

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	6 (1915)
Heft:	5
Artikel:	Über die Verwendung von Synchronmotoren zur Spannungsregulierung am Fernleitungsende
Autor:	Bauer, Bruno
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1056328

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: 10.01.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat

des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon 9571

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und
Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon 6741

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction
nommée par le Comité de l'A.S.E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général

de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Téléphone 9571

Toutes les correspondances concernant les abonnements,
l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone 6741

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de
l'A.S.E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

VI. Jahrgang
VI^e Année

Bulletin No. 5

Mai 1915

Ueber die Verwendung von Synchronmotoren zur Spannungsregulierung am Fernleitungsende.

Von Bruno Bauer, dipl. Ingenieur, Zürich.

Die gewohnte Aufstellung von phasenkompenzierenden Synchronmotoren im Konsumgebiet eines Kraftwerks ist meist im Sinne einer Verbesserung des durch das Verbrauchernetz gegebenen Leistungsfaktors, d. h. einer wirtschaftlicheren Ausnutzung der Generator- und Verteil Anlage gedacht. Ihre Wirkungsweise ist kurz dadurch charakterisiert, dass sie bei Uebererregung die generatorische Anlage mit einer wattlos voreilenden Stromkomponente belasten, die je nach der Grösse des Motors die vom Netz benötigte wattlos nacheilende Stromkomponente ganz oder teilweise zu kompensieren vermag. Durch jeweilige Anpassung der Motorerregung an die veränderliche Netzbela stung kann so der Leistungsfaktor am Aufstellungsort des Motors dauernd auf dem gewünschten günstigsten Wert gehalten werden.

Die bei gegebener Netzbela stung aus der Kompensation resultierende geringere Strombelastung der vor dem Synchronmotor liegenden Fernleitung und Generatoranlage muss aber notwendigerweise auch eine Verkleinerung des Spannungsabfalls zur Folge haben, so dass bei konstant gedachter Spannung im Kraftwerk die Spannung am Fernleitungsende nach Massgabe der aufgewendeten Kompensation variiert. Es ist daher durch die Verwendung solcher Synchronmotoren zugleich ein Mittel gegeben, die Betriebsspannung an deren Aufstellungsort bei konstanter Netzbela stung innerhalb gewisser Grenzen zu verändern, bzw. bei veränderlicher Belastung konstant zu halten.

Die Betriebsmöglichkeit des Synchronmotors als Spannungsregler wäre wirtschaftlich von geringer Bedeutung, liesse sie sich nicht mit seiner Eigenschaft als Phasenverbesserer vereinen. Indessen muss den nachfolgenden Erörterungen gleich vorweg genommen werden, dass dies für die gegebene Anlage nur für ein gewisses Bereich der veränderlichen Netzbela stung zutrifft, indem der als Spannungsregler gesteuerte Synchronmotor nicht über sein ganzes Arbeitsbereich im Sinne einer Verbesserung des Leistungsfaktors wirkt. Die

Grenzen, innerhalb deren ein im angedeuteten Sinne nützliches Arbeiten des Motors gewährleistet ist, stehen für die gegebene Netzeistung im engen Zusammenhang mit den elektrischen Daten der Fernleitung, so dass es im einzelnen Fall einer wirtschaftlichen Untersuchung bedarf, um zu entscheiden, ob die Aufstellung einer solchen Kompensationsanlage gerechtfertigt ist. Wie bekannt, ist diese Anordnung in Amerika schon mehrfach zur Anwendung gelangt; wir werden sehen, dass eben die Verhältnisse von Fernleitungen hoher Betriebsspannung die Verwendung von Synchronmotoren als Spannungsregler zweckmässig erscheinen lassen.

Im Nachfolgenden soll nun kurz das Verhalten einer durch Synchronmotoren regulierten Fernleitung angedeutet werden, um auf Grund der gewonnenen Theorie die Gesichtspunkte zur Wahl solcher Anlagen kennen zu lernen.

Das Diagramm der Fernleitung konstanten Spannungsabfalls.

Die Fernleitung sei gekennzeichnet durch folgende Daten:

- V_1 = konstante Spannung am Anfang.
 - V_2 = konstant zu haltende Spannung am Ende.
 - $V_1 - V_2 = \epsilon_0 \cdot V_1$ = numerischer Spannungsabfall.
 - l = Tracéelänge der Fernleitung in km.
 - r_0 = Ohm'scher Widerstand
 - x_0 = induktiver Widerstand
 - z_0 = Impedanz
 - φ_n = Phasenverschiebung im Verbrauchsnetz gemessen zwischen I und V_2
- $\left. \begin{array}{l} r_0 \\ x_0 \\ z_0 \end{array} \right\}$ pro 1 km Tracéelänge.

Beim Strom I_1 ergibt sich dann der absolute Spannungsabfall (für eine Drehstromleitung Z. B.) zu

