung für besondere Bedürfnisse auch noch in der 16 000/380-V-Stufe zu regeln; hier gilt wieder das bereits Gesagte.

5. Anwendungsbeispiel.

Ich gehe nun über zu einem Anwendungsbeispiel. Da die Unterlagen für das EW Winterthur zur Verfügung stehen, deren Ergebnisse aber innert gewisser Annäherung auch für andere Verhältnisse gelten dürften, so soll dieses Netz besprochen werden.

Fig. 5 zeigt das gegenwärtige Hochspannungsnetz, welches durch die in nord-südlicher Richtung verlaufende Bahnlinie in zwei Hälften getrennt wird, die separat ab Unterwerk «Winterthur» und Unterwerk «Mattenbach» gespeist werden.

In Fig. 6 sind die Ergebnisse der mit Spannungsmittlern [4]) ausgeführten Spannungsmessungen eingetragen. An einzelnen Stellen wurden sogar die effektiven Extremwerte mit schreibenden Voltmetern festgestellt.

Es ist daraus ersichtlich, dass in den äusseren Gebieten, wie Wülflingen, Rosenberg, Oberwinterthur und Breite, Spannungsdifferenzen auftreten, die wohl als Grenze des Zulässigen angesprochen werden müssen. Es bestehen hier Differenzwerte von 14 bis 16 Volt, d. h. 7 ... 8 % der Nennspannung.

Im Zentrum sind sie ähnlich; immerhin liegen infolge der Vermaschung die Mittelwerte besser beieinander. Auffallend ist weiter, dass im Gebiet Töss-Brühlberg grosse Differenzen bestehen, trotzdem das UW Winterthur annehmbar konstante Spannung aufweist. Dies hängt im Gebiet Töss mit den stark belasteten 3-kV-Einzelleitungen (Fig. 5) zusammen. Der «Brühlberg» ist dagegen ein reines Wohnquartier mit langen Sekundärsträngen; der Einfluss von Licht- und Heisswasserspeicherbelastung am Abend und die auch am Tage fehlende Motorenbelastung machen sich in den gemessenen Spannungsmittelwerten deutlich bemerkbar.

Die Ausbaustudien in Hinsicht auf Leitungsreserven, Relaisschutz und Spannungsregulierung haben zu dem in Fig. 7 dargestellten prinzipiellen Projekt geführt. Es sollen in Töss ein Ring gebildet und in den Stationen «Holderplatz» und «Wiesengrund» Organe für Spannungsregulierung aufgestellt werden.

Für das Gebiet Mattenbach-Oberwinterthur und für Wülflingen wird wegen der unzusammenhängenden Bebauung vorläufig für diejenigen Stationen, wo es nötig ist, besser zur dezentralisierten Regulierung gegriffen.

Es sind bei diesem Projekt also folgende Grundzüge der Spannungsregulierung verwirklicht:

1. Spannungsverbesserung durch Ringleitung im Quartier Töss.
2. Einzelstrangregelung am Brühlberg.
3. Einzelsekundärnetzregelung in Wülflingen und Oberwinterthur.
4. Sektorregelung in Veltheim.
5. Gesamtnetzregelung in der Altstadt.
6. Spannungsbeeinflussung durch Blindleistungskondensatoren im Netz Altstadt.

Die eingetragenen Werte der höchsten und tiefsten Spannungen im gegenwärtigen Zustand und nach Einbau der vorgesehenen Regulierung lassen deutlich erkennen, dass damit eine volle Sanierung der Verhältnisse entsteht. Die jetzigen Spannungs-

[4]) Bull. SEV 1935, Nr. 15, S. 418.

