

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 20 (1929)
Heft: 18

Artikel: Mittel zur Verbesserung des cos
Autor: Grieb, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056828>

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: 18.01.2025

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

Mittel zur Verbesserung des $\cos \varphi$.

Vortrag, gehalten an der Generalversammlung des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
in St. Moritz, am 7. Juli 1929

von F. Grieb, Ingenieur, Baden.

621.312(0065)

Der Autor geht zunächst auf den Einfluss der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ($\cos \varphi$) auf die Ausnützbarkeit der elektrischen Anlagen und die Spannungsregulierung ein und zeigt, welches Interesse die Elektrizitätswerke an der möglichsten Verkleinerung dieses Winkels haben. Er betrachtet sodann die Mittel, welche für die Verkleinerung der Phasenverschiebung bei grossen Uebertragungsleitungen und bei Verteilanlagen angewandt werden können. Bei den grossen Uebertragungsleitungen erwähnt er als solche Mittel vor allem die Synchron- und die Asynchronkompensatoren, bespricht deren Vor- und Nachteile und kommt zum Schluss, dass der Kompensation der Blindleistung mittels Synchronmaschinen im allgemeinen der Vorzug gebührt. Als wichtige Mittel zur Kompensation der Blindleistung in Verteilanlagen erwähnt er die Erzeugung der Blindleistung an wichtigen Abnahmepunkten durch besondere Maschinen oder statische Kondensatoren, oder die Benützung von Stromverbrauchern mit hohem $\cos \varphi$, wie z. B. Induktionsmotoren mit Kurzschlusswicklung auch für höhere Leistungen oder Spezialmotoren, die ihre Energie dem Netze unter besonders hohem Leistungsfaktor, eventuell auch mit voreilemendem Strom, entnehmen. Die Betriebssicherheit der letzteren soll bei nicht sehr sorgfältiger Behandlung noch zu wünschen übrig lassen. Im übrigen wird der Entscheid, welche Art Kompensation in Verteilanlagen angewandt werden soll, erst auf Grund besonderer Untersuchungen in jedem einzelnen Fall getroffen werden.

L'auteur commence par examiner l'influence du décalage entre le courant et la tension ($\cos \varphi$) sur l'utilisation des installations électriques et le réglage de la tension; il montre l'intérêt que les centrales ont à réduire cet angle le plus possible et indique ensuite quels moyens peuvent être appliqués dans ce but aux grandes lignes de transport d'énergie et aux installations de distribution. Pour les premières il préconise tout d'abord l'emploi des compensateurs synchrones et asynchrones, commente leurs avantages et leurs inconvénients et arrive à la conclusion qu'en général la compensation de la puissance réactive à l'aide de machines synchrones est préférable. Pour compenser la puissance réactive dans les installations de distribution, l'auteur mentionne avant tout la production de cette puissance réactive aux points de consommation importants, au moyen de machines spéciales ou de condensateurs statiques, ou bien l'emploi d'appareils consommateurs de courant à $\cos \varphi$ élevé, comme p. ex. les moteurs d'induction à induit en court-circuit même pour de grandes puissances, ou alors des moteurs spéciaux prélevant leur énergie du réseau sous un facteur de puissance particulièrement haut, éventuellement avec déphasage du courant en avant sur la tension. La sécurité de fonctionnement de ces derniers semble toutefois laisser encore à désirer si leur emploi n'est pas guidé avec beaucoup de soin. D'ailleurs le choix du genre de compensation à adopter dans les installations de distribution ne peut guère se baser que sur l'examen individuel de chaque cas particulier.

Einleitung.

Die grosse Bedeutung des Leistungsfaktors in elektrischen Wechselstromanlagen ist heute derart zur Selbstverständlichkeit geworden, dass es unnütz erscheint, besonders darauf hinzuweisen. Wenn es dennoch angezeigt ist, auf diese Frage nochmals einzugehen, so beruht dies meines Erachtens hauptsächlich darauf, dass über die Art der Kompensation der Blindleistung noch sehr verschiedene Auffassungen herrschen. Wie, wo und in welchem Masse der $\cos \varphi$ verbessert werden soll, ist heute noch zum Teil eine sehr umstrittene Frage.

Die Ursachen des in vielen Netzen ungünstigen Leistungsfaktors wurde im Vortrag des Herrn Dir. Schiesser anlässlich der Generalversammlung des S. E. V. im Jahre 1924 sehr eingehend untersucht¹⁾. Wie diesen ausführlichen Darstellungen entnommen werden kann, wird der Blindstrom, oder besser gesagt Magnetisierungsstrom, der die Ursache für die entstehende Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bildet, zum grössten Teil (ca. 70–80 %) von den angeschlossenen Motoren, in zweiter Linie von den Transformatoren (ca. 15–20 %) verlangt; die Freileitungen dagegen sind nur mit einem kleinen Anteil (ca. 3–6 %) am Blindleistungsbezug beteiligt. Es ist auch in der gleichen Arbeit sehr klar festgelegt, dass bei dem heutigen Stand der Technik die einzelnen Maschinen und Apparate

¹⁾ S. Bull. S. E. V. 1924, No. 9, S. 433.

selbst nicht mehr wesentlich geändert werden können, um den Blindstrombezug, den dieselben für die Aufrechterhaltung der magnetischen Felder benötigen, zu reduzieren.

Dagegen ist es möglich, durch zweckmässige Projektierung der Anlagen, durch Verwendung möglichst voll belasteter Motoren und Transformatoren, sowie, wenn es die Verhältnisse erlauben, durch Bevorzugung von schnelllaufenden Motoren,

das $\cos \varphi$ Problem im günstigen Sinne zu beeinflussen. Alle diese Massnahmen werden jedoch niemals genügen, die $\cos \varphi$ Frage zu lösen, resp. damit befriedigende Verhältnisse zu erreichen.

Ich möchte in diesem Zusammenhang der Vollständigkeit halber noch kurz die Folgen eines schlechten Leistungsfaktors berühren.

a) *Ausnützung der Anlagen.* Der Magnetisierungsstrom, der für die einzelnen Verbraucher notwendig ist, muss, wenn keine besonderen Einrichtungen getroffen werden, von den Generatoren geliefert werden. Damit werden alle Einrichtungen vom Generator bis zu den Verbrauchern (Generator, Leitung, Transformator evtl. Induktionsregler) nicht nur mit dem Wirkstrom belastet, der in irgend einer anderen Energieform (mechanische Arbeit oder Wärme) umgewandelt werden kann, sondern auch vom Magnetisierungsstrom, der für die Aufrechterhaltung der magnetischen Felder notwendig ist. Obwohl sich die beiden Komponenten, Wirk- und Magnetisierungsstrom, rechtswinklig zusammensetzen, so dass nicht die arithmeti-

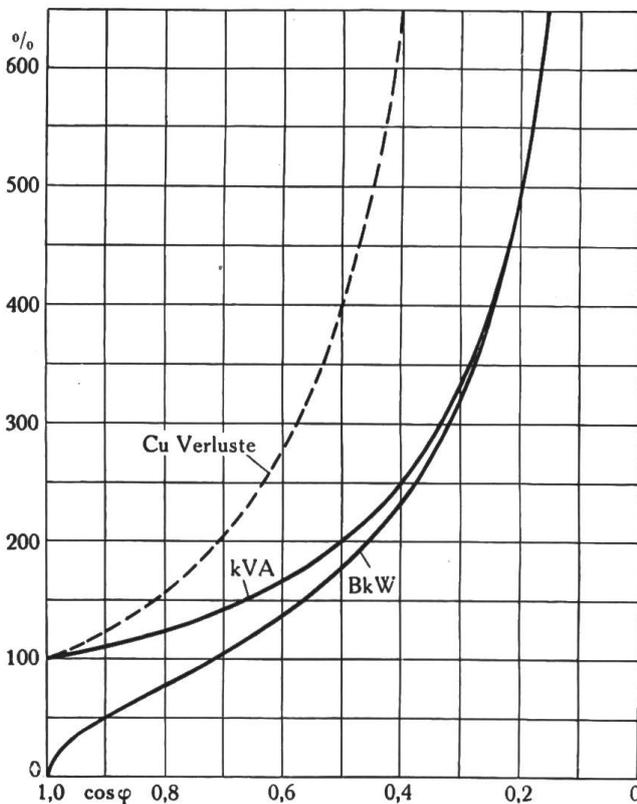


Fig. 1.

Einfluss des Leistungsfaktors auf die Scheinleistung, die Blindleistung und die Kupferverluste bei gleichbleibender Wirkleistung und Spannung.

sche, sondern die geometrische Summe für die Kupfer-Belastung in Betracht kommt, ergibt ein ungünstiger Leistungsfaktor dennoch eine respektable Zusatzbelastung gemäss Fig. 1, BkW-Kurve. Der Gesamtstrom bestimmt die Kupferquerschnitte, so dass eine bestimmte Maschine oder eine Leitung nur eine bestimmte kVA-Belastung übernehmen kann. Was sie an Scheinleistung aufnehmen müssen, geht an der Ausnützung der Anlage verloren.

b) *Verluste.* Die Stromwärmeverluste wachsen bekanntlich mit dem Quadrat des Stromes, so dass dieselben für eine bestimmte Wirkleistung mit schlechter werdendem Leistungsfaktor sehr rapid zunehmen, wie dies der Fig. 1, Kurve für die Cu Verluste, entnommen werden kann.

Die mit kVA bezeichnete Kurve gibt das Verhältnis $\frac{\text{Total-Strom}}{\text{Watt-Strom}} \cdot 100$ ($= \frac{I}{I_w} \cdot 100$) und gibt somit die Zunahme in Prozenten des Gesamtstromes in bezug auf einen unveränderlichen Wirkstrom mit variablem $\cos \varphi$.

Die mit BkW bezeichnete Kurve stellt das Verhältnis $\frac{\text{Blind-Strom}}{\text{Watt-Strom}} \cdot 100$ dar ($\frac{I_B}{I_w} \cdot 100$), d. h. den Blindstrom in Prozenten des Wirkstromes bei unveränderlichem $\cos \varphi$.

Interessant ist die Kurve für die Cu Verluste, die die Zunahme der Kupferverluste für gleichbleibende Wirkleistung und abnehmenden Leistungsfaktor darstellt; wie zu ersehen ist, sind dieselben bei einem $\cos\varphi$ von 0,7 bereits das doppelte und bei einem $\cos\varphi$ von 0,5 bereits das vierfache.

c) *Spannungsregulierung.* Ein weiterer nicht zu unterschätzender Nachteil ergibt ein schlechter Leistungsfaktor auch für die Spannungshaltung, resp. Spannungsregulierung. Wie irgend einer Kurve der Fig. 2 entnommen werden kann, nimmt der Spannungsabfall mit abnehmendem $\cos\varphi$ ziemlich rasch zu. Da fast ohne Ausnahme alle Verbraucher für konstante Spannung vorgesehen sind, verlangt eine Uebertragung mit ungünstigem Leistungsfaktor eine weitgehende Regulierungsmöglichkeit der Generatoren, oder eine spezielle Einrichtung, die Spannung entsprechend regulieren zu können.

Wie Fig. 2 weiter zeigt, ist jedoch für die Spannungsänderung auf einer Uebertragungsanlage nicht nur der Leistungsfaktor allein massgebend, vielmehr spielt naturgemäss auch der Totalwiderstand (Impedanz) und dabei das Verhältnis von Ohmschem zu induktivem Widerstand eine beträchtliche Rolle. In der Fig. 2 ist der Spannungsabfall in % desjenigen bei $\cos\varphi = 1$ (Ohmscher Abfall) für verschiedene Verhältnisse von $\frac{R}{\omega L}$ in Abhängigkeit des Leistungsfaktors aufgetragen. Die Kurven zeigen deutlich die starke Zunahme der Spannungsveränderung mit abnehmendem Verhältnis $\frac{R}{\omega L}$ und konstantem Ohmschen Widerstand.