$$\overline{AB}_1 = I_1 \cdot \sqrt{3} \cdot z_0 \cdot l \text{ Volt}$$

womit das Diagramm für die Strombelastung I_1 festgelegt ist (Fig. 1). Bei vergrösserter Netzeistung entsprechend dem Strom I_2 steigt der absolute Spannungsabfall proportional mit I auf den Wert \overline{AB}' , was unter Berücksichtigung der Konstanz des Winkels α eine Steigerung der Spannung im Kraftwerk auf den Wert V_1' benötigte, damit die Spannung V_2 am Ende unverändert bleibt. Unserer Voraussetzung gemäss soll aber auch V_1 in ihrer Grösse konstant sein, was nur möglich ist, wenn sich die Phasenverschiebung der neuen Belastung gemäss einstellt. Halten wir den Vektor der Endspannung V_2 fest, so muss sich Punkt B des Vektors von V_1 auf einem Kreis um O_1 bewegen. Der Punkt ist für die Strombelastung I_2 durch die Strecke $\overline{AB}_2 = I_2 \cdot \sqrt{3} \cdot z_0 \cdot l$ bestimmt; die neue Lage des Spannungsdreieckes $A B_2 C_2$ ergibt die erforderliche Phasenverschiebung φ_1 am Ende der Fernleitung. Es ist demnach zur Einhaltung konstanter Anfangs- und Endspannung jedem Netzstrom I eine ganz bestimmte Phasenverschiebung zugeordnet, die nur für eine bestimmte Belastung mit der durch das Verbrauchernetz gegebenen Verschiebung φ_n zusammenfällt. Für den Synchronmotor ergibt sich daher die Aufgabe, den Stromvektor des Netzes durch Kompensation in die gewünschte Verschiebung φ_1 der Fernleitung zu drehen. In Fig. 2 ist die Lage der Stromvektoren für verschiedene Belastungen einer gegebenen Kraftübertragung eingezeichnet. Wie ersichtlich, liegen ihre Endpunkte $1', 2', \dots$ ebenfalls auf einem Kreis mit dem Zentrum O_2 . Die nähere Untersuchung des Diagramms zeigt, dass sein Radius R proportional der Spannung V_1 ist; z. B. $m \cdot V_1$, wobei m vom gewählten Maßstab der aufgetragenen Ströme abhängt, der Abstand der beiden Zentren $O_1 O_2$ beträgt dann $m \cdot V_2$ und

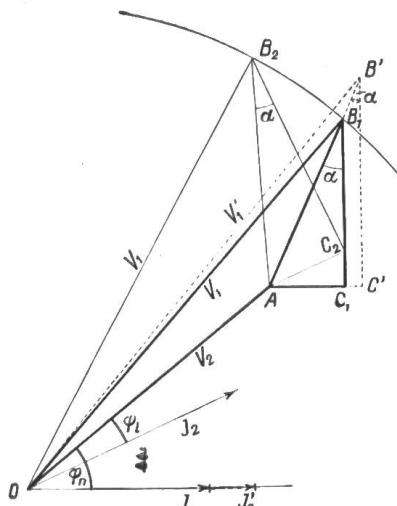


Fig. 1

des Spannungsdreieckes $A B_2 C_2$ ergibt die erforderliche Phasenverschiebung φ_1 am Ende der Fernleitung. Es ist demnach zur Einhaltung konstanter Anfangs- und Endspannung jedem Netzstrom I eine ganz bestimmte Phasenverschiebung zugeordnet, die nur für eine bestimmte Belastung mit der durch das Verbrauchernetz gegebenen Verschiebung φ_n zusammenfällt. Für den Synchronmotor ergibt sich daher die Aufgabe, den Stromvektor des Netzes durch Kompensation in die gewünschte Verschiebung φ_1 der Fernleitung zu drehen. In Fig. 2 ist die Lage der Stromvektoren für verschiedene Belastungen einer gegebenen Kraftübertragung eingezeichnet. Wie ersichtlich, liegen ihre Endpunkte $1', 2', \dots$ ebenfalls auf einem Kreis mit dem Zentrum O_2 . Die nähere Untersuchung des Diagramms zeigt, dass sein Radius R proportional der Spannung V_1 ist; z. B. $m \cdot V_1$, wobei m vom gewählten Maßstab der aufgetragenen Ströme abhängt, der Abstand der beiden Zentren $O_1 O_2$ beträgt dann $m \cdot V_2$ und

die Neigung der Zentrale $\overline{O_1 O_2}$ zum festen Vektor V_2 ergibt sich zu $(90 - \alpha)$ Grad, wobei α nur von der Fernleitung abhängig

ist: $\tan \alpha = \frac{r_0}{x_0}$. In

Fig. 2 ist das Verhältnis $m = 1$ gewählt worden. Die genannten Beziehungen zwischen den beiden Ortskreisen sind durch die Verfolgung der Konstruktion des Diagramms ohne weiteres erläutert, so dass sich hier ein weiterer Beweis erübriggt. Wir kommen später auf die Anwendung dieser Beziehungen zurück.

