Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 4 (1913)

Heft: 9

Artikel: Die Verbesserung des Leistungsfaktors in Kraftanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Phasenkompensators

Autor: Bauer, Bruno

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056797

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: 22.08.2025

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

Zusammenfassung.

Der Ueberstromschutz wird an typischen Beispielen erläutert und die Grundsätze aufgestellt, nach denen elektrische Anlagen gegen Ueberstrom und damit zusammenhängende Störungen zu schützen sind. Anschliessend daran werden die Charakteristiken der für die behandelten Fälle nötigen Schalter-Auslöserelais aufgestellt und zum Teil diskutiert.

Die Verbesserung des Leistungsfaktors in Kraftanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Phasenkompensators

Bauart Brown Boveri.[1])

Von *Bruno Bauer,* Ing.

I. Der Einfluss des Leistungsfaktors auf die Stromversorgungsanlagen.

Bekanntlich liegt die Ursache des oft recht niederen Leistungsfaktors von Kraftanlagen in den angeschlossenen Induktionsmotoren im Konsumgebiet. Wenn auch dieser für vollbelastete, raschlaufende Motoren an sich stets über $\cos\varphi = 0.85$ liegen wird, lässt doch die grosse Zahl der mit Teilbelastung arbeitenden Motoren die resultierende Phasenverschiebung im Netz oft bis auf $\cos\varphi = 0.6$ herunter sinken, eine Folge des schlechten Leistungsfaktors schwachbelasteter Induktionsmotoren. Der Einfluss der Motorbelastung auf den Leistungsfaktor soll später noch näher erläutert werden.

Der Nachteil des stark phasenverschobenen Netzes wird nun besonders für den Stromlieferanten fühlbar. Dieser wird allgemein im Interesse eines wirtschaftlichen Betriebes der Stromversorgungsanlagen darnach trachten, die in den Primärmotoren des Kraftwerkes verfügbare Energie voll und ganz im Konsumgebiet abzusetzen; für die bestehende Anlage bedeutet dies möglichste Vollbelastung der Maschinengruppen, Transformatoren und Leitungsanlagen. Diese ist nun aber für den elektrischen Teil mit Rücksicht auf die Erwärmung an eine obere Grenze gebunden und findet ihren Ausdruck in der maximalen elektrischen Beanspruchung in KVA, d. h. im Produkt Nutzleistung in KW mal Leistungsfaktor $\cos\varphi$. Nachdem die KW-Leistung das Aequivalent der mechanischen Leistung der Primärmotoren bedeutet, ist der Einfluss des Leistungsfaktors ohne weiteres ersichtlich. Ein Leistungsfaktor kleiner als eins lässt trotz des vollbeanspruchten Generators nicht die volle Primär-Motor-Leistung ins Netz schicken, vielmehr muss, um dies zu ermöglichen, der elektrische Teil der Anlage für eine Leistung dimensioniert werden, die, ganz abgesehen von den Uebertragungsverlusten, grösser ist, als die tatsächlich im Netz konsumierte. Berücksichtigt man, dass die meisten der gebräuchlichen Stromtarife dem Konsumenten lediglich die verbrauchte Nutzleistung in KW verrechnen, nicht aber die vom Netz geforderte KVA-Zahl, so ist leicht einzusehen, dass der Leistungsfaktor die Wirtschaftlichkeit der Stromversorgungs-Anlagen fühlbar beeinflusst.

Bevor wir die Mittel zur Bekämpfung dieses Uebelstandes näher beschreiben, möge vorerst untersucht werden, wo die eigentliche Ursache der Phasenverschiebung im Netz zu suchen ist. Der Induktionsmotor (um den es sich hier lediglich handelt) ist seinem Arbeitsprinzip nach ein Transformator mit dem Stator als Primärseite und dem Rotor als Sekundärseite.[2]) Er fordert daher, gleich wie der ruhende Transformator, neben dem Arbeits-

[1]) Unter teilweiser Benützung der Druckschrift 389 II der A.-G. Brown Boveri & Cie., Baden.