Da die Leitungen hauptsächlich nach mechanischen Gesichtspunkten dimensioniert werden müssen, ist das Verhältnis $\frac{R}{\omega L}$ für sie ziemlich festgelegt, so dass sich daran im Interesse der Spannungsregulierung wenig ändern lässt. Dagegen kann die Kurzschlussspannung der Transformatoren stark verändert werden, so dass damit das Verhältnis der gesamten Uebertragung (Leitung plus Transformator) in grossen Grenzen wählbar ist.

Nach dieser kurzen Einleitung möchte ich zur Frage der Kompensation selbst übergehen und sie entsprechend ihrer Wirkungsweise und ihrem Charakter in zwei Hauptgruppen unterteilen:

- A. Die Kompensation der grossen Uebertragungsleitungen (Grosskompensation) und
- B. Die Kompensation der Verteilanlagen (Kleinkompensation).

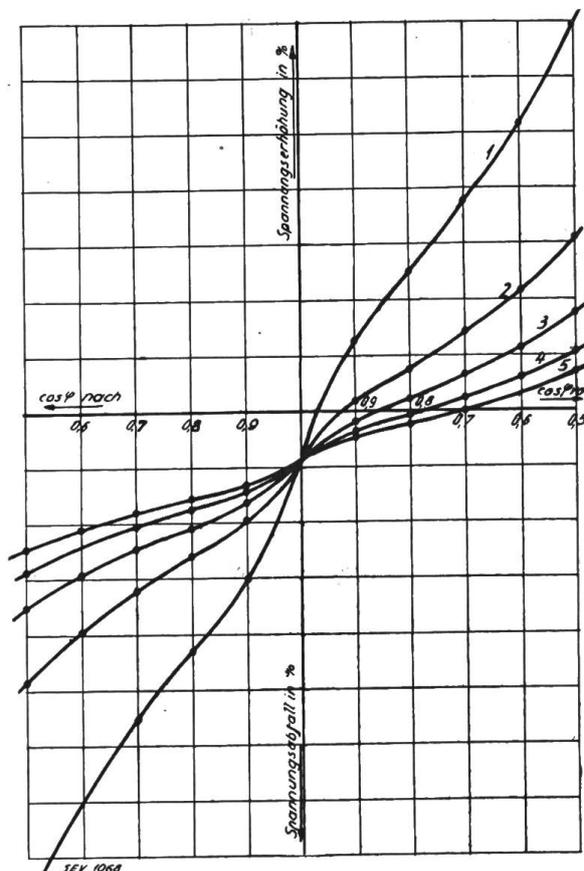


Fig. 2.

Vergleichskurven für den Spannungsabfall für verschiedene Verhältnisse $\frac{R}{\omega L}$.

Kurve 1	$\frac{R}{L\omega} = 0,2$
" 2	$= 0,4$
" 3	$= 0,6$
" 4	$= 0,8$
" 5	$= 1$

A. Grosskompensation.

Man wird sich wohl vorerst die Frage stellen müssen, ob in einer Grossübertragung die Forderung nach der Hochhaltung des Leistungsfaktors unter allen Umständen von allgemeinem Interesse sei. Diese Frage wird sicher teilweise überraschen, speziell in Anbetracht der vorstehend erwähnten ungünstigen Auswirkungen eines schlechten Leistungsfaktors. Damit will ich nicht sagen, dass ich etwa der Ansicht sei, dass der Frage des Leistungsfaktors in Uebertragungsanlagen keine Beachtung geschenkt zu werden braucht; es muss ihr im Gegenteil grosses Interesse entgegengebracht werden. Die Energieverteilung in Hoch- und Höchstspannungsanlagen muss aber neben dem Bestreben höchster Wirtschaftlichkeit in direktem Sinne auch noch anderen Bedingungen genügen, worunter in erster Linie die Spannungshaltung resp. Spannungsregulierung gehört.

Es ist bekannt, dass der Wirkungsgrad der Motoren, wenn sie unterhalb der Nennspannung arbeiten müssen, sinkt, dass das Drehmoment zurückgeht, dass dagegen der Magnetisierungsstrom ansteigt, wenn sie mit mehr als ihrer normalen Spannung gespeist werden und dass damit naturgemäss auch der Leistungsfaktor sinkt. Man weiss auch, dass die Lichtintensität der Glühlampen ca. mit der dritten Potenz der Spannung abnimmt, wenn sie mit weniger als Nennspannung betrieben werden und umgekehrt, so dass schon geringe Spannungsschwankungen sehr bald das Licht zum Flackern bringen. Andererseits reduziert eine zu hohe Spannung die Lebensdauer der Glühkörper ziemlich rasch.

Zu hohe Spannungen treiben den Magnetisierungsstrom von Transformatoren sehr rasch in die Höhe, nur ca. 10 % Spannungserhöhung kann den Magnetisierungsstrom der Transformatoren je nach der gewählten Induktion bis zum doppelten Wert ansteigen lassen.

Es wird nun leider eine schwankende Spannung vielfach mehr als Schönheitsfehler angesehen, weil die oben genannten daraus resultierenden Ursachen zahlenmässig sehr schwer ausgewertet werden können, und dennoch sind sie für die Gesamtwirtschaftlichkeit einer Anlage mindestens ebenso wichtig, wie ein hoher Leistungsfaktor bei allen Belastungen.

Dass es möglich ist, mit Synchronkompensatoren die Spannung am Ende von Uebertragungsanlagen zu regulieren, ist eine Tatsache, die längst bekannt ist und in der Literatur bereits sehr eingehend behandelt wurde. Wenn ich doch noch kurz darauf eintreten möchte, so geschieht dies, um den Zusammenhang von Spannung und Leistungsfaktor bei Energieübertragungen speziell zum Ausdruck zu bringen und um die Bedingungen zu präzisieren, die an die Mittel gestellt werden, die für die Regulierung in Betracht kommen.

Eine Uebertragungsanlage, sei es eine einfache Leitung, oder eine solche mit dazwischen liegenden Transformatoren, sei auf beiden Seiten generatorisch gespeist, wobei es absolut gleichwertig ist, ob beides wirklich Kraftwerke sind oder ob die eine oder andere davon eine Kompensatoranlage ist. Wird die Spannung an diesen beiden Endpunkten mit Hilfe der Generatoren oder Kompensatoren auf einem bestimmten Wert festgehalten, gleichgültig mit oder ohne Spannungsgefälle in der einen oder anderen Richtung, so ist zu einer bestimmten kW-Uebertragung der zugehörige Leistungsfaktor eindeutig bestimmt; denn die Anzahl kW, die über eine Leitung übertragen wird, ist bei einer Kupplung von Kraftwerken gegeben durch die Einstellung der Turbinenregler, bei der Speisung eines Verbrauchszentrums durch die von diesem verlangten Wattenergie. Die Spannungshaltung spielt weder für die Grössenordnung noch für die Richtung der übertragenen kW eine nennenswerte Rolle.

Annäherungsweise wird das durch das Festhalten der Spannung an den beiden Endpunkten zur Verfügung gestellte Spannungsgefälle aufgezehrt von der arithmetischen Summe des Ohmschen Spannungsabfalles des Wattstromes, gegeben durch:

$$I \cos \varphi \cdot R \text{ oder } I_w \cdot R$$

und des induktiven Abfalles des wattlosen Stromes:

$$I \sin \varphi \cdot X \text{ oder } I_1 \cdot X.$$

Bei gegebenem Ohmschen und induktiven Widerstand der Uebertragung und bei dem durch die kW-Belastung bestimmten Wattstrom muss der Blindstrom, damit das Spannungsgleichgewicht erhalten bleibt, einen ganz bestimmten Wert annehmen, womit der Leistungsfaktor eindeutig festgelegt ist.

Diese Beziehung ist allgemein gültig. Es ist also möglich, dass Wattenergie von einem Ort A mit einer bestimmten Spannung nach einem Ort B übertragen werden kann, dessen Spannung tiefer, gleich hoch oder sogar höher liegt, als die Spannung in A. Das zur Verfügung stehende Spannungsgefälle wird in erster Linie vom Wirkstromabfall beansprucht; ist es grösser als derselbe, so kann mit dem Wattstrom noch Blindstrom übertragen werden, ist es kleiner, so muss teilweise oder ganz der Wirkstromabfall durch Blindstromabfall kompensiert werden; d. h. der Blindstromabfall muss in diesem Fall negativ werden, was identisch ist mit einer Blindstromübertragung von B nach A oder einer Uebertragung mit voreilendem Leistungsfaktor.

Mit welchem Spannungsgefälle am zweckmässigsten Uebertragungsanlagen betrieben werden sollen, kann kaum allgemein beantwortet werden. Es ist dies hauptsächlich eine wirtschaftliche Frage, die mit einer Reihe von Faktoren verknüpft ist. Wie aber auch die Regulierung ausgeführt wird, von besonderem Interesse ist sicher immer der Wunsch, mit möglichst wenig Blindstrom eine möglichst grosse Spannungsregulierung erreichen zu können. Die Spannungsvariation, die sich durch den Blindstrom ergibt, sei er nun voreilend oder nachteilend, d. h. induktiv oder kapazitiv, ist gegeben durch $I_1 \cdot \omega \cdot L$. Je grösser also der induktive im Verhältnis zum Ohmschen Widerstand in einer Uebertragung ist, mit desto weniger wattlosem Strom ist eine bestimmte Spannungsvariation zu erzielen, wie dies aus den Kurven der Fig. 2 hervorgeht.

Uebertragungsleitungen mittlerer Spannung haben im allgemeinen ein Verhältnis des Ohmschen zum induktiven Widerstand, das angenähert 1 ist, d. h. sie haben gleichviel Ohmschen wie induktiven Widerstand. Werden Transformatoren in einen Leitungszug eingebaut, so ändert sich das Verhältnis sofort wesentlich, indem moderne Transformatoren in der Regel eine ziemlich grosse Kurzschlussspannung besitzen. Solche von 10 bis 12 % und sogar mehr sind heute für Grosstransformatoren die gebräuchlichsten Ausführungen, während sie kaum 1 % Ohmschen Widerstand erreichen.

Die Ursache der Entwicklung der Grosstransformatoren in dieser Richtung war allerdings kaum die, Uebertragungen mit grossem induktiven Widerstand zu erreichen, sondern das Bestreben, Transformatoren mit grosser Kurzschlussfestigkeit zu bauen, was nach dem Zusammenschluss von mehreren Kraftwerken eine absolute Notwendigkeit wurde. Dadurch werden nicht nur die Transformatoren bei Kurzschluss mechanisch weniger beansprucht, sondern auch die gesamte Anlage und hauptsächlich die Oelschalter, indem die Abschaltleistung mit zunehmender Impedanz abnimmt.

Wenn Synchron-Kompensatoren zur Spannungsregulierung verwendet werden, so ist die Erhöhung des induktiven Widerstandes einer Uebertragung kein Nachteil, sondern sogar sehr erwünscht. Wird dagegen statt auf Spannung auf einen bestimmten Leistungsfaktor reguliert, wie dies vereinzelt ausgeführt wird, so werden die Spannungsvariationen, wenn nicht direkt bis auf $\cos \varphi = 1$ kompensiert wird, was fast in allen Fällen viel zu unwirtschaftlich wäre, relativ immer noch sehr gross, so dass in der Regel noch spezielle Einrichtungen für die Spannungsregulierung notwendig werden.

