

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 22 (1931)

Heft: 21

Artikel: Der Grosskondensator zu Phasenschiebungszwecken und seine Anwendung in Hochspannungsnetzen

Autor: Stehelin, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060535>

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: 14.01.2026

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

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXII. Jahrgang

Nº 21

Mittwoch, 14. Oktober 1931

Der Grosskondensator zu Phasenschiebungszwecken und seine Anwendung in Hochspannungsnetzen.

Vortrag gehalten an der Generalversammlung des VSE am 5. September 1931 in Bern,
von J. Stehelin, Ingenieur, Basel.

Es wird kurz das Prinzip der Anwendung von Kondensatoren erläutert und auf den Unterschied von «Stromschieber» (Kondensator parallel zum Verbraucher) und «Spannungsschieber» (Kondensator in Reihe mit dem Verbraucher) hingewiesen und an Hand eines Beispiels die Wirkung des «Stromschiebers» in Hochspannungsnetzen bei verschiedenen Belastungen und bei Aufstellung in verschiedenen Netzteilen besprochen. Dann werden die Schemata und die Apparate erwähnt, die beim Anschluss von Kondensatoren an Hochspannungsnetze in Frage kommen, auf die Gründe hingewiesen, welche für die Trennung der Spannungsregulierung (mittels Reguliertransformator) und Phasenverbesserung (mittels Kondensatoren als «Stromschieber») sprechen und die Vorteile erörtert, welche der Hochspannungs-Grosskondensator bei zentralisierter Aufstellung gegenüber einer unterteilten Anlage aufweist. Zum Schluss werden einige ausgeführte Anlagen kurz beschrieben.

621.319.4:621.316.727
L'auteur décrit succinctement le principe de l'application des condensateurs et rend attentif à la différence qui existe entre les «déphasateurs de courant» (condensateurs en parallèle avec le récepteur) et les «déphasateurs de tension» (condensateurs en série avec le récepteur). A l'aide d'un exemple, il étudie l'effet du «déphaseur de courant» dans les réseaux à haute tension, pour différentes charges et suivant l'endroit du réseau où il est monté. L'auteur mentionne ensuite les schémas et appareils qui entrent en considération pour le branchement de condensateurs dans des réseaux à haute tension et indique les raisons en faveur de la séparation entre le réglage de la tension (au moyen de transformateurs) et l'amélioration du facteur de puissance (au moyen de condensateurs comme «déphaseurs de courant»). Il cite également les avantages du montage centralisé de condensateurs à haute tension vis-à-vis d'une installation divisée. Pour terminer, l'auteur décrit encore quelques installations actuellement en service.

Die Frage, zu deren Lösung der heutige Vortrag beitragen möchte, lässt sich in Kürze folgendermassen stellen: Gegeben ein elektrischer Verbrauchskreis mit Widerstand R und Reaktanz ωL und eine Uebertragungsleitung, die ihrerseits mit dem Widerstand r und der Reaktanz ωl behaftet ist (Fig. 1a). Wie lässt sich die Speisung des Verbrauchskreises durch eine sinusförmige Wechselspannung mit der Kreisfrequenz ω durchführen,

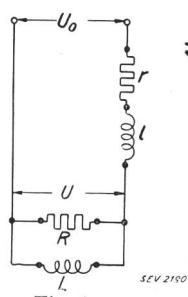


Fig. 1 a.

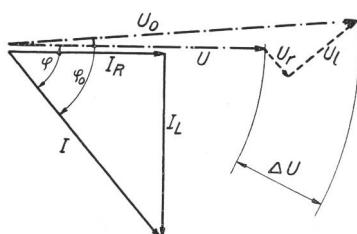


Fig. 1 b.

wenn die Bedingung gestellt ist, dass der Wirkungsgrad der Uebertragung maximal, der Spannungsabfall längs der Leitung minimal werde?

Betrachten wir zunächst den Fall der natürlichen, hilfsapparatenlosen Speisung. Der unter der Spannung U im Verbraucher fliessende Strom I er-

gibt sich als geometrische Summe des Wirkstromes $I_R = U : R$ und des Blindstromes $I_L = U : \omega L$ (Fig. 1b). Der Strom I bedingt im Leitungswiderstand den ihm phasengleichen Spannungsabfall U_r , in der Leitungsreaktanz den ihm rechtwinklig voreilenden Abfall U_l . Die Spannung U_0 am Leitungsanfang schliesst das Spannungspolygon. Der Spannungsabfall längs der Leitung ergibt sich als die algebraische Differenz $\Delta U = U_0 - U$; er ist, bei gleichem Strom I_R , um so grösser, je grösser I bzw. dessen Phasenwinkel φ gegen die Spannung U ist. Die Leitungsverluste P ergeben sich als das Produkt aus Strom und Spannung am Leitungswiderstand

$$P = U_r \cdot I = I^2 \cdot r.$$

Auch sie werden mit der Phasenverschiebung grösser, bei gleichem Wirkstrom I_R .

Legen wir nun an die Spannung U eine Kapazität $\frac{1}{\omega C} = \omega L$ (Fig. 2a), bzw. verbessern wir den Leistungsfaktor des Verbrauchers auf 1, so ergibt sich das Vektordiagramm Fig. 2b. Der Strom in der Leitung ist reiner Wirkstrom, in Phase mit der Spannung U ; die Abfälle U_r und U_l sind minimal geworden, der Gesamtspannungsabfall $\Delta U'$ ist gegenüber ΔU stark verringert. Doch wird im Gesamtsystem noch Blindstrom verbraucht, wie die Phasenverschiebung zwischen I_R und U_0' am Le-

tungsanfang zeigt. Denn die Leitungsreaktanz beansprucht ja auch Blindleistung zur Erhaltung ihres magnetischen Feldes.

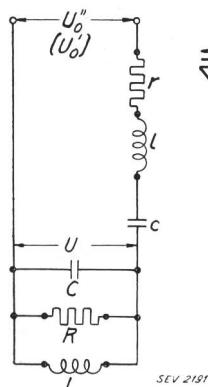


Fig. 2 a.

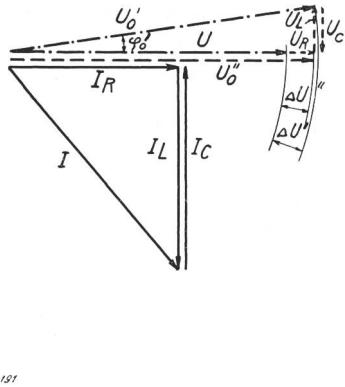


Fig. 2 b.