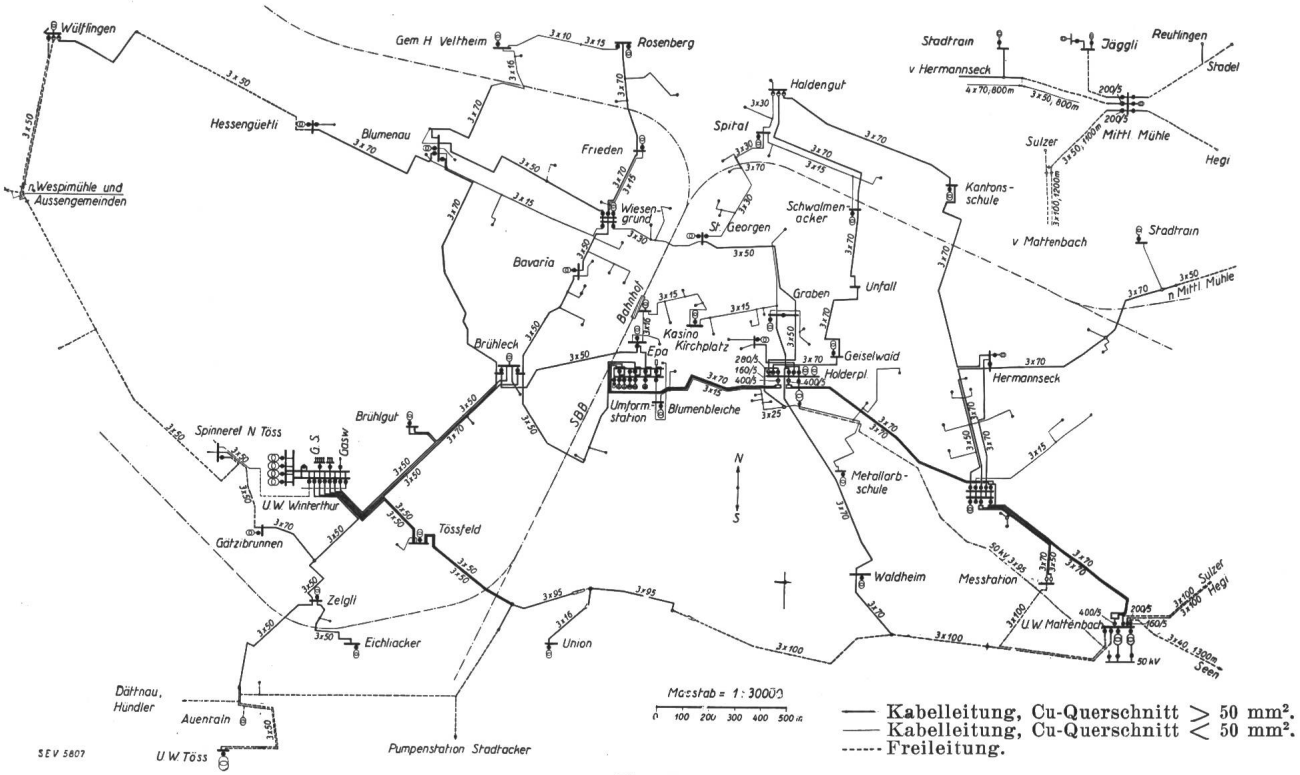

Fig. 5.
3 kV-Netz des EW Winterthur (gegenwärtiger Stand).
Die grossen Punkte bedeuten Schalter mit Relaisschutz und die kleinen Punkte Abonnentenstationen.

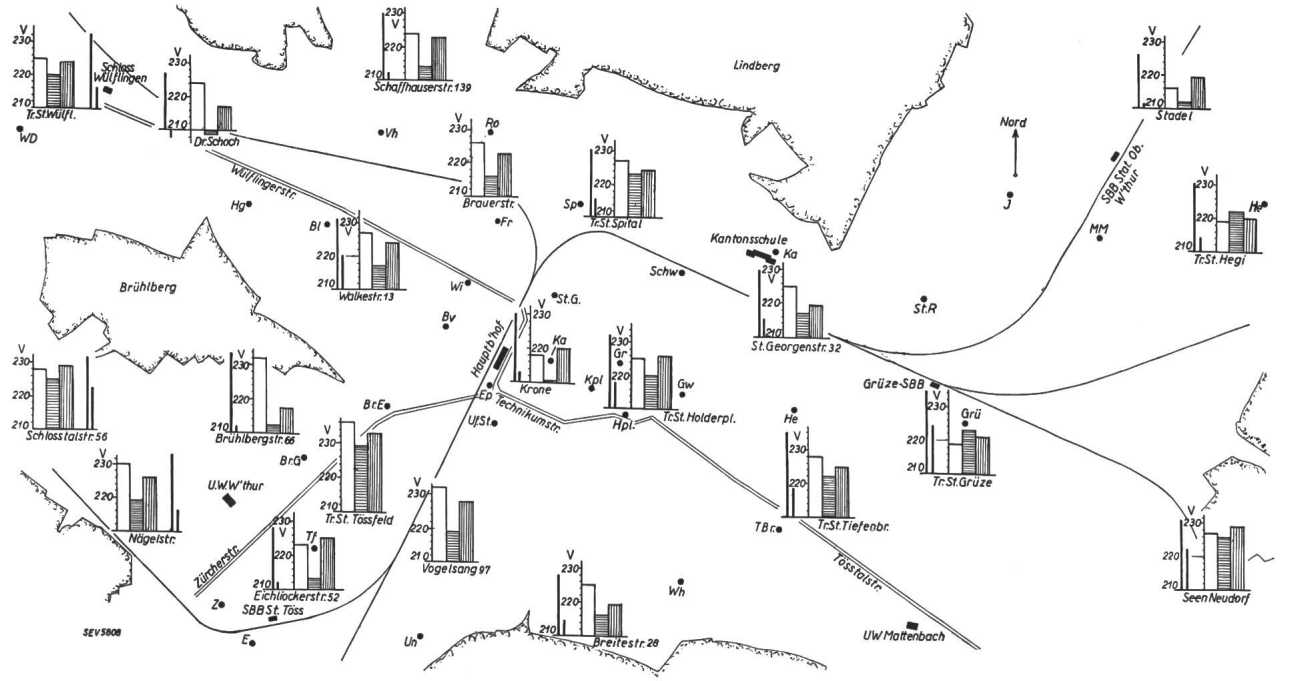

Fig. 6.
Spannungsverhältnisse im 380/220-V-Netz des EW Winterthur, festgestellt mit Spannungsmittlern.

Tages-Mittelwert 08.00 bis 17.00 h.
Lichtperiode-Mittelwert 17.00 bis 22.00 h.
Nacht-Mittelwert 22.00 bis 08.00 h.
Spannungs-Extremalwert.
Netz-Transformatorenstation.

differenzen von bis 16 Volt verringern sich auf 3 . . . 5 Volt in den ungünstigsten Fällen.

Als praktische Anwendung und Versuchsweise wurden bereits im Gebiet von Oberwinterthur drei Sekundärregler aufgestellt. In Fig. 8 sind die regulierten und unregulierten Spannungen am Anfang und Ende einer Leitung für einen Brown-Boveri-Regler sowie die Stationsspannungen für einen Nivo-Regler (Spälti, Zürich) dargestellt.

Es ist auch die Schalthäufigkeit, soweit sie sich ermitteln liess, eingetragen. Das Resultat war auf

jeden Fall so, dass nun die Klagen über schlechte Spannung in diesem Gebiet verstummten.

Ueber das *Parallelschalten von Reglern* wurden einige orientierende, grobe Versuche durchgeführt.