[2]) Der Unterschied gegenüber dem ruhenden Transformator liegt bekanntlich darin, dass sich die Leistung der Primärseite: $i_1 \cdot e_1 \cdot \sim_1$ auf der Sekundärseite in 2 Teile spaltet: der mechanischen Leistung an der Motorwelle und einem Restbetrag in Form elektr. Energie im Sekundärstromkreis $i_2 \cdot e_2 \cdot \sim_2$.

strom seinen Magnetisierungsstrom, der gegenüber ersterem um 90° phasenverschoben ist und daher vom Netz als wattloser Strom zu liefern ist. Für die gegebene Motorausführung ist der Bedarf an Magnetisierungsstrom bezw. Magnetisierungsenergie für alle Belastungen nahezu konstant, es ergibt sich daher ungefähr nachfolgendes Bild, Fig. 1, der Energieverteilung. (In Fig. 1 sind statt der Ströme die zugehörigen Leistungen aufgetragen.) *OA* bedeutet die der Vollast entsprechend aufgenommene Nutzleistung in KW, *AB* der konstante Wert der wattlosen Magnetisierungsenergie; *OB* die tatsächliche Beanspruchung des Netzes in KVA bei Vollast; gegeben als Produkt aus der KW-Leistung *OA* mal dem Leistungsfaktor $\cos\varphi$. Wie ersichtlich, wächst die Phasenverschiebung mit abnehmender Motorbelastung bis zum kleinsten Wert φ_0 bei Leerlauf; diesem entspricht ein Leistungsfaktor von im Mittel $\cos\varphi_0 = 0.15$ für alle Motoren. Die resultierende Phasenverschiebung des Netzes, an das Motoren verschiedenen Belastungszustandes angeschlossen sind, ergibt sich alsdann durch sinngemässes Aneinanderfügen der einzelnen Motordreiecke.

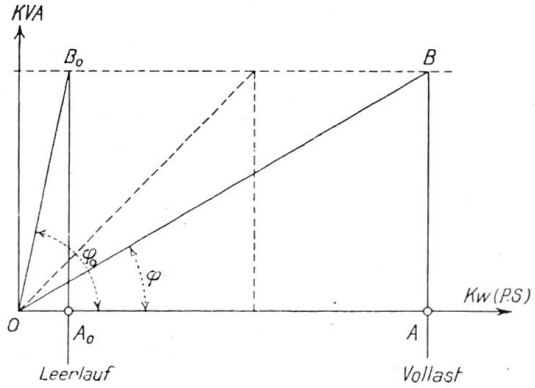

Fig 1.

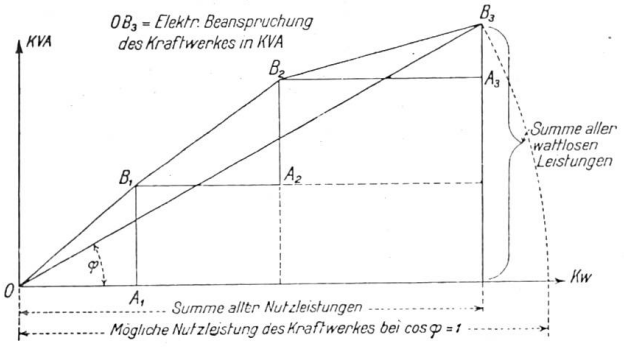

Fig. 2.

Fig. 2 zeigt, dass die elektrische Beanspruchung des Kraftwerkes und der resultierende Netz-Leistungsfaktor durch ein Dreieck gegeben sind, das gebildet ist aus der Summe aller Nutzleistungen der Motoren als die eine Kathete und der Summe aller wattlosen Leistungen als die andere Kathete.

