

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 18 (1927)
Heft: 4

Artikel: Blindlast-Kompensation im Netz des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich
Autor: Leuch, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060446>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 04.04.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke } REDAKTION { Secrétariat général de
Zürich 8, Seefeldstr. 301 } l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration { Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. } Editeur et Administration
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet | Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et
sans indication des sources

XVIII. Jahrgang
XVIII^e Année

Bulletin No. 4

April 1927
Avril

Blindlast-Kompensation im Netz des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich.

Von Dipl.-Ing. H. Leuch, Zürich.

Der Autor untersucht, wie unter Verwendung vorhandener Synchronmaschinen in Zürich und im Kraftwerk Wäggitäl, der Leistungsfaktor der 140 km langen 50 kV-Uebertragungsleitung von den Kraftwerken Sils nach Zürich, die aus 4 Drehstromsträngen besteht, in vorteilhaftester Weise reguliert werden sollte. Er zeigt darauf, wie weit diese theoretisch wünschbare Regulierung praktisch erreicht werden konnte (im Mittel bis auf 10% des Sollwertes), und dass dadurch die übertragbare Leistung dieser Leitung, die bis zur Grenze ihrer Leistungsfähigkeit ausgenützt ist, um ca. 10% erhöht werden konnte.

L'auteur examine comment il serait avantageux de régler le facteur de puissance de la ligne de transmission à 50 kV, comprenant quatre groupes triphasés, longue de 140 km, entre les centrales de Sils et la ville de Zurich, en utilisant des machines synchrones à Zurich et au Wäggitäl. Il montre ensuite à quel degré ce réglage, théoriquement désirable, a pu être réalisé dans la pratique (jusqu'à une moyenne de 10% de la valeur voulue), ce qui a permis d'élever de 10% environ la puissance à transmettre par cette ligne, utilisée dès lors jusqu'à sa limite de capacité.

Einleitung.

Die der vorliegenden Arbeit zu Grunde gelegten Untersuchungen wurden auf Veranlassung des Direktors des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich, Herrn Dipl. Ing. W. Trüb, durchgeführt. Die schon 20 Jahre alten, für kleinere Leistungen gebauten Uebertragungsleitungen zogen in den letzten Jahren wegen ihrer Länge und der Notwendigkeit, bei gegebener Spannung höhere Belastungen zu übertragen, das Interesse für technische Untersuchungen auf sich. Während die vorliegende Abhandlung den Weg vorzeichnete, um die Leitungen nach wirtschaftlichen Grundsätzen betreiben zu können, war es Sache der Instruktion des Personals und sorgfältiger Ueberwachung des Betriebes, um dasjenige Mass an Gewinn zu erzielen, welches die Untersuchung als praktisch erreichbar bezeichnet hatte. Voruntersuchung und Umstellung auf die wirtschaftliche Betriebsweise fallen in das Jahr 1926; in der abgeschlossenen Arbeit konnten immerhin die praktischen Erfahrungen und Auswirkungen bis zum Jahresende Aufnahme finden.

Einleitend müssen einige allgemeine Betrachtungen vorausgeschickt werden.

1. Grundlegende Betrachtungen über Spannung und Blindleistung am Erzeugungsort.

a) Ein Kraftwerk mit mehreren parallelgeschalteten Generatoren. Wirk- und Blindbelastung konstant.

Die Vorbedingungen für das Parallelschalten mehrerer fremderregter Generatoren sind bekannt, nämlich gleiche Spannung und Phasenkoinzidenz am Kupplungspunkt, sowie gleiche Periodenzahl aller Generatoren. Sollen diese nicht aus dem

Tritt fallen, so darf an den letzten beiden Bedingungen nicht gerüttelt werden, dagegen folgt die Klemmenspannung den willkürlichen Veränderungen des Erregerstromes. Den nachfolgenden Betrachtungen wird ein stationärer Wirkleistungszustand zu Grunde gelegt, das heisst, dass die den Generatoren von den Primärmotoren (hydraul. Turbinen) zugeführte Leistung konstant sei, wie auch die Aufnahme elektrischer Wirklast durch das von den Generatoren gespeiste Netz. Daraus sollen die Bedingungen für die Regulierung der Transformatorenerregung abgeleitet werden. Die erweiterte Ueberlegung dient nachher zur Formulierung der Grundsätze für die Spannungs- und Blindlast-Verteilung im Parallelbetriebe mehrerer Werke.

Im Kraftwerk seien z. B. 4 gleiche Generatoren auf ein bestimmtes Netz parallelgeschaltet. Die günstigste Art des Betriebes wäre die gleichmässige Verteilung der Wirk- und Blindlast auf alle 4 Generatoren. Das Leistungsdiagramm, Fig. 1, stellt diese Lösung dar; es entsteht durch geometrische Addition der 4 gleichen Wirk- bzw. Blindleistungskomponenten. Die letztern sind einander nur dann gleich, wenn die 4 Spannungen am Kupplungspunkt einander genau entsprechen; ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ruft jede Abweichung Ausgleichströme hervor, und zwar bewirken diese bei einem tiefer erregten Generator eine Spannungserhöhung und bei den höhererregten Maschinen eine Senkung der Klemmenspannung. Diese Ausgleichströme können bei gleichbleibender Einstellung der Primärmotoren keine Vergrösserung des Wirkstromes herbeiführen, sie sind vielmehr um 90° gegen die Klemmenspannung verschoben. Bei tiefer erregten Generatoren eilen sie relativ zur Klemmenspannung vor (kapazitiv), während sie in den höher erregten nachhinken und einen induktiven Spannungsabfall auf den allen gemeinsamen Wert der Sammelschienenspannung herbeiführen. Dieser Zustand stellt sich naturgemäss schon im Augenblick des Parallelschaltens infolge der kleinsten Ungleichheiten in stärkerem oder schwächerem Masse ein. Damit gelangt man zum allgemeinen Fall, weil nur selten alle Generatoren sich wirklich gleichmässig in die abzugebende Wirk- und Blindleistung teilen werden, d. h. mit gleicher Phasenverschiebung arbeiten.

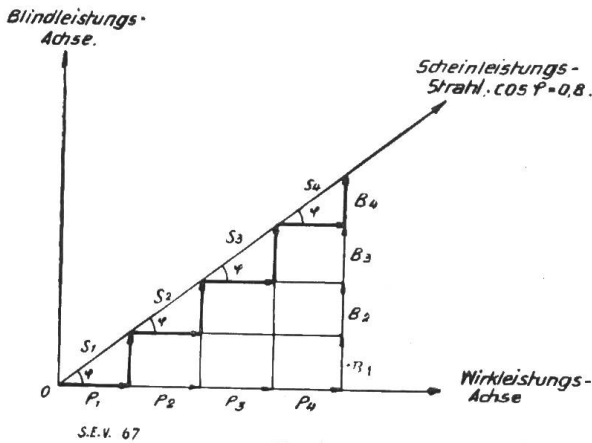


Fig. 1.

Gleichmässige Verteilung von Wirk- und Blindleistung auf 4 Generatoren für $\cos \varphi = 0,8$ gezeichnet.

P = Wirkleistung.
B = Blindleistung.
S = Scheinleistung.

Das Leistungsdiagramm, Fig. 1, stellt diese Lösung dar; es entsteht durch geometrische Addition der 4 gleichen Wirk- bzw. Blindleistungskomponenten. Die letztern sind einander nur dann gleich, wenn die 4 Spannungen am Kupplungspunkt einander genau entsprechen; ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ruft jede Abweichung Ausgleichströme hervor, und zwar bewirken diese bei einem tiefer erregten Generator eine Spannungserhöhung und bei den höhererregten Maschinen eine Senkung der Klemmenspannung. Diese Ausgleichströme können bei gleichbleibender Einstellung der Primärmotoren keine Vergrösserung des Wirkstromes herbeiführen, sie sind vielmehr um 90° gegen die Klemmenspannung verschoben. Bei tiefer erregten Generatoren eilen sie relativ zur Klemmenspannung vor (kapazitiv), während sie in den höher erregten nachhinken und einen induktiven Spannungsabfall auf den allen gemeinsamen Wert der Sammelschienenspannung herbeiführen. Dieser Zustand stellt sich naturgemäss schon im Augenblick des Parallelschaltens infolge der kleinsten Ungleichheiten in stärkerem oder schwächerem Masse ein. Damit gelangt man zum allgemeinen Fall, weil nur selten alle Generatoren sich wirklich gleichmässig in die abzugebende Wirk- und Blindleistung teilen werden, d. h. mit gleicher Phasenverschiebung arbeiten.