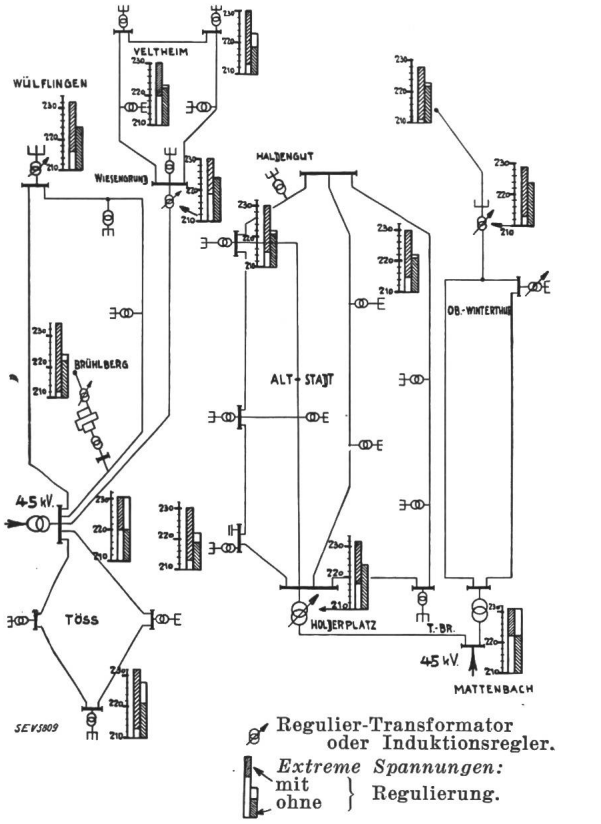

Fig. 7.
3-kV-Netz des EW Winterthur, mit projektierter Regulierung. (Prinzipielles Netzbild.)

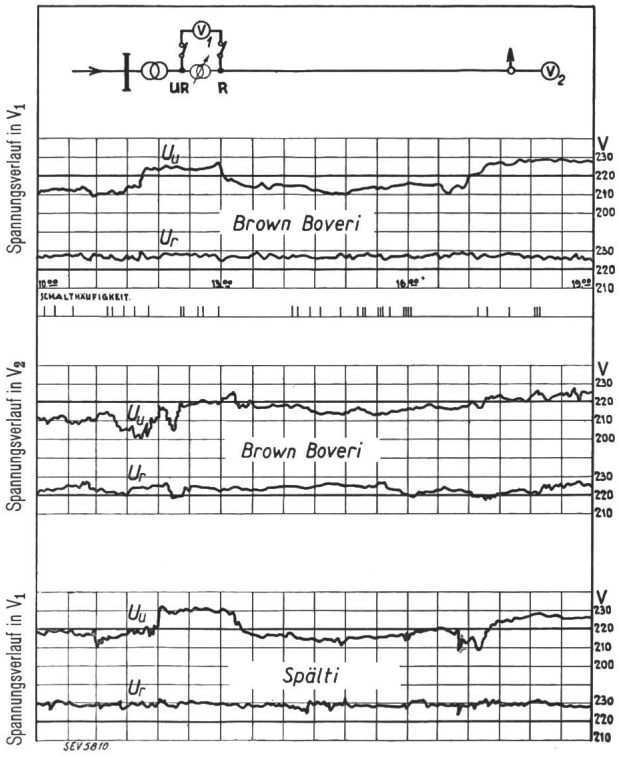

Fig. 8.
Spannungsverhältnisse im 380/220-V-Netz Ober-Winterthur, bei reguliertem (U_r) und unreguliertem (U_u) Betrieb.

Von den mit Reglern ausgerüsteten Stationen stossen «Jäggli» und «Stadtrain» (rechts oben in Fig. 5) mit ihren Sekundärnetzen aneinander. Es ist möglich, beide Stationen über einen Freileitungsstrang von ca. 900 m Länge miteinander zu verbinden. Wir haben nun Versuche über die Möglichkeit des Parallelarbeitens der beiden Regler gemacht und dabei folgendes gefunden: Beide Regler hatten vor der Zusammenschaltung 385 V Grundspannung. «Jäggli» mit 200 kVA Leistung nahm 53 A auf und gab 5 A an die Verbindungsleitung ab. «Stadtrain» mit 100 kVA Leistung nahm 57 A auf und gab 34 A an die Verbindung ab. Nach der Zusammenschaltung regulierten die beiden Regler auf 400 bzw. 390 V. Die Stromaufnahme änderte bei «Jäggli» auf 59 A, die Abgabe an die Leitung auf 19 A. Bei «Stadtrain» waren die Daten 34 A Stromaufnahme, bzw. 29 A Abgabe an die Verbindungsleitung. Leider konnte die Aenderung des Leistungsfaktors nicht bestimmt werden.

Man darf aus dem Versuch immerhin schliessen, dass solche Regler im allgemeinen nicht ohne weiteres beidseitig parallel geschaltet werden sollen, da sich sonst trotz der dazwischen liegenden Leitungsimpedanz sofort Ausgleichströme bilden.

6. Umfrage.

Um nicht nur meine persönliche Ansicht zu äussern, sondern auch die Meinung anderer Betriebsleiter zu hören, habe ich mir erlaubt, an verschiedene Werke einen Fragebogen zu richten. Dieser hat reges Interesse gefunden, und ich danke allen den Werken, die sich die Mühe einer Beantwortung genommen haben.

