Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 20 (1929)

Heft: 15

Artikel: Die Uebertragung grosser Leistungen

Autor: Keller, Max Leo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060773

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: 03.10.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN
BULLETIN
ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

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

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

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

XX. Jahrgang XXe Année | Bulletin No. 15 | August I Août I 1929

Die Uebertragung grosser Leistungen.[1])

Von *Max Leo Keller,* Ingenieur, Aarau.

621.319(004)+621.311(7)

Inhaltsverzeichnis: — Tables des matières:

Einleitung.

I. TEIL.
Theoretische Untersuchungen.

A. Die Berechnung von Kraftübertragungen.
Die allgemeinen Strom- und Spannungsgleichungen.
Die Leitungskonstanten *A, B, C.*
Das Strom- und Spannungsdiagramm.
B. Die Berücksichtigung von Transformatoren und die Leitungskonstanten zusammengesetzter Netze.
C. Die Verwendung von Synchronkondensatoren und Anzapftransformatoren.
D. Das Kreisdiagramm.
E. Die Grenzen der Kraftübertragung.
Das Verhalten der selbsttätigen Spannungsregulierung.
F. Die Stabilität.
Die statische Stabilitätsgrenze.
Die dynamische Stabilität.
Die kompensierte Leitung.
G. Die Wahl der Betriebsleistung.
H. Die Strom- und Spannungsverhältnisse längs der Leitung.
Literaturverzeichnis zum I. Teil.

Introduction.

1re PARTIE.
Recherches théoriques.

A. Le calcul du transport d'énergie.
Les équations générales du courant et de la tension.
Les constantes de ligne *A, B, C.*
Le diagramme des courants et des tensions.
B. La prise en considération des transformateurs et les constantes de ligne des réseaux composés.
C. L'emploi de condensateurs synchrones et de transformateurs à prises variables.
D. Le diagramme circulaire.
E. Les limites du transport d'énergie.
Le fonctionnement du réglage automatique de la tension.
F. La stabilité du transport.
La limite statique de stabilité.
La limite dynamique de stabilité.
La ligne compensée.
G. Le choix de la puissance d'exploitation.
H. Les conditions de courant et de tension le long de la ligne.
Bibliographie.

Einleitung.

Die Forderung nach möglichst hoher Wirtschaftlichkeit in der Elektrizitätsversorgung hat in fast allen Ländern zum Bau von Grosskraftwerken geführt. Diese Entwicklung hat einen bedeutenden Einfluss auf den modernen Schaltanlagenbau und die Kraftübertragung ausgeübt, die beide von der früheren untergeordneten Rolle in der Elektrizitätswerkprojektierung zu massgebendsten Faktoren geworden sind. Dabei hat es sich immer deutlicher gezeigt, dass Zentrale und Kraftübertragung vom technischen, sowohl wie vom wirtschaftlichen Standpunkt aus, zusammen gehören und gemeinsam zu projektieren und zu beurteilen sind. Sie beide bilden das Energie-

[1]) Eingang bei der Redaktion: 16. Sept. 1928.

erzeugungssystem und oft kann das eine durch das andere ersetzt werden, indem in manchen Fällen sich der Bau eines neuen Kraftwerkes durch eine Kraftübertragung vermeiden lässt, während in wieder andern Fällen es vorteilhafter sein mag, ein neues Kraftwerk zu errichten, statt durch eine Leitung die irgendwo vorhandene Energie dem gegebenen Verbrauchsort zuzuführen. Das Energieverteilungs- und Verbrauchersystem bleibt nach wie vor eine ziemlich selbständige Einheit, die von neuen Massnahmen und Aenderungen in der Produktion wenig berührt wird.

Die Basis für alle wirtschaftlichen Untersuchungen ist der Preis der Energie in der benötigten Form am Verbrauchsort. Bei der Ausnützung der natürlichen Hilfsquellen, wie Kohle, Torf, Oel, Wind- und Wasserkraft, Flut und Ebbe, Sonnen- und Erdwärme, ist der Energiegestehungspreis am Fundort, sofern er nicht gleichzeitig Verwendungsstelle ist, nur ein Zwischenwert; es müssen zu demselben noch die Kosten der Transformierung und des Transportes hinzugerechnet werden, um den massgebenden Vergleichspreis zu erhalten. Bei der Ausnützung von abgelegenen Wasserkräften kommt heutzutage nur der Energietransport mit Hochspannungsleitungen in Betracht. Das trifft in der Schweiz und Ländern mit ähnlichen Verhältnissen auch für alle Werke zu, deren Absatzgebiet nicht im Inland allein liegt, sondern deren teilweise oder ganze Kraft der Ausfuhr dient oder dienen wird. Damit jedoch in wasserreichen Ländern, wie eben z. B. die Schweiz, eine nennenswerte Ausnützung der für das Inland überschüssigen Wasserkraft aus wirtschaftlichen Gründen überhaupt möglich werden kann, wird es nötig sein, grosse Energiemengen dafür zur Verfügung zu haben und dieselben, wenn auch nur auf kurze Entfernungen, mit Spannungen zu übertragen, deren Wert eher über als unter 200 000 V liegt. Die Gründe dazu liegen durchwegs in den andernfalls zu hoch werdenden Uebertragungskosten, welche, wie bereits angedeutet, die Verwertung der sonst im Gestehungspreis am Erzeugungsort vorteilhaften Energie verunmöglichen.

Solche Leitungen für hohe Spannungen, grosse Leistung und den verschiedensten Entfernungen kommen jedoch nicht nur für den Energietransport vom Erzeugungsort zum Verbrauchsort in Frage, sondern werden ebenso zweckmässig für die Koppelung zwischen grossen Energiesystemen ausgebaut. Dadurch verliert aber die Leitung ihren bisherigen einfachen Charakter und wird zu einem äusserst komplizierten Gebilde, dessen Arbeitsweise nebst von den Leitungsgrössen auch von den elektrischen und mechanischen Eigenschaften der angeschlossenen Kraftwerke und der Art der Belastungen abhängt. Mit andern Worten: die Kraftübertragung beeinflusst die Konstruktion der Generatoren, die Art der Erregung, die Spannungsregulierung, die Einstellung der Relais und Schalter; auf der mechanischen Seite sind von Einfluss, die kinetischen Energien der rotierenden Massen, die Turbinenregulatoren, die Aenderungsgeschwindigkeit in der Wasserzufuhr bei Wasserturbinen u. a. m.