Zur Deckung dieses Blindverbrauchs legen wir eine weitere Kapazitanz $\frac{1}{\omega c} = \omega l$ an, diesmal in Reihe mit der Leitung, und führen damit im Spannungspolygon einen dem Abfall U_1 entgegengerichteten, gleichgrossen Vektor U_c ein. Der Strom ist nun mit allen Spannungen in Phase, die Verluste sind mit U_r minimal, desgleichen der Spannungsabfall $\Delta U'' = U_r$.

Damit wäre unsere Aufgabe gelöst, denn eine weitere Verringerung des Spannungsabfalles liesse sich nur durch Erhöhung der Verluste erkaufen, etwa durch Auftransformierung am Leitungsende, oder durch «Ueberkompensierung» ebendort, was eine Verschiebung des Stromes ins kapazitive Gebiet und damit seine Vergrösserung zur Folge hätte.

Zur Durchführung unseres Programms bedurften wir zweier Apparate, die zwar ihrem Wesen nach gleich, ihrer Anwendung nach aber verschieden sind. Beide verändern die Phase eines Vektors und können daher allgemein als Phasenschieber bezeichnet werden. Doch der eine (C) schiebt den Strom gegen die Spannung, der andere (c) die Spannung gegen den Strom, weshalb man den Begriff Phasenschieber zur genaueren Unterscheidung in die Begriffe «Stromschieber» und «Spannungschieber» spalten sollte.

Da der Stromschieber bzw. der zum Verbraucher parallel geschaltete Kondensator, wie wir am Diagramm (Fig. 2) sahen, zugleich die Leitungsverluste verringert und die Spannungsverhältnisse wesentlich verbessert, ist es nicht zu verwundern, dass er zuerst, und lange Zeit einzig, zur Anwendung kam. Besonders in England war er schon früh beliebt, wohl deshalb, weil bei thermischen Anlagen die Frage der vollen Ausnützung der Antriebsmaschine infolge der hohen Brennstoffkosten von ausschlaggebender Bedeutung ist. Auch in den Vereinigten Staaten von Nordamerika bürgerte er sich früh ein, dort aber eher infolge seiner spannungsregulierenden Wirkung; so finden wir auch dort die ersten Spannungsschieberanlagen.

Betrachtet man Diagramm 2b, so möchte man

meinen, die kleine Spannungsverbesserung infolge Einführung von c sei die Kosten nicht wert. In Diagramm 1b würde aber die Aufhebung von U_1 eine sehr wesentliche Verringerung des Abfalles ΔU zur Folge haben, und zwar zeigt die Rechnung, dass bei $\cos \varphi = 0,71$ die Hälfte derjenigen Leistung (in BkVA gemessen), die als Stromschieber eine gegebene Abfallverminderung hervorrief, als Spannungsschieber bereits die gleiche Wirkung hat. Wenn man also mehr um den Spannungsabfall als um die Leitungsverluste besorgt ist, wird man den Spannungsschieber vorziehen, der neben der Billigkeit den grossen Vorteil der natürlichen Vollautomatik hat, da er unabhängig von Grösse und Phase des Stromes den Spannungsabfall in kleinen Grenzen hält.

Fügen wir noch hinzu, dass er als einzige Apparatur eines fein ansprechenden und sehr rasch wirkenden Mechanismus bedarf, der ihn bei Kurzschluss hinter seinem Anschlusspunkt (vom Generator aus gesehen) unfehlbar kurzschliesst, weil sonst seine Spannung infolge der hohen Stromstärke ausserordentlich hohe Werte annehmen würde, so haben wir das Wesentliche über diese Anwendung des Kondensators gesagt und kehren zu dem für europäische Verhältnisse wichtigeren Thema des Stromschiebers zurück.

Die frühe Verbreitung des Kondensators als Stromschieber hat in England und in Amerika zwei Gründe; der eine liegt in den vorteilhaften Gebrauchsspannungen und -frequenzen (400 bis 600 V und niedere Mittelspannungen bei 50 und 60 Per./s), der andere in der gringeren Dichte der Energielieferung, die die Entwicklung des bis ins Kleinste unterteilbaren Apparates begünstigte. Auch in Frankreich war schon früh allgemeinere Nachfrage nach Kondensatoren vorhanden; doch verhinderte die niedere Gebrauchsspannung (220 V bei relativ hohen Mittelspannungen) seine Einbürgerung wegen der hohen Preise so lange, bis der bedeutend billigere Hochspannungskondensator in genügend betriebsicherer Ausführung auf dem Markte erschien.

In der Schweiz liessen die Verhältnisse zunächst fast ausschliesslich den rotierenden Phasenschieber aufkommen, da infolge der hohen Dichte der Energielieferung die Aufstellung grosser Blindleistungserzeuger an einigen wenigen Punkten die einstweilen notwendige Entlastung brachte. Als sich aber, viel später, das Bedürfnis nach Phasenkompenstation auch bei Mittel- und Kleinbezügern geltend machte, griff endlich die einheimische Industrie die Fabrikation des Starkstromkondensators auf. Sie holte in wenigen Jahren die ausländische Konkurrenz an Qualität zumindest ein und überflügelte sie sogar, was die Kühnheit der Anwendung und die Grösse der Leistungseinheiten anbetrifft: der 350-BkVA-Kondensator, 16 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Per./s, der im Unterwerk Burgdorf der Schweizerischen Bundesbahnen steht, ist mit seinen 1000 BkVA, die er bei 50 Per./s leisten würde, meines Wissens noch heute nicht übertroffen worden.

Als Hauptform des Starkstromkondensators kann der ölimprägnierte Papierkondensator betrachtet werden, so dass wir bei unserer Besprechung ihn allein zu berücksichtigen brauchen. Seine Entwicklung ging auf drei Fronten voran. Die Papierindustrie hat in den letzten Jahren im Haderpapier ein Dielektrikum ausgearbeitet, das äusserst spannungsfest, auch in dünnsten Schichten sehr gleichmässig, ausserordentlich dauerhaft ist und bei Oelimpregnation einen sehr geringen Verlustwinkel aufweist. Zugleich machte die Imprägniertechnik und vor allem der mechanische Aufbau des Kondensators rasche Fortschritte. Durch erhöhte Beanspruchung des Materials und gleichzeitige Verbilligung der Rohstoffe und der Konstruktion ergab sich eine wesentliche Senkung der Kondensatorpreise, die nach dem heutigen Stand diesen Apparat zum vorteilhaftesten Stromschieber auch in Grossanlagen von mehreren tausend BkVA machen.