Kurz zusammengefasst ergibt sich aus der Beantwortung ungefähr folgendes:

1. Die totale Spannungsänderung soll nicht mehr als ca. 8 % betragen und täglich nur 1 . . . 3mal vorkommen bei ganz geringer Steilheit. Plötzliche Aenderungen dürfen nur einen Bruchteil des genannten Wertes betragen.
2. Ueberlandwerke regulieren vorzugsweise möglichst in den obern Spannungsstufen (Gruppenregulierung oder sogar Netzregulierung).
3. Kleinere Gemeindewerke regulieren möglichst nicht, bauen aber ihr Netz stark aus, um so die Schwankungen zu unterdrücken.
4. Grössere Gemeinde-Werke regulieren in den einzelnen Stationen beim Uebergang auf 380 Volt oder gesamthaft an der Uebernahmestelle vom Lieferwerk.
5. Grössere Stadtwerke bevorzugen die sektorweise Regulierung. Die obere Verteilspannung wird möglichst nahe an den Stadtkern herangeführt (50-kV-Kabel).
6. Der Einzelregulierung stehen die Werke skeptisch gegenüber, obwohl sie teilweise als nötig empfunden wird (Befürchtung zu grosser Ansprüche der nicht regulierten Abnehmer).

In Tabelle I sind die Hauptpunkte der Umfrage zusammengestellt. Von den angefragten Werken gingen 35 Antworten ein, die teilweise sehr wertvolle Auskünfte geben. Hiervon konnten für die

Resultat der Umfrage betreffend Spannungsregulierung.

Tabelle I.

G = Gemeindewerk S = Stadtwerk Ü = Überlandwerk	Art der Spannungsregulierung														
	Nicht reguliert oder nicht abgeklärt			Gesamtnetz			Sektorweise			Am Generator bzw. 150/x kV			Einzelreguliert		
	G	S	Ü	G	S	Ü	G	S	Ü	G	S	Ü	G	S	Ü
Zahl der Werke	2	2		1	3	3		7	8		3		2		
Langsame Schwankungen: Zahl > 10 in 12 h					1	1					1				
Zahl < 10 in 12 h					2	2		7	8		1				
Grösse: $\Delta U < \pm 3\,\%$					3			6	3		1				
Grösse: $\Delta U > \pm 3\,\%$					1	3		1	5		1				
Rasche Schwankungen: $\Delta U = 1...2\,\%$				1	3	1		7	8				1		
Rasche Schwankungen: $\Delta U = > 2\,\%$						2									
Stufentransformator				1	3	1		2	6				1	1[1]	3[1]
Induktions-Regler					1			5	3[1]				1	4[1]	1[1]
Ansprechempfindlichkeit: für Stufenschalter > 1,5 %					1	2		1	5				1		
für Stufenschalter < 1,5 %				1	1	1		1	2						
Induktions-Regler > 1 %					1			1							
Induktions-Regler < 1 %					2			5	5				1		
Ansprechorgan: gedämpft ST.-Tr.				1				3	4				1	2	2
Ansprechorgan: gedämpft J.-R.															
Ansprechorgan: ungedämpft ST.-Tr.									1					2	
Ansprechorgan: ungedämpft J.-R.				1				5	1				1	3	
Antrieb: Stuf.-Transformator: Hand						3[2]			3[2]						
Stuf.-Transformator: Motor				1	1			1	3						
Stuf.-Transf.: Kraftspeicher								1	1				1	1	3
Induktions-Regler: Hand									1[2]						
Induktions-Regler: Motor				1	1			5	4				1	2	2
Induktions-Regler: Oeldr.								1[1]	2[1]						
Parallelarbeiten: stabilisiert									1						
unstabilisiert: handreguliert						3		3	3[3]						
automatisch									1[3]				3[3]	3[3]	

[1]) Nur wenn spezielle Verhältnisse Einbau nötig machen.
[2]) In bedienten Stationen.
[3]) Nur ausnahmsweise bei Störungen.

Zusammenstellung verwertet werden: 5 Angaben von Gemeindewerken, 15 Angaben von Stadtwerken und 11 Angaben von Ueberlandwerken. Zu den einzelnen Fragen ergibt sich folgendes:

Das Problem der Spannungsregulierung findet überall grösste Beachtung; bei einigen Werken ist es aber noch nicht so akut, dass eine ernsthafte Lösung gesucht wurde. Von den übrigen Werken regulieren die Gemeindewerke entweder das Gesamtnetz oder dann einzeln im Sekundärnetz, die kleineren Stadtwerke ebenfalls das Gesamtnetz, die grösseren dagegen sektorweise, wie auch die Ueberlandwerke die Sektorregulierung vorziehen. 3 Stadtwerke sind in der glücklichen Lage, das ganze Regulierproblem durch Veränderung der Generatorspannung lösen zu können.

Was die Dauer der Schwankungen anbetrifft, so ist man allgemein der Ansicht, dass langsame Schwankungen nur sehr selten, d. h. einige Male am Tag auftreten dürfen. Hierfür lassen die meisten Stadtwerke eine Spanne von weniger als ± 4 % zu, während die Ueberlandwerke etwas höher gehen. Immerhin werden auch hier 15 % als äusserste Grenze für Einzelversorgung bezeichnet.

Als maximal zulässige rasche Schwankungen werden 1 % bis höchstens 2 % genannt, 3 V bilden das Mittel. Für die automatische Regulierung ist damit zugleich die Ansprechempfindlichkeit gegeben. Diese wird mit ca. 1,5 ... 1,75 % für Stufentransformatoren angegeben, für Induktionsregler werden dagegen 0,5 ... 0,75 % verlangt.