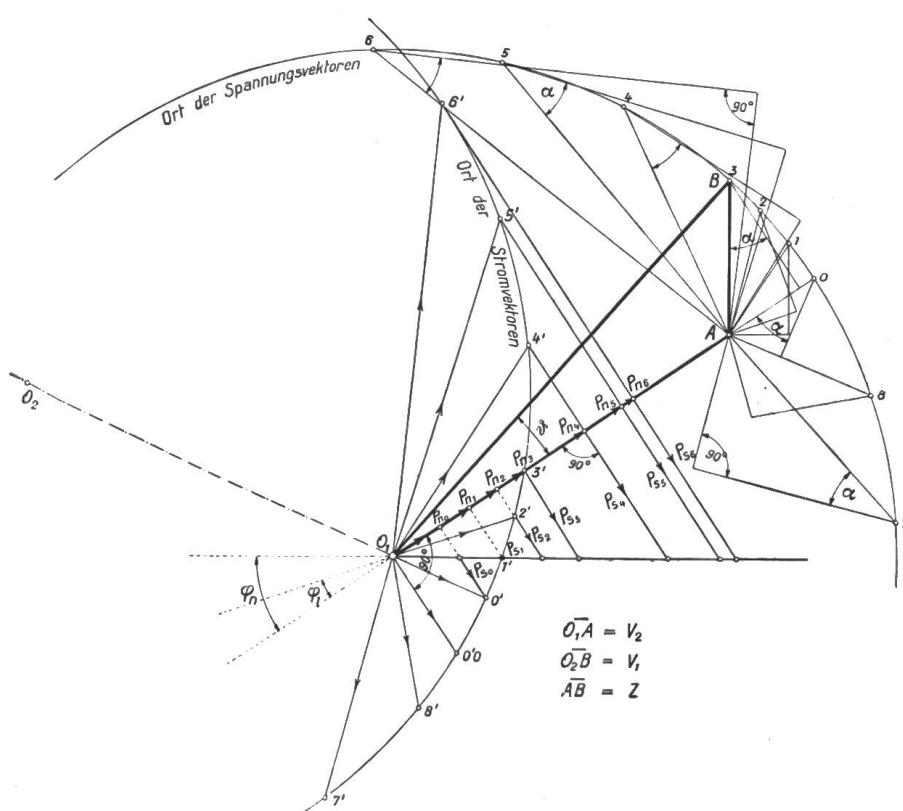


Fig. 2

Die Beanspruchung des Synchronmotors.

Das entwickelte Diagramm der Fernleitung gibt uns den Zusammenhang zwischen dem Fernleitungsstrom und der erforderlichen Phasenverschiebung, es muss nun untersucht werden, was für Beanspruchungen sich hieraus für den kompensierenden Motor bei gegebener Netzeistung ergeben. In den meisten Fällen wird wohl der Synchronmotor auf der Unter spannungsseite der am Ende der Fernleitung aufgestellten Transformatoren angeschlossen werden (Fig. 3); wenn wir daher in den nachfolgenden Rechnungen alle Leistungen oberspannungsseitig verstehen, ist nachträglich noch der Wirkungsgrad der Abwärtstransformierung in Berücksichtigung zu ziehen.

Beim Strom I_1 und der zugehörigen Verschiebung φ_1 führt die Fernleitung die Leistung:

$$P_n = \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot V_2 \cos \varphi_1 \text{ in kW}$$

im Netz schreibt sich diese Leistung:

$$P_n = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot V_2 \cos \varphi_n \text{ in kW}$$

woraus das Verhältnis der beiden Ströme gegeben ist. Einfacher ist der Zusammenhang im Diagramm zu ersehen, wo wir statt der Ströme die entsprechenden Leistungen eintragen (Fig. 4). Es lässt sich daraus auch deutlich die Aufgabe des Synchronmotors erkennen: zur Aufbringung der nützlichen Leistung P_n bedarf das Netz bei seiner Phasenverschiebung φ_n die wattlose Leistung $PQ = P_n \cdot \tan \varphi_n$, die ohne Kompensation vom Kraftwerk zu liefern wäre. Zur Konstanthaltung der Endspannung muss aber bei der gegebenen Nutzleistung P_n die Phasenverschiebung am Fernleitungsende φ_1 betragen entsprechend der wattlosen Leistung $PR = P_n \cdot \tan \varphi_1$. In unserem Fall ist $\varphi_n > \varphi_1$, der Synchronmotor hat also als Kompensator den noch verbleibenden Rest der vom Netz benötigten wattlosen Leistung aufzubringen, nämlich

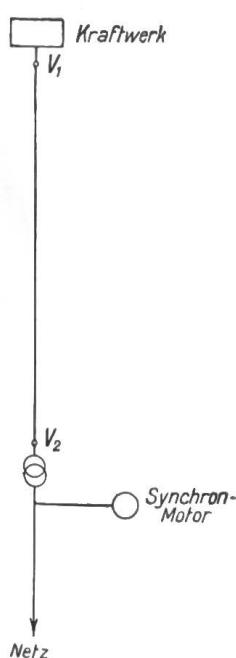


Fig. 3

$$P_s = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n - P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \text{ in kVA.}$$

Der Ausdruck gilt allgemein für die *Grösse der Beanspruchung eines Synchronmotors als Phasenkompensator*. Ist seine Arbeitsweise als *Phasenregler* gedacht, d. h. soll er am Ende der Fernleitung einen gewünschten Leistungsfaktor konstant halten, so ist im obigen Ausdruck $\operatorname{tg} \varphi_1$ als Konstante einzusetzen und die erforderliche Beanspruchung des Motors ist proportional der Nutzleistung P_n . In seiner Funktion als *Spannungsregler* besteht kein linearer Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und der Nutzleistung, da gemäss unserem Diagramm jedem Wert des Fernleitungsstroms bzw. der Leistung P_n ein bestimmter Phasenwinkel φ_1 zugeordnet ist. Wie im Diagramm ersichtlich, variiert dieser von 90° Nacheilung über Null zu einem maximalen Wert im Gebiet der Voreilung, woraus schon zu ersehen ist, dass P_s grösser als P_n werden kann, ein Betriebsfall, der natürlich wirtschaftlich unmöglich ist. Es wird die nächste Aufgabe sein, die Anwendungsmöglichkeit unseres Reguliersystems von diesem Gesichtspunkte aus zu beleuchten.