Bei einer Energieübertragung mit einem festen Leistungsfaktor bekommt man absolut die analogen starren Verhältnisse wie sie bei der Gleichstromübertragung

bekannt sind und gibt damit den grossen Vorteil des elastischen Betriebes, wie sie der Wechselstromübertragung von Haus aus eigen sind, unnötig preis.

Man wird einwenden, dass bei einer Spannungsregulierung mit Synchronkompensatoren nicht das Maximum an Wirtschaftlichkeit der Uebertragungsleitung erreicht wird, indem die Leitung nur bei Vollast mit dem Maximum der zur Verfügung stehenden Blindleistung entlastet wird, während die Kompensation mit abnehmender Last ebenfalls abnimmt, um bei Leerlauf die Leitung sogar induktiv zu belasten. Diese Einwendung ist absolut richtig. Die Verluste werden auf der Uebertragung bei Teillast etwas höher sein; dem gegenüber stehen aber die Vorteile der besseren Ausnützung durch die Konstanz der Spannung.

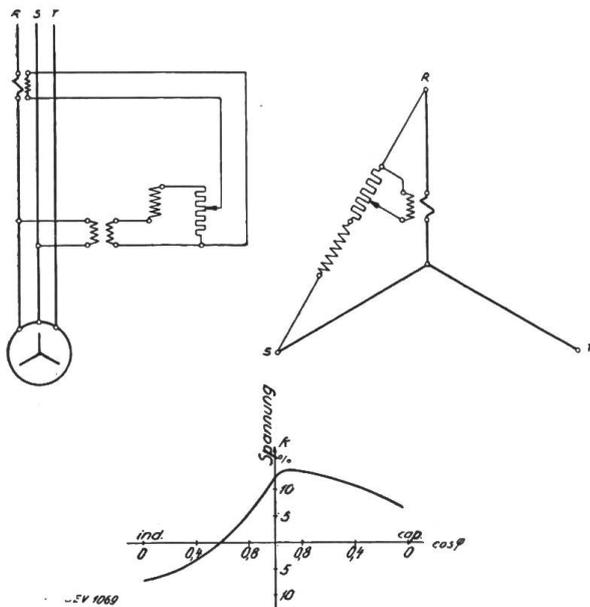


Fig. 3.

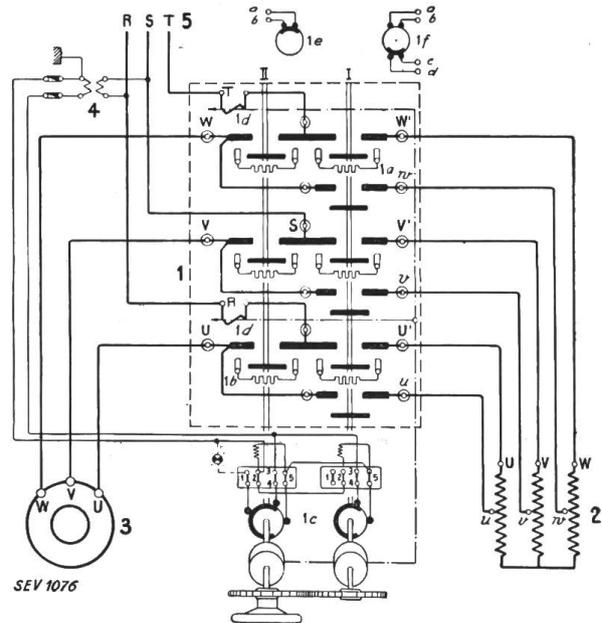


Fig. 4.

Schaltungsschema für das asynchrone Anlassen eines Synchronkompensators.

Ich möchte in diesem Zusammenhang auf den Rapport No. 98 des Mr. Baum, San Francisco, hinweisen, den er an der diesjährigen Conférence internationale des grands Réseaux électriques à haute Tension vorlegte und in welchem der Autor zur Schlussfolgerung kommt, dass mit einer Spannungsregulierung mit Synchronkompensatoren die wirtschaftlichste Energieübertragung ermöglicht wird. Wir brauchen zwar nicht so weit zu gehen, um solche Anlagen zu sehen, denn auch in Europa sind eine grössere Anzahl solcher im Betrieb. Ein grosses Ueberlandwerk in Deutschland sah sich sogar gezwungen, bei Nacht für den Blindstrombezug besonders günstige Bedingungen zu gewähren, um die Kompensatoren im untererregten Arbeitsgebiet zu entlasten.

Die Wirtschaftlichkeit bei der Spannungsregulierung könnte dadurch verbessert werden, dass das Spannungsgefälle nicht absolut fest gehalten, sondern mit abnehmendem Leistungsfaktor verkleinert würde, so dass damit die induktive Stromkomponente, die zur Erreichung des reduzierten Spannungsgefälles notwendig ist, verkleinert wird.

Ganz automatisch geschieht dies bei Verwendung von statischen Spannungsschnellreglern der A.-G. Brown, Boveri & Co. Durch eine Kompensation des Schnellreglers mit dem Strom in der Phase R wird, wie in Fig. 3 ersichtlich ist, erreicht, dass die Spannung mit abnehmendem $\cos \varphi$ auch abnimmt, somit das Spannungsgefälle vom Kraftwerk zu den Hauptverteilknoten reduziert und damit die induktive Kompensatorleistung verkleinert wird. Eine ideale Spannungsregulierung

lierung würde demnach so aussehen, dass die einzelnen Hauptverteilknoten die Spannung konstant halten, unabhängig von der Belastung und dem Leistungsfaktor, was z. B. automatisch mit astatistischen Schnellreglern ohne weiteres erreicht wird, während die Energie liefernden Kraftwerke in der Spannungshaltung elastisch wären und automatisch die Kompensationseinrichtung entlasten würden.

Für eine Kompensationseinrichtung zum Zwecke der Spannungsregulierung kommen in der Regel grössere Leistungen in Betracht, somit auch Maschinen grösserer Leistung und mit günstiger Reguliermöglichkeit, wofür sich in erster Linie Synchronkompensatoren und eventuell Asynchronkompensatoren eignen.

I. Synchronkompensatoren.

1. *Aufbau.* Im mechanischen Aufbau unterscheidet sich ein Synchronkompensator sehr wenig von einem Synchrongenerator resp. Motor; ich möchte deshalb nicht näher auf konstruktive Einzelheiten eingehen. Die Tourenzahl ist in der Regel frei wählbar, so dass jeweils die für die Maschine günstigsten Verhältnisse gewählt werden können.

2. *Anlauf.* Das Anlassen der Kompensatoren kann je nach den Verhältnissen verschieden gewählt werden.

a) *Asynchroner Anlauf.* Jeder Synchronkompensator läuft mit reduzierter Spannung asynchron an, und zwar sowohl mit wie auch ohne Dämpferwicklung

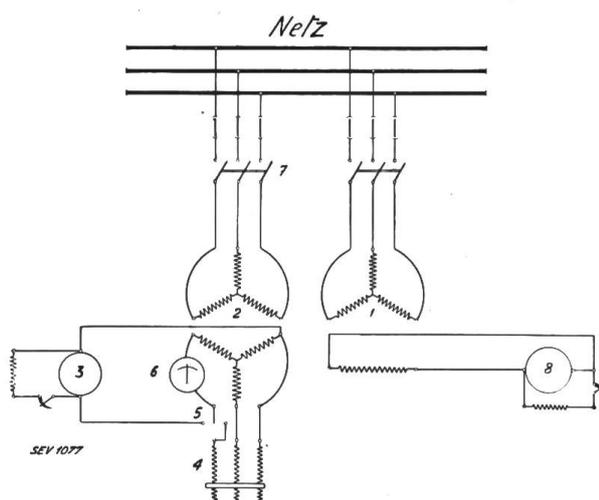


Fig. 5.

Schema für das Anlassen eines Synchronmotors mit einem Synchron-Induktionsmotor.

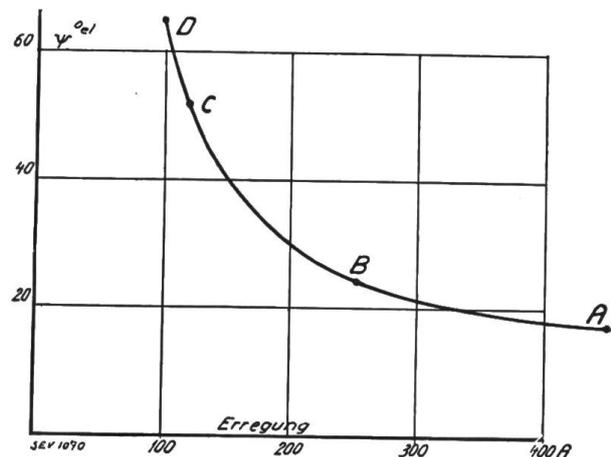


Fig. 6.

- A Maximale Erregung
- B Mittlere Erregung
- C Zum Synchronisieren minimal erforderliche Erregung
- D Fällt ausser Tritt bei erregtem Kompensator.

und kann als Reaktionsmaschine sogar ohne Gleichstromerregung in Synchronismus kommen. Bei einer Anlassspannung von 30–35 % nimmt der Kompensator bis max. 100 % des Normalstromes aus dem Netz auf. Die Anlassschaltung wird zweckmässig gemäss Fig. 4 gewählt. Mit Hilfe eines Stufenschalters wird dem Kompensator zuerst eine reduzierte Spannung zugeschaltet. Nach Erreichen der vollen Drehzahl wird die Gleichstromerregung auf das Polrad gegeben und bis zu dem bestimmten Punkte erregt, der ein stossfreies Umschalten auf volle Spannung erlaubt. Stossfrei kann dann umgeschaltet werden, wenn sofort nach der Umschaltung die Polradachse mit dem Spannungsvektor des Netzes übereinstimmt. Die Polradachse ist identisch mit dem EMK-Vektor, welcher nun vor der Umschaltung mit Hilfe der Erregung durch Veränderung der Richtung des Spannungsabfalles so gedreht werden kann, dass der erwünschte Zustand im Moment nach der Umschaltung erreicht wird. Diese Umschaltung wird mit dem Stufenschalter unterbrechungslos ausgeführt. Die Festlegung der Erregung, bei welcher die Umschaltung stossfrei erfolgen kann, wird zweckmässig im Versuchslokal vorgenommen. Der ganze Anlassvorgang dauert

je nach der Grösse der Maschine ca. 30 bis 60 Sekunden. Während diese Anlassmethode für kleinere und mittlere Maschinen absolut zweckmässig ist, werden grosse Maschinen durch den Einschaltstrom doch ziemlich beansprucht, so dass es sich empfiehlt, eine Anlassmethode mit Anwurfsmotor zu verwenden.

b) *Anlauf mit Hilfsmotor.* Bei dieser Art des Anlassens wird der Kompensator mit einem Hilfsmotor, der so dimensioniert sein muss, dass er den Kompensator losbrechen und hernach beschleunigen kann, auf Tourenzahl gebracht.

Als Anwurfsmotor kann entweder ein gewöhnlicher Asynchronmotor mit nächst kleinerer Polzahl als der Synchronkompensator verwendet werden, oder aber ein Synchron-Induktionsmotor mit gleicher Polzahl.