Bei tiefer erregten Generatoren eilen sie relativ zur Klemmenspannung vor (kapazitiv), während sie in den höher erregten nachhinken und einen induktiven Spannungsabfall auf den allen gemeinsamen Wert der Sammelschienenspannung herbeiführen. Dieser Zustand stellt sich naturgemäss schon im Augenblick des Parallelschaltens infolge der kleinsten Ungleichheiten in stärkerem oder schwächerem Masse ein. Damit gelangt man zum allgemeinen Fall, weil nur selten alle Generatoren sich wirklich gleichmässig in die abzugebende Wirk- und Blindleistung teilen werden, d. h. mit gleicher Phasenverschiebung arbeiten.

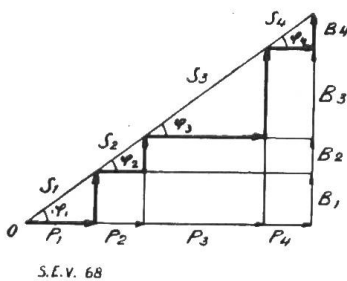


Fig. 2.

Proportional veränderte Wirk- und Blindlast der 4 Generatoren: $\cos \varphi = 0,8$.

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi.$$

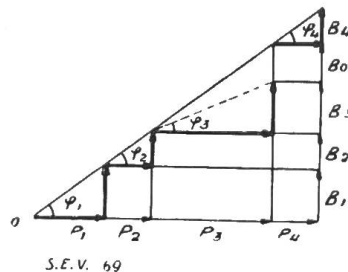


Fig. 3.

Generator 3 läuft mit verkleinerter Erregung; Blindlastkomponente mit B_0 ungedeckt; $\cos \varphi = 0,8$.

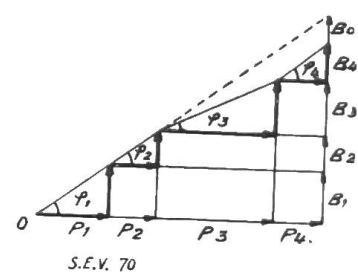


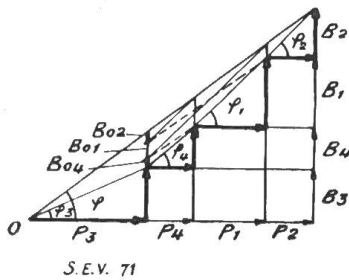
Fig. 3 a.

Generator 3 läuft mit verkleinerter Erregung; Blindlastkomponente B_0 ungedeckt; $\cos \varphi = 0,8$.

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_4 > \varphi_3.$$

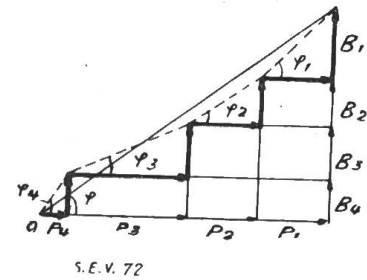
In Fig. 2 ist vorausgesetzt, dass alle 4 Maschinen, wenn nicht mit gleicher Wirkleistungs-, so doch mit proportional veränderter Blindleistungslieferung beteiligt

seien, also die gleiche Phasenverschiebung aufweisen. Unter dieser Annahme fließen zwischen den Generatoren und durch dieselben keine Ausgleichströme. Wird z. B. an Generator 3 die Erregung geschwächt, so dass er nur noch eine verkleinerte Blindleistungskomponente B^3 bei gleicher zugeführter mechanischer Leistung abgibt (Fig. 3), so wäre ein Fehlbetrag an Blindleistung B_0 vorhanden, wenn nicht die anderen Generatoren diesen augenblicklich übernehmen würden. Die hervorgerufenen Ausgleichströme stellen sofort die Spannungsgleichheit wieder her. Der sich ergebende Blindleistungsausgleich vergrößert die Phasenwinkel der Maschinen 1, 2 und 4, wie aus Fig. 4 hervorgeht. Die Blindleistungskomponente B_0 wird von den Generatoren 1, 2 und 4 im Verhältnis der Wirkleistungen als B_{01} , B_{02} und B_{04} übernommen. Ihre Grösse wird im Diagramm nach Fig. 3 dadurch erhalten,



S. E. V. 71
 Fig. 4.
 Verteilung der Blindlastkomponente B_0 auf die Generatoren 1, 2 und 4; Wirklast unverändert, $\cos \varphi = 0,8$.
 $B_{01} + B_{02} + B_{04} = B_0$.
 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_4 > \varphi_3$.

dass man durch die Schnittpunkte des Scheinleistungsstrahls mit den zu den Wirkleistungen gehörenden Ordinaten Strahlen unter dem Winkel $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$ gegen die Abszissenachse zieht. Die Diagramme nach Fig. 3 und 3 a können, wie oben gezeigt, der Wirklichkeit in keinem Augenblick entsprechen, weil sich der physikalische Vorgang stetig vollzieht. Wird nachher ein Teil der Wirklast,



S. E. V. 72
 Fig. 5.
 50% Wirklast von Generator 4 auf Generator 2 übertragen; Blindlastkomponenten unverändert.
 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4$.

ohne Veränderung der Erregung, z. B. von Generator 4 auf Generator 2 geworfen, so ändern sich, abgesehen vom innern Spannungsabfall, nur die Phasenwinkel dieser beiden Maschinen, wie aus Fig. 5 hervorgeht. Erregerstrom und Hauptstrom einer Synchronmaschine sind durch die V-Kurve miteinander verknüpft. Unter der Voraussetzung konstanter Wirkleistung beeinflusst die Veränderung des Erregerstroms nur die wattlose Komponente des Hauptstroms und daher nur die Blindleistung. Aus dem bisher Gesagten geht hervor, dass nur die Einstellung gleicher Spannung an gleichbelasteten Generatoren, von Pendelungen abgesehen, Ausgleichströme vermeiden kann. Bei ungleicher Wirklast sollen die einzelnen Generatoren auf gleichen Phasenwinkel erregt werden.

b) Mehrere Kraftwerke parallelgeschaltet, konstante Blind- und Wirkbelastung.

Verallgemeinert man diese Betrachtungen auf mehrere über Verbindungsleitungen parallelgeschaltete Werke, so gelten diese Ueberlegungen auch für den Kupplungspunkt der Werke, unter der Voraussetzung kapazitäts- und induktionsfreier Verbindungsleitungen und gleicher Kurvenform der Maschinen. Weil diese Annahmen praktisch nicht erfüllt sind, hat jedes Werk die durch Kapazität und Induktivität der Zuleitungsstrecke herbeigeführte zusätzliche Verschiebung, sowie den Spannungsabfall bis zum Kupplungspunkt auszugleichen. Mit andern Worten ausgedrückt, müssen dort die Leistungen mit gleicher Spannung und gleichem Phasenwinkel ankommen.

Untersuchungen auf dieser Grundlage führen deshalb zum Grundsatz: „Parallelbetrieb unter gleicher Phasenverschiebung am Kupplungspunkt“.

2. Mittel zur Verminderung der Phasenverschiebung eines Netzes.

Die Hebung des Leistungsfaktors kann entweder durch vermehrte Kompensation des Leistungsfaktors der angeschlossenen Verbraucher oder durch zusätzliche Mittel herbeigeführt werden. Ueber die technischen Lösungen und wirtschaftlichen Ausichten der bessern Kompensation der Verbraucher hat Herr Direktor M. Schiesser-

Baden anlässlich der Generalversammlung des V. S. E. am 21. Juli 1924 referiert. Seine Zusammenfassung auf Seite 461 des Bulletins 1924 spricht sich über diesen Punkt deutlich aus. Hier soll nur von den Mitteln gesprochen werden, welche dem Elektrizitätsunternehmen selbst in eigenen Anlagen zur Verfügung stehen. Es sind dies ausser übererregten Synchronmotoren Induktionsregler und Kondensatoren. Letztere dienen keinen produktiven Zwecken; sie haben zwar kleine Verluste und stellen in Form eines guten Fabrikats ein vollkommenes Kompensationsmittel dar. Da sie sich mehr zur Aufstellung im Bereich des Abonnenten eignen, wenn er etwa durch den Vertrag zum Hochhalten des $\cos \varphi$ verpflichtet ist, fallen sie ausser den Kreis der vorliegenden Betrachtung. Viel häufigere Verwendung finden Synchronmotoren. Eine allgemeine Regel für die Zweckmässigkeit der Anwendung des einen oder andern Mittels lässt sich nicht aufstellen, weil ausser wirtschaftlichen Erwägungen die bestehenden Verhältnisse in den Erzeugungs-, Uebertragungs- und Verteilanlagen mitzusprechen haben ¹⁾.