II. Die Verbesserung des Leistungsfaktors.

Um die oben geschilderten Nachteile eines niederen Leistungsfaktors zu beheben, hat man offenbar darnach zu trachten, den Generatoren im Kraftwerk die Lieferung der wattlosen Leistung abzunehmen; sie sind alsdann in der Lage, bei gleicher elektrischer Beanspruchung eine grössere Nutzleistung dem Netz zuzuführen. Siehe Fig. 2. Ganz allgemein ist, gemäss der Theorie des Wechselstromkreises, die Aufhebung einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung nur durch Kompensation möglich, d. h. in unserem Fall, wir müssen Maschinen aufstellen, die vom Netz einen wattlos *vor*eilenden Strom fordern, damit dieser den wattlos *nach*eilenden Magnetisierungsstrom der Motoren kompensieren (aufheben) kann. Man sagt oft auch, die induktive Motorenbelastung des Netzes muss durch eine kapazitive Belastung kompensiert werden. Um den Arbeitsvorgang einfacher zu umschreiben, ist die Wendung gebräuchlich: die Kompensationsmaschinen *liefern* den Magnetisierungsstrom für die Motoren, die Generatoren im Kraftwerk den Arbeitsstrom.

Es stehen uns heute zu diesem Zweck zwei Mittel zur Verfügung.

1. Die Aufstellung von Maschinen im Kraftwerk (oder Unterwerken), die die Lieferung des wattlosen Energiebedarfs des ganzen Netzes (oder Teile desselben) übernehmen.
2. Die Aufstellung von Maschinen in Verbindung mit den Motoren, die sogen. Kompensationseinrichtungen im engeren Sinne, die den Magnetisierungsstrom der einzelnen Motoren an Ort und Stelle liefern.

Im ersteren Falle kommen motorisch arbeitende Synchronmaschinen und Einankerumformer in Frage, die bekanntlich durch Uebererregung das Netz neben dem Arbeits-

strom mit einem wattlos voreilenden Strom belasten, der kompensierend wirkt. Die Dimensionierung dieser Maschinen erfolgt gleich wie für die Generatoren nach Massgabe ihrer elektrischen Beanspruchung in KVA. Diese ist nun im Fall der Ueberkompensation [1]) auch grösser als die der mechanischen Nutzleistung entsprechende KW-Belastung. Es soll im Nachfolgenden kurz gezeigt werden, wie sich die elektrische Beanspruchung für eine gewünschte Netz-Verbesserung graphisch bestimmen lässt.

Es bedeute: L_N die Nutzleistung des Netzes in KW.
$\cos\varphi_N$ der heutige Leistungsfaktor des Netzes.
$\cos\varphi_{N1}$ der gewünschte Leistungsfaktor des Netzes.
L_M die gewünschte Nutzleistung des anzuschliessenden Synchronmotors in KW (PS).

Die Frage ist, wie gross wird die Beanspruchung des Motors sein und wie stark voreilend muss dieser arbeiten.

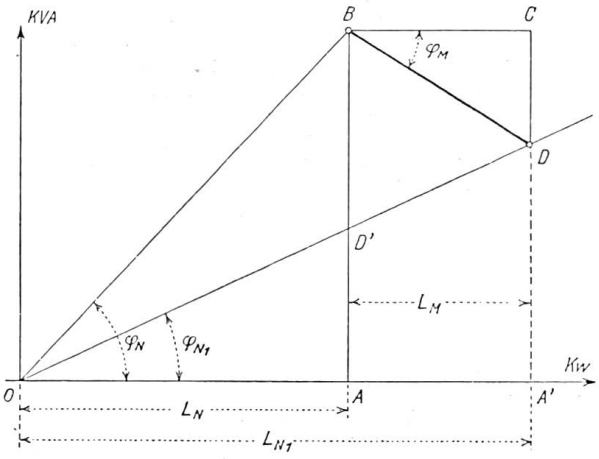

Fig. 3.