Bei der Verwendung eines Asynchronmotors muss in den Rotorkreis ein ziemlich grosser Regulierwiderstand gelegt werden, mit Hilfe dessen die Tourenzahl des Motors so reguliert werden kann, dass ein Synchronisieren des Kompensators nach erfolgter Erregung mit dem Netz möglich ist.

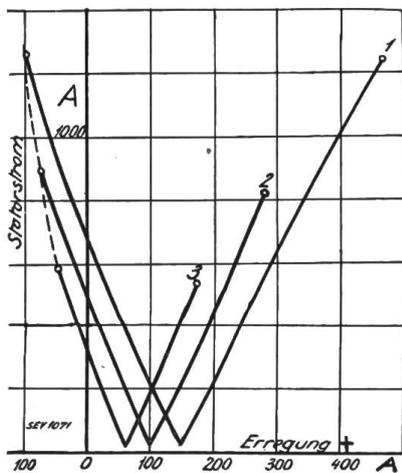


Fig. 7.
Leerlauf-V-Kurven von Synchron-
maschinen.

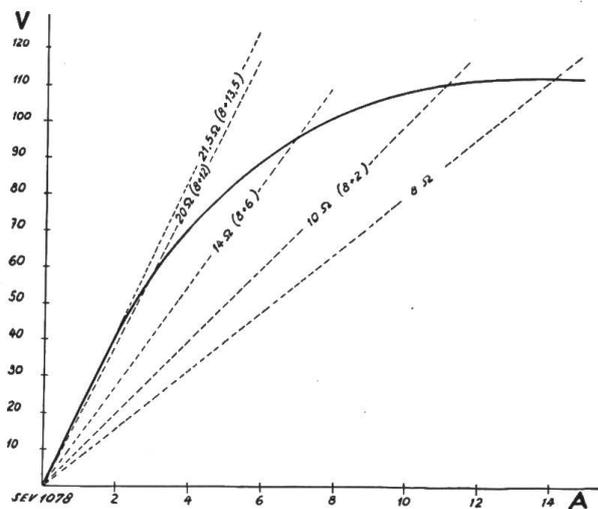


Fig. 8.
Leerlaufcharakteristik einer Erregermaschine.

Um die Synchronisierung umgehen zu können, wird zum Anlassen zweckmässig ein Synchron-Induktionsmotor verwendet, gemäss Schema Fig. 5. Der Rotor desselben wird relativ zum Spannungsvektor des Netzes auf die Welle des Kompensators so aufgekeilt, dass die Polradachse resp. der EMK-Vektor des Synchronkompensators nach erfolgter Synchronisierung des Anwurfsmotors mit dem Netzvektor übereinstimmt, so dass der Statorschalter ohne weiteres eingelegt werden kann. Der ganze Anlassvorgang besteht nur darin, den Schalter 7 des Anwurfsmotors zu schliessen, den Rotoranlasser 4 zurück zu regulieren und bei einem bestimmten Ausschlag des Rotor-Ampèremeters 6 den Umschalter 5 zu schliessen.

Falls die rechnerisch ermittelte Aufkeilung des Synchron-Induktionsmotors nicht ganz stimmen sollte, so kann auf dem Versuchsstand durch Veränderung der Erregung der EMK-Vektor des Synchron-Induktionsmotors in einem bestimmten Bereich verändert werden, wie es auf Fig. 6 zu ersehen ist, um damit genaue Uebereinstimmung zwischen Polradachse und Netzvektor des Synchronkompensators zu erreichen. Dadurch hat man die Gewähr, dass der Statorschalter der Hauptmaschine ohne vorherige Kontrolle geschlossen werden darf, ohne dass ein Stromstoss entsteht. Diese Anlassmethode ist wohl in jeder Beziehung die zweckmässigste, indem sie an das Personal absolut keine Anforderungen stellt und die Maschinen in keiner Weise beansprucht.

Es gibt noch andere Lösungen, Synchronkompensatoren in Betrieb zu setzen, wie beispielsweise bei Aufstellung mehrerer Kompensatoren in ein und derselben

Anlage die Anwendung einer speziellen Hochfahrgruppe. Auch sind Lösungen bekannt, die den Anwurfsmotor in Serie schalten mit der Statorwicklung des Kompensators, und zwar mit und ohne Zwischenschaltung eines Transformators. Es sind diese Anordnungen jedoch als Einzelfälle zu betrachten und haben in der Praxis bis jetzt keine grosse Bedeutung erlangt.

3. *Betrieb der Synchronkompensatoren.* Wenn die Maschine angelassen ist, so arbeitet sie wie ein Synchronmotor, jedoch nur auf einer V-Kurve, der Leerlauf-V-Kurve, gemäss Fig. 7. Der Uebergang des Arbeitsbereiches eines Kompensators von einer V-Kurve auf die andere geschieht automatisch beim Uebergang von einer Spannung auf eine andere, und zwar im Sinne der Verschiebung nach links bei einer Spannungssenkung und umgekehrt. Da jedoch in der Regel die Spannungsänderungen klein sind, resp. durch die Spannungsregulierung mit dem Kompensator selbst auf ein Minimum reduziert wird, ist eine translatorische Verschiebung der V-Kurve nur verschwindend klein, so dass praktisch für die Beurteilung der Arbeitsweise eines Synchronkompensators nur eine Kurve in Betracht kommt.

Je nach dem Verwendungszweck der Maschine und je nach den Netzverhältnissen (Netze mit grossem oder kleinem kapazitiven Ladestrom) muss die Maschine mit mehr oder weniger Untererregung, d. h.

Blindstrombezug aus dem Netz, arbeiten. Wie aus den V-Kurven zu ersehen ist, kann der Synchronkompensator ohne Schwierigkeit bis auf Erregung 0 arbeiten, ja noch sogar darüber hinaus bis der Kippunkt erreicht ist, d. h. bis die Maschine ausser Tritt fällt.

Anders sind die Verhältnisse bei der Gleichstrom-Erregermaschine, die bekanntlich dann labil wird, wenn die Widerstandsgeraden keinen eindeutigen Schnittpunkt

mit der Leerlaufcharakteristik ergeben (siehe Fig. 8). Will man dagegen bis auf Erregung 0 zurückgehen, so muss die Erregermaschine fremd erregt werden. Die Regulierung von Synchronkompensatoren bedingt meistens einen sehr grossen Regulierbereich, nämlich von Erregung 0, was ca. 50–60 % der Vollast induktiv entspricht, bis zur Vollast kapazitiv. Um diese grosse Regulierarbeit dennoch mit normalen Schnellreglern bewältigen zu können, wurde von Brown, Boveri & Cie., eine entsprechende Schaltung entwickelt, die in Fig. 9 dargestellt ist.

Wie man erkennt, ist die Erregermaschine nicht mit einer Nebenschluss-, sondern mit einer Compoundmaschine fremd erregt, wodurch sich die Regulierarbeit für den Schnellregler beträchtlich reduziert. Man wird vielleicht Bedenken haben können, dass durch diese Schaltung resp. speziell durch die Verwendung einer Compoundmaschine die Zeitkonstante erhöht und damit die Reguliergeschwindigkeit

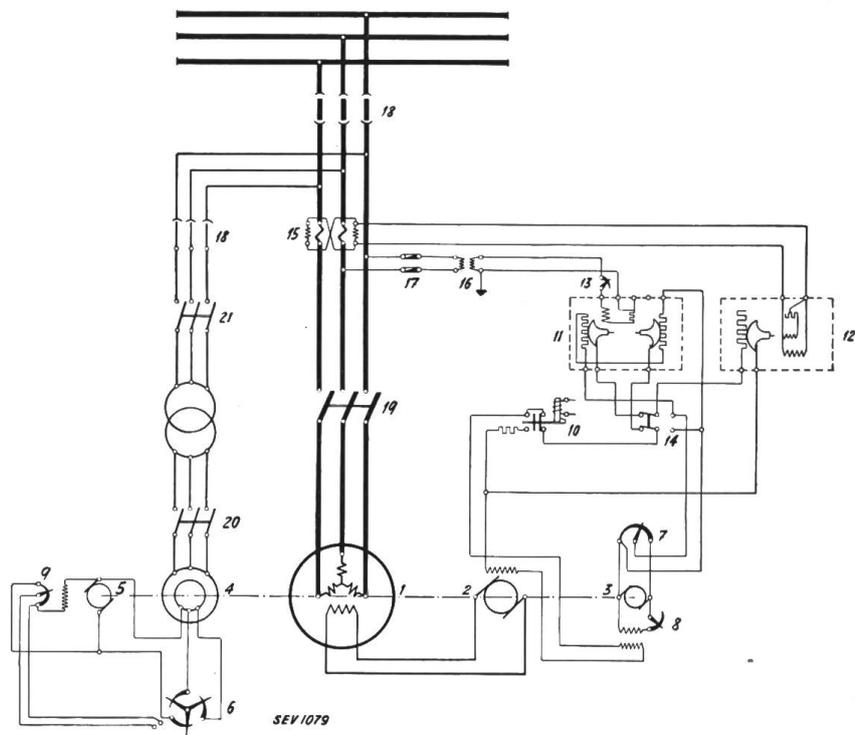


Fig. 9.

Schema eines Synchronkompensators mit kompondiertem Hilfsrerger.

wesentlich verlängert wird. Wie jedoch Versuche gezeigt haben, trifft dies absolut nicht zu, was sich auch aus der Ueberlegung ergibt, dass die Zeitkonstante des Polrades des Synchronkompensators diejenige der kleinen Erregermaschinen um ein Vielfaches übersteigt.

Mit Hilfe eines Spannungsreglers, dessen Widerstand als Potentiometer zwischen positiven und negativen Pol des Hilfserregers geschaltet ist, kann nun in einfacher Weise die Erregung so beeinflusst werden, dass am Anschlusspunkt des Kompensators die Spannung auf einem konstanten Wert gehalten werden kann. Die Regu-

lierung ist ganz automatisch, bedarf keinerlei Wartung, analog derjenigen bei Generatoren.

Man hört mitunter auch die Bedenken, dass Synchronkompensatoren leicht ausser Tritt fallen können, d. h. nicht stabil sind bei evtl. auftretenden Frequenz- und Spannungsschwankungen. Wie den V-Kurven (Fig. 7) entnommen werden kann, tritt jedoch die Kippgrenze erst bei einer negativen Erregung auf; es ist mir

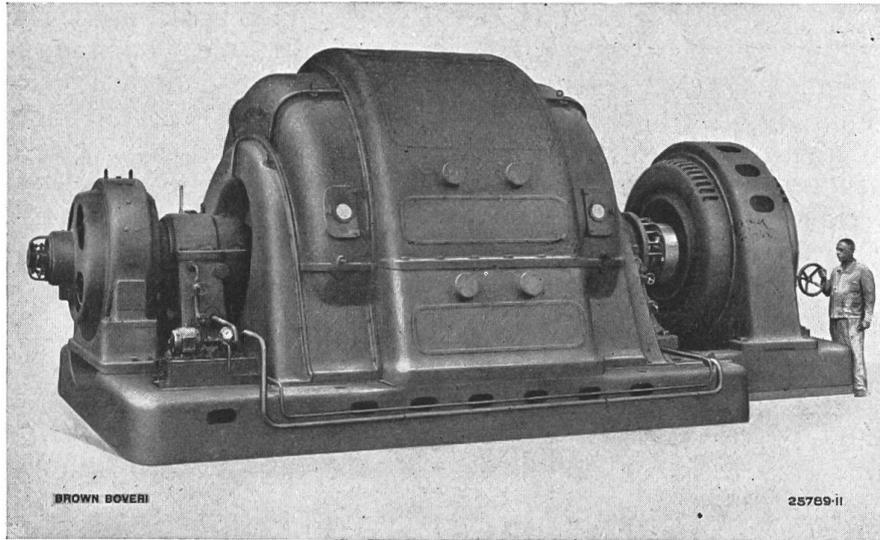


Fig. 10.
Synchronkompensator für 30 000 kVA.

auch kein Fall bekannt, wo Synchronkompensatoren hinsichtlich Stabilität irgendwelche Schwierigkeiten verursacht haben.