Ein genauer Wirtschaftlichkeitsvergleich mit anderen Phasenverbesserungsmitteln lässt sich nur von Fall zu Fall anstellen, da zu viele Umstände das Resultat beeinflussen: die Betriebsspannung, der Strompreis, die Benützungsdauer, der Wirkungsgrad und die Grösse des Blindstromerzeugers, die Vorteile aus seiner Unterteilung, der vorhandene Platz, das verfügbare Bedienungspersonal — das sind alles Faktoren, die die Berechnung wesentlich verändern. Nimmt man beispielsweise an, es handle sich um einen rotierenden Phasenschieber von 5000 BkVA, mit nur 3,3 % Verlusten und 5000 Stunden Benützungsdauer bei einem Strompreis von 4 Rp./kWh, so ergibt sich ein jährlicher Mehrstromverbrauch des Phasenschiebers von Fr. 6.— pro BkVA gegenüber einer gleichgrossen Kondensatorenbatterie mit 0,3 % Verlust. Bei dieser Batteriegrösse und einer Unterteilung in 10 bis 12 Einheiten kann man mit einem Preis von Fr. 35.— pro BkVA bei etwa 10 kV rechnen, inklusive Schaltausrüstung. Die Kondensatoren wären somit in ca. sechs Jahren aus den Verlustersparnissen des Phasenschiebers amortisiert, ungeachtet der zusätzlichen Vorteile, die sich aus ihrer Verteilung auf mehrere Hauptpunkte des Netzes ergeben. In vielen Fällen werden die Verhältnisse aber noch günstiger liegen, so dass die genannten sechs Jahre Amortisationszeit sich auf fünf oder vier Jahre reduzieren.

Wir wollen uns nun der Anwendung des Stromschiebers in Hochspannungsnetzen zuwenden. Fig. 3 gibt das allgemeine Schema einer Uebertragungs- und Verteilanlage wieder, die wir uns des Beispiels wegen für eine Leistung von 10 000 kVA ausgebaut denken wollen.

Aus dem Gebiet I der Fernübertragungsspannung (110 bis 220 kV) wird die Energie in einem Hauptwerk ins Gebiet II der Uebertragungsspannung (30 bis 80 kV) umgespannt, dann in mehreren Unterwerken ins Gebiet III der Mittel- oder Verteilspannung (2 bis 3 kV), und zuletzt in vielen Stationen ins Gebiet IV der Nieder- oder Gebrauchs-

spannung (110 bis 500 V). Alle am Umspannprozess beteiligten Transformatoren werden eine Gesamtnennleistung von schätzungsweise viermal die Netzeistung haben, in unserem Beispiel also ca. 40 000 kVA. Davon werden die meisten dauernd angeschlossen bleiben und eine konstante Grund-

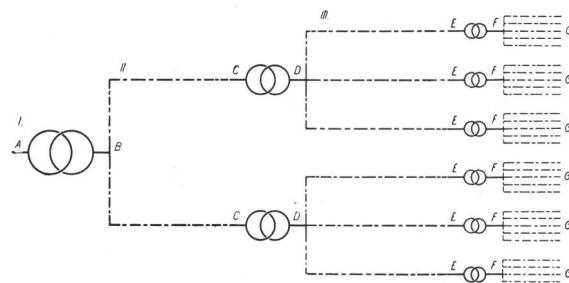
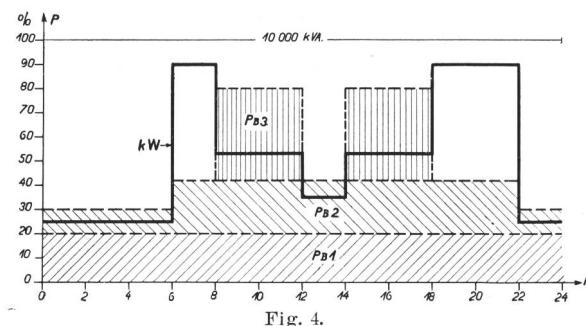


Fig. 3.

Blindleistung bilden, die bei Netzelelauf mit 2000 BkVA angeschlagen werden kann und die sich bei Vollbelastung des Netzes auf ca. 3000 BkVA erhöhen wird.

Wir legen nun unserer Betrachtung ein Tagesdiagramm (Fig. 4) zugrunde, das trotz der starken Stilisierung einen guten Einblick in die uns beschäftigenden Verhältnisse gewährt. Nachts haben wir verminderte Belastung, und zwar fast rein Ohmsche Belastung, mit entsprechend geringer Erhöhung der Blindleistung über den Grundwert $P_{B1} = 2000$ BkVA. In den Lichtlaststunden ist die Blindleistung grösser. In den Kraftlaststunden steigt sie auf ihr Maximum, wobei in Fig. 4 ein mittlerer Leistungsfaktor von 0,71 beim Verbraucher angenommen wurde. In der Mittagspause gibt die Belastung nach; die Blindleistung ist aber noch



ziemlich hoch, weil neben Heizstrom auch Kraftstrom verbraucht wird. (Die Leistungen denken wir uns am Lieferpunkt A des Schemas Fig. 3 gemessen.)

Zur eingehenderen Behandlung des Falles müssen wir nun zwei Varianten betrachten, von denen die erste für die Annahme gilt, es sei niederspannungsseitig keine Kompensation möglich, und zwar wegen ungünstiger Gebrauchsspannung, stark verteilter Belastung, unübersichtlicher Verhältnisse in bezug auf die Blindleistung, und wegen der Notwendigkeit, raschestens Abhilfe zu schaffen (Ein-

führung des $\cos \varphi$ -Tarifs durch den Lieferanten). Dieser Fall wird in der Schweiz seltener sein, in anderen Ländern aber ziemlich oft vorkommen. Er ist insofern lehrreich, als sich an ihm die Grundsätze der Hochspannungskompensation klar herausarbeiten lassen.