Das Problem der Grosskraftübertragung hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Insbesondere hat die Entwicklung der Elektrizitätswirtschaft in den Vereinigten Staaten von Amerika zu einer Lösung dieser Frage gedrängt. Sie bildete deshalb schon öfters im Schosse des „American Institute of Electrical Engineers“ Gegenstand von Untersuchungen[2]). Gleichzeitig wurde auch in Europa, vor allem in Deutschland und Frankreich, dem Problem rege Aufmerksamkeit geschenkt[3]). Doch fast alle bisherigen Arbeiten galten der Uebertragung von elektrischer Energie auf sehr lange Entfernungen. Zum mindesten ebenso wichtig sind aber, infolge der zunehmenden Ausdehnung der Wechselwirtschaft über weite und intensiv elektrifizierte Gebiete, die Koppelungsleitungen zwischen Energiezentren, die auch für kurze Strecken für hohe Spannungen und die maximal zulässige Grenzleistung zu bauen sind. Sie sind folglich im wesentlichen denselben Erscheinungen und Bedingungen unterworfen, wie die Fernkraftübertragungen. Es liegt deshalb kein Grund vor, bei Grosskraftübertragungen einen besonderen Unterschied zwischen

[2]) Literatur 6, 7, 17 bis 21, 23 bis 30, 37 bis 45, 56, 57; siehe Literaturverzeichnis S. 506.
[3]) Literatur 3, 10 bis 14, 35, 36, 46, 48 bis 52.

sehr langen und verhältnismässig kurzen Leitungen zu machen. Dagegen ist es hier von besonderer Wichtigkeit, dass solche Uebertragungen sich organisch in ein Kraftsystem einfügen, d. h. sie dürfen sich nicht nur nach den engeren Gesichtspunkten richten, die für gewöhnliche Leitungen wegleitend sind, sondern sie haben auf die Struktur des gesamten Systems Rücksicht zu nehmen. Das häufige Versagen von Koppelungsleitungen und Grosskraftübertragungen lässt sich in der Regel auf die Missachtung letzterer Forderung zurückführen.

In der nachstehenden Arbeit wird versucht, an Hand von Theorie und Praxis, d. h. der Berechnung und einer ausgeführten Anlage, die Arbeitsweise von Kraftübertragungen grosser Leistung darzustellen. Die Berechnung soll eine qualitative Analysis ermöglichen, während das Beispiel Aufschluss über die wirklichen Grössenverhältnisse geben soll. Die theoretischen Untersuchungen gelten für Kraftübertragungen irgendwelcher Dimensionen. Das Ausführungsbeispiel dagegen ist klassisch für die Fortleitung von hohen Leistungen auf verhältnismässig kurze Entfernungen, und wobei die Kuppelung mit anderen Systemen mitberücksichtigt werden muss.

I. Teil.

Theoretische Untersuchungen.

A. Die Berechnung von Kraftübertragungen.

Jede elektrische Leitung, ganz gleichgültig für welche Spannung, Leistung und Länge, ist gegeben durch die vier Leitungsgrössen. Diese sind:

1. der Ohmsche Widerstand *(R)*
2. die Ableitung *(G)*
3. die Induktivität *(L)*
4. die Kapazität *(C)*

Die beiden erstgenannten „Konstanten" führen zu einem Energieverlust, die zwei letztgenannten Grössen stellen eine Energiespeicherung dar. Der Einfluss vom Widerstand und der Induktivität hängt vom Leiterstrom und derjenige von der Ableitung und der Kapazität von der Betriebsspannung ab. Infolge der Gegenwart von Widerstand und Induktivität in einer Leitung ändert sich die Spannung nach Grösse und Phase in jedem Leiterelement um den entsprechenden Ohmschen bezw. induktiven Spannungsabfall. Der Strom dagegen ändert sich in Grösse und Phase je nach dem Wert der Ableitung und Kapazität, um den jeweiligen Betrag des Ladestroms.

Der Widerstand und die Induktivität werden zur Impedanz. $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, die Ableitung und die Kapazität zur Admittanz, $Y = \sqrt{G^2 + (\omega C)^2}$, in einen gemeinsamen Ausdruck zusammengefasst.

Wir benützen im folgenden die „symbolische Schreibweise". Es wird dabei $Z = R + j\,\omega L$ oder $= Z_0\, \varepsilon^{j \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}}$ und $Y = G + j\,\omega C$ oder $Y_0\, \varepsilon^{j \operatorname{arctg} \frac{\omega C}{G}}$.

Die allgemeinen Strom- und Spannungsgleichungen.

Die bekannten Differentialgleichungen für die räumliche und zeitliche Aenderung der Spannung und des Stromes für ein Leiterelement dl (Fig. 1) lauten:

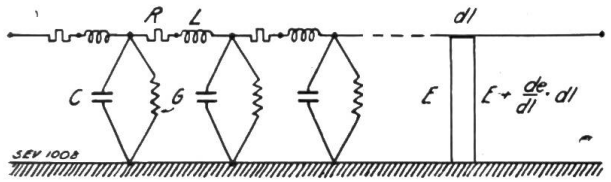


Fig. 1.
Schema einer Leitung.

$$-\frac{dE}{dl} = (R + j\,\omega L)\, I \qquad (1)$$

und

$$-\frac{dI}{dl} = (G + j\,\omega C)\, E \qquad (2)$$

Differenziert man Gleichung (1) nochmals nach $\mathrm{d}\,l$:

$$-\frac{\mathrm{d}^2 E}{\mathrm{d}\,l^2} = (R + j\,\omega L)\,\frac{\mathrm{d}\,I}{\mathrm{d}\,l}$$

und ersetzt darin $\frac{\mathrm{d}\,I}{\mathrm{d}\,l}$ durch Gleichung (2), so wird:

$$\frac{\mathrm{d}^2 E}{\mathrm{d}\,l^2} = (R + j\,\omega L)\,(G + j\,\omega C)\,E \tag{3}$$

oder wenn man $(R + j\,\omega L) = Z$; $(G + j\,\omega C) = Y$ setzt:

$$\frac{\mathrm{d}^2 E}{\mathrm{d}\,l^2} = Z\,Y\,E \tag{3a}$$

Diese Gleichung zweiter Ordnung hat die Form $\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}\,x^2} = a\,y$ und wird erfüllt durch $y = K'\,\varepsilon^{px} + K''\,\varepsilon^{-px}$, wobei $p = \sqrt{a}$. Also:

$$E = K_1\,\varepsilon^{l\sqrt{zy}} + K_2\,\varepsilon^{-l\sqrt{zy}} \tag{4}$$

und damit wird unter Benützung von Gleichung (1) und (4) der Strom:

$$I = -\frac{1}{(R + j\,\omega L)}\,\frac{\mathrm{d}\,E}{\mathrm{d}\,l} = \sqrt{\frac{y}{z}}\left(K_2\,\varepsilon^{-l\sqrt{zy}} - K_1\,\varepsilon^{l\sqrt{zy}}\right) \tag{5}$$

Setzen wir nun zur Bestimmung der Konstanten die Spannung am Anfang der Leitung gleich E_a, den Strom gleich I_a, so wird bei der Grenzbedingung, Länge der Leitung $l = 0$:

$$E_a = K_1 + K_2 \text{ und } I_a = \sqrt{\frac{y}{z}}\,(K_2 - K_1)$$

oder die Konstanten:

$$K_1 = \frac{1}{2}\left(E_a - I_a\sqrt{\frac{z}{y}}\right)$$

$$K_2 = \frac{1}{2}\left(E_a + I_a\sqrt{\frac{z}{y}}\right)$$

Diese Werte in Gleichung (4) eingesetzt und umgeformt ergeben die Spannung E_e im Abstande l zu:

$$E_e = E_a\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{zy}} + \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) - I_a\sqrt{\frac{z}{y}}\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{zy}} - \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) \tag{6}$$

den Strom I_e im Abstande l zu:

$$I_e = I_a\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{zy}} + \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) - E_a\sqrt{\frac{y}{z}}\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{zy}} - \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) \tag{7}$$