Im vorliegenden Fall eines Ueberlandwerkes mit einer Leitungslänge zwischen Grundkraftwerk (Albula) und Verbrauchszentrum (Zürich) von rund 140 km, einer Spannung von 50 kV und relativ kleinem Leitungsquerschnitt, steht das Problem der Entlastung der Uebertragungsleitungen zur Verminderung ihrer Verluste im Vordergrund. Das Leitungssystem ist als lange Uebertragung zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsort mit 2 zwischenliegenden Speisepunkten (Ragaz und Siebnen) aufzufassen. Daraus ergeben sich für den Betrieb folgende Parallelschaltungen, welche sich entweder an einem Tag oder in einer längern Periode aufeinander folgen können:

Sils: Albulawerk, Heidseewerk, Rhätische Werke.

Ragaz: Klosters und Küblis der Bündner Kraftwerke.

Siebnen: Kraftwerke Rempen und Siebnen der A. G. Kraftwerk Wägital, andere Werke jenseits Rathausen, Werke der Nordostschweizerischen Kraftwerke.

Guggach: Netz und Werke der Nordostschweizerischen Kraftwerke.

Das Hauptaugenmerk ist auf die Stammleitung Sils-Zürich gerichtet. Zu ihrer Entlastung soll die Blindleistung in möglichst weitgehendem Masse am Orte des Verbrauchs, also in Zürich selbst, erzeugt werden, damit der Magnetisierungsstrom nicht über eine unnötig lange Strecke geleitet werden muss. Der erste Schritt zur Entlastung der Uebertragungsleitung Sils-Zürich liegt im Phasenschieben im Verbrauchszentrum Zürich, wo das 6 kV-Verteilnetz mit genügenden Querschnitten ausgebaut ist.

Als Umformergruppen stehen im 6 kV-Netz 9 Synchronmotoren von total 13 500 kVA zur Verfügung. Wenn somit in 4 Gruppen 2 800 kVA $\sin \varphi$ für die Kompensation verfügbar sind, muss die Kurve gesucht werden, welche angibt, unter welchem Phasenwinkel und welcher übertragenen Wirkleistung die Blindleistung gleich diesen 2 800 kVA $\sin \varphi$ ist. Liegt der Augenblickswert des aus Wirkleistung und Phasenverschiebung ermittelten Blindleistungsbedarf über diesem Wert, so sind alle 4 Phasenschieber im Betrieb zu lassen, liegt er darunter, so können Maschinen abgeschaltet werden.

In Fig. 6 sind der Cosinus des Verschiebungswinkels und die Wirkleistung als Abszisse mit linearen Massstäben gewählt, welche Grössen als gegeben angesehen werden können. Man erhält die zugehörige Blindleistung $B = P \operatorname{tg} \varphi$, indem man den Rechtecksinhalt aus P (Wirkleistung) und dem tg des Verschiebungswinkels bildet. Andererseits gibt jeder der 4 als verfügbar angenommenen Phasenschieber eine Blindleistung von 700 kVA $\sin \varphi$ bei verschiedenen Verschiebungswinkeln ab, unter der Voraussetzung, sie seien so reichlich dimensioniert, dass sie auch mit sehr grosser Verschiebung arbeiten können. Im Bereich der praktisch auftretenden

¹⁾ Ueber die wirtschaftlichen Verhältnisse siehe Bulletin S. E. V 1923, No. 5, Seite 269.

Verschiebungswinkel ist dies der Fall. Der Ausdruck $B = S \sin \varphi$, worin S die Scheinleistung ist, kann mit genügender Genauigkeit als eine Maschinenkonstante betrachtet und ebenfalls als Rechteck dargestellt werden. Der geometrische Ort der Endpunkte aller von 0 ausgehenden Rechteckdiagonalen ist eine Hyperbel für jede ganze Zahl voll eingesetzter Phasenschieber. Das Kriterium, wie viele Schieber zur vollen Kompensation erforderlich sind, besteht in der relativen Lage des freien Endpunktes, bezw. der Länge der von 0 ausgehenden Diagonale, welche die Scheinleistung S für den untersuchten Fall misst, zu den Hyperbeln. Liegt der Diagonalpunkt A zwischen den Koordinatenachsen und der Hyperbel 1, so genügt 1 Phasenschieber, liegt er zwischen 2 Hyperbeln, so genügt deren höhere Zahl und liegt er jenseits der letzten Hyperbel, so reichen alle diese Mittel zur vollen Kompensation nicht aus.

Beispiel zu Fig. 6:

- Gegeben: Wirkleistung $P = 5$ MW (Megawatt),
 Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,9$.
 Gesucht: die Anzahl Phasenschieber zum Erreichen der Kompensation auf $\cos \varphi = 1$.

Inhalt des Rechtecks:

$$B = P \operatorname{tg} \varphi = 5,0484 = 2,42 \text{ MVA } \sin \varphi.$$

Bildet man das Rechteck aus $P = 5$ MW und $\operatorname{tg} \varphi$ für $\cos \varphi = 0,9$, so liegt der Endpunkt A der Diagonale durch den 0-Punkt zwischen den Kurven 3 und 4, das heisst, dass 4 Phasenschieber von je 0,7 MVA die volle Kompensation herbeiführen vermögen.

$$\text{Kontrolle: Scheinleistung } S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{5}{0,9} = 5,55 \text{ MVA,}$$

$$\text{Blindleistung } B = S \sin \varphi = 5,55 \cdot 0,434 = 2,42 \text{ MVA.}$$

Um den Nachteil der Ungenauigkeit zu vermeiden, welche der graphischen Methode beim Aufsuchen des $\operatorname{tg} \varphi$ -Wertes anhaftet, wenn man in Fig. 6 durch den Schnittpunkt der Ordinate des gegebenen Leistungsfaktors mit dem Kreis einen 0-Strahl ziehen und ihn mit $\operatorname{tg} \varphi$ -Masstab schneiden muss, kann man sich ein rechtwinkliges Diagramm nach Fig. 7 konstruieren, welches die $\cos \varphi$ -, $\sin \varphi$ - und $\operatorname{tg} \varphi$ -Kurven enthält. Dazu trägt man im rechtwinkligen $S \sin \varphi$ -Diagramm die Hyperbeln für $S \sin \varphi = \text{konstant}$ ein und sucht für einen gegebenen Fall den Punkt A (bezw. C).

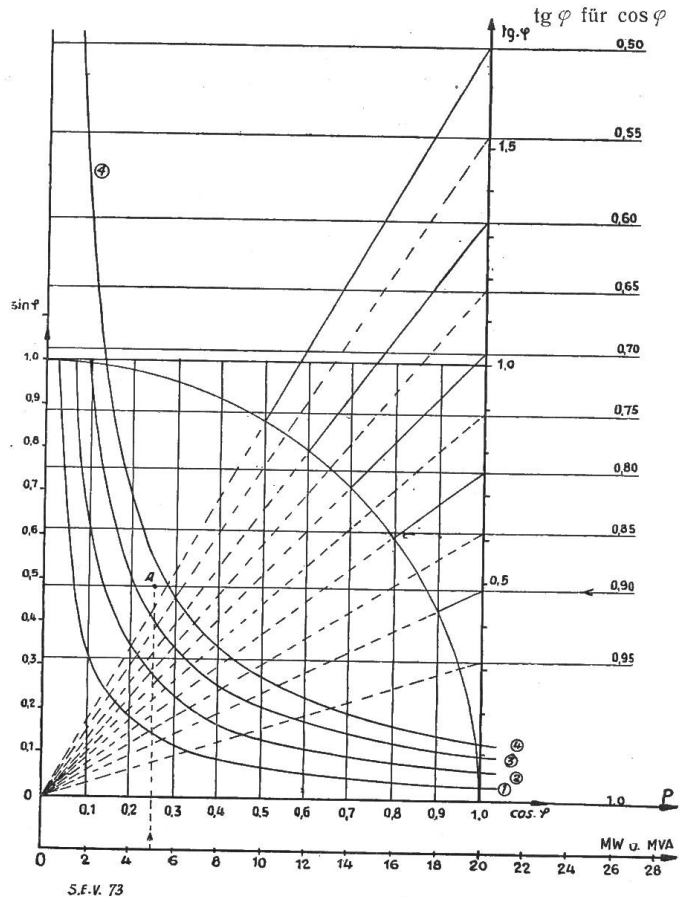


Fig. 6. Polares Diagramm zum Ermitteln der für die volle Kompensation notwendigen Anzahl Phasenschieber bestimmter Blindleistung.