Was die Regulierapparate anbelangt, so glauben die Stadtwerke, den Induktionsregler vorziehen zu müssen, wohl besonders dann, wenn bei nicht zu hoher Spannung die Sektorregulierung erfolgt. Für Gesamtnetzregulierung, besonders wenn sie in den obern Uebertragungsspannungen erfolgt, wird der Stufentransformator vorgezogen. Das zeigt sich deutlich bei den Angaben der Ueberlandwerke. Interessant ist die Feststellung, dass einzelne ausländische Werke an Stelle von Hochspannungs-Stufenschaltern lieber Zusatztransformatoren mit kontinuierlicher Aenderung der Erregung verwenden, womit sie ebenfalls eine stufenlose Regulierung erreichen.

In bezug auf den Antrieb sind viele Werke der Ansicht, dass Handantrieb oder dann ein elektrischer Antrieb mit Druckknopfsteuerung genügt, sofern die Station bedient ist. Für den Induktionsregler ist der Motorantrieb das normale; Oeldrucksteuerung wird nur für besonders unruhige Betriebe (Elektroöfen am allgemeinen Netz) verlangt. Beim Stufentransformator wird dort, wo die Station unbedient ist, teilweise dem Kraftspeicherantrieb der Vorzug gegeben, sonst wird auch hier der Motorantrieb als genügend angesehen.

Stufentransformatoren werden als vollständig kurzschlußsicher bezeichnet. Im allgemeinen wird der Mechanismus während eines durchgehenden Kurzschlusses blockiert. Dagegen soll eine Abschaltung des Transformators erfolgen, wenn der Kurzschluss während der Umschaltbewegung eintritt. Unzuträglichkeiten hieraus wurden bisher nicht beobachtet. Das Zusammenfallen von Netzkurzschlüssen mit einer Regulierbewegung scheint demnach äusserst selten zu sein.

Ueber die Anzahl der zulässigen Schaltungen gehen die Ansichten auseinander. Während für Induktionsregler keine Vorschriften gemacht werden, sollen die Stufenschalter auf kurzzeitige Spannungsänderungen nicht ansprechen. Immerhin lässt ein Werk bis 60 Schaltungen pro Stunde zu, während ein anderes mit 3 ... 4 Schaltungen rechnet. Ein praktischer Versuch in einem Ueberlandwerk zeigte ca. 25 ... 30 Schaltungen in 24 Stunden.

In bezug auf die Sekundärregulierung wird der stufenlosen Regulierung der Vorzug gegeben. Sofern Stufenschalter verwendet werden, sollen sie vielstufig, mit kleinen Spannungssprüngen und mit Kraftspeicher ausgerüstet sein. Die Schützensteuerung wird nicht als Ideallösung charakterisiert.

Ueber das Parallelarbeiten von automatisch gesteuerten Reglern in verschiedenen Stationen fehlen Erfahrungen. Die regulierten Netzteile werden allgemein separat betrieben und nur im Notfall beidseitig zusammengeschaltet. Dagegen arbeiten Regler mit Handregulierung oder Druckknopfsteuerung in verschiedenen Stationen vielfach parallel. Ebenfalls werden stabilisierte Regler in der gleichen Station mit gutem Erfolg parallel betrieben.

7. Diskussionsfragen.

Im vorliegenden Referat wurde versucht, das Problem der Spannungshaltung betriebstechnisch zu beleuchten. Es haben sich dabei verschiedene Fragenkomplexe herausgeschält, welche als Grundlage für die Diskussion dienen könnten und nachstehend aufgeführt sind:

1. Welche Elektrizitätsanwendungen sind spannungsempfindlich und bei welcher Grenze beginnt diese Empfindlichkeit?
2. Welche Schwankungen (Dauer und Anzahl sowie Steilheit) sind noch zulässig?
3. Wo setzt der Betriebsleiter am vorteilhaftesten das Regulierorgan ein? (Netzschutz, Reserveleitungen.)
4. Welche Mittel sollen verwendet werden (Stufentransformator, Induktionsregler, Sekundärregler) und wie soll deren Steuerung beschaffen sein (Hand-, Motor- oder Oeldruckantrieb, Kraftspeicher).
5. Bringen die Stufentransformatoren durch das Ueberschalten Zuckungen in das Licht?
6. Wie gestaltet sich der Parallelbetrieb (stabilisiert oder nicht, cos φ-Regelung usw.)?

Conférence de *M. M. Roesgen*, sous-directeur du service de l'Electricité de Genève.

Le problème des chutes de tension s'est posé à l'origine déjà de la construction des réseaux de distribution; mais il est certain que ce problème est devenu de plus en plus compliqué, au fur et à mesure qu'augmentaient le nombre et la variété des applications de l'électricité. La conséquence a été que des solutions tout d'abord satisfaisantes ont dû être ou abandonnées ou perfectionnées pour faire face aux exigences croissantes de l'exploitation.

Le développement de la distribution électrique ne se manifeste pas de la même façon dans tous les réseaux qui, de leur côté, ont chacun leur structure particulière, imposée par les conditions locales et les principes mis à la base des premières installations. Il en résulte qu'ici et là, on a pu appliquer certaines solutions particulières du problème qu'il peut être intéressant d'exposer.

Il convient cependant tout d'abord de rappeler brièvement les éléments théoriques du problème:

Une ligne de transport d'énergie électrique est un système doué de résistance pure, d'inductance, de capacité et de conductance de fuite; cette dernière propriété ne joue qu'un rôle négligeable; la capacité n'intervient que pour les câbles et pour les lignes aériennes à très haute tension.

Dans le cas le plus simple de la ligne aérienne, la chute totale de tension se compose de la chute

ohmique et de la chute inductive, qui sont décalées l'une par rapport à l'autre de 90°.