Ist statt Sendespannung und -Strom Empfangsspannung und Empfangsstrom am Lastende der Leitung gegeben, so müssen in Gleichung (4) $\pm\,l\sqrt{zy}$ und in Gleichung (5) K_1 und K_2 vertauscht werden, worauf auf dieselbe Weise gefunden wird:

$$E_a = E_e\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{zy}} + \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) + I_e\sqrt{\frac{z}{y}}\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{zy}} - \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) \tag{8}$$

$$I_a = I_e\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{yz}} + \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) + E_e\sqrt{\frac{y}{z}}\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{l\sqrt{zy}} - \varepsilon^{-l\sqrt{zy}}\right) \tag{9}$$

Es ist in der Regel zweckmässiger, statt z und y pro Längeneinheit (km) einzusetzen und dann mit der Leitungslänge l (km) zu multiplizieren, schon von Anfang an die Werte Z und Y für die gesamte Leitungslänge zu verwenden. Wir können damit die vorstehenden Gleichungen in der Form schreiben:

$$E_e = E_a A - I_a B \tag{10}$$
$$I_e = I_a A - E_a C \tag{11}$$
$$E_a = E_e A + I_e B \tag{12}$$
$$I_a = I_e A + E_e C \tag{13}$$

wobei die Leitungskonstanten werden:

$$A = \frac{1}{2}\left(\varepsilon^{\sqrt{ZY}} + \varepsilon^{-\sqrt{ZY}}\right) \tag{14}$$

$$B = \sqrt{\frac{Z}{Y}}\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{\sqrt{ZY}} - \varepsilon^{-\sqrt{ZY}}\right) \tag{15}$$

$$C = \sqrt{\frac{Y}{Z}}\,\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{\sqrt{ZY}} - \varepsilon^{-\sqrt{ZY}}\right) \tag{16}$$

Der physikalische Sinn dieser Konstanten ist weiter unten des näheren erläutert.

Die Leitungskonstanten A, B und C.

Oft wird die Berechnung dieser Grössen mit Hilfe hyperbolischer Funktionen durchgeführt, entsprechend der Beziehung:

$$\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{\sqrt{ZY}} + \varepsilon^{-\sqrt{ZY}}\right) = \cosh\sqrt{Z\,Y} \quad \text{und}$$

$$\frac{1}{2}\left(\varepsilon^{\sqrt{ZY}} - \varepsilon^{-\sqrt{ZY}}\right) = \sinh\sqrt{Z\,Y} \quad \text{und damit}$$

$$A = \cosh\sqrt{Z\,Y} \tag{17}$$

$$B = \sqrt{\frac{Z}{Y}}\,\sinh\sqrt{Z\,Y} \tag{18}$$

$$C = \sqrt{\frac{Y}{Z}}\,\sinh\sqrt{Z\,Y} \tag{19}$$

Die Ausdrücke ε^x und ε^{-x} lassen sich aber auch in Reihen entwickeln:

$$\varepsilon^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \ldots$$

$$\varepsilon^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} - \ldots$$

so dass sich die Leitungskonstanten in der einfachen Form von konvergenten Reihen ohne besondere Hilfsmittel berechnen lassen. Infolge der starken Konvergenz dieser Reihen genügt für Kraftübertragungen die Berücksichtigung von 3 Gliedern, für Leitungen bis zu 100 km von nur 2 Gliedern. Es ist:

$$A = \left(1 + \frac{Z\,Y}{2} + \frac{Z^2\,Y^2}{24} + \frac{Z^3\,Y^3}{720} + \frac{Z^4\,Y^4}{40320} + \ldots\right) \tag{20}$$

$$B = Z\left(1 + \frac{Z\,Y}{6} + \frac{Z^2\,Y^2}{120} + \frac{Z^3\,Y^3}{5040} + \frac{Z^4\,Y^4}{362\,880} + \ldots\right) \tag{21}$$

$$C = Y\left(1 + \frac{Z\,Y}{6} + \frac{Z^2\,Y^2}{120} + \frac{Z^3\,Y^3}{5040} + \frac{Z^4\,Y^4}{362\,880} + \ldots\right) \tag{22}$$

Die Leitungskonstanten A, B, C sind, wie man sieht, von Strom und Spannung, also von der Belastung der Leitung unabhängig und werden, ausser von der Frequenz, allein von den physikalischen Charakteristiken des verwendeten Materials und der Leiteranordnung bezw. Konstruktion beeinflusst.

Da Z und Y komplexe Ausdrücke sind, so werden auch A, B, C komplexe Zahlen sein; also:

$$A = (a_1 + j\,a_2) \tag{23 a}$$

$$B = (b_1 + j\,b_2) \tag{23 b}$$

$$C = (c_1 + j\,c_2) \tag{23 c}$$

Wie aus den Gleichungen 14, 15, 16 hervorgeht, besteht unter diesen Grössen immer die Beziehung:

$$A^2 - B\,C = 1 \tag{24}$$

Das Strom- und Spannungsdiagramm.

Kennt man die Leitungskonstanten, so kann man mit Hilfe der Gleichungen 10 bis 13 das Strom- und Spannungsdiagramm für irgendwelche Belastungen berechnen oder graphisch aufzeichnen (Fig. 2, 3 und 4). Aus diesen Diagrammen ist der Einfluss und der physikalische Sinn der verschiedenen Grössen sehr hübsch erkenntlich.

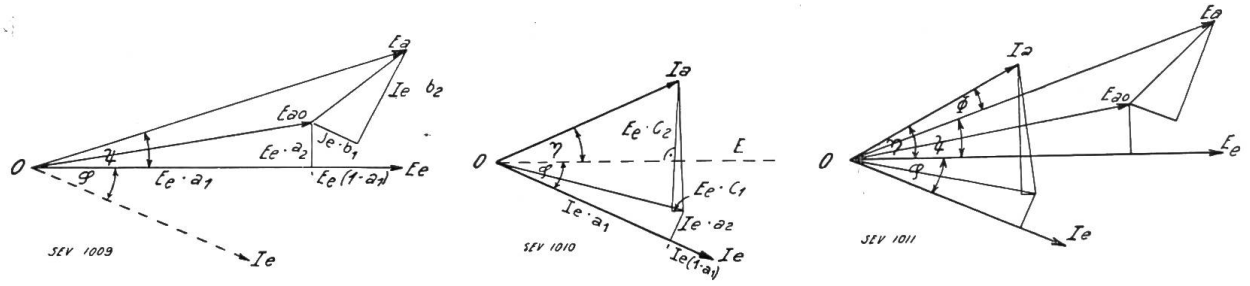


Fig. 2. Spannungsdiagramm.

Fig. 3. Stromdiagramm.

Fig. 4. Kombiniertes Strom- und Spannungsdiagramm.

$E_e\,(1-a_1)$ Spannungsverbrauch des durch die Leitungsinduktanz fliessenden Ladestromes.

$E_e\,a_2$ Spannungsverbrauch des durch den Ohmschen Widerstand fliessenden Ladestromes.

b_1 Ohmscher Widerstand R in Ohm
b_2 Induktanz ωL in Ohm
C_1 Ableitung G in Siemens
C_2 Konduktanz ωC in Siemens
} die, infolge ihrer verteilten Natur längs der Leitung, sich gegenseitig beeinflussen und ändern.

$\cos\varphi$ Leistungsfaktor am Ende der Leitung bzw. der $\cos\varphi$ der Belastung.

$\cos\Phi$ Leistungsfaktor am Anfang der Leitung bzw. der Generatoren (hochspannungsseitig).

ψ Winkel zwischen den Spannungen am Anfang und Ende der Leitung.