Wie wir sahen, wird im Netz eine bestimmte Blindleistung P_{B1} (hier zu 2000 BkVA angesetzt) dauernd aufgenommen, deren Höhe im übrigen stark von Fall zu Fall variiert (man denke an Kabelnetze!). Zu deren Erzeugung wird man vorteilhaft Kondensatoren in Einheiten von 50 bis 150 BkVA verwenden, die in geeigneten, möglichst peripheren Punkten des Mittelspannungsnetzes angeschlossen werden (Punkte E Fig. 3). Dadurch wird in den Zeiten schwacher Belastung ein allgemeiner Netzleistungsfaktor von ungefähr 1 erreicht. Zudem entlasten diese Kondensatoren die Verästelungen des Mittelspannungsnetzes auch in Vollastzeiten. Neben dieser «Grundbatterie», wie wir sie nennen wollen, wird eine weitere Anzahl von Kondensatoren zur Deckung der Blindstromfläche P_{B2} und teilweise P_{B3} vorgesehen, und zwar wollen wir diesen Teil der Stromschieberanlage die «Regelbatterie» nennen. Für sie kommen die Unterwerke als Aufstellungsort in Betracht (Punkte D), sowie die Mittelspannungssammelschienen des Hauptwerkes (am Punkt B zu denken). Hier werden Einheiten von 200 bis 500 BkVA für 2 bis 30 kV, eben sogenannte Grosskondensatoren, ihre Anwendung finden. Und zwar würde man im vorliegenden Fall ca. 3000 BkVA für die Regelbatterie ansetzen, die beispielsweise folgendermassen verteilt werden könnte, in der Annahme, dass das eine Unterwerk und das Hauptwerk stärker mit Kraft belastet sind und das Hauptwerk zur feineren Regulierung des Leistungsfaktors dem Lieferanten gegenüber stärker ausgerüstet sein soll.

Hauptwerk . .	$200 + 3 \times 400 = 1400$	BkVA
I Unterwerk . .	$200 + 2 \times 400 = 1000$	BkVA
II Unterwerk . .	$200 + 1 \times 400 = 600$	BkVA

Mit dieser Blindleistung kann bei guter Verteilung der Kondensatoren und richtiger Wahl der Kondensatoreinheiten (wobei man im allgemeinen mit 2 Einheitsleistungen im Verhältnis von 1 : 2, beispielsweise hier 200 : 400 BkVA, auskommen wird) in allen Betriebsfällen ein befriedigender Leistungsfaktor erreicht werden. Für den vorliegenden Fall hätten wir bei Halblast und Lichtlast $\cos \varphi \cong 1$, bei Kraftlast $\cos \varphi \cong 0,86$ als Netzleistungsfaktor.

Nun könnte man meinen, die Dosierung der Blindleistung erfordere häufige Zu- und Abschaltung der Regelbatterie-Einheiten. Eingehende Beobachtungen an einer Verteilanlage, deren Verhältnisse etwa durch die Schemas Fig. 3 und Fig. 4 wiedergegeben werden, ergaben viel geringere Blindlastschwankungen, als zuerst vermutet wurde. In den Halblaststunden bleibt die Blindleistung fast konstant. In den Kraftlaststunden erreicht sie bald nach Arbeitsbeginn einen viel höheren Wert, und wir wollen an Hand des Diagrammes Fig. 5a die

Verhältnisse bei Kraftlastschwankungen analysieren. Die Scheinleistung im Verbrauchskreis ist durch den Strahl P dargestellt ($\cos \varphi = 0,71$ angenommen). Die Netzbldleistung geometrisch zu P addiert, ergibt die unkompensierte Netzscheinleistung P' (10 000 kVA). Durch die Einführung der Grund- und Regelbatterieleistung ($P_{BG} + P_{BR}$), wird P' in P'_{K} verschoben. Sinkt nun die Belastung P mit konstantem $\cos \varphi = 0,71$, so folgt P' näherungsweise der Geraden G , die die Blidleistungsaxe im Punkt 2000 BkVA (Leerlaufblidleistung des Netzes) schneidet. Der Endpunkt von P'_{K} wird dabei der zu G parallelen Geraden folgen. Lässt man

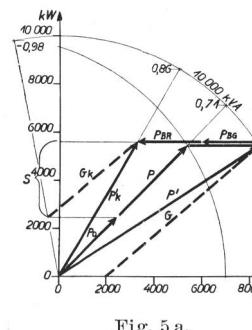


Fig. 5 a.

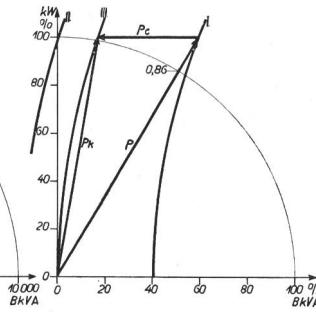


Fig. 5 b.

einen $\cos \varphi = 0,98$ voreilend noch zu, so kann die Belastung P auf den Wert P_0 sinken, bis ein Regulieren des Leistungsfaktors durch Abschalten von Regeleinheiten nötig wird. Wie man sieht, ist der Schwankungsbereich s der Belastung P , für den keine Ueberkompensation eintritt, sehr gross. Aehnliches gilt für die Lichtlaststunden, und so wird man mit einigen wenigen Schaltoperationen pro Tag auskommen, eventuell nach einem einfachen «Fahrplan» schalten können, wobei ein Teil der Regelbatterie nur über Samstag—Sonntag und an Feiertagen abgeschaltet wird¹⁾.

Die Benützungsdauer der Grundbatterie wird 8760 Stunden jährlich sein, während diejenige der Regelbatterie im Mittel zu ca. 5000 Stunden angenommen werden kann.

Als zweite Variante wollen wir den Fall betrachten, in welchem eine günstige Gebrauchsspannung zur Verfügung steht, etwa 380 oder 500 V. Dann wird man einen grossen Teil der Regelbatterie ins Niederspannungsgebiet verlegen, weil dadurch gerade bei Vollast, wo die Uebertragungsverluste sehr hoch sind (entsprechend $3 \cdot I^2 \cdot r$ für Drehstrom), das gesamte Uebertragungssystem entlastet wird. Das bedeutet aber, dass man seine Kraftbezüger durch

¹⁾ Dass übrigens bei Einzelkompensation von Asynchronmotoren ein guter Leistungsfaktor in allen Belastungszuständen erreicht werden kann, ohne Zu- oder Abschaltung von Kapazität im Betrieb, zeigt Fig. 5b. Kurve I stellt das bekannte Kreisdiagramm eines Asynchronmotors dar. Kurve II desgleichen, aber nach Anschluss eines Kondensators, der den Leistungsfaktor bei Vollast auf 1 bringt, mit entsprechender Ueberkompensation bei kleiner Belastung. Wählt man dagegen die Kondensatorleistung P_c gleich der Blindleistung bei Leerlauf, so ergibt sich die Kurve III als korrekte Lösung mit $\cos \varphi = 1$ bei Leerlauf, $\cos \varphi = 0,98$ bei Vollast.

einen $\cos \varphi$ -Tarif zur Anschaffung von Kondensatoren zwingt, die teilweise nur in den Kraftlaststunden, teilweise von Montagfrüh bis Samstagmittag, teilweise durchgehend eingeschaltet bleiben. Grundsätzlich wird man aber danach trachten, die durchgehend eingeschalteten Kondensatoren mittelspannungsseitig anzuschliessen, um den Austausch von Blindenergie über leerlaufende Transformatoren zu vermeiden. Die Regelbatterie in den Unterwerken wird reduziert werden können, aber doch zur Aufrechterhaltung eines geordneten Betriebes zur Verfügung stehen müssen.