Der Zusammenhang zwischen der Motorbeanspruchung P_s und der Nutzleistung P_n kann durch Eintragung des Diagramms in Fig. 4 in das allgemeine Fernleitungsdiagramm sehr übersichtlich gestaltet werden. Fig. 2 enthält bereits diese Kombination, indem die Stromvektoren $O_1 O'$, $O_1 1'$, $O_1 2' \dots$ mit den Senkrechten zum festen Vektor $O_1 A = V_2$ die Leistungsdreiecke bilden, welche auf $O_1 A$ zu jedem Stromvektor die zugehörige Netzleistung herausgreifen lassen. Durch Einzeichnung des festen Stromvektors im Netz unter dem Winkel φ_n können gemäss Fig. 4 direkt die entsprechenden Beanspruchungen des Synchronmotors ermittelt werden. Unabhängig von der in Fig. 2 gewählten Einteilung findet man zu einer gegebenen Netzleistung P_n die erforderliche Motorleistung, indem man P_n in kW von O_1 aus auf dem Vektor $O_1 A$ abträgt und durch den Endpunkt die Senkrechte fällt; das vom Ortskreis der Stromvektoren und dem festen Vektor der Netzströme heraus geschnittene Stück ist gleich der Motorbeanspruchung in kVA. Im Verlauf der wachsenden Nutzleistung sind vier Belastungsfälle bemerkenswert.

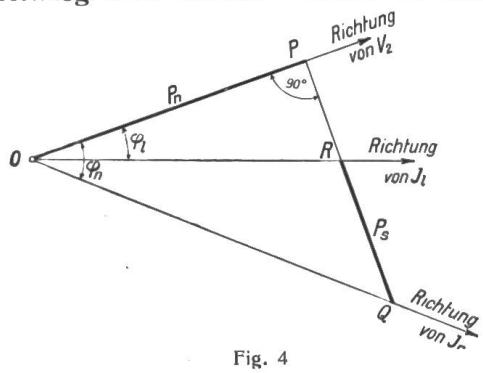


Fig. 4

Der Zusammenhang zwischen der Motorbeanspruchung P_s und der Nutzleistung P_n kann durch Eintragung des Diagramms in Fig. 4 in das allgemeine Fernleitungsdiagramm sehr übersichtlich gestaltet werden. Fig. 2 enthält bereits diese Kombination, indem die Stromvektoren $O_1 O'$, $O_1 1'$, $O_1 2' \dots$ mit den Senkrechten zum festen Vektor $O_1 A = V_2$ die Leistungsdreiecke bilden, welche auf $O_1 A$ zu jedem Stromvektor die zugehörige Netzleistung herausgreifen lassen. Durch Einzeichnung des festen Stromvektors im Netz unter dem Winkel φ_n können gemäss Fig. 4 direkt die entsprechenden Beanspruchungen des Synchronmotors ermittelt werden. Unabhängig von der in Fig. 2 gewählten Einteilung findet man zu einer gegebenen Netzleistung P_n die erforderliche Motorleistung, indem man P_n in kW von O_1 aus auf dem Vektor $O_1 A$ abträgt und durch den Endpunkt die Senkrechte fällt; das vom Ortskreis der Stromvektoren und dem festen Vektor der Netzströme heraus geschnittene Stück ist gleich der Motorbeanspruchung in kVA. Im Verlauf der wachsenden Nutzleistung sind vier Belastungsfälle bemerkenswert.

1. *Nutzlast $P_n = o$* (Punkt $o'o$ in Fig. 2). Der Synchronmotor liefert einen um 90° wattlos nacheilenden Strom, um den angenommenen Spannungsabfall $V_1 - V_2$ aufrecht zu erhalten.

2. $P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$, d. h. $P_s = o$ (Punkt 1 in Fig. 2). Für diese Leistung ist der Phasenwinkel am Ende der Fernleitung gleich dem Phasenwinkel im Netz, die Beanspruchung des Synchronmotors ist daher gleich Null.

3. $\varphi_1 = o$, d. h. $P_s = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n$ (Punkt 3 in Fig. 2). Der Motor kompensiert die totale vom Netz benötigte wattlose Leistung, d. h. die Leitung führt am Ende keinen wattlosen Strom.

4. $P_n = P_{n\max}$ (Punkt 6 in Fig. 2). Das Diagramm lässt erkennen, dass für die gegebene Fernleitung mit dem festgelegten Spannungsabfall ein gewisser Wert der Nutzleistung nicht überschritten werden kann. Im gewählten Beispiel ist der hiefür erforderliche Fernleitungsstrom stark voreilend, die Beanspruchung des Synchronmotors ein Vielfaches der Nutzleistung.

Allgemein lässt sich vorerst herauslesen, dass sich für ein gegebenes Bereich der Nutzleistung die Beanspruchung des Synchronmotors als Spannungsregler von einem negativen Maximum (Nacheilung) durch Null gehend zu einem positiven Maximum (Voreilung) bewegt. Die Regelungsmethode kann offenbar dann mit Vorteil zur Anwendung kommen, wenn das nützliche Arbeitsbereich des Synchronmotors, d. h. das Gebiet, in dem er phasenverbessernd arbeitet, so gross ausfällt, dass sich hieraus eine praktisch in Frage kommende Verbilligung der Fernleitung ergibt.

Der Aufzeichnung des Diagramms in Fig. 2 für eine gegebene Kraftübertragung stehen zeichnerisch etwelche Schwierigkeiten entgegen, indem die Vorausberechnung der Fernleitung wohl den absoluten Wert \overline{AB} des Spannungsabfalls ergibt, nicht aber die konstant zu haltende numerische Differenz der Spannungen V_1 und V_2 . Die zeichnerische Ermittlung dieser Grösse wird ungenau, wie überhaupt die ganze übrige Konstruktion, sobald sich die einzelnen Vektoren in ihrem praktischen Größenverhältnis gegenüber stehen. Man verfährt daher vielleicht besser, die Beziehungen zwischen P_n und P_s auf rechnerischem Weg zu ermitteln. Im Nachfolgenden sollen die erforderlichen Unterlagen entwickelt werden.

Analytische Behandlung des Problems.

Die Berechnungen beziehen sich, wie auch die vorangegangene graphische Behandlung, auf Freileitungen mit vernachlässigbarer Betriebskapazität; deren Berücksichtigung würde die graphische Methode wenig komplizieren, wohl aber die analytische Behandlung bzw. die daraus resultierende Schlussformel.