Si l'on désigne par R et par $X = \omega L$ la résistance et la réactance d'une ligne, on peut déterminer la tension U_0 qui, appliquée à l'origine de celle-ci, fait débiter une intensité I donnée à l'extrémité sous une tension U_1 également donnée.

Il est intéressant de construire le diagramme pour différentes valeurs de φ_1, U_1 et I restant constants en valeur absolue. Pour cela, on trace 2 cercles dont les centres sont situés aux 2 angles aigus du triangle rectangle IR et IX, qui reste invariable par hypothèse. On obtient ainsi le diagramme dit de Kapp, sur lequel on remarque aisément les phénomènes particuliers suivants (fig. 1):

Lorsque le courant fourni I est inductif, la tension à l'origine doit être supérieure à la tension d'utilisation, et légèrement en avance ou en retard sur celle-ci, selon que l'inductance ou la résistance prédomine.

Lorsque le courant fourni est nettement capacitif, la chute de tension inductive se soustrait de la

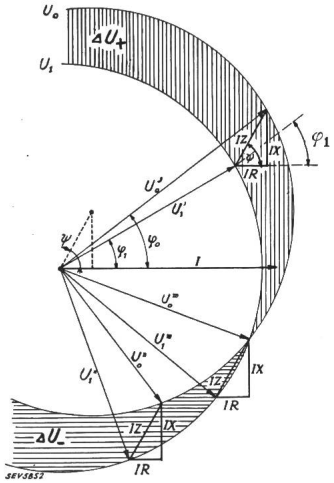

Fig. 1.

Diagramme de Kapp d'une ligne électrique.

$U_0 - U_1 \simeq I\,R\cos\varphi_1 + I\,X\sin\varphi_1$

$\simeq I\,(R\cos\varphi_1 + X\sin\varphi_1)$

tension d'utilisation, en sorte que la tension à l'origine est plus grande qu'à l'extrémité. Ce phénomène se produit en particulier lorsqu'un câble ou une ligne à haute tension fonctionnent à vide; l'intensité qui parcourt la ligne est due au seul courant de capacité, qui se trouve ainsi en avance de 90° environ sur la tension génératrice.

On peut enfin observer sur le diagramme un régime particulier, pour lequel les tensions à l'origine et à l'extrémité sont égales en valeur absolue mais sont légèrement décalées l'une par rapport à l'autre.

Les lignes aériennes à moyenne tension ont une réactance à peu près égale à la résistance; si l'on trace alors le diagramme en observant les valeurs relatives des tensions et des chutes de tension, on peut constater que le cas le plus défavorable se présente pour un cos φ d'env. 0,7 et non, comme on pourrait le croire au premier abord, pour les cos φ très bas (fig. 2).

Cette constatation montre l'intérêt technique capital qu'ont les centrales à n'accepter que des appareils à bon facteur de puissance; cette remarque est particulièrement importante au moment où les lampes à décharge se répandent de plus en plus.

Pour arriver à ce résultat, on peut employer différents moyens, tels que le refus des appareils dont le cos φ est inférieur à certaines valeurs parfaitement réalisables, l'application de tarifs basés sur la puissance apparente, l'octroi de bonification en cas d'amélioration sensible du cos φ.

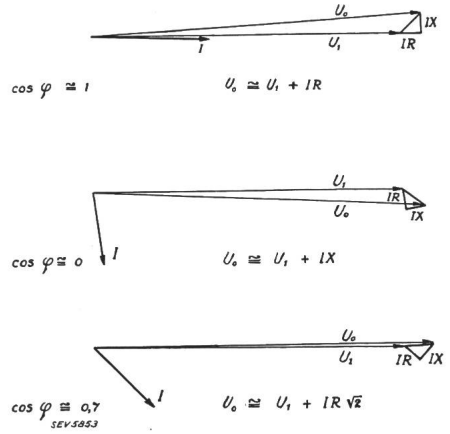

Fig. 2.
Diagramme dans le cas d'une ligne aérienne à moyenne tension.

Le problème pratique des chutes de tension consiste en principe à compenser celles-ci de façon que la tension au point d'utilisation soit aussi constante que possible. A ce point de vue, le réseau de Genève, au moment de la création de l'usine de Chèvres, se présentait sous une forme particulière: un centre alimenté par une usine située à 5 km et reliée à ce centre par un groupe de câbles sans dérivation. Le principe adopté fut le maintien de la tension au centre de la ville, reproduite sur le tableau de l'usine par un câble pilote et un voltmètre. Celui-ci fut étalonné par comparaison afin de compenser les erreurs dues à la chute de tension dans le câble pilote. Le point de mesure avait été soigneusement choisi sur un câble basse tension, à une certaine distance de la sous-station, de façon à reproduire

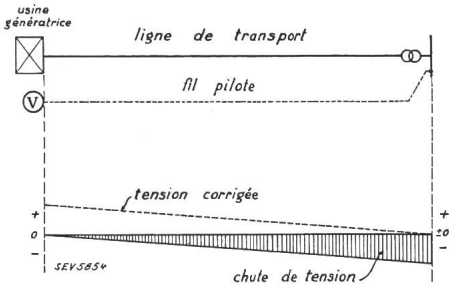

Fig. 3.
Réglage de la tension au moyen du voltmètre pilote.

la tension moyenne de la distribution. Ce système donna des résultats parfaitement satisfaisants jusque vers 1926 (fig. 3).

A ce moment, le diagramme de charge commençait à être déformé par les chauffe-eau à accumulation. Or, ceux-ci étaient relativement rares dans le quartier où était prise la tension témoin, alors que dans d'autres quartiers, leur charge créait des chutes de tension plus importantes, que le réglage d'usine

ne compensait qu'en partie. Il fallut donc, à un moment donné, abandonner le premier point de mesure et adopter un autre point, où l'allure de la tension reflétait mieux l'allure générale de la charge.