Das sind in grossen Zügen die Gesichtspunkte, nach denen man die Phasenverbesserung ganzer Netze durchführen wird.

Betrachten wir nun kurz die Apparatur, die zum Anschluss von Hochspannungskondensatoren zur Wahl steht.

Schema XI (Fig. 6a). Die einfachste Lösung ist der unmittelbare Anschluss an den zu kompensierenden Verbraucher, da hier bei Abschalten des Hauptschalters die Entladung des Kondensators in die Hochspannungswicklung des Transformators bzw. in die Statorwicklung des Motors erfolgt.

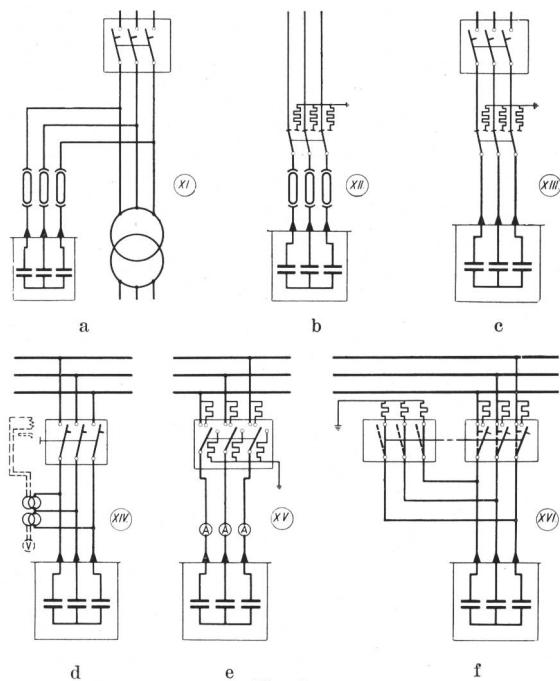


Fig. 6.

Schemata für den Anschluss von Hochspannungskondensatoren.

Dieses Schema wird beim Anschluss der im Netz verteilten «Grundbatterie», wenn der Verbraucher dauernd angeschaltet bleibt, verwendet. In grösseren Verbrauchsanlagen wird man zwei oder mehrere Transformatoren zur Verfügung haben, von denen nur einer dauernd eingeschaltet ist; dann wird man vorteilhaft den Anteil an die «Grundbatterie» dem letzten Transformator beischliessen, während der Anteil an die «Regelbatterie» denjenigen Transformatoren beigegeben wird, die nur in den Haupt-

betriebszeiten für Kraftstrom zugeschaltet werden. Dies ist vor allem für jene Netze von Wichtigkeit, die über eine ungünstige Verbrauchsspannung verfügen.

Schema XII (Fig. 6b). Soll der Kondensator unabhängig schaltbar sein, so verwendet man bei kleineren Leistungen und niederen Mittelspannungen einen dreipoligen Umtrenner mit Entladewiderständen und schützt den Kondensator durch Trennsicherungen. Bei grösserer Schalthäufigkeit verwendet man nach

Schema XIII (Fig. 6c) einen dem Entladetrenner vorgebauten Oelschalter mit dreipoliger Maximalstromauslösung. Eine Verriegelung sollte tunlichst Fehlschaltungen verhindern und wenn möglich die sofortige Entladung (Umlegen des Trenners) nach dem Abschalten erzwingen. Diese Anordnung kann bereits für grosse Leistungen verwendet werden, wenn die Schalthäufigkeit nicht eine Operation pro Tag übersteigt.

Schema XIV (Fig. 6d) gibt eine Anordnung wieder, die ihrer Einfachheit wegen öfters Anwendung finden sollte. Ein zwischen dem Schalter und dem Kondensator angeschlossener Spannungswandler in V-Schaltung sorgt für die Entladung und kann nebenbei zur Spannungsmessung und zur Betätigung einer Minimalspannungsauslösung dienen, falls er sekundär nicht einfach offen gelassen wird. An Stelle des Spannungswandlers können auch zwei einphasige Drosselpulen verwendet werden.

Schema XV (Fig. 6e) veranschaulicht einen Spezialölschalter für Hochspannungs-Grosskondensatoren. Er ist mit Vorkontakten und Einschaltwiderständen sowie mit im Kessel eingebauten Entladewiderständen versehen.

Schema XVI (Fig. 6f) zeigt eine Anordnung, die sich besonders zur Bewältigung von grossen Abschaltleistungen eignet. Ein mit Einschaltwiderständen versehener automatischer Oelschalter, der den Kondensator steuert, wird mit einem zweiten Oelschalter, der als Entladeschalter ausgebildet ist, derart mechanisch gekuppelt, dass der «Aus»-Stellung des Hauptschalters die «Ein»-Stellung des Nebenschalters entspricht und umgekehrt. Als Hauptschalter kann bis zu den höchsten Abschaltleistungen ein normales Modell verwendet werden, während der Nebenschalter nur die betreffende Betriebsspannung auszuhalten hat.

Die Anordnungen XIV bis XVI kommen hauptsächlich für Grosskondensatoren der Regelbatterie in Betracht. Sie eignen sich auch zur Fernsteuerung oder zur automatischen Steuerung durch $\cos \varphi$ -Relais, wenn auch, wie wir sahen, eine Feinregelung des Leistungsfaktors kaum je in Frage kommen wird.