In Fig. 5 ist das Diagramm der Fernleitung für die Strombelastung I und die Phasenverschiebung φ_1 nochmals aufgezeichnet. Unsere nächste Aufgabe ist die Aufstellung der Beziehung zwischen P_n und g_1 , um die auf Seite 68 angesetzte Relation zwischen P_s und P_n eindeutig in Funktion von P_n und den Konstanten der Kraftübertragung ausdrücken zu können.

Aus Fig. 5 lassen sich folgende Beziehungen herauslesen.

$$\text{im } \triangle ABC \text{ ist: } \gamma + \delta = 90 - (\alpha + \varphi_1) \quad . . . \quad 1)$$

$$\begin{aligned} \text{im } \triangle OAB \text{ ist: } \overline{AB}^2 &= V_1^2 + V_2^2 - 2 V_1 V_2 \cos \delta \\ \cos \delta &= \frac{V_1^2 + V_2^2 - \overline{AB}^2}{2 V_1 V_2} \quad . . . \quad 2) \end{aligned}$$

$$\text{im } \triangle OBD \text{ ist: } \overline{BD}^2 = 2 V_1^2 (1 - \cos \delta) \quad . . . \quad 3)$$

$$\begin{aligned} \text{im } \triangle ABD \text{ ist: } \overline{BD}^2 &= \overline{AB}^2 + \overline{AD}^2 \\ &- 2 \overline{AB} \cdot \overline{AD} \cdot \cos(\gamma + \delta) \quad . . . \quad 4) \end{aligned}$$

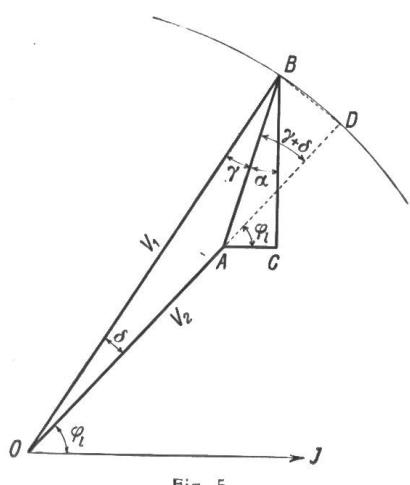


Fig. 5.

Setzt man 2) in 3) ein, schreibt statt „ \overline{AD} “ ($V_1 - V_2$) und setzt die beiden Ausdrücke 3) und 4) einander gleich, so ergibt sich die Gleichung:

$$2 V_1 \left(1 - \frac{V_1^2 + V_2^2 - \overline{AB}^2}{2 V_1 V_2} \right) = \overline{AB}^2 + (V_1 - V_2)^2 - 2 \overline{AB} \cdot (V_1 - V_2) \cdot \cos(\gamma + \delta) \quad 5)$$

Da für die Vorausberechnung einer Fernleitung im allgemeinen V_1 , die Anfangsspannung, als gegeben zu betrachten ist, soll diese in der Schlussformel verbleiben; wir setzen daher

$$V_1 - V_2 = \varepsilon_0 \cdot V_1 \text{ woraus } V_2 = V_1 (1 - \varepsilon_0) \quad . . . \quad 6)$$

In Berücksichtigung von 1) kann geschrieben werden:

$$\cos(\gamma + \delta) = \sin(\alpha + \varphi_1)$$

womit sich dann nach einigen Umformungen aus 5) und 6) der Ausdruck ergibt:

$$\overline{AB}^2 + 2 \overline{AB} \cdot V_1 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \sin(\alpha + \varphi_1) - V_1^2 \cdot \varepsilon_0 (2 - \varepsilon_0) = 0 \quad . . . \quad 7)$$

Diese Gleichung erlaubt den Zusammenhang zwischen dem absoluten Wert des Spannungsabfalls \overline{AB} und der numerischen Differenz $V_1 - V_2 = \varepsilon_0 \cdot V_1$ zu ermitteln. Die Vorausberechnung einer Fernleitung ergibt bekanntlich nicht ε_0 , sondern die Grösse $\overline{AB} = \varepsilon \cdot V_1$. Wir gewinnen ε_0 aus ε durch Auflösen der Gleichung 7) und erhalten dadurch:

$$\varepsilon_0 = 1 + \varepsilon \cdot \sin(\alpha + \varphi_1) - \sqrt{1 + \varepsilon \cdot \sin(\alpha + \varphi_1)^2 - \varepsilon \{ \varepsilon + 2 \sin(\alpha + \varphi_1) \}} \quad . . . \quad 7a)$$

Das positive Wurzelzeichen hat keine physikalische Bedeutung.

Die Grösse $A B$ kann nun durch den Strom bezw. die Nutzleistung ausgedrückt werden; es ist für eine Drehstromleitung z. B.:

$$A B = I \cdot \sqrt{3} \cdot z_0 \cdot l \text{ und andererseits } I = \frac{P_n}{V_2 \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_l}$$

sodass in Berücksichtigung von 6):

$$\overline{A B} = \frac{P_n \cdot z_0 \cdot l}{\cos \varphi_l \cdot V_1 (1 - \epsilon_0)} \quad \quad 8)$$

wenn wir 8) in 7) einsetzen und nach $\sin(\alpha + \varphi_l)$ auflösen:

$$\sin(\alpha + \varphi_l) = \frac{V_1^2 \cdot \epsilon_0 (2 - \epsilon_0) \cos \varphi_l}{2 P_n \cdot z_0 \cdot l} - \frac{P_n \cdot z_0 \cdot l}{2 \cos \varphi_l \cdot V_1^2 (1 - \epsilon_0)^2}$$