OAB bedeute in Fig. 3 ähnlich wie in Fig. 2 das Leistungsdreieck des Netzes vor Anschluss des Synchronmotors. Wir zeichnen zuerst den dem neuen Leistungsfaktor entsprechenden Winkel φ_{N1} ein und fügen dann, wie in Fig. 2 gezeigt, das neue Motordreieck an *B* an. Von diesem kennen wir vorerst nur die KW-Komponente (aus der *PS*-Leistung umgerechnet) *BC*. Der Fusspunkt des Lotes von *C* auf den Schenkel des Winkels φ_{N1} schneidet dann offenbar *CD*, die wattlos *vor*eilende Komponente des Synchronmotors aus; d. h. die Hypothenuse *BD* ergibt in KVA die erforderliche elektrische Beanspruchung des Motors; Winkel *CBD* zugleich die Phasenverschiebung resp. die Voreilung. Trotzdem nun die Nutzleistung des Kraftwerks auf $OA' = L_{N1}$ gestiegen ist, sind die Generatoren um den Betrag *CD* der wattlosen Leistung entlastet worden.

Soll das Netz kompensiert werden, ohne dass gleichzeitig Bedarf an mechanischer Leistung vorliegt, so muss die Kompensationsmaschine leer laufen. Sie hat dann in unserem Fall den Betrag *BD'* (Fig. 3) an wattloser Leistung zu übernehmen und ist daher für diesen Betrag in KVA zu dimensionieren. Trotzdem nun keine mechanische Leistung abgegeben wird und daher auch keine KW-Leistung vom Netz zu liefern ist, erreicht die Beanspruchung der Maschine ungefähr denselben Wert wie im obigen Fall, d. h. es wird in beiden Fällen das gleiche Modell zur Anwendung kommen. Es folgt hieraus schon, dass es unter Umständen fraglich ist, ob die solcherweise durchgeführte Verbesserung des Leistungsfaktors dem Stromlieferanten tatsächlich wirtschaftliche Vorteile bietet. Auch darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass die Installierung solcher Kompensationsmaschinen die Betriebskosten belastet, zumal bei grossen Einheiten, die einen etwas umständlichen Anlassvorgang benötigen. Es mag hier schon erwähnt sein, dass natürlich die Betriebskosten der Kompensationseinrichtungen zweiter Art dem Stromkonsumenten zur Last fallen, nachdem diese ja beim Motor zur Aufstellung gelangen. Zum Schluss sei noch darauf hingewiesen, dass der Betrieb rein kapazitiv arbeitender Synchronmaschinen stets mit etwelchen Schwierigkeiten verbunden ist; sie neigen in gewissen Fällen zur Selbsterregung, auch lassen sie, wie jede Kapazität, die höheren Harmonischen des Betriebsstromes hervortreten.

Die in zweiter Linie genannten Kompensationseinrichtungen bezwecken, nach früherem, den Bedarf an wattlos nacheilendem Strom an Ort und Stelle, beim Motor, zu kompen-

[1]) Ueberkompensation, weil der Synchronmotor bei normaler Erregung schwach nacheilend arbeitet; er ist kompensiert, wenn er den Leistungsfaktor $\cos\varphi = 1$ aufweist, überkompensiert, wenn er voreilend schreitet.

sieren. Es kann sich daher wiederum nur darum handeln, dem Netz einen wattlos voreilenden Strom zu entziehen und zwar in diesem Falle *durch den Motor selbst*, dank seiner Verbindung mit der Kompensationseinrichtung, die notwendigerweise den Charakter einer Kapazität aufweisen muss.