Wir wollen nun zur Frage der gemeinsamen Spannungsregulierung und Phasenverbesserung übergehen, zu welchem Zweck man allgemein rotierende Phasenschieber verwendet. Dieser Praxis lässt sich nämlich manches entgegenhalten. Zunächst wird die Konstanz der Spannung dadurch erreicht,

dass in Vollastzeiten der Leistungsfaktor wohl verbessert wird, in Leerlastzeiten dagegen verschlechtert, indem die Blindleistungsmaschine bekanntlich durch Aufnahme von Blindleistung die steigende Spannung herunterdrückt, während sie sie in Vollastzeiten durch Abgabe von Blindleistung heraufdrückt. Man kommt so dazu, bei geringer Wirklast eine sehr hohe Scheinleistung vom Lieferwerk zu beziehen, die nicht nur die unnötige Inbetriebhaltung von Generatoren, sondern hohe Leistungsverluste nach sich zieht. Geradezu unmöglich wird die Spannungsregulierung durch Blindleistungsmaschinen mit kapazitiver und induktiver Arbeitsmöglichkeit, wenn die Speiseleitung nicht in jedem ihrer Entnahmepunkte mit dem gleichen Hilfsmittel spannungsreguliert ist. Denn denken wir uns eine Fernübertragungsleitung mit Speisepunkt in S (Fig. 7), erstem Entnahmepunkt (Hauptwerk mit

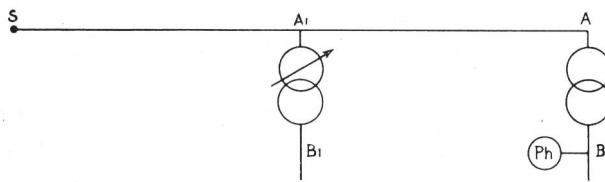


Fig. 7.

angeschlossener Verteilanlage gemäss Fig. 3) in A_1 , zweitem Entnahmepunkt in A . Hauptwerk A_1 verfüge über einen Transformator mit oberspannungsseitig angebrachten, unter Last und automatisch schaltbaren Anzapfungen. A_1 wird daher die Höchstspannung schwanken lassen und, diesen Schwankungen oberspannungsseitig sich anpassend, seine Unterspannung konstant halten. Wollte nun das Hauptwerk A der bei Entlastung des Gesamtsystems eintretenden Spannungserhöhung durch Aufnahme von Blindleistung begegnen, so müsste es eine viel höhere Blindleistung aufnehmen, als der Nennleistung seiner eigenen Verteilanlage entspricht; es müsste zu seiner eigenen Blindleistung einen grossen Teil derjenigen aufnehmen, die im Hauptwerk A_1 verzehrt werden müsste, um dort die Höchstspannung konstant zu halten. Um also von anderweitig bedingten Spannungsschwankungen unabhängig zu sein, muss Hauptwerk A mit einem Anzapfungstransformator ausgerüstet sein und seine Spannung am Punkt B der Fig. 3 konstant halten.

Als weiterer Nachteil der Spannungsregulierung durch rotierenden Phasenschieber sei erwähnt, dass die Spannung nur im Hauptwerk geregelt wird, während die Spannungsabfälle im Mittel- und Niederspannungsnetz sich selbst überlassen bleiben. Ferner setzt bei einem Defekt an dieser Maschine die Spannungsregulierung sowohl wie die Leistungsfaktorverbesserung für Wochen, ja Monate aus, mit entsprechenden Verlusten in der Blindstromrechnung. Und endlich muss fast immer der rotierende Phasenschieber so überdimensioniert werden, dass er späteren Erweiterungen des Netzes genügt, wodurch sein Preis und seine Verluste sich erhöhen.

Demgegenüber bietet die Lösung der getrennten Regulierung der Spannung einerseits — durch Regeltransformator — und des Leistungsfaktors andererseits — durch Kondensatoren als Stromschieber — folgende Vorteile: Entlastung grösserer Netzteile bis ins Mittel- und Niederspannungsgebiet, daher wesentliche Verringerung der Gesamtverluste; unbegrenzte Erweiterbarkeit der Stromschieberanlage durch Einsetzen neuer Kondensatoreinheiten in Punkten gesteigerter Belastung; wirtschaftlichste Ausnutzung der Energieerzeugungsanlage, die auch bei kleiner Last reinen Wirkstrom zu liefern hat; zuletzt Risikoverteilung in der Stromschieberanlage, innerhalb derer ein Defekt sich kaum im Gesamtleistungsfaktor auswirken wird, insbesondere weil er rasch behebbar ist.

Uebrigens ist die Elektrizitätswirtschaft bereits durch eine andere Notwendigkeit, nämlich die der Regelung des Energieaustausches bei Kupplung von Netzen, zur allgemeineren Einführung des Regeltransformators gezwungen worden, so dass weitgehende Verwendung von Kondensatoren auch in Grossanlagen auf der Hand liegt.

Wie wir oben angedeutet haben, kommen für zentralisierte Aufstellung von Blindleistungserzeugern der Leistungsordnung 200 BkVA und aufwärts Grosskesselkondensatoren in Frage, und wir wollen uns nun eingehender mit den Gründen beschäftigen, die zur Ausbildung grosser Einheiten geführt haben. Doch wollen wir vorausschicken, dass Einheitsleistungen von 200 BkVA und darüber fast nur für Hochspannung in Betracht kommen, weil man bei niederspannungsseitiger Kompensation selbst grosser Verbrauchsanlagen schon mit Rücksicht auf die örtliche Verteilung der Last die Blindleistung meist in Einheiten von 50 bis 200 BkVA am jeweiligen Kabelende und in der Nähe grösserer Motorenansammlung erzeugen wird.

Wir wenden uns daher ausschliesslich dem Hochspannungs-Grosskondensator zu und sagen, dass er nach zwei Richtungen hin eine Verbilligung von Stromschieberanlagen gestattet. Zunächst durch seinen geringen Platzbedarf, indem beispielsweise bei 20 kV eine 1000-BkVA-Anlage mehr als doppelt so viel Grundfläche beansprucht, wenn sie in 10 Einheiten zu je 100 BkVA unterteilt wird, als wenn sie aus 2 Einheiten zu je 500 BkVA besteht, da die Oeldistanzen in jedem einzelnen Kessel für die hohe Betriebsspannung bemessen werden müssen und der grosse Kessel eine bessere Ausnutzung des Raumes nach oben gestattet. Ferner braucht jeder Kleinkessel seine Durchführungen und, bei Aussenbetrieb, sein eigenes Expansionsgefäß usw. Während daher bei Niederspannung, z. B. bei 250 V, der Preis pro BkVA schon bei Einheitsleistungen von ca. 120 BkVA seinen Minimalwert erreicht, eine weitere Steigerung der Einheitsleistung also keine Ersparnis mehr bringt, so erreicht der 20-kV-Kondensator diese Grenze erst bei ca. 400 BkVA, für Aussenbetrieb sogar erst bei noch höheren Leistungen. Dabei steigen auch die Kosten der Zusatzapparatur (Zuleitungen, Trenn-

schalter, Oelschalter usw.) nicht proportional mit der Leistung. Gleiche Qualität des aktiven Teiles vorausgesetzt, ist also der Grosskondensator in preislicher Hinsicht überlegen.