Fig. 10 zeigt einen Synchronkompensator von 30 000 kVA mit Anwurfsmotor, Erreger und kompondiertem Hilfserreger. Der kleine Motor, der beim linken Lager ersichtlich ist, treibt eine kleine Zahnradpumpe an, mit welcher Drucköl unter die Welle gegeben wird, um das Losbrechen beim Anlauf zu erleichtern.

II. Asynchronkompensatoren.

In neuerer Zeit ist in der Literatur öfters über die Asynchronkompensatoren berichtet worden, die im Prinzip die gleiche Aufgabe übernehmen wie die Synchronkompensatoren. Da diese Maschinen weniger bekannt sind, möchte ich auf deren Aufbau und Wirkungsweise kurz eintreten.

Es sei zunächst erläutert, weshalb man trotz den langjährigen guten Resultaten mit Synchronmaschinen auf den Gedanken kam, für den gleichen Zweck andere Maschinen zu bauen. Es gibt heute Anlagen, in welchen durch den Zusammenschluss mit anderen Kraftwerken die Oelschalter, Stromwandler und Trenner, sowie auch die Sammelschienen und in einzelnen Fällen sogar die Transformatoren bei Kurzschluss bis an die Grenze ihrer mechanischen Festigkeit beansprucht werden. Synchronkompensatoren liefern bei Kurzschluss, wie ein Generator, einen Kurzschlussstrom. Bei solchen Anlagen, die bereits voll beansprucht sind, ist es von grösstem Interesse, durch die Aufstellung von notwendigen Kompensatoren den Kurzschlussstrom nur um ein Minimum zu vergrössern. Eine Synchronmaschine ergibt einen relativ hohen Stosskurzschlussstrom, weil zu deren Begrenzung zum grössten Teil nur die Statorstreuung in Betracht kommt, da der Rotor, der zum Teil aus massivem Material besteht, durch die entstehende Wirbelstrombildung einer Verlagerung des magnetischen Flusses, wie er für die Bildung des Stosskurzschluss-

stromes notwendig ist, einen starken Widerstand entgegenstellt. In gleicher Weise wirken auch eventuell vorhandene Dämpferwicklungen, d. h. auch sie wirken im Sinne des Festhaltens des magnetischen Flusses. In dieser Beziehung haben die Asynchronmaschinen einen günstigeren Aufbau, indem die Streuung im Rotor zur Begrenzung des Stosskurzschlussstromes mitwirken kann, und da ferner die Rotoren aus Dynamoblech bestehen, erlauben sie leichter eine rasche Verlagerung des magnetischen Flusses. Während die Verhältnisse für die Berechnung des Stosskurzschlussstromes quantitativ nicht ganz eindeutig erfasst werden können, steht doch fest, dass der Dauerkurzschlussstrom bei den Synchronmaschinen, bedingt durch die Gleichstromerregung, immer einen positiven Wert hat, während er bei der Asynchronmaschine durch den Wegfall der Erregung bei Kurzschluss zu Null wird.

Der Asynchronkompensator kann ohne Aenderung in der Dimensionierung mit gleich viel Leistung induktiv und kapazitiv belastet werden. Wie weit dies ausgenützt werden darf und auch wirtschaftlich Vorteile bietet, hängt zur Hauptsache mit den Netzverhältnissen zusammen und zwar hauptsächlich mit der Grösse des Ladestromes der Uebertragungsanlage.

1. Aufbau. Der mechanische Aufbau eines Asynchronkompensators ist im wesentlichen gleich demjenigen eines gewöhnlichen Asynchronmotors. An die Schleifringe desselben wird irgend eine Kompensationseinrichtung angeschlossen.

Nach der Bauart Brown, Boveri & Cie. besteht diese aus einem Kompensator, System Scherbius, welcher über einen Frequenzumformer gespeist wird, gemäss Schema Fig. 11. Während der Frequenzwandler an die starre Kupplung mit dem Hauptmotor gebunden ist, kann die Scherbiusmaschine, je nach den Verhältnissen, ebenfalls mit dem Motor gekuppelt werden, oder wenn eine andere Tourenzahl vorteilhafter ist, auch einzeln angetrieben werden.

2. Anlauf. Der Anlauf des Asynchronkompensators geschieht im Prinzip wie der eines gewöhnlichen Asynchronmotors mit Hilfe eines Rotorwiderstandes. Nach erreichter Tourenzahl wird der Rotorschalter auf den bereits sich im Betrieb befindlichen Scherbiuskompensator umgelegt. Um starke Stromstösse zu vermeiden, darf im Moment der Umschaltung der Phasenkompensator nicht voll erregt sein, weshalb in den Stromkreis zwischen Frequenzumformer und Phasenkompensator ein Widerstand 8 gelegt ist, der nach erfolgter Zuschaltung des Kompensators stufenweise ausgeschaltet wird, bis die volle Erregung erreicht ist. Erst dann kann die Regulierung der Blindleistung beginnen.

Die beschriebene Anlassmethode ist ohne weiteres zulässig bei kleinen und mittleren Maschinen. Bei grossen Maschinen hat sich dagegen das Bedürfnis geltend gemacht, die Rotorspannung höher zu wählen, um für den Kollektor des Phasenkompensators einen kleineren Strom zu bekommen. Damit wird aber auch die Rotorstillstandsspannung erhöht. Um aber nicht unnütze Isolation in den Rotor hineinbringen zu müssen, wurde ein Anlasstransformator vorgesehen, der dem Asynchronkompensator während der Anlassperiode eine reduzierte Spannung zuführt, womit auch die Stillstandsspannung reduziert wird. Bei erreichter Tourenzahl kann dann der Kompensator auf volle Spannung umgelegt werden und der weitere Anlassvorgang ist mit dem beschriebenen identisch.

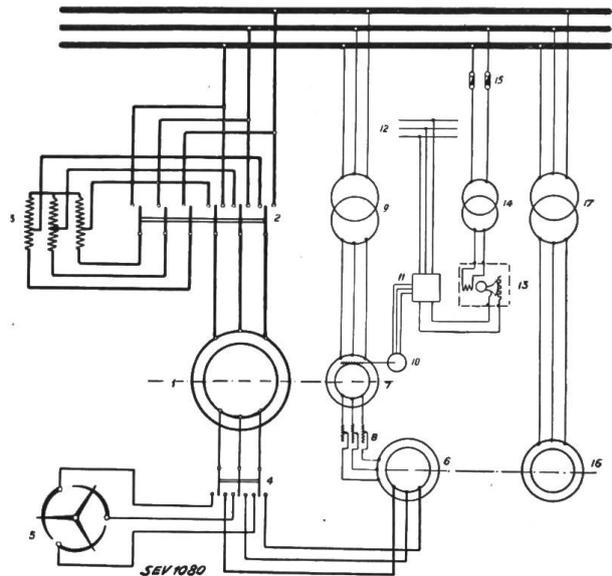


Fig. 11.

Schema eines Asynchron-Phasenkompensators.

3. *Betrieb.* Die Veränderung der Blindleistung wird durch eine Verdrehung der Erregerspannung bewirkt, was durch eine einfache Verschiebung einer Bürstenbrücke des Frequenzumformers erreicht wird. Bei einer Verdrehung der Erregerspannung um 180° el. ändert sich die Leistung des Kompensators von Vollast induktiv bis Vollast kapazitiv. Diese Regulierung bedingt eine kleine Veränderung der Tourenzahl der Asynchronmaschine, welche jedoch absolut belanglos ist.

Es gibt noch andere Methoden, die Blindleistung der Asynchronmaschine zu regulieren, auf die einzutreten hier zu weit führen würde.

Hinsichtlich Stabilität ist die Asynchronmaschine sehr günstig, da sie in jedem Betriebszustand ihren Asynchroncharakter beibehält, so dass weder bei Frequenzschwankungen noch bei Spannungsschwankungen Befürchtungen für das Aussertrittfallen begründet wären.

Soll mit dem Asynchronkompensator eine Spannungsregulierung ausgeführt werden, so wirkt, wie dies im Schema zu ersehen ist, ein Schnellregler auf einen Drehmagnet und dieser seinerseits auf einen kleinen Motor, der die Bürstenverstellung am Frequenzumformer besorgt. Die Verluste eines Asynchronkompensators resp. dessen Wirkungsgrad ist inkl. Regulierung, wie angestellte Vergleiche ergeben haben – entgegen tendenziösen Angaben, die in der Literatur zu finden sind – angenähert gleich demjenigen der Synchronkompensatoren, so dass in dieser Beziehung weder für das eine noch für das andere System nennenswerte Vorteile vorhanden sind. Fig. 12 zeigt einen ausgeführten Asynchronkompensator von 10 000 kVA auf dem Versuchsstand. Man erkennt darauf auch den starr gekuppelten Frequenzumformer mit der Bürstenverstellung. Der Phasenkompensator resp. die Scherbiusmaschine ist bei dieser Ausführung von einem separaten Motor angetrieben und auf dem Bilde nicht zu sehen.

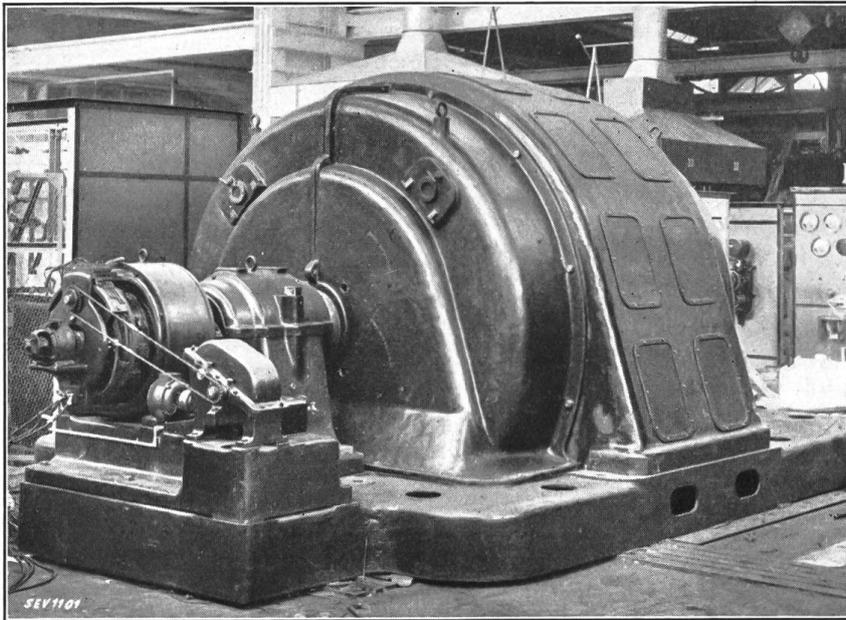


Fig. 12.
Asynchron-Phasenkompensator für 10 000 kVA.

Reihenfolge ausgeführt werden darf und dadurch einige Anforderungen an die Bedienung stellen würde, wurde dasselbe in vorliegenden Falle ganz automatisch vorgesehen, so dass die Betätigung eines einzigen Kontaktgebers genügt, um die Gruppe inkl. Regulierung in Betrieb zu setzen, was auch die Gewähr gibt, dass keine falschen Schaltmanöver gemacht werden können.