- Anzahl Phasenschieber:
 (1) 1 à 700 kVA $\sin \varphi$.
 (2) 2 à 700 kVA $\sin \varphi$.
 (3) 3 à 700 kVA $\sin \varphi$.
 (4) 4 à 700 kVA $\sin \varphi$.

Man kann hiebei nach 2 Arten verfahren, entweder:

a) durch direktes Eintragen des Rechtecks:

$$P (P \operatorname{tg} \varphi) = PB \text{ (Punkt A),}$$

oder

b) durch Berechnen von $S = \frac{P}{\cos \varphi}$ und bilden des Rechtecks:

$$P (S \sin \varphi) = PB \text{ (Punkt C).}$$

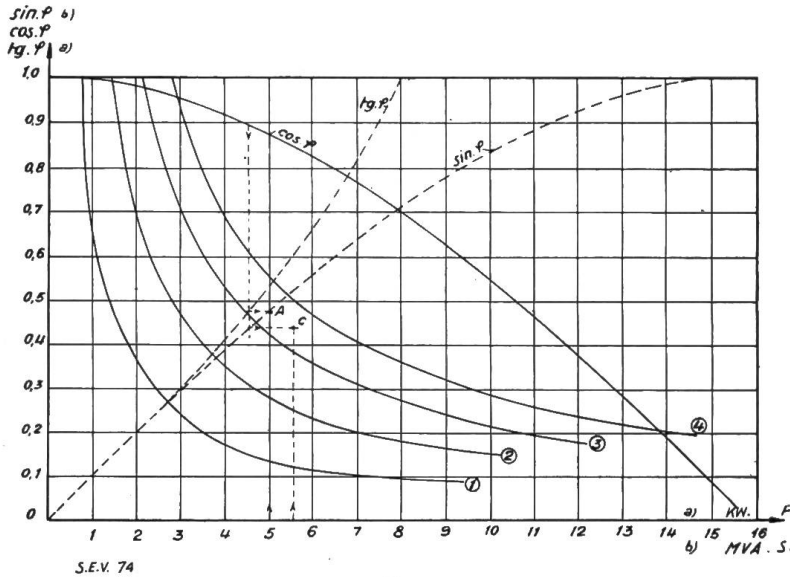


Fig. 7.

Rechtwinkliges Diagramm zum Ermitteln der für die volle Kompensation notwendigen Anzahl Phasenschieber bestimmter Blindleistung auf graphischem Wege mit linearem $\cos \varphi$ -Masstab.

Anzahl Phasenschieber:

- (1) 1 à 700 kVA $\sin \varphi$.
- (2) 2 à 700 kVA $\sin \varphi$.
- (3) 3 à 700 kVA $\sin \varphi$.
- (4) 4 à 700 hVA $\sin \varphi$.

- a) $B = P \times \operatorname{tg} \varphi$.
- b) $B = S \times \sin \varphi$.

Die beiden nach a) oder b) ermittelten Punkte gehören ein und derselben Hyperbel (der homologen Hyperbelschar) an und beantworten die gestellte Frage im gleichen Sinn.

Im allgemeinen wird man die einfachere Weise nach Fig. 6 oder 7 a der zweiten Methode nach 7 b vorziehen. Dem Betriebsleiter geben solche Kurven, wenn sie einmal für einen Netzpunkt entworfen sind, welcher mit Leistungs- und Leistungsfaktorinstrumenten ausgerüstet ist, mit wenig Mühe zu jeder gewünschten Zeit ein klares Bild über den Betriebszustand. Wenn Blindwattmeter an den für diese Erhebungen in Betracht kommenden Orten in das Leitungsnetz eingebaut sind,

entheben sie von der Anwendung solcher Hilfsmittel. Allein diese Instrumente sind erst in wenigen Betrieben zu treffen; unter 5 wird hiezu noch ein Wort zu sagen sein.

3. Der Bedarf an Blindleistung im Verteil- und Verbrauchsnetz.

Die elektrische Arbeit wird in einer verketteten Spannung von etwa 45 bis 50 kV in Zürich den Haupttransformatorenstationen zugeführt. Unter 2. wurde gezeigt, welche Mittel im Verteil- und Verbrauchsnetz zur Phasenkompensation zur Verfügung stehen. Um den Verlauf der Aufnahme von Blindleistung des 6 kV-Verteilnetzes aus dem 50 kV-Uebertragungsnetz während eines Tages zu ermitteln, werden Wirkleistung (P) und Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) in Funktion der Zeit aufgenommen und das Blindleistungsdiagramm (B) nach folgendem Gesetz aus diesen Angaben konstruiert: $B = P \operatorname{tg} \varphi$ (Fig. 9 bis 12).

4. Die Wirkung der Kompensation im 6 kV-Verteilnetz.

Massgebend für diese Untersuchung ist vor allem die Feststellung, ob das Netz Zürich als ganzes durch die beschriebenen Hilfsmittel voll oder etwa über-

kompensiert werden könnte. Da das Kabelverteilstück selbst eine Kompensation von ungefähr 4 % verursacht und im allgemeinen relativ reichlicher dimensioniert ist, als die 50 kV-Fernleitung, darf mit Rücksicht darauf, dass die Kompensatoren auf nur 3 Netzknoten verteilt sind, eine Ueberkompensation auftreten. Die in Zürich aufgedrückte kapazitive Blindleistung vermag bei hoher Belastung nur bis zu bestimmten Netzknoten eine Ueberkompensation herbeizuführen. Im allgemeinen liegen aber noch Transformatoren und ansehnliche Leitungsstrecken zwischen Kompensator und Verbraucher; endlich sorgt die Verzweigung des Netzes dafür, dass die Ueberkompensation nur eine örtlich beschränkte ist. Zur Ermittlung des Einflussbereiches der überkompensierenden Umformer wurden umfangreiche Versuche im 6 kV-Netz vorgenommen. Der Herstellung einer direkten Kabelverbindung vom Drahtzug über Promenade-Hirschengraben-Letten nach Guggach ohne jede Zwischenverzweigung und Einbau je einer Garnitur von Messinstrumenten an den bezeichneten Orten ging die Untersuchung eines Synchronmotors der Beleuchtungs-Umformergruppen im Drahtzug voraus. Jede der genannten Stationen war zur Messung von Strom, Spannung, Leistung und Leistungsfaktor eingerichtet. Mit diesen 24 Instrumenten wurden 270 Punkte aufgenommen, was einer Gesamtzahl von 6480 Ablesungen entspricht. Durch Zuschalten von Zweigverbindungen wurde nachgewiesen, dass sich ein Teil der Kompensationswirkung durch diese Verbindungen dem nicht direkt bzw. über einen längeren und weiter verzweigten Umweg angeschlossenen Netz mitteilt. Naturgemäß verteilt sich die Scheinleistung im umgekehrten Verhältnis der Reaktanzen der Netzweige.

Die Schaffung einer durchgehenden Kabelverbindung, welche in den engen Stationen beträchtliche Gefahren bot, verfolgte überdies den Zweck, die praktische Rückwirkung der 6 kV-Phasenschieber auf das 50 kV-Uebertragungsnetz festzustellen. Da diese Untersuchungen Anfang 1926 vorgenommen wurden, waren die Phasenschieber der heutigen Haupttransformatorenstation Drahtzug nur durch die erwähnte 6 kV-Kabelleitung mit dem 50 kV-Uebertragungsnetz verbunden. (Vergl. unter 5.)

5. Die Rückwirkung der Kompensation am Verbrauchsort auf die Zuleitung.

Es wird in diesem Abschnitt angenommen, der Kompensator stehe nicht abseits, sondern unmittelbar am Ende der zu kompensierenden 50 kV-Zuleitung. Weil für die Messung ein direktes 6 kV-Kabel vom Schieber zum Ende der 50 kV-Leitung zur Verfügung stand, wird dieser Untersuchung diejenige Schieberleistung zugrunde gelegt, welche am Leitungsende angebracht werden konnte. Die Verhältnisse werden also so angenommen, wie wenn Schieber kleinerer Leistung tatsächlich am untersuchten Leitungsende ständen.