Bei dem Kompensationssystem der *A. G. Brown, Boveri & Cie.*[1]) das sich in der Praxis bereits in zahlreichen Ausführungen bewährt hat, wird als Phasenkompensator eine besondere mehrphasige Kollektormaschine verwendet, die an die Schleifringe des Induktionsmotors angeschlossen wird. Der Rotor des Kompensators (siehe Fig. 4) trägt eine an einen

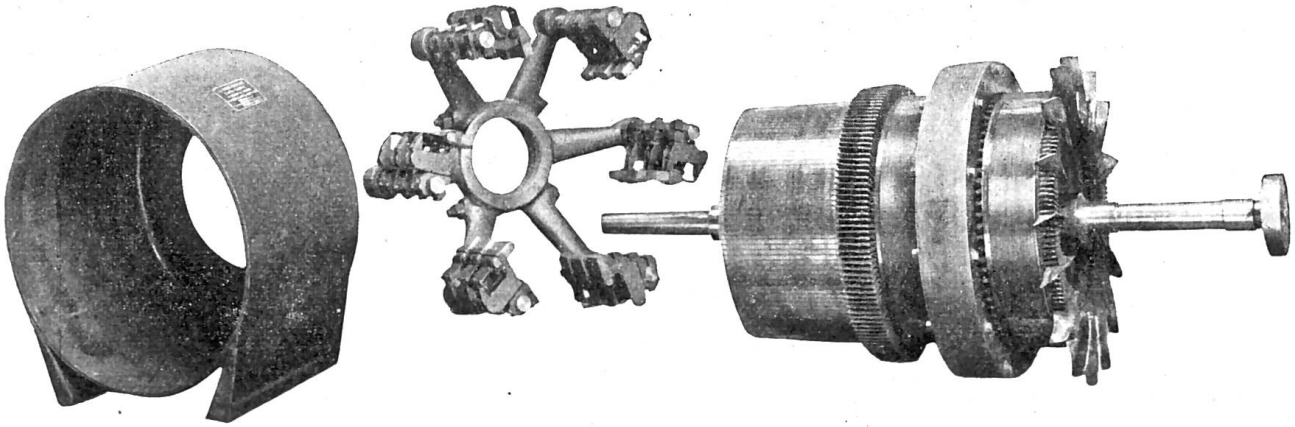

Fig. 4.

Kollektor angeschlossene Trommelwicklung, deren Stäbe in die Löcher eines Blechpaketes verlegt sind. Fliesst den auf dem Kollektor schleifenden Bürsten ein Mehrphasenstrom, z. B. der Läuferstrom des Hauptmotors zu, so wirkt die Anordnung bei Stillstand als Drosselspule und erzeugt als solche einen Reaktanzabfall, der eine Nacheilung des Stromes herbeiführt. Bei gegebenem Strom ist dieser Reaktanzabfall nur abhängig von der Periodenzahl, d. h. von der Geschwindigkeit, mit welcher das im Kompensator entstehende Drehfeld die Wicklung schneidet. Verkleinert man die Schnittgeschwindigkeit, indem man die Wicklung gleichsinnig mit dem Felde rotieren lässt, so nimmt die Reaktanz und demgemäss auch die Nacheilung ab, um schliesslich bei Synchronismus den Wert 0 zu erreichen. Bei Steigerung der Geschwindigkeit über Synchronismus hinaus bekommt die Reaktanz einen negativen Wert, der Kompensator erhält also den Charakter einer Kapazität. Dementsprechend wird der Strom vorgeschoben. Bedenkt man, dass der dem Kompensator zugeführte Strom die Schlupffrequenz des Hauptmotors — also 1—3 Perioden — besitzt, während die Antriebstourenzahl des Kompensators so gewählt wird, dass seine Rotationsfrequenz die Grössenordnung 30—50 aufweist, so ist einleuchtend, dass ein stark voreilender Strom entsteht. Dieser wird zur Lieferung des Magnetisierungsstromes für den Induktionsmotor verwendet. Er bewirkt, dass letzterer dem Netz nur noch reinen Wattstrom entnimmt. Bei entsprechender Dimensionierung des Kompensators kann der Induktionsmotor sogar überkompensiert werden, gleich wie die vorbeschriebenen Synchronmotoren.