η Winkel zwischen der Spannung am Ende und dem Strom am Anfang der Leitung.

$\eta + \varphi$ Winkel zwischen dem Strom am Anfang und Ende der Leitung.

Diese Diagramme zeigen deutlich die Veränderungen, denen Strom und Spannung bei verschiedenen Belastungszuständen unterworfen sind. Im Leerlauf stellt der Vektor $\overline{O\,E_{a\,o}}$ die Anfangsspannung der Leitung dar, die einreguliert werden muss, um die Endspannung E_e zu halten. Halten jedoch die Spannungsregler die Sendespannung konstant, so erhöht sich die Endspannung im Verhältnis $E_a : E_{a\,o}$. Im Stromdiagramm verschiebt sich das Ladestrom-Dreieck, $E_e\,C$, nach dem Ursprungspunkt O, da $I_e = 0$. Wird der Einfluss von Ableitung und Kapazität vernachlässigt, so wird $A = a_1 + j\,a_2 = 1$ und der Vektor $\overline{O\,E_{a\,o}}$ fällt mit $\overline{O\,E_e}$ zusammen; die Grösse b_1 wird gleich dem Widerstand R und b_2 gleich der Induktanz $\omega\,L$ (siehe Gleichung 21, $Y = 0$), womit man das bekannte Diagramm für kurze Niederspannungsleitungen erhält.

B. Die Berücksichtigung von Transformatoren und die Leitungskonstanten zusammengesetzter Netze.

Bei den oben gegebenen Gleichungen wurde vorausgesetzt, dass es sich um eine homogene Leitung handelt, und dass sich Strom und Spannung auf die Hoch-

spannungsseite der Kraftübertragung beziehen. Oft ist es jedoch erwünscht, die Berechnungen einerseits oder beidseitig direkt auf die Unterspannungsseite der Uebertragung auszudehnen. Bei der angenäherten Rechnung wird die Transformatorenimpedanz arithmetisch zu derjenigen der Leitung addiert, also angenommen, dass sich ihre Wirkung gleichmässig über die ganze Leitung verteile. In Wirklichkeit bildet jedoch der Transformator einen Impedanzknoten in der Kraftübertragung. Befindet sich überdies nur auf der einen Seite der Leitung ein Transformator oder haben die Auf- und Abtransformatoren nicht dieselbe Charakteristik, so wird die Kraftübertragung nicht nur unhomogen, sondern auch unsymmetrisch in bezug auf ihren Mittelpunkt. Dies beeinflusst die Konstante A in Gleichung 10 und 13, die wir für diese Fälle durch eine Konstante D ersetzen, welche der Unsymmetrie Rechnung trägt. Damit lauten ganz allgemein die Strom- und Spannungsgleichungen:

$$E_e = E_a\, D - I_a\, B \tag{25}$$
$$I_e = I_a\, A - E_a\, C \tag{26}$$
$$E_a = E_e\, A + I_e\, B \tag{27}$$
$$I_a = I_e\, D + E_e\, C \tag{28}$$

Auf dieselbe Art, nämlich durch die Bestimmung der Konstanten, lässt sich auch ein aus mehreren verschiedenen Teilen zusammengesetztes Kraftübertragungssystem der Rechnung unterwerfen.

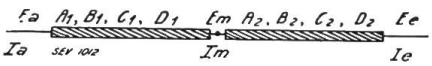


Fig. 5.
Zusammengesetzte Leitung.

Als Beispiel sei eine aus zwei in Serie geschalteten Teilen, die ihrerseits auch schon zusammengesetzt sein können, bestehende Leitung angenommen (Fig. 5). Es ist dann nach Gleichung (25) und (26):

$$E_m = E_a\, D_1 - I_a\, B_1$$
$$I_m = I_a\, A_1 - E_a\, C_1$$
$$E_e = E_m\, D_2 - I_m\, B_2$$
$$I_e = I_m\, A_2 - E_m\, C_2$$

Setzt man die Werte von E_m und I_m in den Gleichungen für E_e und I_e ein, so wird:

$$E_e = E_a\,(D_1\, D_2 + C_1\, B_2) - I_a\,(A_1\, B_2 + B_1\, D_2) = E_a\, D_0 - I_a\, B_0$$
$$I_e = I_a\,(A_1\, A_2 + B_1\, C_2) - E_a\,(C_1\, A_2 + D_1\, C_2) = I_a\, A_0 - E_a\, C_0$$

also:

$$A_0 = A_1\, A_2 + B_1\, C_2$$
$$B_0 = A_1\, B_2 + B_1\, D_2$$
$$C_0 = C_1\, A_2 + D_1\, C_2$$
$$D_0 = D_1\, D_2 + C_1\, B_2$$

auch hier gilt natürlich die Beziehung nach Gleichung (24):

$$A_0\, D_0 - B_0\, C_0 = 1 \tag{29}$$

Die Bestimmung der allgemeinen Netzkonstanten auf die dargestellte Art wurde zuerst von R. D. Evans und H. K. Sels angegeben[4]) und für eine grosse Anzahl von Netzkombinationen durchgeführt. Sie sind in der Tabelle I, die dem Verfasser von den beiden Autoren in freundlicher Weise zur Verfügung gestellt wurde, zusammengestellt. Die Tabelle umfasst die meisten in der Praxis vorkommenden Fälle.

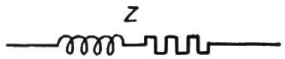
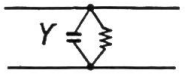
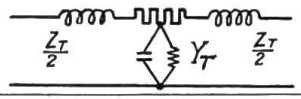
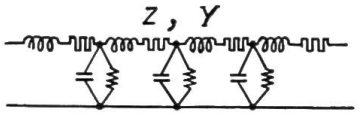
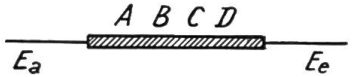
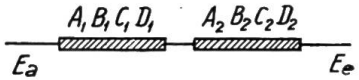
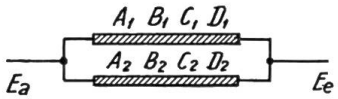
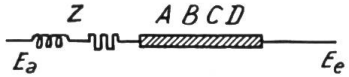
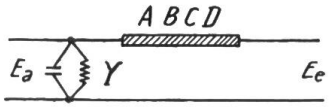
C. Die Verwendung von Synchronkondensatoren und Anzapftransformatoren.

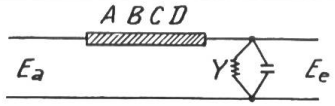
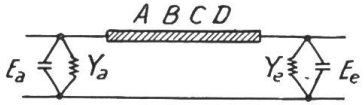
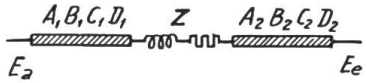
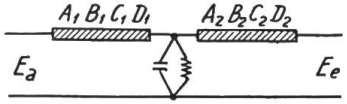
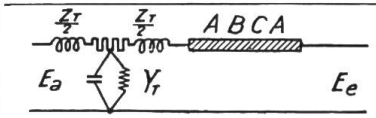
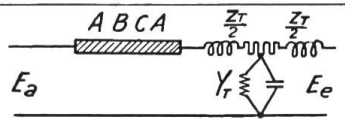
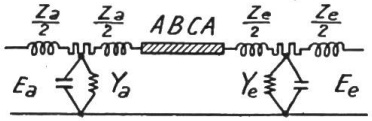
Die Eigenschaft übererregter Synchronmaschinen, phasenvoreilenden Strom abzugeben, bietet ein hervorragendes Mittel zur Regulierung der Spannung und zur stabilen Uebertragung grosser Leistungen auf weite Entfernungen. Für gegebene Spannungsverhältnisse ist nicht nur die maximale kW-Belastung gegeben, sondern

[4]) Electrical Journal 1921, S. 358; Literatur 9.