Nun lässt sich gegen etwaige Befürchtungen bezüglich der Betriebssicherheit von Hochspannung-Grosskondensatoren sagen, dass der Durchschlag eines Elementes im Betrieb höchst unwahrscheinlich ist, da der Sicherheitskoeffizient, den man bei der Bemessung des Dielektrikums anwendet, außerordentlich hoch ist. Betrachten wir die Kurve A der Fig. 8, die die Durchschlagzeit in Funktion der angelegten Spannung darstellt (letztere in Multiplen der Betriebswechselspannung U), so ergibt sich generell, dass ein fehlerfreies Kondensatorelement unter ca. $10 \cdot U$ momentan bzw. nach 8 bis 10 Sekunden, unter $4 \cdot U$ aber bereits erst nach ungefähr 30 Minuten durchschlagen wird. Unter 2,5

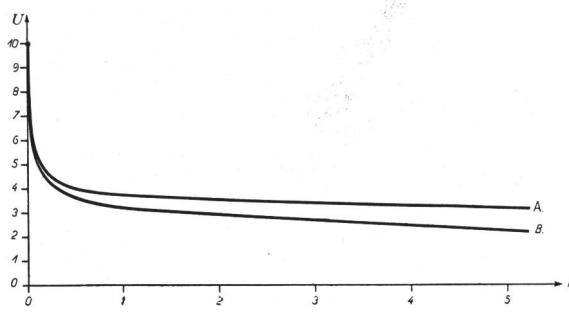


Fig. 8.

bis $3 \cdot U$ lässt sich sogar der Durchschlag nicht mehr erreichen, selbst bei über hundertstündiger Belastung. Dieser Verlauf der Zeitspannungskurve ergibt sich allerdings nur bei Elementen, deren Konstruktion eine tadellose Abfuhr der im Elementeninneren erzeugten Wärme gewährleistet. Bei schlechter Wärmeabfuhr, wie sie u. a. Kondensatoren mit festem Imprägnierungsmittel aufweisen, hat die Kurve einen ungünstigeren Verlauf (etwa ähnlich Kurve B), unter der Annahme, dass der Momentandurchschlagwert für beide Elemente der gleiche sei. Die Spannungen, die für Durchbruch in einer gegebenen Zeit angelegt werden dürfen, sind niedriger, besonders für langdauernde Belastung.

Da wir aber hier nur Kondensatoren erstklassiger Konstruktion zu berücksichtigen brauchen, können wir an Hand der generell gemachten Angaben über die Durchschlagfestigkeit sagen, dass der Kondensator Sicherheitsfaktoren aufweist, die sich mit denjenigen der allerbesten elektrischen Apparate messen können. Vorausgesetzt ist allerdings, dass eine scharfe Prüfung der fertig zusammengebauten Einheit alle irgendwie fehlerhaften Elemente ausgeschieden hat; und die Möglichkeit der rücksichtslosen Prüfung hängt wiederum davon ab, ob ein im Versuch durchschlagenes Element ohne grossen Aufwand entdeckt, herausgenommen und ersetzt werden kann.

Weiter sei hervorgehoben, dass der Durchbruch eines Elementes im Betrieb bei einem Hoch-

spannungskondensator sich, der Reihenschaltung der Elemente wegen, niemals in einem vollen Kurzschluss auswirken, sondern nur in einer Erhöhung der Phasenströme kundtun wird. Je kürzer aber die Reihe, je niedriger also die Spannung, desto grösser wird die Stromerhöhung sein und damit die Gewissheit, dass die Ueberstromrelais ansprechen. Je länger dagegen die Reihe, je höher also die Betriebsspannung, desto geringer die Stromerhöhung und damit desto ungefährlicher die Ueberbeanspruchung der übrigen, gesunden Spannungsstufen. Daraus kann der richtig konstruierte Hochspannungskondensator nicht nur seiner Ausführung nach (hoher Sicherheitskoeffizient), sondern auch seinem Wesen nach (Reihenschaltung einzelner Elemente) als der betriebsicherste Apparat der Elektrotechnik bezeichnet werden, eine Behauptung, die durch die Erfahrungen mit modernen Kondensatoren selbst grösster Leistung bestätigt wird.

Auch die Kühlfläche von Grossseinheiten, die spezifisch (in dm^2/BkVA gemessen) geringer ist als bei Kleintypen, hat sich als vollkommen ausreichend erwiesen. Messungen an einem 500-BkVA-Kondensator, der betriebswarm einer zehnständigen Ueberlastung um 50 % ausgesetzt wurde, zeigten keine nennenswerte Erwärmung derjenigen Oelschichten, die den aktiven Kondensatorteil bergen. Dies hängt damit zusammen, dass bei modernen Ausführungen sehr niedrige Verlustzahlen des Elementes erreicht werden. Als Gesamtverlustwinkel kann man für Hochspannungskondensatoren bei den technischen Frequenzen mit $\text{tg } \delta = 0,002$ bis 0,003 entsprechend Verlusten von 0,2 bis 0,3 % rechnen. Davon entfällt ein Teil auf die Zuführungen im Kessel und auf die Verbindungen der einzelnen Elemente. Diejenigen Verluste, die das Dielektrikum erwärmen (die dielektrischen Verluste und die Stromwärmeverluste in den Kondensatorbelägen) belaufen sich sogar auf nur ca. 0,15 bis 0,25 %. Vergleicht man diese Zahlen mit denjenigen früherer Ausführungen, die Verluste von 0,6 bis 1 %, ja darüber, aufwiesen, so wird man zugeben müssen, dass Bedenken wegen zu grosser Erwärmung von Grosskondensatoren keine Berechtigung mehr haben.

Dass der Grosskondensator, der übrigens für Niederspannung im Ausland, z. B. in England und Deutschland, seit langen Jahren als Stroomschieber verwendet wird, bereits auch hierzulande und für Hochspannung seine Probe bestanden hat, mögen einige Beispiele von ausgeführten Anlagen der Emil Haefely & Co. A.-G., Basel, beweisen.