Die Konstruktion des Phasenkompensators ist insofern eigenartig, als er keinen Stator besitzt. Damit trotzdem ein geschlossener Weg für die Kraftlinien vorhanden ist, wird der Rotor mit einem über die Wicklung vorstehenden Eisenring versehen. Dass ein Stator und eine Statorwicklung für den vorliegenden Zweck entbehrlich sind, folgt bereits aus der vorstehenden prinzipiellen Erläuterung, noch deutlicher geht dies vielleicht aus folgender Ueberlegung hervor:

Es liegt die Aufgabe vor, einem Induktionsmotor den zur Erregung erforderlichen Magnetisierungsstrom zu liefern. Dieser ist, wie bereits mehrfach betont, wattlos, d. h. seine Erzeugung erfordert keine Arbeit. Es braucht daher keine Energie auf den Rotor

[1]) Vgl. A. Scherbius: Eine neue Maschine zur Kompensation der Phasenverschiebung von Ein- und Mehrphasen-Induktions-Motoren, E. T. Z. 1912, Heft 42.

übertragen zu werden, d. h. ein Drehmoment ist nicht erforderlich und ein Stator, der sonst zur Bildung des Drehmomentes benötigt wird, erübrigt sich.

Der Antrieb des Phasenkompensators kann in verschiedener Weise bewerkstelligt werden. Hat der zu kompensierende Motor selbst eine genügend hohe Umlaufzahl, so ist die direkte Kuppelung von Induktionsmotor und Kompensator am Platz. Bei langsamlaufenden Induktionsmotoren kann der Phasenkompensator entweder durch Riemenübertragung von der Hauptmotorwelle aus angetrieben werden, oder man verwendet einen besonderen Antriebsmotor. Letztere Anordnung bietet den Vorteil, dass man die Umlaufzahl des Kompensators beliebig wählen kann und dass dieser sich an einem beliebigen Ort aufstellen lässt, was mit Rücksicht auf die Raumverhältnisse von Vorteil sein kann.