Leitungskonstanten für verschiedene Netzschaltungen. (Nach R. D. Evans und H. K. Sels.)

Tabelle I.

Pos.	für	Schema	A_0	B_0	C_0	D_0
1	Serie-Impedanz . .		1	Z	0	1
2	Shunt-Admittanz .		1	0	Y	1
3	Transformator . .		$1+\frac{Z_T Y_T}{2}$	$Z_T\left(1+\frac{Z_T Y_T}{4}\right)$	Y_T	$1+\frac{Z_T Y_T}{2}$
4	Leitung		$A = \cosh\sqrt{Z\,Y} = \left(1+\frac{Z\,Y}{2}+\frac{Z^2\,Y^2}{24}+\cdots\right)$	$B = \sqrt{\frac{Z}{Y}}\sinh\sqrt{Z\,Y} = Z\left(1+\frac{Z\,Y}{6}+\frac{Z^2\,Y^2}{120}+\cdots\right)$	$C = \sqrt{\frac{Y}{Z}}\sinh\sqrt{Z\,Y} = Y\left(1+\frac{Z\,Y}{6}+\frac{Z^2\,Y^2}{120}+\cdots\right)$	$D = A$
5	Netz (allgemein) .		A	B	C	D
6	Zwei Netze in Serie		$A_1 A_2 + B_1 C_2$	$A_1 B_2 + B_1 D_2$	$C_1 A_2 + D_1 C_2$	$D_1 D_2 + C_1 B_2$
7	Zwei Netze parallel		$\frac{A_1 B_2 + B_1 A_2}{B_1 + B_2}$	$\frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2}$	$C_1 + C_2 + \frac{(A_1 - A_2)(D_2 - D_1)}{B_1 + B_2}$	$\frac{B_1 D_2 + D_1 B_2}{B_1 + B_2}$
8	Netz und Anfangs-impedanz (Transformator [1])		$A + C\,Z$	$B + D\,Z$	C	D
9	Netz und Empfangs-impedanz (Transformator [1])		A	$B + A\,Z$	C	$D + C\,Z$
10	Netz u. Impedanzen (Transformatoren [1]) an beiden Enden		$A + C\,Z_a$	$B + D\,Z_a + A\,Z_e + C\,Z_a\,Z_e$	C	$D + C\,Z_e$
11	Netz und Admittanz am Sendeende		A	B	$C + A\,Y$	$D + B\,Y$

12	Netz und Admittanz am Empfangsende		$A + B\,Y$	B	$C + D\,Y$	D
13	Netz mit Admittanzen an beiden Enden		$A + B\,Y_e$	B	$C + A\,Y_a + D\,Y_e + B\,Y_a\,Y_e$	$D + B\,Y_a$
14	Zwei Netze mit zwischengeschalteter Impedanz		$A_1\,A_2 + B_1\,C_2 + A_1\,C_2\,Z$	$A_1\,B_2 + B_1\,D_2 + A_1\,D_2\,Z$	$A_2\,C_1 + C_2\,D_1 + C_1\,C_2\,Z$	$B_2\,C_1 + D_1\,D_2 + C_1\,D_2\,Z$
15	Zwei Netze mit zwischengeschalteter Admittanz		$A_1\,A_2 + B_1\,C_2 + A_2\,B_1\,Y$	$A_1\,B_2 + B_1\,D_2 + B_1\,B_2\,Y$	$A_2\,C_1 + C_2\,D_1 + A_2\,D_1\,Y$	$B_2\,C_1 + D_1\,D_2 + B_2\,D_1\,Y$
16	Leitung mit Sendetransformator [2]		$A\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{2}\right) + C\,Z_T\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{4}\right)$	$B\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{2}\right) + A\,Z_T\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{4}\right)$	$C\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{2}\right) + A\,Y_T$	$A\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{2}\right) + B\,Y_T$
17	Leitung mit Empfangstransformator [2]		$A\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{2}\right) + B\,Y_T$	$B\left(1 + \frac{Z_T\,Z_T}{2}\right) + A\,Z_T\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{4}\right)$	$C\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{2}\right) + A\,Y_T$	$A\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{2}\right) + C\,Z_T\left(1 + \frac{Z_T\,Y_T}{4}\right)$
18	Leitung mit Transformatoren am Sende- und Empfangsende [2]		$A_o = A\left[\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right) + Z_a\,Y_e\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{4}\right)\right] + B\,Y_e\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right) + C\,Z_a\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{4}\right)$	$B_o = B\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right) + A\left[Z_e\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{4}\right) + Z_a\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{4}\right)\right] + C\,Z_a\,Z_e\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{4}\right)\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{4}\right)$	$C_o = C\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right) + A\left[Y_a\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right) + Y_e\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right)\right] + B\,Y_a\,Y_e$	$D_o = A\left[\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right) + Z_e\,Y_a\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{4}\right)\right] + B\,Y_a\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{2}\right) + C\,Z_e\left(1 + \frac{Z_a\,Y_a}{2}\right)\left(1 + \frac{Z_e\,Y_e}{4}\right)$

[1]) Wenn für Transformatoren benützt, so ist der Magnetisierungsstrom vektoriell zum Belastungsstrom zu addieren.

[2]) Nur für ein gegebenes Spannungsverhältnis, da Aenderung der Sättigung bezw. des Magnetisierungsstromes mit der Spannung nicht einbezogen ist. Es empfiehlt sich deshalb im allgemeinen die Verwendung von Pos. 8 bezw. 9 und 10 für Transformatoren mit veränderlicher Spannung.

zu jeder Wirklast gehört auch eine ganz bestimmte Blindleistung, welche von der Leitungscharakteristik abhängt. Mit andern Worten: wenn der cos φ der Gebrauchslast von demjenigen am Ende der Leitung abweicht, so muss die $\pm$ Differenz an Blindstrom von dritter Seite geliefert werden, wenn die Spannungen fixiert bleiben sollen. In Fig. 6 ist das vollständige Diagramm mit Synchronkondensatoren am Empfangsende gegeben. Die gestrichelten Vektoren stellen die Strom- und Spannungsverhältnisse dar, wenn keine Synchronkondensatoren, für die Uebertragung derselben angenommen Wirkleistung, verwendet werden. Man sieht, wie im letzteren Fall sich nicht nur die Sendespannung stark erhöht, sondern auch die Verluste stark zunehmen.

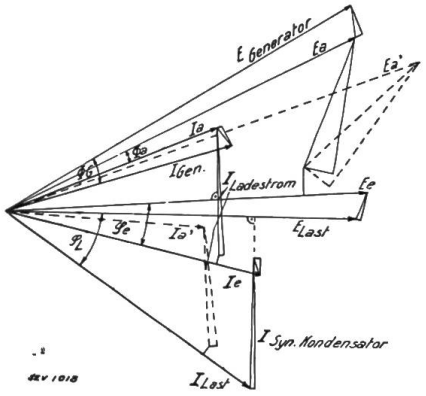


Fig. 6.
Vollständiges Strom- und Spannungsdiagramm für Betrieb mit Synchronkondensatoren am Ende der Leitung.