Il est probable que si la cuisine électrique continue à se développer comme jusqu'ici, il faudra encore une fois revoir le choix de la tension témoin afin de mieux équilibrer les différentes variations de tension.

Ce réglage est d'ailleurs altéré par un autre phénomène. Depuis longtemps les câbles d'origine étaient devenus trop faibles et ils avaient été complétés par des lignes aériennes et souterraines à plus haute tension, et plus largement dimensionnées. Ces dernières étant par surcroît peu chargées, leur chute de tension est très inférieure à celle des anciens câbles. Il en résulte que lorsque la chute de tension de ceux-ci est exactement compensée pendant la pointe, la tension à l'extrémité des nouvelles lignes augmente très sensiblement (fig. 4).

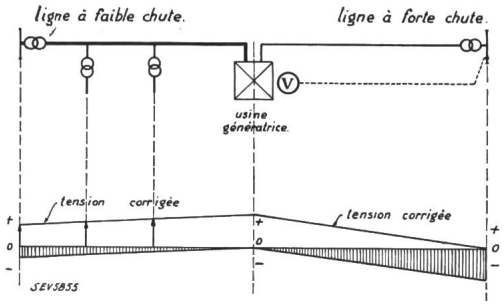

Fig. 4.
Réglage de la tension dans le cas de 2 lignes de caractéristiques différentes.

Pour atténuer ce phénomène, particulièrement désagréable pour les lampes qui se trouvent survoltées au moment de leur emploi le plus étendu, il a fallu introduire les transformateurs à prises multiples fixes; chaque borne haute tension ou basse tension comporte des prises donnant, outre la tension nominale, d'autres tensions à $1^1/_2$ ou 3 % en dessus ou en dessous. Il est dès lors possible d'accorder en quelque sorte le transformateur à l'allure de la tension du point du réseau auquel il est raccordé. Ce système a en outre l'avantage de permettre la correction de la tension au fur et à mesure que l'allure générale de celle-ci se modifie, à la suite de l'augmentation de la charge sur les lignes du réseau haute tension.

Le diagramme de Kapp a montré que la chute de tension d'une ligne peut devenir négative si elle débite un courant fortement décalé en avant.

D'une façon plus générale, on peut dire que la chute de tension est diminuée lorsque le facteur de puissance d'utilisation s'améliore ou devient capacitif. On peut obtenir ce résultat au moyen de moteurs asynchrones-synchronisés ou de condensateurs.

Le cas s'est présenté à Genève; en 1929, le Service des eaux construisait à Versoix une station de pompage auxiliaire destinée à améliorer la pression du réseau de ce village, alimenté par l'usine de la Coulouvrenière; l'idée vint de faire jouer au moteur de 218 kW de la pompe le même rôle au point de vue électrique, que cette dernière devait remplir au point de vue hydraulique. Le moteur fut donc construit comme machine asynchrone-synchronisée, avec un cos φ allant jusqu'à 0,5 en avant. Le fonctionnement de ce moteur peut se résumer comme suit: le courant absorbé étant fortement capacitif, tout se passe comme si le groupe fournit au réseau du courant réactif, qui est immédiatement absorbé par les moteurs industriels de l'endroit; la ligne haute tension Chèvres-Versoix, longue de 16 km, n'a donc plus à transporter ce courant réactif, d'où première diminution de la chute de tension. En outre, le courant transporté par la ligne étant capacitif, la chute de tension totale est encore réduite, sinon annulée.

A vide, le moteur élevait la tension de 950 à 1020 V; en pleine charge, la tension était encore de 975 V, soit 3 % environ au-dessus de la tension normale.

Pour des raisons de bruit, le groupe décrit ci-dessus a dû être remplacé en 1931 par un autre moteur du type normal muni de condensateurs statiques. L'effet produit par ces derniers est analogue.

Il convient toutefois de remarquer ce qui suit:

Un moteur asynchrone-synchronisé ne corrige la chute de tension que pendant qu'il tourne, c'est-à-dire pendant qu'il charge effectivement le réseau; il est donc en quelque sorte autorégulateur.

Une batterie de condensateurs est au contraire enclenchée à demeure, du moins en général. Elle relève donc constamment la tension, même lorsque les moteurs sont hors circuit. Il peut en résulter une hausse de tension préjudiciable aux lampes et même dangereuse pour les transformateurs.

Voici un exemple vécu:

Un transformateur triphasé devait alimenter 3 groupes de lampes à vapeur de sodium, de chacun 3 kW; la puissance réactive de ces lampes, env. 7,7 kvar, devait être fournie par 3 condensateurs de 500 μF, 220 V, connectés à la sortie du transformateur; cette solution s'imposait par son prix plus bas et sa réalisation plus aisée. Or, lors des essais, les condensateurs furent enclenchés alors que les lampes n'étaient pas encore alimentées; le résultat fut que la tension monta de 220 V à 310 V, l'intensité de 35 à 50 A et que le transformateur fut endommagé.

Il est donc extrêmement important d'étudier attentivement les schémas de connexion des condensateurs et il faudra toujours s'efforcer de disposer ces derniers de façon qu'ils soient enclenchés et déclenchés en même temps que les appareils dont ils doivent compenser le courant réactif. On donnera donc la préférence au condensateur individuel.