$\sin(\alpha + \varphi_l)$ in die Funktionen der einzelnen Winkel aufgelöst und beide Seiten der Gleichung durch $\cos \varphi_l$ dividiert führt zu einer quadratischen Gleichung für die gesuchte Grösse $\operatorname{tg} \varphi_l$ von der Form:

$$B \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi_l + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi_l + (B - A + \sin \alpha) = 0$$

$$\text{wobei } A = \frac{V_1^2 \cdot \epsilon_0 (2 - \epsilon_0)}{z_0 \cdot l \cdot 2 P_n} \quad \text{und } B = \frac{P_n \cdot Z_0 \cdot l}{2 (1 - \epsilon_0)^2 \cdot V_1^2}$$

Der Ausdruck:

$$\frac{V_1^2}{z_0 \cdot l} = P_0 \quad \quad 9)$$

bedeutet die Kurzschlussleistung der Fernleitung, eine Konstante der gegebenen Kraftübertragung. Wir führen P_0 in obige Ausdrücke ein und erhalten nach einigen Umformungen als Auflösung der quadratischen Gleichung in $\operatorname{tg} \varphi_l$:

$$\operatorname{tg} \varphi_l = \frac{1}{P_n} \left\{ -P_0 (1 - \epsilon_0)^2 \cos \alpha \pm \sqrt{P_0^2 (1 - \epsilon_0)^2 - [P_0 (1 - \epsilon_0)^2 \sin \alpha + P_n]^2} \right\} \quad \quad 10)$$

Wie die nähere Untersuchung zeigt, führt das negative Wurzelzeichen zu physikalisch unreellen Werten, in die Rechnung ist stets der positive Wert der Wurzel einzuführen. Setzen wir 10) endlich in den auf Seite 68 gegebenen Ausdruck für P_s ein, so erhalten wir die Beziehung:

$$P_s = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n - \left\{ -P_0 \cdot (1 - \epsilon_0)^2 \cdot \cos \alpha + \sqrt{P_0^2 (1 - \epsilon_0)^2 - [P_0 (1 - \epsilon_0)^2 \sin \alpha + P_n]^2} \right\}$$

Die Diskussion der Formel führt, wie leicht ersichtlich, zu den vier ausgezeichneten Belastungsfällen, die auf Seite 68 behandelt worden sind. Um gleich die Handhabung der gewonnenen analytischen Beziehungen zu erproben, möge nachfolgend ein Rechnungsbeispiel Platz finden.

Vorausbestimmung einer Kraftübertragung mit Spannungsregulierung am Ende der Fernleitung.

Es soll beispielsweise eine Drehstromleitung über 50 km erstellt werden für eine durchgehende Leistung von 10 000 kW bei $\cos \varphi_n = 0,8$ im Tagesmittel, im Kraftwerk gemessen. Die normale tägliche Belastungsspitze betrage 20 000 kW bei $\cos \varphi_n = 0,8$. Die Betriebsspannung im Kraftwerk sei zu 45 000 Volt angesetzt. Für die Wahl des Kupferquerschnittes kann vorerst nur der wirtschaftlichste Effektverlust der Fernleitung bestimmt sein, da in unserem Fall keine Rücksicht auf den Spannungsverlust zu tragen ist. Wir setzen ersteren bei der höchsten Belastung mit 20 000 kW zu 12% fest. Eingedenk des charakteristischen Verlaufs der Beanspruchung im Synchronmotor bestimmen wir von vorne herein dessen positiven Maximalwert. Der Motor soll so gross sein, dass er bei der Höchst-

last den Leitungsfaktor am Ende der Leitung auf eins zu bringen vermag. Damit wäre seine Grösse bereits festgelegt, es bleibt aber noch zu ermitteln, über welches Bereich der Nutzleistung er phasenverbessernd arbeitet und wie überhaupt die Beanspruchung P_s mit der Nutzleistung verläuft. Der Berechnung liegen nunmehr zusammenfassend folgende Daten zu Grunde:

<i>Fernleitung</i>	$I = 50\,000 \text{ m}$
am Leitungsanfang: $V_1 = 45\,000 \text{ V}$	$P_n = 20\,000 \text{ kW}$
	$\cos \varphi_1 \sim 1^*)$
	$p = 12\%$

Es berechnet sich hieraus:

$$I = \frac{20\,000\,000}{\sqrt{3} \cdot 45\,000} = 267 \text{ A}, \quad q = \frac{1,75 \times 20\,000 \cdot 50\,000}{(45\,000)^2 \times 12} = 72 \text{ mm}^2$$

Die Drehstromleitung mit 150 cm Drahtabstand weist beim normalen Querschnitt von $q = 70 \text{ mm}^2$ folgende Daten auf:

$r_0 = 0,249^\Omega$	$\sin \alpha = 0,55$
$x_0 = 0,378^\Omega$	$\cos \alpha = 0,835$
$z_0 = 0,452^\Omega$	$P_0 = \frac{(45\,000)^2}{z_0 \cdot I} = 89\,600 \text{ kW}$

Die spezifische Strombelastung $\sigma_i = \frac{257}{70} = 3,68 \text{ Amp.}$ ist vielleicht etwas zu hoch, in dessen tritt sie nur bei der Spitzenlast auf; jedenfalls sind wir damit an der Grenze der zulässigen Belastung unserer Fernleitung; dies drückt sich auch im Spannungsabfall aus; dieser wird zu:

$$AB = I \cdot \sqrt{3} \cdot Z_0 \cdot I = 257 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,452 \times 50 = 10\,100 \text{ Volt} = 22,4\%, \varepsilon = 0,224.$$

Dieser Wert dürfte bei Regulierung vom Kraftwerk aus kaum mehr zulässig sein, für den Synchronmotor als Spannungsregler erwachsen betriebstechnisch hieraus vorerst keine Schwierigkeiten, den Einfluss des Spannungsabfalls auf die Arbeitsweise des Motors werden wir im übrigen später näher untersuchen.