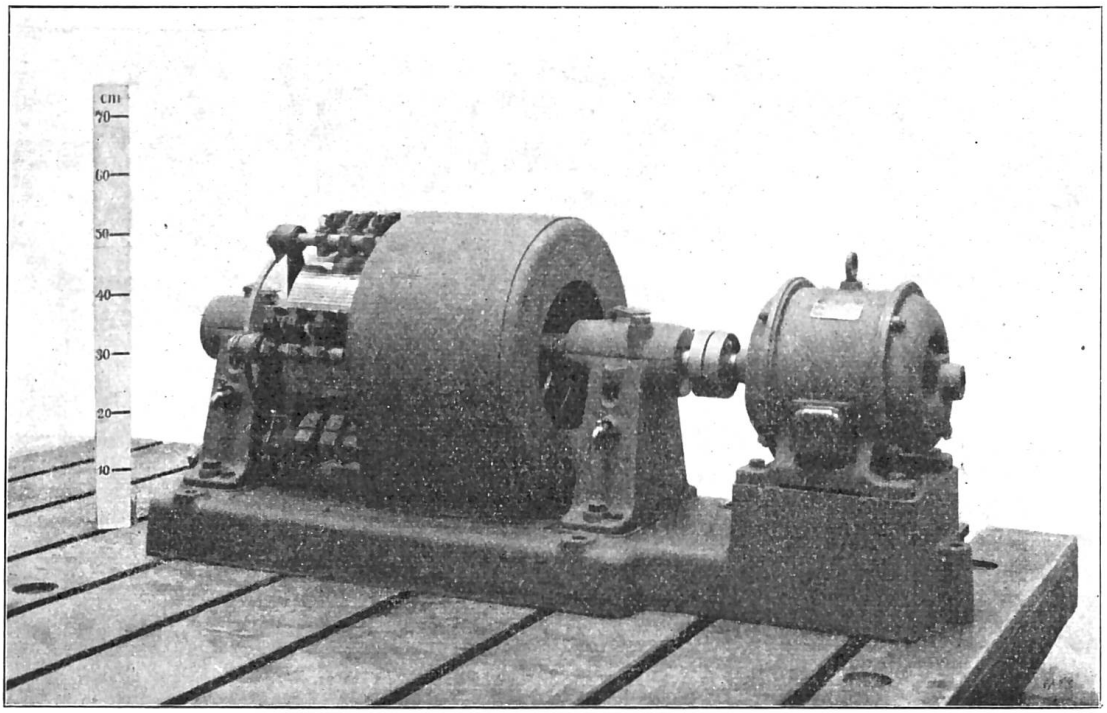

Fig. 5.

Die für den Antrieb des Kompensators erforderliche Leistung ist ganz gering (ca. $^1/_2$ bis 1 PS bei Hauptmotoren bis etwa 1000 PS), da lediglich seine Reibungsverluste zu decken sind; weitere Energie braucht dem Kompensator nicht zugeführt zu werden, da er, wie bereits mehrfach betont, nur wattlosen Strom zu liefern hat.

Der Hauptvorzug des beschriebenen Phasenkompensators, System Brown-Boveri, gegenüber ähnlichen Einrichtungen, liegt in seiner Einfachheit und Betriebssicherheit. Die kräftige Bauart, sowie namentlich auch eine wirksame Ventilation gestatten es, den Kompensator sehr stark zu belasten, sodass sich seine Dimensionen im Verhältnis zu den auftretenden Stromstärken klein halten lassen (siehe Fig. 5).

Zu bemerken ist ferner, dass ein mittels des Phasenkompensators kompensierter Induktionsmotor seinen asynchronen Charakter vollständig beibehält, d. h. der Schlupf wächst mit der Belastung. Der verbesserte Leistungsfaktor bleibt für alle im Betrieb vorkommenden Belastungen praktisch konstant, ohne dass nachreguliert zu werden braucht, im Gegensatz zu dessen erwähntem starken Abfallen bei zurückgehender Belastung des nichtkompensierten Motors; der in Fig. 6 charakterisierte Motor konnte, wie die Kurve zeigt, bis auf ca. $^1/_3$ Voll-Last noch mit $\cos \varphi = 1$ arbeiten.

III. Die Wahl des Kompensations-Systems.

Zum Schluss stellt sich nun die Frage, welche Vorteile bietet der Phasenkompensator gegenüber der Verwendung überkompensierter Synchronmaschinen und wann ist das eine oder andere System vorzuziehen?

Die prinzipielle Gegenüberstellung der beiden Systeme, ohne Rücksicht auf den konkreten Fall, entscheidet zu Gunsten des Phasenkompensators. Abgesehen davon, dass er in rein technischer Beziehung die ihm gestellte Aufgabe vollständiger löst,[1]) bietet er nun auch für den *Stromkonsumenten* wirtschaftliche Vorteile. Wir haben gesehen, dass er die Lieferung des Magnetisierungsstromes übernimmt, und zwar führt er diesen dem Rotor zu, der Stator des Hauptmotors wird dadurch entlastet, vielmehr lässt er bei Beibehaltung der alten Beanspruchung eine Steigerung der Nutzleistung (der PS-Leistung) zu. Aus gleichem Grunde lässt sich bei der Neukonstruktion eines Motors unter Verwendung des Phasenkompensators eine Reduktion in der Dimensionierung ermöglichen (also eine Gewichtsverminderung) derart, dass der Preis des Motors *mit* Kompensation den Preis des normalen unkompensierten Motors meistens nicht übersteigt. Dies tritt besonders deutlich bei grossen, langsamlaufen-