Die Wirkung der Phasenkompensation auf der Ueberland-Transportstrecke ist bestimmend für den anzustrebenden Grad der Phasenkompensation. Das Hin- und Herpendeln des Magnetisierungsstromes über solch' lange Leitungen mit ansehnlichem Widerstand verursacht beträchtliche Energie- und damit Geldverluste, ganz besonders wenn es sich um Leitungen handelt, welche ausser der Grundkraft noch hochwertige, akkumulierbare Spitzenarbeit transportieren. Diese Ueberlegung musste im vorliegenden Fall ausschlaggebend sein, da auf den letzten 40 km der ganzen Leitungslänge im Winter kostbare Spitzenkraft aus dem reinen Akkumulierwerk Wägital übertragen wird. Während des grössten Teils der Sommerperioden steht genügend Leistung und Arbeit zu Verfügung, so dass der Verbesserung des Leistungsfaktors während dieser Zeit nicht dieselbe Bedeutung beizumessen ist, wie im Winter. Zum Bestimmen des wirtschaftlichen Kompensationsgrades auf der höchstbelasteten Leitungsstrecke mit vorhandenen Mitteln, sofern dieselben dazu ausreichen, dient die nachfolgende Untersuchung.

Kittler entwickelt in Band II seiner „Allgemeinen Elektrotechnik“ das Vektordiagramm der belasteten Leitung, sowie die Gleichungen für den Wirkungsgrad

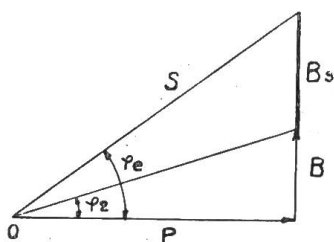
derselben. Das Differenzieren der Wirkungsgradgleichung nach φ_2 , dem Phasenwinkel am Ende der Leitung, ergibt:

$$\sin \varphi_2 = - \frac{\sin (\varphi_k - \varphi_o)}{2 \sqrt{\frac{Z_o}{Z_k} \cos \varphi_o \cos \varphi_k}} ;$$

hierin bedeuten die Indices k und o Kurzschluss und Leerlauf, Z ist die Impedanz der Leitung.

Mit Erfüllen dieser Gleichung durch Einstellen des ermittelten Phasenwinkels φ_2 am Ende der Leitung wird der günstigste Wirkungsgrad erreicht. Leerlauf- und Kurzschlussversuche auf jeder der 4 Leitungen lieferten die notwendigen Rechnungsgrößen. Die in Tabelle 1 aufgeführten Werte sind am Anfang der 4 parallelgeschalteten Drehstrom-Uebertragungsleitungen von je 50 mm² Kupferquerschnitt pro Phase, welche bei seiner verketteten Spannung von ca. 50 kV und 46 km mittlerer Länge bisweilen mit bis zu 40 000 kW belastet werden, aufgenommen worden. Diese Unterlagen, welche überdies rechnerisch belegt sind, ergaben die günstigsten Phasenwinkel nach der angeführten Formel.

Das negative Vorzeichen des Sinus deutet auf Nacheilen des Stromes gegenüber der Spannung am Leitungsende hin. Praktisch ist allerdings die Abweichung von 1 nicht von Belang. Die Betriebsinstruktion wird daher auf $\cos \varphi = 1$ am Leitungsende lauten, um so mehr als die Messinstrumente für reine Betriebszwecke im allgemeinen grössere Ungenauigkeiten als 1% aufweisen. Das Leistungsdiagramm Fig. 8 stellt die Wirkung des Zulieferns von Blindleistung durch die Phasenschieber unter Vernachlässigung allfälliger zusätzlicher Wirklastkomponenten zur Deckung von Leerlaufverlusten dar.



S.E.V. 75

Fig. 8.

Wirk- u. Blindleistungsdiagramm für das Leitungsende.

$$B_s = P (\operatorname{tg} \varphi_e - \operatorname{tg} \varphi_2) = P b.$$

φ_e = effektiver Phasenwinkel im unkompensierten Diagramm.

φ_2 = günstigster Phasenwinkel.

P = Wirkleistung.

B_s = Schieberleistung.

b = Faktor der momentan erforderlichen Schieberleistung.

Es taucht nun die weitere Frage auf, ob die vorhandenen Mittel zur Verbesserung des Leitungsfaktors zu allen Zeiten des Tages genügen, um den Phasenwinkel auf den gewünschten Wert verkleinern zu können. Das Tagesdiagramm der Phasenverschiebung am Leitungsende muss durch einen zweiten Linienzug, den gewünschten Phasenwinkel φ_2 bzw. seinen tg ergänzt werden, um daraus die in jedem Augenblick erforderliche Schieberleistung rechnerisch oder graphisch ermitteln zu können.

Für die gefundenen Werte von $\cos \varphi_2 = 0,997$ bzw. $0,998$ (Tabelle 1) der meistbelasteten Transportstrecke ergibt sich eine Tangente für φ_2 von $0,0573$ (ähnlich dem \sin). Man hat demnach im Tagesdiagramm des $\operatorname{tg} \varphi_e$ den über den ganzen Tag und für die betreffende Leitung konstanten Wert von $\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,0573$ zu subtrahieren. Graphisch führt man dies am zweckmässigsten so durch, dass man den 0-Punkt der tg -Skala um $0,0573$ verschiebt und für den Wert $(\operatorname{tg} \varphi_e - \operatorname{tg} \varphi_2) = b$ eine neue Skala für direkte Ablesung des Schieberfaktors b anbringt.

In der Praxis besitzt man für den Anfangs- oder Endpunkt einer Uebertragungsleitung meistens nur Registrierstreifen für die Wirklast und etwa den $\cos \varphi_e$. Verfügt man über diese beiden Diagramme, so kann man mittels der Kennlinien der Fig. 9 und 10 für jeden Augenblick die erforderliche Schieberleistung berechnen nach der Formel: $B_s = P (\operatorname{tg} \varphi_e - \operatorname{tg} \varphi_2) = P b$. Den Faktor b , den wir hier mit „Schieberfaktor“ bezeichnen, entnimmt man den Kennlinien rechts unten in folgender Weise: Zu der zu untersuchenden Stunde ermittelt man erst den zugehörigen $\cos \varphi_e$ aus dem Diagrammteil links unten, geht mit einer Parallelen zur

Abszissenachse nach rechts bis zum Schnittpunkt mit der $\cos \varphi_e$ -Kennlinie und von dort mit einer Ordinate auf die $\operatorname{tg} \varphi_e$ -Kurve. Die diesem letzten Schnittpunkt zugehörige Ordinate ist $\operatorname{tg} \varphi_e$; wird sie im b -Masstab abgelesen, so erhält man direkt $(\operatorname{tg} \varphi_e - \operatorname{tg} \varphi_2)$, also den Schieberfaktor b . Mit der Wirkleistung multipliziert, ergibt dieser die erforderliche Schieberleistung für das Leitungsende. Der Schieberfaktor der Leitungsstrecke A kann auch der Tabelle 2 für Leistungsfaktorwerte zwischen 0,61 bis 1,0 entnommen werden. Schlüsselkurven und Tabellen ermöglichen, beim Fehlen von Blindwattmetern mittels Leistungsfaktor- und Wattmeter rasch den Augenblickszustand zu übersehen.

Zeichnet sich der Betriebsleiter die für die Werke charakteristischen Blindleistungsdiagramme auf, so sieht er in welchem Masse seine Kompensationsmittel im allgemeinen einzusetzen sind und wie weit sie ausreichen. Die Fig. 9 zeigt, dass im vorliegenden Falle in den ersten 6 Morgenstunden die vorhandenen Synchronmotoren zum Erreichen der günstigsten Phasenverschiebung ausgereicht hätten. Es sei aber hier wiederum betont, dass Rücksichten auf die Spannungshaltung und allgemeine Betriebsgründe dazu führen können, dass der Betriebsleiter darauf verzichtet, die zur Zeit der niedrigen Belastung weniger wertvolle Kompensation im möglichen Masse herbeizuführen. Die Analyse der Diagramme (ähnlich Fig. 9 bis 12) führen ihn zu allgemeinen Anordnungen, welche er auf diesem Gebiet treffen wird. Sinkt die Kurve der Blindleistung unter die im Verbrauchsgebiet zur Verfügung stehende maximale Schieberleistung, so geben Tagesdiagramme nach Fig. 9 bis 12 oder dann ohne diese die Registrierstreifen mit Hilfe der allgemeinen Fig. 6 und 7 über die Äusserbetriebsetzung einzelner Phasenschieber Aufschluss.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich beim Entwerfen der Messeinrichtung, welche beim Anschluss der neu eingerichteten Haupttransformatorenstation Drahtzug in die Hochspannungsleitung eingebaut wurde, von diesen Betrachtungen leiten liess. Die betreffende Anlage wird seit November 1926 durch 2 Drehstromkabelleitungen für 50 kV gespeist; daselbst sind auch 4 grosse Synchronmotoren aufgestellt, die abwechselungsweise zur Phasenkompensation herangezogen werden können. Eine besondere Schaltung der Sekundärkreise der Leistungsstromwandler gestattet unter Einfügung von Zusatz-