Fig. 9 zeigt einen einphasigen 350-BkVA-Kondensator 16 kV, $16\frac{2}{3}$ Per./s für Aussenbetrieb. Bemerkenswert an dieser Bahnanlage ist die Tatsache, dass der Apparat zwischen Fahrdrift und Erde liegt, also in Schutzkondensator-Schaltung, bei der bekanntlich die Kondensatoren gefährlicheren Ueberspannungen ausgesetzt sind als bei normaler Schaltung zwischen zwei Leitern. Der in Fig. 10 gezeigte 250-BkVA-Kondensator für 2000 V, 3 ~ 50, ist mit Doppelschalter gemäss Schema XVI ver-

sehen. Eine Ausführung für feuchte Räume zeigt Fig. 11 (500 BkVA bei 3200 V, 3~50, Fig. 12 veranschaulicht eine typische Regelanlage mit $270 + 530 = 800$ BkVA bei 10,5 kV, 50 Per./s, die das beliebige Einsetzen von $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$ oder $\frac{3}{3}$ der Volleistung gestattet. Jede Einheit ist mit einem Spezial-Kondensatoren-Schalter gemäss Schema XV versehen. Von diesen zwei Einhei-

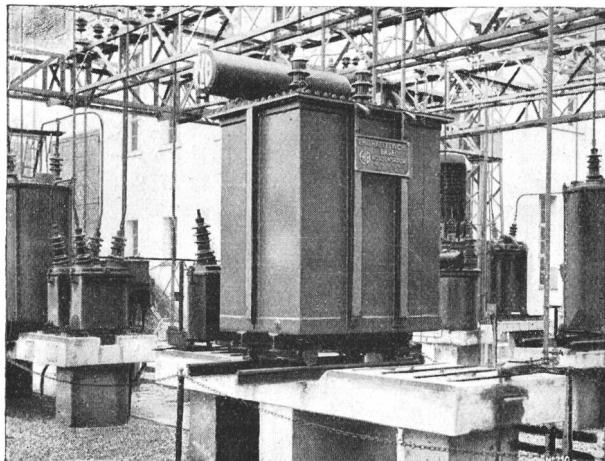


Fig. 9.
350-BkVA-Kondensator,
 $1 \sim 16\frac{2}{3}$ 16 kV, für Bahnanlage.

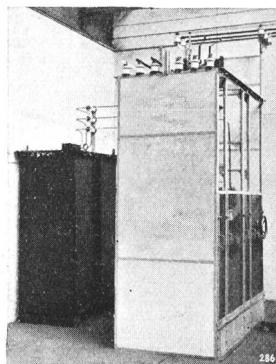


Fig. 10.
250-BkVA-Kondensator,
 $3 \sim 50$ 2 kV, angeschlossen
nach Schema Fig. 6 f.

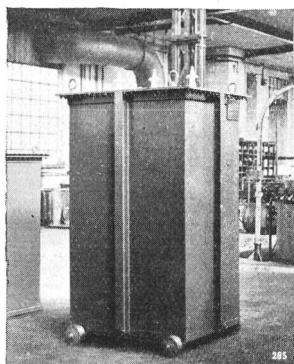


Fig. 11.
500-BkVA-Kondensator,
 $3 \sim 50$ 3,2 kV, für feuchte
Räume.

ten bleibt die kleinere dauernd, die grosse nur tagsüber eingeschaltet. Bei Vollast lässt sich eine Spannungserhöhung um ca. 5 % erreichen. In die Zuleitungen dieser Kondensatoren sind Strommesser zu Kontrollzwecken fliegend eingebaut, die allerdings bei der Bildaufnahme noch nicht vorhanden waren. Als Beispiel einer Anlage mit Entlade-Drosselspule gemäss Schema XIV sei der 340-BkVA-Kondensator (10 kV, 50 Per./s, Drehstrom) des Elektrizitätswerkes des Kantons Schaffhausen, Kraftwerk Galgenbuck, erwähnt, eine Regeleinheit, die nur tagsüber eingeschaltet wird. Fig. 13 gibt eine Anlage für 120 kV Gleichspannung wieder, wie sie zur Prüfung von Hochspannungs-Grosskondensatoren verwendet wird, da die hohen Prüfleistungen mit Wechselstrom (ca. 10fache Betriebs-

leistung) bei Hochspannung, und besonders bei Grosskondensatoren, nicht mehr aufgebracht werden könnten.

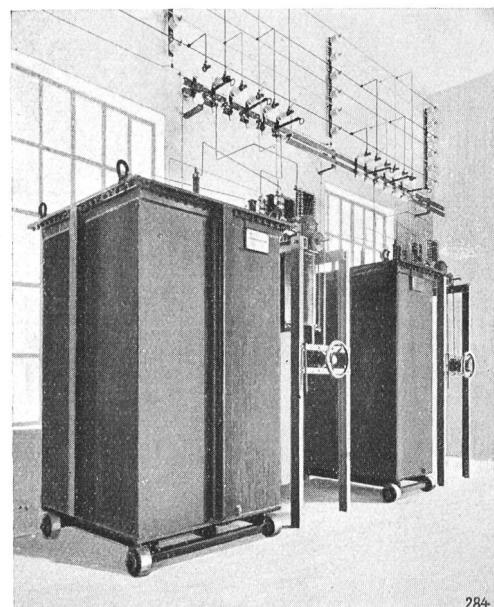


Fig. 12.
Regelanlage (530 + 270) BkVA, $3 \sim 50$ 10,5 kV,
angeschlossen nach Schema Fig. 6 e.

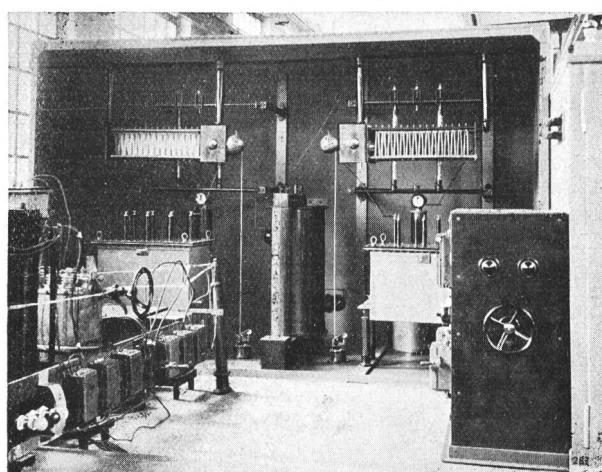


Fig. 13.
Prüfanlage, 120 kV Gleichstrom.

Zusammenfassend und abschliessend möchte ich sagen, dass erst die Ausbildung des Hochspannungs-Grosskondensators diesem Apparat, der seit langem in kleinen und mittleren Anlagen zu Phasenverbesserungszwecken verwendet wurde, allgemeinsten Bedeutung verliehen hat, ja, ihn zum Phasenschieber par excellence gemacht hat, verwendbar selbst in den grössten Anlagen bei direktem Anschluss an die hohen Mittelspannungen, die anderen Phasenschiebern verwehrt sind, ein Hilfsmittel, geschmeidig genug und so zuverlässig und anspruchslös, wie es sich ein Betriebsleiter nur wünschen kann.