Die konstruktive Ausführung des Rotors ist identisch mit dem Rotor eines Asynchronmotors. Die etwas hohe Strombelastung der Schleifringe hat zur besseren Kühlung derselben zu einer Spezialausführung geführt. Der in Fig. 12 gezeigte Asynchronkompensator ist seit einiger Zeit in anstandslosem Betrieb.

Ich möchte hier weiter nicht auf die Vor- und Nachteile der beiden Maschinentypen (Asynchron- und Synchronkompensatoren) eintreten, da eine technische und wirtschaftliche Beurteilung hauptsächlich nur in engem Zusammenhang mit den

Netzverhältnissen und Bedienungsverhältnissen möglich ist. Ich habe eine kurze Skizze der charakteristischen Merkmale des mechanischen Aufbaues des Anlaufes und des Betriebes beider Maschinentypen gegeben, die immerhin in konkreten Fällen und bei Kenntnis der Betriebsbedingungen erlauben zu beurteilen, welche der beiden Lösungen sich als zweckmässiger erweisen wird.

Der Vollständigkeit halber seien auch noch kurz die leerlaufenden Synchron-Induktionsmotoren genannt, die auch noch für die Grosskompensation verwendet werden können. Diese werden asynchron mit einem Rotorwiderstand angelassen und nach Erreichen der Tourenzahl wird die Gleichstromerregung zugeschaltet, so dass sich die Maschine nachher analog verhält wie ein Synchronkompensator. Diese Lösung erscheint auf den ersten Blick bestechend, indem sie die einfache Anlassmethode der Asynchronmaschine mit der leichten Regulierung der Synchronmaschine verbindet. Leider aber besitzt diese Lösung nicht nur die Vorteile der beiden Typen, sondern auch Nachteile. Wird die Stillstandsspannung auf ihrem normalen Wert belassen, so ergeben sich sehr grosse Rotorströme und erschweren beträchtlich die Reguliermöglichkeit, so dass man sich zu deren Behebung besonderer Anlasswicklungen bedienen muss, welche die Konstruktion wesentlich komplizieren. Auch haben die Synchron-Induktionsmotoren ein kleineres Kippmoment als Synchronmaschinen. Den asynchronen Charakter nehmen sie nur an, wenn bei Ueberschreiten des Kippmomentes die Erregung geöffnet wird, sonst pendeln sie mit grossen Stromstössen.

Wie man sieht, sind die Vorteile zum grossen Teil nur scheinbar, es ist dies auch der Grund, weshalb sie bis heute für Grosskompensation mit notwendiger Reguliermöglichkeit die Synchronkompensatoren nicht zu verdrängen vermochten.

B. Klein-Kompensation.

Mit der Kompensation der grossen Uebertragungsleitung und entsprechender Regulierung mit Bevorzugung der Spannungsregulierung ist jedoch das $\cos\varphi$ -Problem noch nicht gelöst. Es bestehen heute noch eine grosse Zahl von Verteilanlagen der Mittel- und Niederspannung in Städten und Fabrikanlagen, deren grösste Sorgen heute noch die Folgen eines schlechten Leistungsfaktors sind, die sich hauptsächlich durch überlastete Transformatoren und Leitungen und damit stark erhöhte Uebertragungsverluste äussern. Die Tendenz, auf diesem Gebiete eine Verbesserung anzustreben, ist in den in den Stromlieferungsverträgen in irgend einer Form aufgenommenen $\cos\varphi$ -Klauseln zu erkennen. Ich möchte hier nicht auf die Mannigfaltigkeit der verschiedenen $\cos\varphi$ -Tarife eingehen. Sicher ist, dass sie alle anstreben, den Strombezüger in berechtigter Weise für eine eigene Blindstromlieferung resp. für die Reduktion derselben aus dem Bezugsnetz finanziell in irgend einer Form zu interessieren.

Wie bereits erwähnt, kann der Abonnent den $\cos\varphi$ -Tarif befriedigen, indem er:

1. den für seine Anlage notwendigen Blindstrom selbst erzeugt, oder:
2. seine Verbrauchseinrichtungen so ändert, dass sich der Blindstrombezug aus dem Netz reduziert.

Im ersten Fall handelt es sich um die sog. Zentralkompensation, im zweiten um die verteilte Kompensation.

Welche der beiden Methoden die zweckmässigere ist, hängt sehr mit den Netzverhältnissen und der Art der Verbraucher zusammen und muss von Fall zu Fall untersucht werden. Es sollen an dieser Stelle nur die hauptsächlichsten Mittel angegeben werden, die heute für diesen Zweck auf dem Markte sind.

I. Zentral-Kompensation.

Wird an einem oder mehreren Schwerpunkten der Verteilung die Kompensation durchgeführt, so werden dort Einrichtungen aufgestellt, die nur den Zweck haben, Blindstrom zu liefern. Hierfür eignen sich bis zu Grössen von einigen

100 kVA Synchron-Induktionsmotoren, indem sie in einfacher Weise angelassen werden können und für die Erregung noch keinen für die Regulierung zu grossen Strom benötigen.

Natürlich können auch ohne weiteres Synchron-Kompensatoren verwendet werden, die jedoch für diese Grösse in der Regel eher etwas teurer sind. Um die Anlassapparatur der Synchron-Kondensatoren solcher Grösse zu vereinfachen, können dieselben direkt über eine entsprechend dimensionierte Drosselspule ans Netz angelegt werden, indem diese dann nach erreichter Tourenzahl einfach überbrückt wird. Die Blindstromerzeugung wird mit der Erregung je nach dem Stromlieferungsvertrag entweder auf einen konstanten Wert oder auch auf einen konstanten $\cos \varphi$ eingestellt. Die erste Art der Regulierung wird durch eine feste Einstellung am Magnetregulator erreicht, die Regulierung auf konstanten $\cos \varphi$ mit einem $\cos \varphi$ -Regler, der von Strom- und Spannungswandler vom Netz aus gesteuert wird.

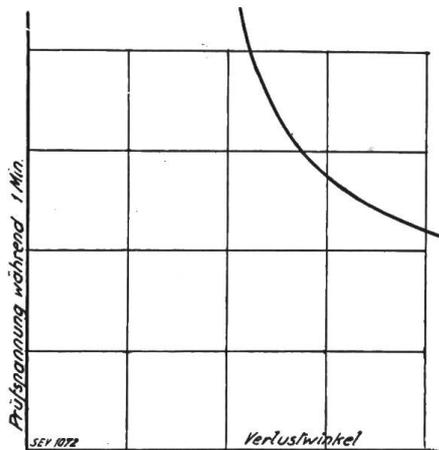


Fig. 13.

Abhängigkeit der Prüfspannung von den dielektrischen Verlusten.

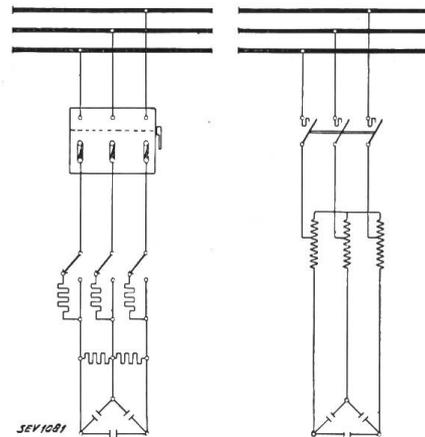


Fig. 14.

Schema für den Anschluss von statischen Kondensatoren mit und ohne Autotransformator.

In neuerer Zeit ist die Verwendung von statischen Kondensatoren aus wirtschaftlich berechtigten Gründen sehr in den Vordergrund getreten. Elektrisch gesprochen ist die Verwendung derselben nichts anderes als eine Parallelschaltung einer bestimmten Kapazität zu den verschiedenen Verbrauchern. Im mechanischen Aufbau sind die Kondensatoren sehr einfach. Um die notwendige Kapazität bei Betriebsfrequenz zu erreichen, werden bei den mir im Detail bekannten Ausführungen Rollen aus Spezialpapier mit zwei Metallbelägen gewickelt. Die beiden Beläge werden zwischen die verkettete Spannung geschaltet. Je nach der damit erreichten Kapazität wird vom Kondensator somit ein kapazitiver Strom aus dem Netz aufgenommen, der sich geometrisch zum induktiven Belastungsstrom addiert und damit die gewünschte Phasenverbesserung zur Folge hat. Speziell wichtig ist die Verwendung einer besonderen Papierqualität sowie die sehr sorgfältige Ausführung des Anschlusses an die Beläge zur Vermeidung lokaler Erwärmungen. Die gewickelten Rollen werden unter Vacuum entlüftet und mit Oel bester Qualität imprägniert und nachher die einzelnen Rollen je nach der gewünschten Kapazität parallel geschaltet und in einem Eisenkasten eingebaut und luftdicht mit einem Blechdeckel mit zwei Durchführungen abgeschlossen und verlötet. Damit ist die beste Gewähr für dauernde Haltbarkeit geleistet.

Grösste Aufmerksamkeit muss auch der Prüfung der Kondensatoren geschenkt werden und darunter speziell der Messung der dielektrischen Verluste, da diese die Erwärmung der Kondensatoren bestimmen und damit deren Lebensdauer. Ein Kondensator, der zu grosse Verluste hat und damit eine zu grosse Erwärmung aufweist, wird mit grösster Wahrscheinlichkeit bereits zu Anfang des Betriebes

defekt. Interessant ist in dieser Beziehung auch die Kurve Fig. 13, die die Durchschlagsspannung in Abhängigkeit des Verlustwinkels angibt. Wie man erkennt, nimmt die Durchschlagsspannung mit zunehmendem Verlustwinkel sehr rasch ab; man sieht daraus auch, wie wichtig die eben genannte Verlustmessung für die Qualitätsprüfung eines Kondensators ist. Neben dieser Prüfung sind die Kondensatoren auch einer erhöhten Betriebsspannung mit Wechselstrom auszusetzen. Es ist jedoch sehr ratsam, die Anforderung in dieser Beziehung nicht zu hoch zu stellen, da bekanntlich der Kapazitätsstrom proportional mit der Spannung wächst, die Leistung also mit dem Quadrat derselben, so dass dadurch leicht zu grosse Erwärmungen entstehen, die dem Kondensator schaden können; dagegen sollen die Kondensatoren zur Kontrolle der Durchschlagsspannung einer Prüfung mit angemessener Gleichspannung unterzogen werden.

Der Anschluss an das Netz geschieht am zweckmässigsten nach einer Schaltung gemäss Fig. 14. Um Stromstösse auf das Netz zu vermeiden, werden kleine Vorschaltwiderstände verwendet, und um dem Kondensator nach erfolgter Abschaltung Gelegenheit zur Entladung zu geben, werden Entladewiderstände eingebaut. Ohne diese würden die Kondensatoren nach der Abschaltung ihre Ladung behalten und sich bei eventl. Berührung der Klemmen über dem Körper entladen, was sehr gefährliche Folgen haben könnte.

Ist eine Regulierung der Blindleistung notwendig, so kann dies durch Zu- und Abschaltung von einzelnen Elementen geschehen. Eine kontinuierliche Regulierung wie z. B. bei Synchron-Kompensatoren lässt sich nicht mit einfachen Mitteln erreichen.