Eine andere Möglichkeit, die Sendespannung unverändert oder doch in zulässigen Grenzen zu halten, liegt in der Verwendung von Anzapftransformatoren an Stelle der Synchronkondensatoren. Die Methode der Spannungsregulierung durch Anzapftransformatoren hat gegenüber der Verwendung von Kondensatoren den Vorteil, dass rotierende Maschinen dabei vermieden werden; dagegen hat sie den Nachteil, dass die Blindleistung der Belastung von den Generatoren und der Leitung getragen werden muss. Dieser letztere Umstand bedingt bei kürzeren Kraftübertragungen hoher Leistungsfähigkeit vor allem einen grösseren Spannungsabfall, während die Kompensierung der Blindlast am Empfangsende einen Betrieb mit höherem durchschnittlichen Leistungsfaktor und besserem Wirkungsgrad erlaubt. Bei sehr langen Leitungen, die sowohl eine beträchtlich voreilende wie nacheilende Blindstromkompensierung benötigen, sind Synchronkondensatoren wegen ihrer besseren Regulierbarkeit zweckmässiger. Neben den Betriebsbedingungen bestimmt die Wirtschaftlichkeit, welche der beiden Arten der Regelung den Vorzug verdient; oft werden jedoch beide vorteilhaft miteinander kombiniert.

Schliesst man bei der Berechnung der Leitungskonstanten die Transformatoren ein, so vereinfacht sich das Diagramm um die Transformatoren-Impedanzdreiecke[5]). Da jedoch die Berechnung für diesen Fall ziemlich viel Arbeit erfordert und dabei der Aenderung der Sättigung bei verschiedenen Transformatorenspannungen doch nicht Rechnung getragen wird, so ist es meist vorteilhafter, nur die Impedanz für das Spannungsdreieck zu ersetzen und im Stromdiagramm den Magnetisierungsstrom der jeweiligen Spannung gesondert zu addieren[6]).

Die Anwendung der Synchronkondensatoren in Zwischenwerken zur Unterteilung und Kompensierung von Kraftübertragungen und ihre Bedeutung für die Stabilität wird später behandelt werden.

D. Das Kreisdiagramm.

Das Kreisdiagramm einer Leitung lässt sich aus dem Diagramm des Synchronmotors von A. Blondel herleiten. Die Arbeitsweise einer Kraftübertragung ist durch ähnliche Elemente gegeben wie für die Synchronmaschine; der hauptsächlichste Unterschied liegt im Fehlen der magnetischen Sättigung und im Auftreten der Kapazität. Die erste Anwendung des Kreisdiagramms für Leitungen geht auf R. A. Philip[7]) und H. B. Dwight[8]) zurück. Verschiedene andere Autoren haben diese Methode für

[5]) Tabelle I. Pos. 16 bis 18.
[6]) Tabelle I. Pos. 8 bis 10.
[7]) Literatur 1.
[8]) Literatur 2.

besondere Zwecke weiter entwickelt, u. a. hauptsächlich: L. Thielemans[9]), R. D. Evans & H. K. Sels[10]) und J. Ossanna[11]).

Das Kreisdiagramm gibt Aufschluss über die Beziehungen zwischen Sende- und Empfangsspannung einerseits und Wirk- und Blindleistung an den beiden Enden der Leitung anderseits. Statt mit den Leistungen lässt es sich ebenfalls auf Grund von Wirk- und Blindstrom ableiten, doch sei hier die erstere Darstellung gegeben, da sie im allgemeinen die zweckmässigere ist.

Bei Rechnung mit komplexen Zahlen erhält man den symbolischen Ausdruck der Leistung durch Multiplikation des Spannungsausdruckes mit dem konjugierten Stromwert[12]). Es seien:

$E,\ I$ skalare Werte,

$\check{E},\ \check{I}$ komplexe Werte,

$\hat{E},\ \hat{I}$ konjugierte Werte.

Damit schreiben sich die Spannungs- und Stromgleichungen:

$$\check{E}_a = \check{E}_e\ \check{A} + \check{I}_e\ \check{B}$$

$$\check{I}_a = \check{I}_e\ \check{D} + \check{E}_e\ \check{C}$$

daraus:

$$\check{I}_e = \check{E}_a\ \frac{1}{\check{B}} - \check{E}_e\ \frac{\check{A}}{\check{B}} \quad \text{und damit,}$$

$$\check{I}_a = \check{E}_a\ \frac{\check{D}}{\check{B}} - \check{E}_e\ \frac{\check{A}\check{D} - \check{B}\check{C}}{\check{B}}$$

oder bei Berücksichtigung, dass $\check{A}\check{D} - \check{B}\check{C} = 1$

$$\check{I}_a = \check{E}_a\ \frac{\check{D}}{\check{B}} - \check{E}_e\ \frac{1}{\check{B}}.$$

Dieser Wert des Stromes konjugiert und mit der Spannung $\check{E}_a$ multipliziert, ergibt die Leistung:

$$\check{E}_a\ \hat{I}_a = \check{E}_a\ \hat{E}_a\ \frac{\hat{D}}{\hat{B}} - \check{E}_a\ \hat{E}_e\ \frac{1}{\hat{B}} \tag{30}$$

Es besteht nun bei Wahl der Empfangsspannung, $\check{E}_e$, als Referenzvektor die Beziehung:

$$\check{E}_e = \hat{E}_e = E_e;\ \check{E}_a\ \hat{E}_a = E_a^2;\ \check{E}_a = E_a\ (\cos\psi + j\sin\psi),$$

wobei ψ den Phasenverschiebungswinkel zwischen der Spannung am Anfang und Ende der Leitung bedeutet. Ferner sei P die Wirkleistung, Q die zugehörige Blindleistung, so wird:

---

9) Literatur 8.

10) Literatur 9.

11) Literatur 11.

12) Wir bezeichnen die voreilende Blindleistung mit dem Minus-, die nacheilende Blindleistung mit dem Plus-Zeichen. Den Spannungsausdruck halten wir ungeändert, so dass sich bei der Berechnung des Stromes aus dem komplexen Ausdruck der Leistung zwangsläufig für voreilenden Strom +, für nacheilenden Strom – im imaginären Glied ergibt. Diese Bezeichnungsweise scheint dem Verfasser mit Rücksicht der Wirkung von Blindleistung auf Spannungsabfall und Erregung sinngemäss zu sein.

$$P_a + j\,Q_a = \check{E}_a\,\hat{I}_a = E_a^2\,\frac{\hat{D}}{\hat{B}} - \frac{E_e}{\hat{B}}\,E_a\,(\cos\psi + j\sin\psi). \tag{31}$$

Der Klammerausdruck $(\cos\psi + j\sin\psi) = e^{+j\psi}$ ist gleich 1, ändert also die Grösse von E_a nicht, sondern rotiert den Vektor lediglich um den Winkel ψ, und zwar je nach dem $\pm$ Vorzeichen des imaginären Gliedes vor- bezw. rückwärts.

Ist nun die Sendespannung E_a und die Empfangsspannung E_e konstant, so bewegt sich die Scheinleistung $P_a + j\,Q_a$ auf einem Kreise mit dem Mittelpunkt $E_a^2\frac{\hat{D}}{\hat{B}}$ und dem Radius $E_a\,E_e\frac{1}{\hat{B}}$. Der Mittelpunkt wird von der Sendespannung bestimmt; wir erhalten also, wie sich aus der Ableitung ergibt, die zu den Sendekreisen gehörenden Leistungen.