Gleichung 7a) lässt aus ε den konstanten numerischen Spannungsabfall ε_0 berechnen; obiger Wert entspricht dem Phasenwinkel $\varphi_1 = 0$ daher lautet Gleichung 7a) Seite 69

$$\varepsilon_0 = 1 + \varepsilon \sin \alpha - \sqrt{1 + \varepsilon^2 \sin^2 \alpha - \varepsilon (1 + 2 \sin \alpha)}$$

die Werte von $\varepsilon = 0,224$ und $\sin \alpha = 0,55$ eingesetzt ergibt

$$\varepsilon_0 = 0,143 \text{ d. h. Endspannung } V_2 = 38\,600 \text{ Volt.}$$

Damit sind alle Daten geschaffen, um mit Hilfe der entwickelten Gleichungen zu jeder Nutzleistung P_n die zugehörige Motorbeanspruchung P_s zu berechnen. Die erhaltenen Werte beziehen sich auf das Fernleitungsende, wir wollen daher die obigen Daten soweit nötig hierauf umrechnen.

$$\text{Fernleitungsdaten } \varepsilon_0 = 0,143 \quad V_2 = 38\,600 \text{ V} \quad \sin \alpha = 0,55$$

$$\text{Am Leitungsende: } P_n = 20\,000 - 12\% = 17\,600 \text{ kW} \quad \cos \alpha = 0,835$$

$$\cos \varphi_1 = 1 \quad \cos \varphi_n = 0,8 \quad \operatorname{tg} \varphi_n = 0,749 \quad P_0 = 89\,600 \text{ kW}$$

$$\text{nach früherem ist: } P_s = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n = P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$$

^{*)} Angenommen wurde, dass $\cos \varphi_1$ am Ende = 1; am Leitungsanfang wird in Folge der Induktivität der Fernleitung eine kleine Phasenverschiebung eintreten, die wir hier in erster Näherung vernachlässigen.

wobei $P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$ durch unsere Formel 10) Seite 70 gegeben ist. Die oben berechneten Werte in den Ausdruck eingesetzt lässt folgenden Zusammenhang zwischen $P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$ und P_n entstehen:

P_n in kW	0	5000	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	35 000	40 000
$P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$ in kVA	+ 12800	+ 9800	+ 6100	+ 2400	- 2400	- 8000	- 15600	- 26000	- 54800

In Fig. 6 sind die Werte von $P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$ in Funktion von P_n graphisch aufgetragen, durch deren Subtraktion von der $P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n$ -Linie gemäss der Formel ergab sich hieraus die P_s -Kurve, d. h. per gesuchte Zusammenhang zwischen der Nutzleitung und der Beanspruchung des Synchronmotors.

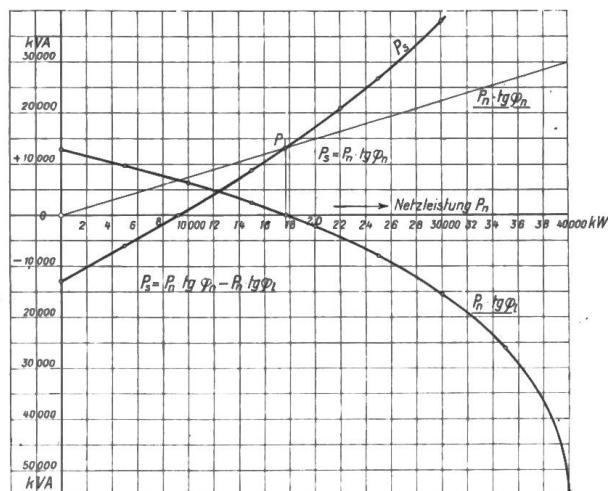


Fig. 6

wärts bis zu rund 9000 kW, nach Voraussetzung ungefähr gleich dem täglichen Mittelwert der Belastung. Sinkt die Belastung unter diesen Betrag, so verschlechtert der regelnde Motor die Phasenverschiebung über φ_n hinaus bis zu $\varphi_1 = 90^\circ$ Nacheilung für $P_n = 0$; die diesbezügliche Motorbeanspruchung erreicht 13 000 kVA nacheilend. Im praktischen Betrieb würde man den Motor kaum mit grosser Untererregung arbeiten lassen, zumal wenn er noch mechanische Arbeit abzugeben hat, zur Einhaltung der Spannungskonstanz kann alsdann im Kraftwerk mit der Erregung zurückgegangen werden.

Die Diskussion über die wirtschaftliche Zulässigkeit der berechneten Verhältnisse kann ohne weitere Unterlagen der gegebenen Anlage nur ganz allgemein durchgeführt werden, es lassen sich hierüber aus dem bis jetzt Behandelten ungefähr folgende Gesichtspunkte herauslesen.

Gesichtspunkte zur wirtschaftlichen Anwendbarkeit der Regulierungsmethode.

Die Grösse des Synchronmotors bestimmt sich im allgemeinen aus dem bei der Höchstleistung gewünschten günstigsten Leistungsfaktor am Fernleitungsende. (Punkt P in Fig. 6). In Abwägung der Verbilligung der Fernleitung gegenüber der Verteuerung durch die Motoranlage wird man erfahrungsgemäss nur in Ausnahmefällen die vollständige Kompensation der wattlosen Netzleistung erreichen, es sei denn, dass die Synchronmotoren zugleich als Antriebsmotoren mechanische Arbeit abgeben. Dieser Fall ist z. B. überall da möglich, wo die gesamte von der Fernleitung geführte Energie rotierenden Umformern zugeführt wird.