Der Grund, warum die statischen Kondensatoren so an Interesse gewonnen haben, ist der, dass sie eine bedeutend bessere Wirtschaftlichkeit ergeben als irgend eine andere Methode mit rotierenden Maschinen, weil ihre Verluste nur ca. 0,5 % der angegebenen Blindleistung betragen. Die statischen Kondensatoren werden heute hauptsächlich für Nieder- und Mittel-Spannung gebaut. Da die Blindleistung mit dem Quadrat der Spannung wächst, sind die Kondensatoren höherer Spannung relativ billiger als solche niedrigerer Spannung. Andererseits ist der maximal zulässigen Betriebsspannung aus fabrikatorischen resp. Qualitätsgründen des Papiers eine Grenze gestellt, so dass für eine wirtschaftliche Ausführung heute mit den genannten Spannungsgrenzen von wenigen tausend Volt gerechnet werden kann. Ist die Betriebsspannung zu unwirtschaftlich (zu hoch oder zu nieder) für einen direkten Anschluss, so werden die Kondensatoren zweckmässig über Autotransformatoren ans Netz angelegt.

Fig. 15 gibt eine approx. relative Zusammenstellung der Gestehungskosten von statischen Kondensatoren und rotierenden Kompensatoren für verschiedene Leistungen. Wie der Zusammenstellung entnommen werden kann, sind die Anschaffungskosten der statischen Kondensatoren heute noch bedeutend grösser und

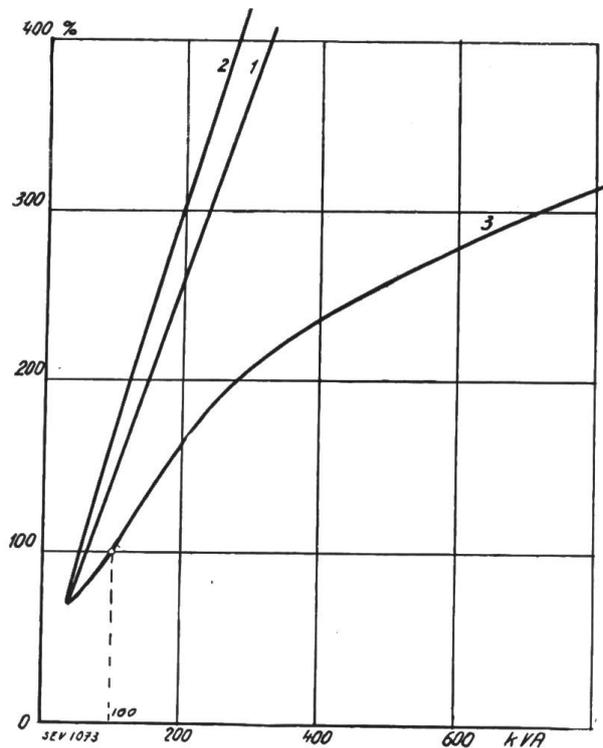


Fig. 15.

Relative Gestehungskosten von rotierenden Kompensatoren und statischen Kondensatoren.

- Kurve 1 Kondensator-Batterie direkt angeschlossen.
- Kurve 2 Kondensator-Batterie über Autotransformator angeschlossen.
- Kurve 3 Synchron-Induktionsmotor.

trotzdem ergibt sich eine weit bessere Wirtschaftlichkeit, wie aus Fig. 16 entnommen werden kann. Es sind hier die relativen Betriebskosten von rotierenden Kompensatoren nach der Bauart der Synchron-Induktionsmotoren und der statischen

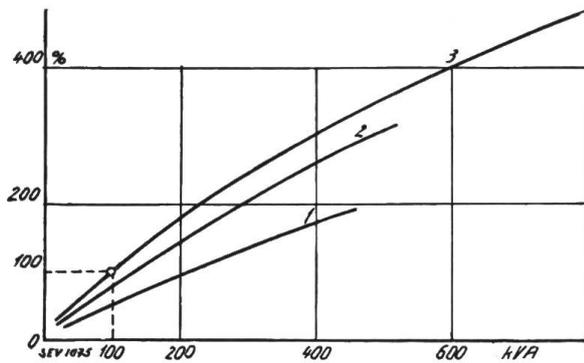


Fig. 16.

Betriebskosten von rotierenden Kompensatoren und statischen Kondensatoren bei einem kWh-Preis von 10 Rp.

- Kurve 1 Kondensator-Batterie direkt angeschlossen.
- Kurve 2 Kondensator-Batterie über Autotransformator angeschlossen.
- Kurve 3 Synchron-Induktionsmotor.

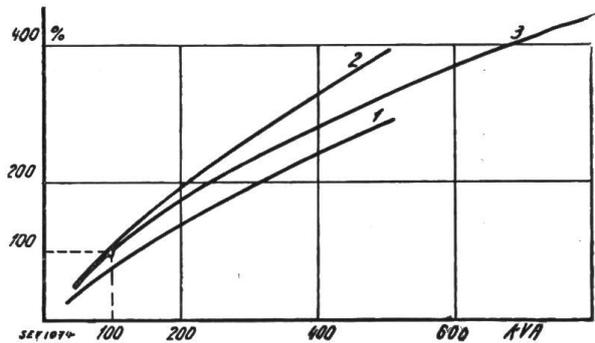


Fig. 17.

Betriebskosten von rotierenden Kompensatoren und statischen Kondensatoren, wie in Fig. 16, jedoch für einen kWh-Preis von 5 Rp.

- Kurve 1 Kondensator-Batterie direkt angeschlossen.
- Kurve 2 Kondensator-Batterie über Autotransformator angeschlossen.
- Kurve 3 Synchron-Induktionsmotor.

Kondensatoren einander gegenüber gestellt mit den in Fig. 15 angegebenen Gestehungskosten und einer Amortisation und Verzinsung von 20 % mit einem kWh-Preis von 10 Cts. In Fig. 17 sind dieselben Vergleichskurven nochmals aufgetragen mit den gleichen Annahmen für die Gestehungskosten, Amortisation und Verzinsung, jedoch für einen kWh-Preis von 5 Cts. Fig. 18 zeigt die innere Ausführung, ich möchte sagen den aktiven Teil eines Mikafilkondensators, während Fig. 19 die fertig zusammengestellten Elemente wiedergibt. Diese werden dann zu mehreren je nach der Grösse der Batterie in einem passenden Eisengestell untergebracht, wie aus Fig. 20 hervorgeht.

II. Verteilte Kompensation.

Im Gegensatz zu der Zentralkompensation sieht die verteilte Kompensation, die Erzeugung des Blindstromes oder die Reduktion des Blindstrombezuges aus dem Netz bei jedem einzelnen Stromverbraucher vor.

Dies wurde seinerzeit in Erkenntnis, dass der grösste Anteil der $\cos \varphi$ -Verschlechterung von den Induktionsmotoren stammt, dadurch zu erreichen versucht, die sog. kompensierten Motoren einzuführen, von welchen eine grössere Anzahl verschiedener Systeme auf den Markt kamen.

Mit welchem Preis und mit welcher Wirkungsgradverschlechterung, d. h. mit welcher Wirtschaftlichkeit mit diesen Motoren die $\cos \varphi$ -Verbesserung erkaufte wird, geht deutlich aus der bereits genannten Arbeit des Herrn Dir. Schiesser im Bulletin des S. E. V. 1924 hervor, so dass ich darauf nicht mehr eintreten will. Dagegen möchte ich zur Unterstreichung der obgenannten Angaben aus dem Jahrbuch der Verkehrs-Direktion 1927 der Berliner Städt. Elektrizitätswerke den folgenden Abschnitt erwähnen:

„In einem grösseren Industriebetrieb wurden 28 Motoren von 1,5—30 kW, die von acht Firmen stammen, eingebaut und nach 16 Monaten Betriebszeit seitens der BEWAG untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass den meisten kompensierten Motoren noch eine Reihe von Mängeln anhaften, die die Betriebssicherheit bei nicht sehr sorgfältiger Behandlung herabsetzen und gleichzeitig auch bei einigen Typen zu einer erheblichen Verschlechterung der Kompensationswirkung beitragen. So wurde gemessen, dass etwa bei 50 % der Motoren der Leistungsfaktor schlechter als der Soll-Leistungsfaktor war, was auf Verschiebung der Bürstenbrücke, Verschmutzung der Kollektoren und ähnliches zurückzuführen ist. Besonders die klei-

neren Motortypen haben sich im Betriebe nicht gut bewährt, da die sehr gedrängte Bauart der kleinen Maschinen naturgemäss bei dem nicht ganz einfachen Aufbau eines kompensierten Motors die Betriebssicherheit herabsetzen muss.“

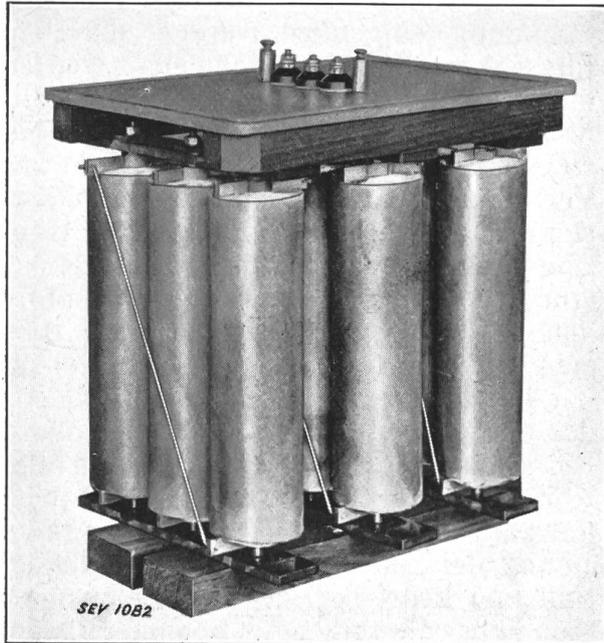


Fig. 18.
Ausführung eines Kondensators.

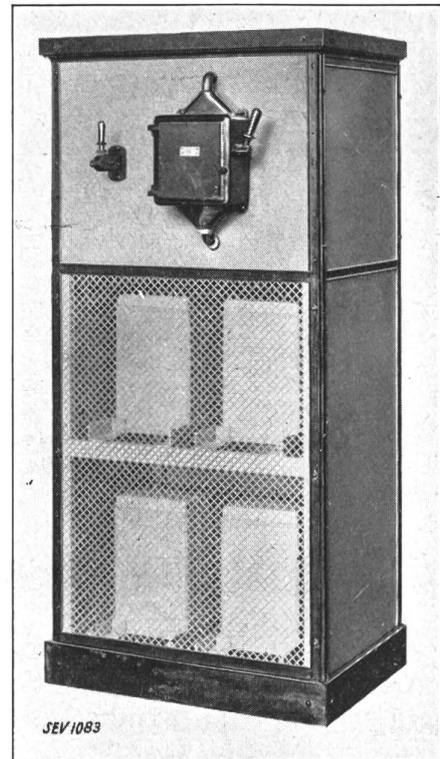


Fig. 20.
Zusammengebaute Kondensatorbatterie.

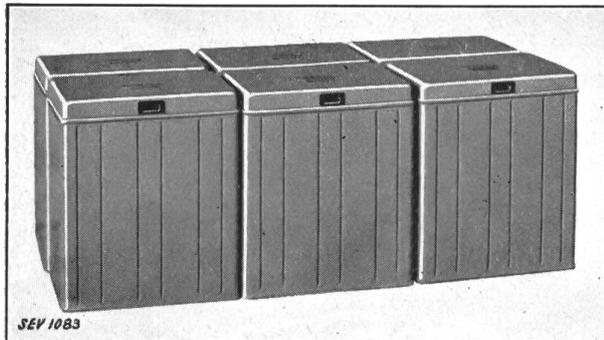


Fig. 19.
Fertig zusammengebautes Kondensatorelement.