Zur Berechnung der Kreiskonstanten und für die Aufzeichnung des Diagramms lässt sich die Gleichung (31) in folgender Form schreiben:

$$P_a + j\,Q_a = E_a^2\,(l_a + j\,m_a) - E_a\,E_e\,n\,(\sin\delta + j\cos\delta)\,(\cos\psi + j\sin\psi), \tag{32}$$

wobei:

$$l_a + j\,m_a = \frac{\hat{D}}{\hat{B}};\quad n\,(\sin\delta + j\cos\delta) = \frac{1}{\hat{B}},\quad n = \frac{1}{B}$$

oder:

$$l_a = \frac{d_1\,b_1 + d_2\,b_2}{b_1^2 + b_2^2}$$

$$m_a = \frac{d_1\,b_2 - d_2\,b_1}{b_1^2 + b_2^2}$$

$$n = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}$$

ψ ist der Winkel, um welchen die Spannung am Anfang der Leitung derjenigen am Ende voreilt.

δ ist der Ergänzungswinkel zum Neigungswinkel der Konstanten B, also $\operatorname{tg}\delta = \frac{b_1}{b_2}$.

Auf dieselbe Art lässt sich auch die Gleichung für die Empfangskreise ableiten. Es wird:

$$P_e + j\,Q_e = -E_e^2\,(l_e + j\,m_e) + E_e\,E_a\,n\,(\sin\delta + j\cos\delta)\,(\cos\psi + j\sin\psi), \tag{33}$$

wobei:

$$l_e = \frac{a_1\,b_1 + a_2\,b_2}{b_1^2 + b_2^2}$$

$$m_e = \frac{a_1\,b_2 - a_2\,b_1}{b_1^2 + b_2^2}$$

Ist die Leitung symmetrisch, also $A = D$, so wird $l_e = l_a$ und $m_e = m_a$.

Die beiden Kreisdiagramme sind in Fig. 7 dargestellt. Man erkennt auch hier deutlich, dass für ein gegebenes Spannungsverhältnis zu jeder Wirklast, sowohl am Anfang wie am Ende der Leitung, ein ganz bestimmter $\cos\varphi$ gehört. Stellt der Punkt S im Sendediagramm die zu übertragende Leistung dar, so gibt der Punkt R im Empfangsdiagramm, der sich mit Hilfe des Winkels ψ auf einfache Art finden

lässt, die erhaltene Wirk- und Blindleistung am Ende der Leitung. Die Differenz der Wirkleistungen $P_a - P_e$ ergibt den Wattverlust der Kraftübertragung [13]). Weicht der Leistungsfaktor der Belastung von dem der übertragenen Leistung ab, z. B.

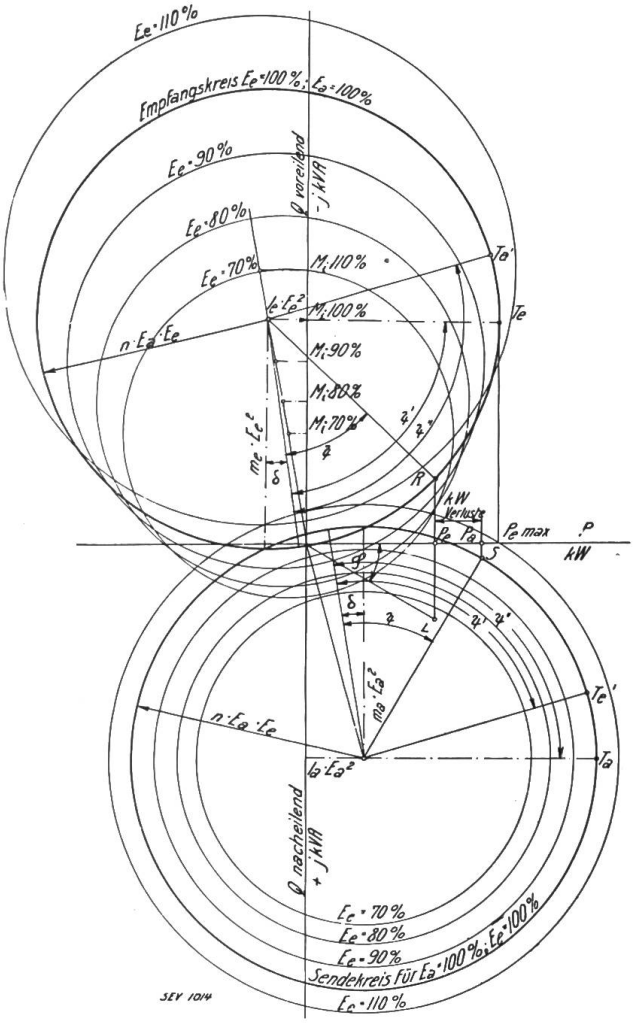


Fig. 7.
Leistungs-Kreisdiagramm für konstante Sendespannung E_a und veränderliche Empfangsspannung E_e.

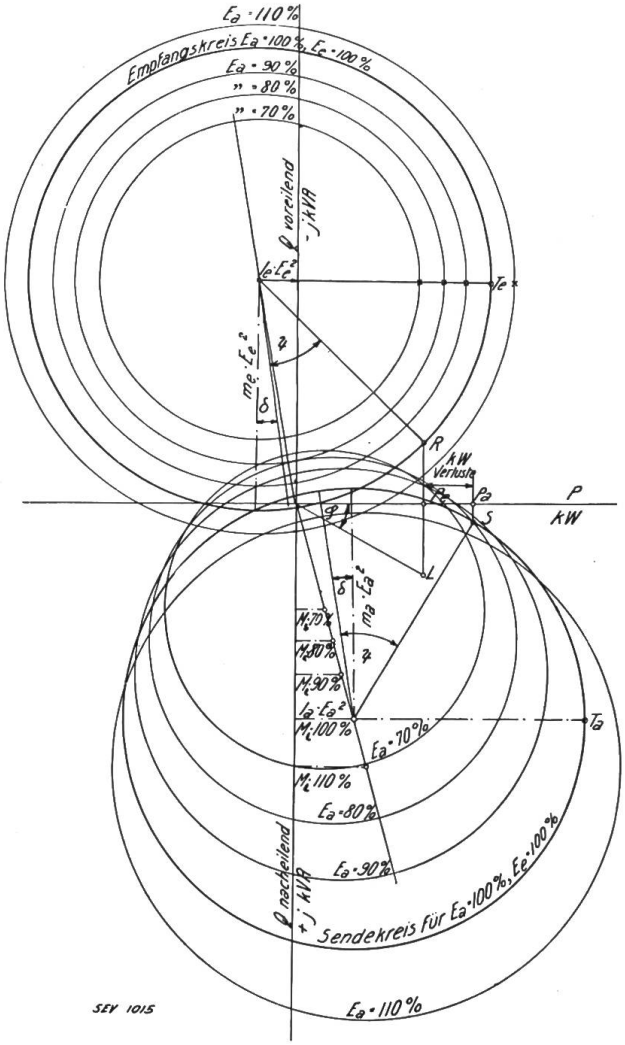


Fig. 8.
Leistungs-Diagramm für veränderliche Sendespannung E_a und konstante Empfangsspannung E_e.