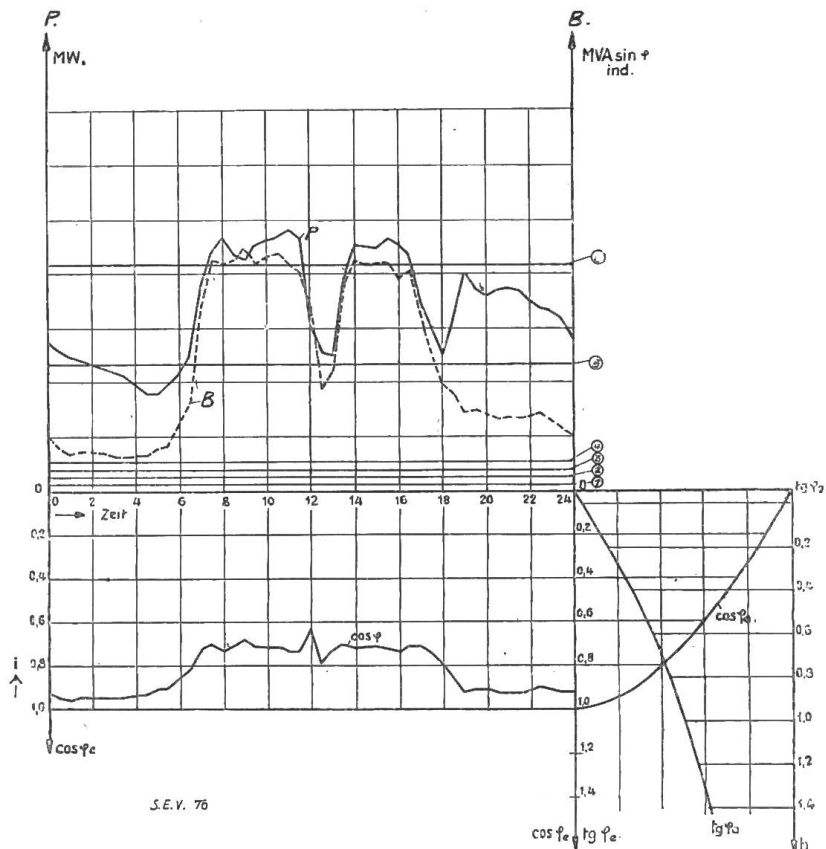


Fig. 9.

Tagesdiagramm der Wirk- und Blindlast, sowie des Phasenwinkels am Ende der Leitung bei zeitlich abgestufter künstlicher Kompensation (Strecke $A \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,057$).

Anzahl Phasenschieber:

- (1) 1 à 700 kVA $\sin \varphi$.
- (2) 2 à 700 kVA $\sin \varphi$.
- (3) 3 à 700 kVA $\sin \varphi$.
- (4) 4 à 700 kVA $\sin \varphi$.
- (5) 4 à 700 + 1 à 9000 kVA $\sin \varphi$.
- (6) 4 à 700 + 2 à 9000 kVA $\sin \varphi$.

wandlern bei beliebiger Schaltung und Energieflussrichtung der beiden 50 kV-Kabelleitungen die Wirk- und die Blindleistung in registrierenden Instrumenten zusammengefasst aufschreiben und durch Zähler messen zu lassen. Diese Hilfsmittel sollen auch dem untern Personal, dem mit Registrierstreifen besserer Unterricht erteilt wird, als mit mündlichen Erklärungen über Phasenverschiebung, das Ver-

ständnis für das Niedhalten der Blindleistung in der Uebertragungsleitung vermitteln.

Die Diagramme Fig. 9 und 10, welche für die gleiche Leitungsstrecke A aufgestellt sind, geben ein deutliches Bild der durch Anwendung des hier entwickelten Reguliervsystems ermittelten Blindlastverminderung trotz Steigerung der Wirklast und Speisung desselben Versorgungsgebietes.

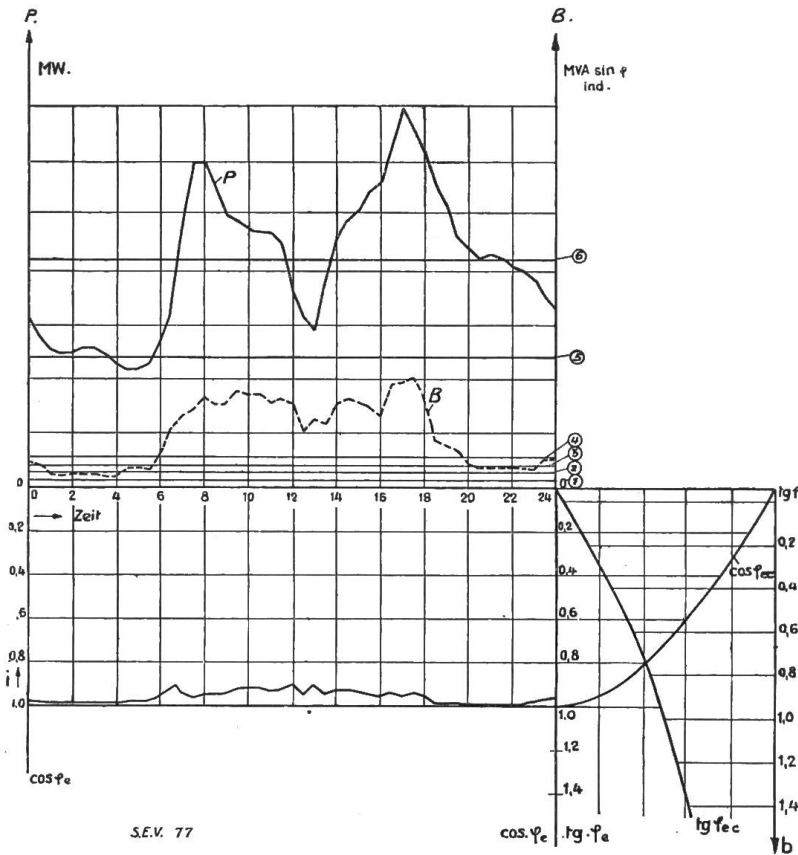


Fig. 10.

Tagesdiagramm der Wirk- und Blindlast sowie des Phasenwinkels am Ende der Leitung vor Einführung der künstlichen Kompensation (Strecke A $\text{tg } \varphi_2 = 0,057$).

Anzahl Phasenschieber:

- (1) 1 à 700 kVA sin φ .
- (2) 2 à 700 kVA sin φ .
- (3) 3 à 700 kVA sin φ .
- (4) 4 à 700 kVA sin φ .
- (5) 4 à 700 + 1 à 9000 kVA sin φ .
- (6) 4 à 700 + 2 à 9000 kVA sin φ .

welche für die Kompensation während des ganzen Jahres zur Verfügung stehen. Das Wäggitalwerk liegt, wenn man nur die Strecke Siebnen-Zürich im Auge hat, am Anfang der Leitung, für die ganze Uebertragungsleitung des Albula werkes jedoch in deren Zuge. In jedem der Generatoren stehen bei den vorhandenen Erregermaschinen und Regulatoren im Leerlauf wenigstens 9000 kVA sin φ zur Verfügung. In der Zentrale Rempen sind 4 Hochdruckakkumulierpumpen aufgestellt, welche durch 5000 kVA-Motoren angetrieben werden, die mit dem Netz synchronisiert werden können. Jeder Motor kann im Leerlauf 5000 kVA sin φ erzeugen bei einem Leerlaufverlust von ca. 100 kW.

Für die Lösung des Regulierproblems betrachtet man die Strecke Sils-Siebnen als ein Ganzes und lässt am Ende dieser Leitung das Wäggitalwerk die erforderliche Blindleistung hinstossen. Weil dadurch der Phasenwinkel in Siebnen

6. Kompensation am Anfang oder im Zug der Leitung.

Die hier beschriebenen Verhältnisse der Uebertragungsleitungen des EW der Stadt Zürich könnten den Schluss zulassen, dass im praktischen Betrieb der günstigste Phasenwinkel auf der Zubringerleitung während der Hauptbelastungszeiten nicht erreicht werden könne, weil die Kompensationseinrichtungen in Zürich nicht genügen. Das Unternehmen ist aber in der glücklichen Lage, im Wäggitalwerk über grosse Maschinen zu verfügen,

verkleinert wird, vermögen dann die Synchronmotoren in Zürich die Leitungsstrecke Siebnen-Zürich auf den günstigsten Phasenwinkel zu kompensieren.