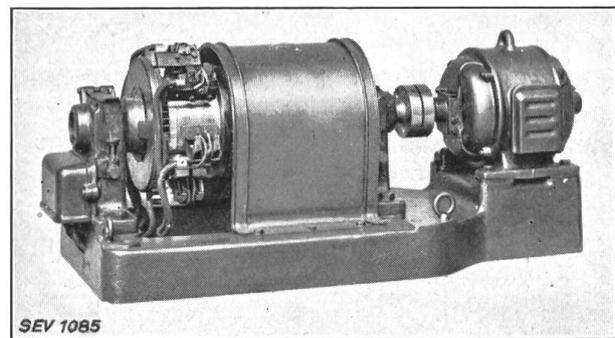


Fig. 21.
Statorloser Phasenkompensator.

Dagegen ist die Verwendung der Synchron-Induktionsmotoren in der letzten Zeit eher in den Vordergrund getreten. Sie können ohne weiteres mit $\cos \varphi = 1$ oder sogar übererregt mit voreilem Leistungsfaktor arbeiten. Speziell zu empfehlen sind sie für ruhige Betriebe mit möglichst konstanter Belastung. Für Betriebe mit grossen Stossbelastungen sind sie wegen dem kleineren Kippmoment nicht besonders geeignet.

Die grosse Anzahl Induktionsmotoren, die heute im Betriebe sind, können natürlich aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen nicht ohne weiteres ersetzt werden. Dagegen können einzelne von diesen eventuell mit einem Phasenkompensator versehen werden, womit der Motor auf $\cos \varphi = 1$ kompensiert werden kann und zugleich das Kippmoment erhöht wird.

Es gibt eine grössere Anzahl von Kompensatorsystemen. Ich möchte jedoch hier nur auf zwei prinzipiell verschiedene Typen eintreten:

1. *Der statorlose Phasenkompensator.* Die Magnetisierungsstromaufnahme aus dem Netz kann bei einem Induktionsmotor dadurch vermieden werden, dass derselbe im Rotor erzeugt wird. Damit der Strom im Rotor als Magnetisierungsstrom wirkt, muss er gegenüber dem Statorstrom eine Voreilung besitzen. Damit jedoch ein voreilender Strom im Rotor entsteht, muss in demselben eine entsprechende Spannung eingeführt werden, die vom Phasenkompensator geliefert werden muss. Er besitzt, wie Fig. 21 zeigt, keinen Stator, sondern nur einen Rotor mit einer Gleichstromwicklung. Diese ist zur Verringerung des magnetischen Widerstandes von einem lamellierten Eisenring umgeben. Speist man diesen Rotor von den Schleifringen des Hauptmotors aus über drei um 120° versetzte Bürsten mit Drehstrom, so entsteht im Anker ein Drehfeld, das mit der Frequenz des speisenden Stromes im Raum rotiert. Bei Stillstand wirkt die Wicklung des Kompensators wie eine Drosselspule. Mit zunehmender Drehzahl des Ankers

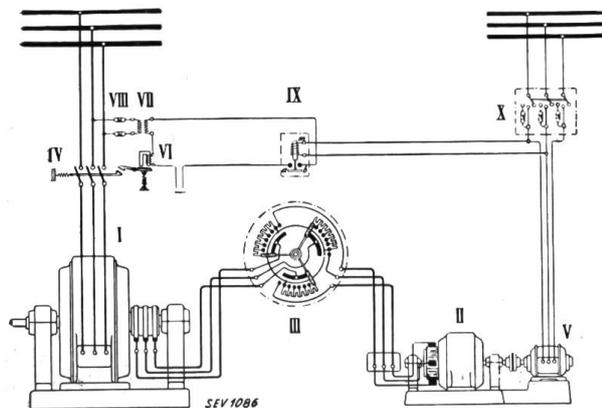


Fig. 22.
Schema für den Anschluss eines statorlosen Phasenkompensators.

im Sinne seines Drehfeldes nimmt die Spannung der Selbstinduktion beständig ab und erreicht beim Synchronismus den Wert Null und kehrt bei weiter zunehmender Tourenzahl ihr Vorzeichen um, so dass nunmehr die erzeugte Spannung dem erregenden Strom um 90° voreilt. Diese Spannung ist es nun, die im Rotor des Hauptmotors einen Strom erzeugt, der magnetisierend wirkt, so dass derselbe nicht mehr vom Netz bezogen werden muss. Der Antrieb kann beliebig entweder vom Hauptmotor aus, oder mit einem speziellen Antriebsmotor geschehen, wobei die Schaltung nach Fig. 22 ausgeführt wird. Die Leistung des Antriebsmotors ist sehr gering und beträgt ca. $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{3}$ % des Hauptmotors. Ein Motor mit angeschlossenem Phasenkompensator arbeitet von Vollast bis ca. Halblast mit $\cos \varphi = 1$; von Halblast an nimmt die Kompensation langsam ab und erreicht bei Leerlauf des Motors den Wert Null, d. h. sie ist nicht mehr wirksam; der unbelastete Motor muss somit seinen Magnetisierungsstrom mit und ohne Kompensator aus dem Netz beziehen.

Wegen dieser Charakteristik eignet sich der statorlose Phasenkompensator am besten für Motoren, die möglichst dauernd mit konstanter Belastung arbeiten, wie dies z. B. bei Pumpenantrieb zutrifft.

2. *Der Nebenschluss-Phasenkompensator.* Es macht sich jedoch oft auch bei Motoren mit stark variabler Belastung das Bedürfnis geltend, ebenfalls volle Kompensation des Motors bei schwacher Belastung zu haben. Um diesem Wunsche gerecht zu werden, wurde von Brown, Boveri & Cie. der Nebenschluss-Phasenkompensator

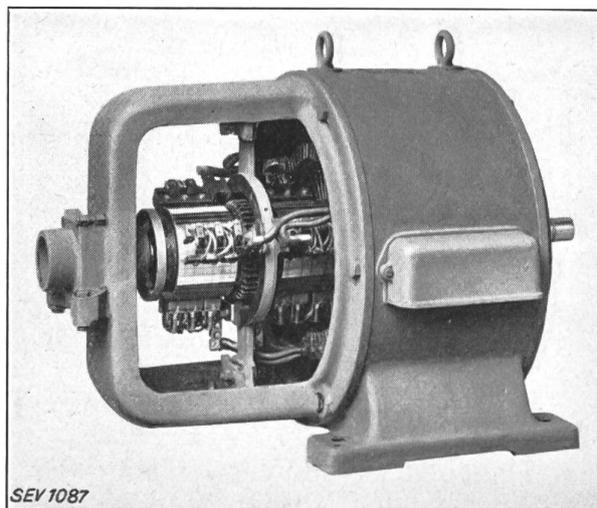


Fig. 23.
Nebenschluss-Phasenkompensator.

tor nach System Scherbius entwickelt. Wie aus Fig. 23 hervorgeht, besitzt dieser Kompensator sowohl einen Rotor wie einen Stator. Der Stator des Kompensators wird, wie auf dem Schaltungschema Fig. 24 zu ersehen ist, vom Rotor des Asynchronmotors erregt und der Kompensator liefert an seinen Rotorklemmen eine solche Spannung, dass sie im Rotor des Hauptmotors einen voreilenden Strom erzeugt, der magnetisierend wirkt. Ich möchte hier nicht weiter auf die Einzelheiten dieser Maschine eintreten, sondern für weitere Details auf die BBC-Mitteilungen, Heft 1, Jahrgang 1925, verweisen. Wichtig ist, dass mit dem Nebenschluss-Phasenkompensator der Motor auch überkompensiert werden kann, und zwar theoretisch bis zu einem beliebigen voreilenden Leistungsfaktor. Praktisch wird jedoch die zulässige Strombelastung im Rotor des Hauptmotors die Grenze der Kompensation festlegen.

Auch zur Einzelkompensation kommt heute der statische Kondensator ernstlich in Betracht, indem er direkt parallel zum Stator des Motors angeschlossen wird. Durch diese Schaltung kann natürlich der vom Motor verlangte Magnetisierungsstrom unabhängig von seiner Belastung durch den Kapazitätsstrom des Kondensators voll kompensiert werden.

Damit habe ich Ihnen eine kurze Skizze gegeben von den hauptsächlichsten Mitteln, die uns heute für die Phasenkompensation zur Verfügung stehen.

Ueber die Verwendung lassen sich nach meiner Ansicht nur ganz allgemeine Richtlinien festlegen. Jeder konkrete Fall muss dennoch auf seine technische und wirtschaftliche Zweckmässigkeit hin einzeln untersucht werden.

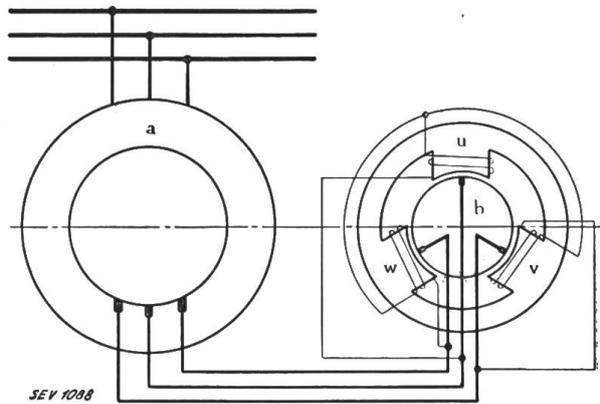


Fig. 24.

Schema eines Nebenschluss-Phasenkompensators.

Literatur-Verzeichnis.

- André Blondel.* Calcul des lignes de transport de force à longue distance. „Lumière Electrique 1909“.
- Dr. Ing. B. Bauer.* Ueber die Verwendung von Synchronmotoren zur Spannungsregulierung am Fernleitungsende. Bull. S.E.V. 1915, No. 5.
- E. Schönholzer.* Ueber eine moderne und praktische Berechnungsmethode sehr langer Hochspannungs-Fernleitungen mit Potentialregelung durch Synchronmotoren. STZ 1922, No. 6 bis 9.
- Fr. Grieb.* Der Synchronkompensator als Spannungsregler. BBC-Mittg. 1925, No. 1.
- E. Schönholzer.* Der leerlaufende Synchronmotor als wirtschaftlicher Spannungsregler von Drehstrom-Fernleitungen. Bull. S.E.V. 1926, No. 4.
- Frank G. Baum.* Transport de grande puissance électrique. Conférence internationale des grands Réseaux électriques à haute Tension. 1929, Rapport No. 98.
- Dr. Ing. M. Schenkel.* Ueber grosse Asynchron-Blindleistungsmaschinen. Elektrizitätswirtschaft 1926.
- Dr. Ing. M. Schenkel.* Blindleistungsmaschinen. ETZ, 1924, No. 45.
Diskussion dieses Artikels. ETZ, 1925, No. 8.
- H. Hartz.* Die eigenerrregte Drehstrom-Erregermaschine und ihr Anwendungsgebiet. Siemens-Zeitschrift, Juli 1927.
- Ing. H. Nissel.* Blindstromkompensation bei Grossabnehmern. ETZ 1928, No. 10.
- Dr. Ing. Seiz.* Neue Schaltungen zur Phasenkompensation und Drehzahlregelung von Induktionsmotoren. BBC-Mittg. 1926, No. 5.
- Dr. Ing. Seiz.* Nebenschluss-Phasenkompensator. BBC-Mittg. 1927, No. 11.