Das nützliche Arbeitsbereich des Synchronmotors als Spannungsregler ist durch die oben herangezogene Höchstleistung und die Netzelastung gegeben, für die $\varphi_1 = \varphi_s$ also

$P_s = 0$. Es liegt im Interesse eines wirtschaftlichen Betriebs der Anlage, dieses Bereich möglichst auszudehnen. Das heisst graphisch, diejenige P_s -Kurve zu suchen, die durch den oben bereits festgelegten Punkt P (Fig. 6) gehend, möglichst flach verläuft. Dementsprechend muss auch das negative Maximum der Beanspruchung ($P_n = 0$) möglichst klein werden. Wir könnten aus den abgeleiteten Formeln die Bedingungen hiefür ableiten, die graphische Methode lässt aber die Zusammenhänge übersichtlicher herauslesen. In Fig. 2 ist, wie auf Seite 68 erläutert, die Beanspruchung des Motors für $P_n = 0$ durch den Punkt $o'o$ auf dem Ortskreis der Stromvektoren gegeben, während durch P_{s_3} die maximal in Frage kommende positive Beanspruchung bestimmt ist, entsprechend der Höchstleistung P_{n_3} . Den gewünschten Verhältnissen würde ein Ortskreis entsprechen, der, durch P_{n_3} gehend, einen möglichst kleinen Vektor $o'o$ herausschneidet. Bei der auf Seite 66 angegebenen Konstruktion dieses Kreises verlangt dies einen möglichst grossen Neigungswinkel ($90 - \alpha$) der Zentren $\overline{O_1 O_2}$ zum festen Vektor V_1 und eine möglichst kleine Differenz $R - \overline{O_1 O_2}$. Da der Winkel α durch die Fernleitung gegeben ist und nach früherem $R = m \cdot V_1$ bzw. $\overline{O_1 O_2} = m \cdot V_2$ also $R - \overline{O_1 O_2} = V_1 - V_2$, sagt obiges in anderen Worten aus: *Das nützliche Arbeitsbereich des Synchronmotors ist für die gegebene in Frage kommende Maximalbeanspruchung um so grösser, je kleiner der Winkel α der Fernleitung ausfällt und je kleiner der numerische Spannungsabfall der Uebertragung gewählt wird.*

Für die gegebene Fernleitung ist eine Reduktion des numerischen Spannungsabfalls $V_2 - V_1$ bei konstanter Anfangsspannung V , gleichbedeutend mit einer Verkleinerung des Winkels α .

Dieser Fall ist in Fig. 7 zur Anschaugung gebracht, in der das nützliche Arbeitsbereich von ΔP_n auf $\Delta P'_n$ gewachsen ist. Demgegenüber steht aber eine Vergrösserung des Kupferquerschnittes, so dass auch in diesem Fall das wirtschaftlich günstigste Mittel zu suchen wäre.

Allgemein ist der Winkel α einer Fernleitung durch die Anordnung der Drähte und deren gegenseitigen Abstand gegeben; der Durchmesser der Drähte hat nur geringen Einfluss. Der Winkel ist umso kleiner, je mehr die Induktivität der Leitung den Ohm'schen Widerstand übersteigt, woraus der Schluss zu ziehen ist, dass unter Beibehaltung des gleichen relativen Spannungsabfalls ε_0 eine Fernleitung sich um so günstiger zur Spannungsregulierung durch Synchronmotoren verhält, je höher ihre Betriebsspannung ist. Die

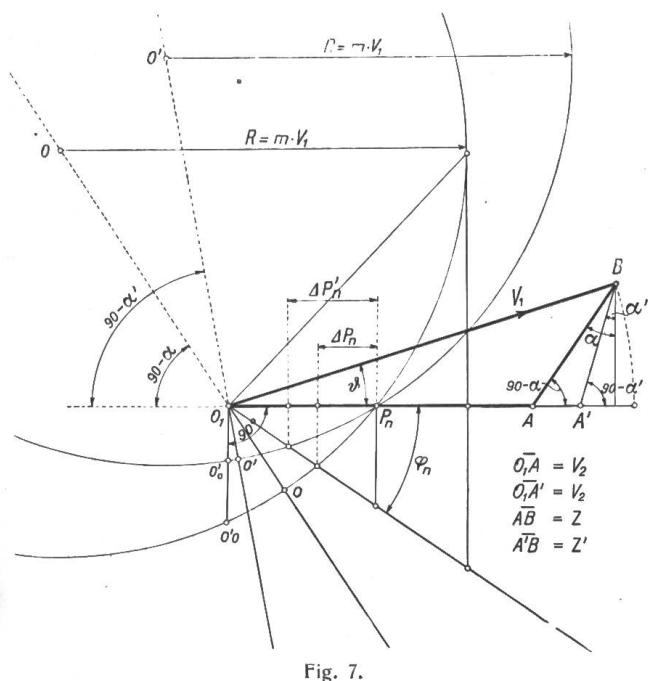


Fig. 7.

behandelte Reguliermethode wird daher vorzugsweise für Fernleitungen grösserer Uebertragungslänge in Frage kommen, die ihrer relativ hohen Induktivität wegen auch bei kleinem Winkel α immer noch Werte des numerischen Spannungsabfalls zulassen, die sich für die voranzgehenden Berechnungen der Kompensationsanlage als wirtschaftlich erweisen.