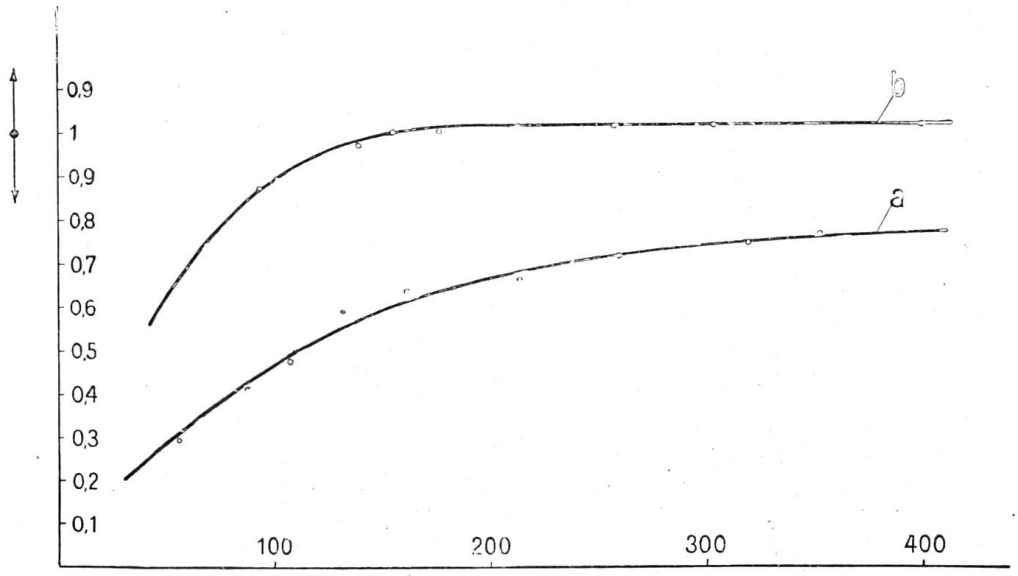

Fig. 6.

den Motoren zu Tage. Freilich kann hierbei dieser Motor, wenn ohne Kompensation arbeitend, nicht die volle Nutzleistung abgeben. Nachdem auf solche Weise der Vorteil der direkten Kompensation dem Stromlieferanten und dem Käufer zu Gute kommt, kann die Frage aufgeworfen werden, in wie weit ersterer für die Beschaffung einer Kompensationseinrichtung zu interessieren wäre.

Allerdings sind nun der Anwendung des Phasenkompensators gewisse Grenzen gesteckt. Es ist von vorneherein ersichtlich, dass aus ökonomischen Gründen nicht alle Motoren eines industriellen Betriebs direkt kompensiert werden können, man wird vielmehr nur die grössten Typen, mit Vorteil solche, die dauernd mit konstanter Last arbeiten, mit Komp.-Einrichtungen ausrüsten. Diese lassen sich gegebenenfalls überkompensieren, um noch einen Teil des Magnetisierungsstroms der übrigen Motoren übernehmen zu können. Die Grösse des Motors bestimmt sich hierbei wieder nach Massgabe der elektr. Beanspruchung, welche auf gleiche Weise wie für den Synchronmotor entwickelt, zu ermitteln ist. Mit wachsender Ueberkompensation gestalten sich jedoch die Betriebsbedingungen für den Kompensator stetig ungünstiger, sodass im Interesse des letzteren die überkompensierten Motoren nur schwach voreilend gewählt werden sollen. Ueberwiegt daher die Summenleistung der kleinen Motoren die Leistung der grossen, kompensierbaren, um ein bedeutendes, so kann der Vorzug des Phasenkompensators fraglich werden. Es ist in solchen Fällen nur noch eine Frage der Wirtschaftlichkeit, welches der beiden Kompensations-Systeme zu wählen ist.

[1]) Indem er den Leistungsfaktor automatisch für alle Belastungen konstant hält, während der Synchronmotor eine nach Massgabe der Netzbelastung veränderliche Erregung fordert.