In gleicher Weise, wie in Tabelle 1 die Messresultate der Leitungsstrecke A dargestellt sind, gibt Tabelle 3 diejenigen der Strecke B samt dem günstigsten Phasenwinkel am Ende an. Die Tangente des günstigsten Phasenwinkels, welcher praktisch eine Leitungskonstante ist, erlaubt auch für den Punkt Siebnen den jeweiligen Schieberfaktor b mittels Kennlinien nach Fig. 11 oder 12 zu ermitteln.

Dank der grossen Schieberleistungen des Wäggitalwerks gelingt es, die Leitungen zwischen Siebnen und Zürich, welche insbesondere im Winter das meiste Interesse beanspruchen; auf den gewünschten Grad zu kompensieren. Der Zentrale Siebnen fällt deshalb die Aufgabe zu, soweit die Spannungshaltung es gestattet, nach den Diagrammen der Leitungen auf $\cos \varphi = 1$ zu regulieren.

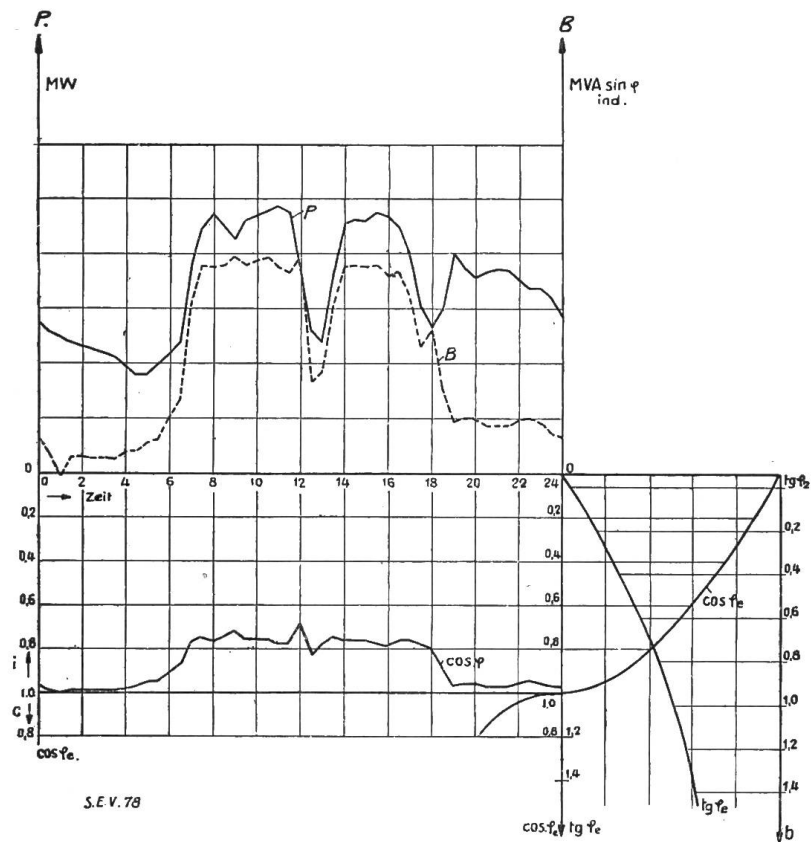


Fig. 11.
Tagesdiagramm der Wirk- und Blindlast, sowie des Phasenwinkels am Anfang der Leitung vor Einführung der künstlichen Kompensation (Strecke B $\text{tg } \varphi_2 = 0,026$).

Der Vergleich zwischen den Fig. 11 und 12, welche Wirk- und Blindlastdiagramme für die gleiche Leitungsstrecke B vor bzw. nach Anwendung der Kompensationsmittel darstellen, gibt ein Mass der Blindlastverkleinerung für die Werke am Leitungsanfang. Hier tritt deutlich in Erscheinung, dass die am Leitungsanfang stehenden Werke mit durchgehendem oder intermittierendem Betrieb zeitweise kapazitiv belastet sind, was aber nicht ungünstig wirkt, solange die Abweichung vom Wert $\cos \varphi = 1$ nicht bedeutend ist. Zur Fig. 12 ist zu bemerken, dass sie die Wirk- und Blindlast eines Wintertages darstellt, an welchem am Leitungsende (Zürich) von 0–24 Uhr durchgehend künstlich kompensiert wurde und in der Zeit von 7–12 und 13–18 Uhr auch noch im Zuge der Leitung ein kompensierender Synchronmotor bis zu 9000 kVA $\sin \varphi$ hinzulieferte. Diese Zeiten decken sich mit der Zeit grösster Blindlast am Leitungsende.

7. Verminderung der Uebertragungsverluste durch Phasenkompensation.

Die Verlustverminderung durch Phasenkompensation beruht auf der Verkleinerung des Leiterstromes bei gleichbleibender Uebertragungsleistung, womit eine Spannungssenkung verbunden ist. In der Leistungsgleichung für Drehstrom am Verteilort

$$P_e = \sqrt{3} E_e J_e \cos \varphi_e \text{ unkompensiert}$$

können $\sqrt{3}$ und E_e als Konstanten betrachtet werden, wenn nur am Leitungsende

kompensiert und auf konstante Endspannung reguliert wird. Bei Phasenkompensation erhält die Gleichung ein Zusatzglied für den Leerlauf-Wattstrom zur Deckung der Wirkverluste im Phasenschieber. Im ganzen ergibt sich aber dennoch eine Verlustverminderung, weil der resultierende Strom des Phasenschiebers gegenüber dem unkompensierten Netzstrom stark voreilt und nur eine kleine Wattkomponente besitzt. Bei richtiger Dimensionierung einer neu in Betrieb genommenen Phasenschieberanlage lässt sich auf langen Transportstrecken ein beträchtlicher Gewinn herauswirtschaften, wenn das Schieben betriebstechnisch und zeitlich richtig durchgeführt wird. Dies will heißen, dass auf das Tagesdiagramm der Blindleistung vor Anwendung der Kompensation resp. auf dasjenige des Leistungsfaktors am Ende der Uebertragungsleitung sowie auf die Klassierung der Energie als Tages- oder Nacht-, Fluss- oder akkumulierbare Energie und deren Gestehungskosten Rücksicht

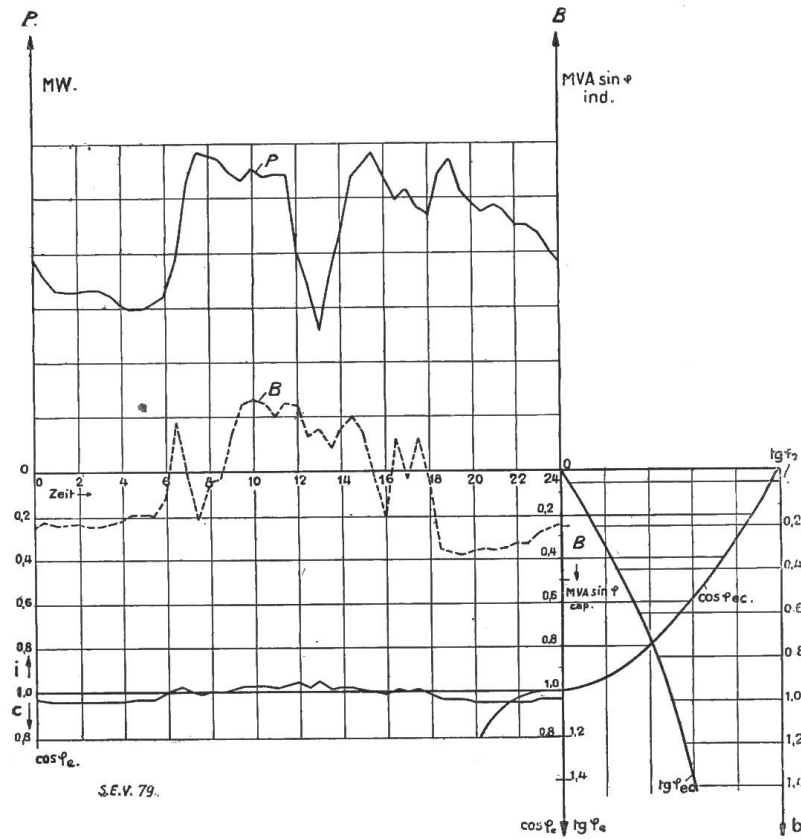


Fig. 12.