Le diagramme des chutes de tension est intéressant à construire dans le cas d'un système triphasé, en particulier d'un système à 4 fils. Lorsqu'un réseau triphasé à 4 conducteurs alimente des appareils monophasés, l'équilibrage des charges sur les 3 phases n'est jamais parfaitement réalisé. Les intensités des 3 phases sont par conséquent inégales, de même que leur décalage par rapport aux tensions. Il en résulte que les chutes de tension dans les 3

fils sont inégales en grandeur et en phase; en conséquence le triangle équilatéral des tensions à l'origine du réseau se transforme en un triangle scalène; le diagramme fig. 5 montre par un exemple exagéré le mécanisme du phénomène. A l'action de la chute de tension absolue proprement dite et du décalage

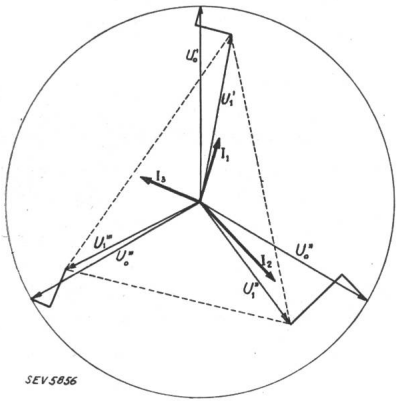

Fig. 5.

Chute de tension dans le cas d'un système triphasé non équilibré.

dû à la ligne de transport s'ajoute donc encore l'effet défavorable du déséquilibre des phases (fig. 5).

On comprend dès lors pourquoi il est si important de réaliser un équilibrage aussi exact que possible des charges monophasées.

Malheureusement, si ce résultat est facilement atteint dans le cas des moteurs ou des gros appareils thermiques tels que les chauffe-eau ou les poêles, il n'en est plus de même lorsque les appareils récepteurs sont monophasés. Ainsi, la répartition des lampes d'une installation peut être mathématiquement exacte; mais si les différents circuits fonctionnent à des heures différentes, le résultat final est loin d'être satisfaisant. De même, la répartition sur les 3 phases des corps de chauffe d'une cuisinière

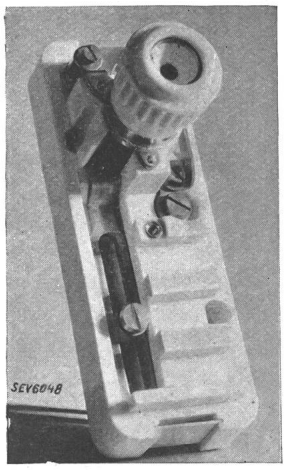

Fig. 6.

Coupe-circuit monophasé 25 A, permettant le branchement rapide sur l'une ou l'autre des 3 phases.

n'assure qu'un équilibrage insuffisant puisque les différentes plaques et le four fonctionnent à tour de rôle.

A ce propos, il est intéressant de signaler un phénomène très répandu et qui provoque parfois des inconvénients sérieux. C'est la systématisation des schémas; par exemple, la règle pour un constructeur de cuisinières de brancher le four sur la phase *R* et la plaque de 1800 W sur la phase *S*; ou bien, pour les monteurs qui construisent les colonnes montantes, le branchement constant sur une même couleur de phase de l'interrupteur horaire qui commande les lampes d'escalier et généralement les lampes de rues. Il résulte de ces schémas que certaines phases sont systématiquement plus chargées

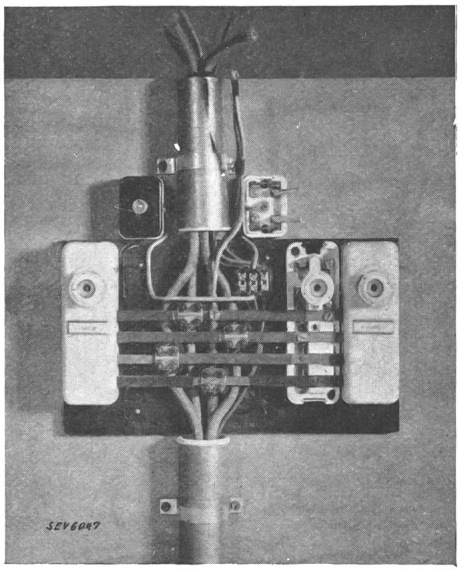

Fig. 7.
Panneau de 3 coupe-circuit d'étage, pouvant être facilement branchés sur l'une ou l'autre des 3 phases de la colonne montante.

que les autres. Il est donc nécessaire d'imposer une rotation dans la répartition sur les phases des différents circuits.

Enfin, et pour la même raison, il peut être intéressant de pouvoir rapidement et commodément modifier la répartition sur les phases des installations d'une maison locative. L'exemple suivant montre bien la nécessité de cette opération: dans une maison de 7 étages, comportant 4 appartements par étage, tous équipés avec cuisinière électrique monophasée, il arriva que les 8 ou 10 premiers appartements occupés furent ceux qui étaient situés du même côté, au soleil; par symétrie, les installations électriques de ces appartements préférés avaient été raccordées à la même phase; celle-ci se trouva donc seule chargée, d'où déséquilibre important et surtension sur les lampes des quelques circuits alimentés par les autres phases. Le remède fut une rotation dans la répartition des coupe-circuit d'appartement sur la colonne montante.

Pour faciliter cette opération, le Service de l'électricité de Genève a développé, avec un constructeur, un coupe-circuit monophasé pour montage sur rails, qui permet le raccordement sur l'une ou l'autre des 3 phases au moyen d'une pièce de connexion mobile (fig. 6 et 7).

Ce modèle de coupe-circuit est imposé dans toutes les maisons locatives neuves où l'on doit fréquemment corriger les déséquilibres qui se produisent inévitablement dans ce genre d'installations électriques.