Tagesdiagramm der Wirk- und Blindlast, sowie des Phasenwinkels am Anfang der Leitung, bei zeitlich abgestufter künstlicher Kompensation (Strecke B $\text{tg } \varphi_2 = 0,026$).

zu nehmen ist. In allen Fällen der Kompensation am Leitungsende kann vorausgesagt werden, dass bei gleichgehaltener Endspannung die Anfangsspannung weniger hoch getrieben zu werden braucht und am Leitungsanfang die Verminderung der Phasenverschiebung fühlbar wird. Steht man vor der Aufgabe, eine voll- oder überlastete Leitung, welche mit schlechtem Leistungsfaktor betrieben wird, noch höher zu belasten, so liefert die Phasenkompensation hierfür ein brauchbares Mittel.

Die Berechnungen ergaben im vorliegenden Beispiel eine mögliche Verlustverminderung auf den 50 kV-Uebertragungsleitungen von annähernd 10 % während der Zeit hoher Belastung (Tag), was im Monatsmittel nur etwa 2 bis 6 % ausmacht, weil vorerst aus Rücksichten auf die Anlagen die Kompensation nur bis $\text{cos } \varphi = 0,9$ erreichbar war.

Die Tabelle 5 stellt den Verlauf der Uebertragungsverluste in den der Einführung der beschriebenen Kompensationsweise vorangehenden 2 Monaten und der Zeit seit Bestehen dieser Instruktion im Vergleich zum Vorjahr dar. Weil der absolute Wert der Verluste der ganzen Strecke von den Verlustanteilen der einzelnen Teilstrecken und der darüber transportierten Arbeit (bezw. Leistung) abhängig ist, sind in der Tabelle die mittelst der Teilstreckenimpedanzen auf die ganze Strecke umgerechneten Verluste eingetragen. In gleicher Weise ist auch die monatlich übertragene Arbeit auf die ganze Transportstrecke bezogen und deren Aenderung von 1925 bis 1926 in % des Vorjahres ausgedrückt. Es muss bemerkt werden, dass der Oktober 1926 die Uebergangszeit war und im November die Kompensationsmittel in verstärktem Masse, zwar abgestuft, aber durchgehend eingesetzt waren.

der Wirkverluste im Phasenschieber. Im ganzen ergibt sich aber dennoch eine Verlustverminderung, weil der resultierende Strom des Phasenschiebers gegenüber dem unkompensierten Netzstrom stark voreilt und nur eine kleine Wattkomponente besitzt. Bei richtiger Dimensionierung einer neu in Betrieb genommenen Phasenschieberanlage lässt sich auf langen Transportstrecken ein beträchtlicher Gewinn herauswirtschaften, wenn das Schieben betriebstechnisch und zeitlich richtig durchgeführt wird. Dies will heißen, dass auf das Tagesdiagramm der Blindleistung vor Anwendung der Kompensation resp. auf dasjenige des Leistungsfaktors am Ende der Uebertragungsleitung sowie auf die Klassierung der Energie als Tages- oder Nacht-, Fluss- oder akkumulierbare Energie und deren Gestehungskosten Rücksicht

Die Abnahme der relativen Verluste im Dezember 1926 um 1,1 % gegenüber denjenigen des Vorjahres, welche trotz der Steigerung übertragenen relativen Arbeit um 51 % (und Steigerung der Leistung möglich war, zeigt deutlich die Wirksamkeit der Phasenkompensation. Ueberdies spielen in diesen Monatsergebnissen die täglichen Leistungsdiagramme bezw. die Grösse des Schwankungsverhältnisses eine

Leitungsstrecke A;

Kurzschluss- und Leerlaufkonstanten der 50 kV-Leitungen, günstigster Leistungsfaktor am Leitungsende.

Tabelle 1.

Leitung	Leerlauf		Kurzschluss			$\sin \varphi_2$	$\cos \varphi_2$
	Z_0 10 ⁸ Ohm	$\cos \varphi_0$	Z_k Ohm	$\cos \varphi_k$	r_k Ohm		
1	12,6	0,21	36,2	0,67	24,2	-0,057	0,998
2	12,6	0,23	36,7	0,68	24,9	-0,055	0,998
3	9,2	0,17	45,9	0,65	29,9	-0,081	0,997
4	9,3	0,18	46,7	0,65	30,5	-0,079	0,997

Leitungsstrecke A;

Effektiver Leistungsfaktor am Leitungsende und zugehöriger Schieberfaktor b.

Tabelle 2.

tg $\varphi_0 = 0,057$							
$\cos \varphi_e$	b	$\cos \varphi_e$	b	$\cos \varphi_e$	b	$\cos \varphi_e$	b
1,00	-0,057	0,90	+0,427	0,80	+0,688	0,70	+0,969
0,99	+0,094	0,89	0,455	0,79	0,713	0,69	0,997
0,98	0,153	0,88	0,481	0,78	0,739	0,68	1,025
0,97	0,203	0,87	0,509	0,77	0,764	0,67	1,054
0,96	0,240	0,86	0,537	0,76	0,790	0,66	1,082
0,95	0,275	0,85	0,564	0,75	0,815	0,65	1,110
0,94	0,306	0,84	0,589	0,74	0,842	0,64	1,140
0,93	0,335	0,83	0,614	0,73	0,869	0,63	1,170
0,92	0,366	0,82	0,638	0,72	0,895	0,62	1,201
0,91	0,397	0,81	0,663	0,71	0,932	0,61	1,231

Leitungsstrecke B;

Kurzschluss- und Leerlaufkonstanten der 50 kV-Leitungen, günstigster Leistungsfaktor am Leitungsende.

Tabelle 3.

Leitung	Leerlauf		Kurzschluss			$\sin \varphi_2$	$\cos \varphi_2$
	Z_0 10 ⁸ Ohm	$\cos \varphi_0$	Z_k Ohm	$\cos \varphi_k$	r_k Ohm		
2	0,63	0,48	85,75	0,66	57,0	-0,264	0,999

entscheidende Rolle. Dieser Wert bewegte sich im ersten Winterquartal zwischen den Werten 1,7 und 1,2 unter gleichmässiger Berücksichtigung der Wochentage wie der Samstags- und Sonntagslasten. Die Minimalbelastungen der betreffenden Tage betragen 33 bzw. 57 % der Maximallasten. Daraus ergibt sich der starke Einfluss, den der

*Leitungsstrecke B;
Effektiver Leistungsfaktor am Leitungsende und zugehöriger Schieberfaktor b.*

Tabelle 4.

tg $\varphi_2 = 0,0262$							
cos φ_e	b	cos φ_e	b	cos φ_e	b	cos φ_e	b
1,00	-0,026	0,90	+0,458	0,80	+0,719	0,70	+1,000
0,99	+0,125	0,89	0,486	0,79	0,744	0,69	1,028
0,98	0,184	0,88	0,512	0,78	0,770	0,68	1,056
0,97	0,234	0,87	0,540	0,77	0,795	0,67	1,085
0,96	0,271	0,86	0,568	0,76	0,821	0,66	1,113
0,95	0,306	0,85	0,595	0,75	0,846	0,65	1,141
0,94	0,337	0,84	0,620	0,74	0,873	0,64	1,171
0,93	0,366	0,83	0,645	0,73	0,900	0,63	1,201
0,92	0,397	0,82	0,669	0,72	0,926	0,62	1,232
0,91	0,428	0,81	0,694	0,71	0,953	0,61	1,262

Monatliche Uebertragungsverluste der Strecken A und B 1925 und 1926.

Tabelle 5.

Monat	Absolute Aenderung der transportierten Arbeit 1925 bis 1926 %	Relativer Verlust bezogen auf die ganze Transportstrecke			Bemerkungen
		1 9 2 5	1 9 2 6	+ Zunahme - Abnahme 1925 bis 1926 %	
		%	%	%	
August	- 5,7	18,5	19,3	+ 0,8	unkompensiert
September	- 4,98	17,9	19,5	+ 1,6	unkompensiert
Oktober	+ 0,05	19,2	17,3	- 1,9	1926 kompensiert
November	+ 33,5	19,3	17,9	- 1,4	1926 kompensiert
Dezember	+ 36,9	19,1	18,0	- 1,1	1926 kompensiert

Verlauf der Belastungskurve auf die Verlustbestimmung ausübt. Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich ist nun in der angenehmen Lage, den Leitungsfaktor seiner Uebertragungsleitungen während der ganzen Woche bis auf 10% dem Idealwert entgegengeführt zu haben. Diesem Umstand kommt aber für die Zukunft die nicht zu unterschätzende Bedeutung zu, das Uebertragungssystem um etwa 10% höher zu belasten und die Anlagen dauernd besser ausnützen zu können. Die mit dem hier an Hand ausführlicher Diagramme und Kurvenblätter erläuterten Kompensationssystem im genannten Betriebe gesammelten Erfahrungen sind ausnahmslos gute.