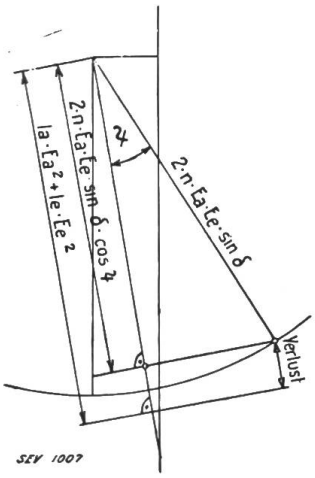


Fig. F 13.

wenn die Belastung dem Punkt L entspricht, so muss der Unterschied zwischen L und R an voreilender wattloser Leistung durch Synchronkondensatoren am Leitungsende geliefert werden, sofern eine Aenderung bezw. Anpassung der Spannung nicht zulässig ist.

Aus den Kreisgleichungen geht hervor, dass bei konstant gehaltener Sendespannung, aber veränderlichen Empfangsspannungen, der Mittelpunkt für die Sendekreise derselbe bleibt und nur die Radien sich proportional mit der Empfangsspannung ändern, während die Empfangskreise, neben den proportional ändernden Radien, auch den jeweili-

[13]) Aus Gleichung 32 und 33: kW-Verlust $= P_a - P_e = l_a E_a^2 + l_e E_e^2 - 2\, n\, E_a\, E_e \sin\delta \cos\psi$.

Durch passende Wahl des Masstabes lässt sich das Verlustdiagramm mit dem Leistungsdiagramm verbinden, und zwar so, dass man die Radien der beiden Kreise gleich gross wählt. Die Beziehungen gehen ohne weiteres aus Fig. F 13 hervor.

gen Mittelpunkt im quadratischen Verhältnis der Empfangsspannungen verschieben (Fig. 7). Bei konstanter Spannung am Ende der Leitung ist es gerade umgekehrt, d. h. die Empfangskreise für verschiedene Sendespannungen sind konzentrisch und die Sendekreise ändern sowohl Radius wie Mittelpunkt im oben genannten Verhältnis (Fig. 8).

E. Die Grenzen der Kraftübertragung.

Die Kreisgleichung (33) kann man bei Umgruppierung auch schreiben:

$$n\, E_a\, E_e = (P_e + l_e\, E_e^2) + j\, (Q_e + m_e\, E_e^2)$$

oder:

$$n^2\, E_a^2\, E_e^2 = (P_e + l_e\, E_e^2)^2 - (Q_e + m_e\, E_e^2)^2.$$

Unter der Annahme, dass wir über die Blindleistung frei verfügen können, wird die maximale Wirkleistung:

$$P_e = n\, E_a\, E_e - l_e\, E_e^2, \tag{34}$$

d. h. die maximale kW-Leistung, welche – unter vorstehender Bedingung – von einer Leitung übertragen werden kann, ist bei unbegrenzter Sendespannung ebenfalls unbegrenzt. Bei gegebenem Spannungsverhältnis ist sie bestimmt durch den Betrag auf der kW-Achse, der von der Tangente an den Empfangskreis im Punkte T_e begrenzt wird. Trägt man den zugehörenden Winkel ψ' im Sendekreis ein, so erkennt man, dass für die Sendeleistung noch eine Erhöhung möglich ist. Die empfangene Blindleistung nimmt dabei allein zu, die Wirkleistung dagegen infolge der starken Zunahme der Uebertragungsverluste (grössere Scheinleistung T_a') ab. Der Unterschied in den Grenzleistungen für das Generatoren- bezw. Motorenende hängt vom Winkel δ ab und wird um so geringer, je kleiner das Verhältnis zwischen dem Ohmschen Widerstand und der Reaktanz ist, und wäre Null, wenn die Leitung nur induktiven Spannungsabfall, also keinen Ohmschen Widerstand hätte. Die Kreismittelpunkte liegen in diesem Fall, wie zu erwarten ist, auf der Q-Achse und es wird für die maximale Wirkleistung die Phasenverschiebung zwischen der Spannung am Anfang und Ende der Leitung 90^0. – Der Punkt T_e ist die Kippgrenze für synchronen Betrieb. Unterhalb dieser Grenze bedeutet eine Vergrösserung der Phasenverschiebung zwischen den Endspannungen eine Leistungszunahme, welche die Tendenz hat, die Synchronmaschinen der Belastung zu beschleunigen und den Beharrungszustand wieder herzustellen, während beim Ueberschreiten dieser Grenze die Wirklast verringert wird, die synchronisierte Kraft abnimmt und die Maschinen sich mehr und mehr verzögern, bis sie ausser Tritt fallen.

Bei diesen Betrachtungen wurde, wie das Kreisdiagramm voraussetzt, angenommen, dass die Endspannungen im gesamten Arbeitsbereich der Uebertragung wirklich konstant bleiben, also:

$$\frac{\mathrm{d}\,E}{\mathrm{d}\,P} = 0.$$

Kann infolge der begrenzten Leistung und der Spannungscharakteristik der Generatoren und Synchronmotoren diese Annahme nicht aufrecht erhalten werden, so müssen, wie später gezeigt werden soll, zur Bestimmung der Grenzleistung als Endvektoren die induzierten Maschinenspannungen eingesetzt und die Reaktanz der Uebertragungsleitung noch um den Betrag der in Serie geschalteten Maschinenreaktanzen erhöht werden.

Das Kreisdiagramm ist selbstverständlich theoretisch ohne weiteres auch auf die Uebertragung statischer Lasten anwendbar. Eine Kippgrenze existiert hier nicht; dagegen wird man es hier in praktischen Fällen nie mit einer konstanten Empfangsspannung zu tun haben. Dieselbe wird vielmehr je nach der Zusammensetzung der Belastung veränderlich sein. Die maximale übertragbare Leistung ist bei gegebener Sendespannung durch die totale „Impedanz“ von Leitung und Last gegeben.

Ist die Sendespannung fixiert, so liegen die Mittelpunkte der Empfangskreise auf einer Geraden, welche mit der Q-Achse den Winkel $\operatorname{tg} \gamma = \frac{l_e}{m_e}$ bildet. Die Hüllkurve dieser Kreise ist eine Parabel (Fig. 9, auch in Fig. 7 erkenntlich). Die auf der P-Achse senkrecht stehende Tangente an die Parabel bestimmt die maximale Leistung P_{max}, welche sich mit der gegebenen Sendespannung übertragen lässt. Die dazugehörende Empfangsspannung ergibt sich aus der Differenzierung von Gleichung (34):

$$\frac{dP}{dE_e} = n\, E_a - 2\, l_e\, E_e,$$

woraus wird:

$$E_e = \frac{n}{2\, l_e} E_a \tag{35}$$

und die Leistung:

$$P_{max} = \frac{n^2}{4\, l_e} E_a^2. \tag{36}$$

Bei sehr langen Leitungen kann eine Kraftübertragung mit sehr stark abweichenden Sende- und Empfangsspannungen u. U. wirtschaftlich gerechtfertigt sein. Bei Koppelung von Systemen dagegen ist man meist gezwungen, die Endspannungen innert verhältnismässig kleiner Grenzen annähernd gleich zu wählen. Bei kurzen Leitungen ist es wirtschaftlicher, mit höherer Anfangs-, bei langen Leitungen mit höherer Empfangsspannung zu übertragen, je nach dem Einfluss des Ladestroms.

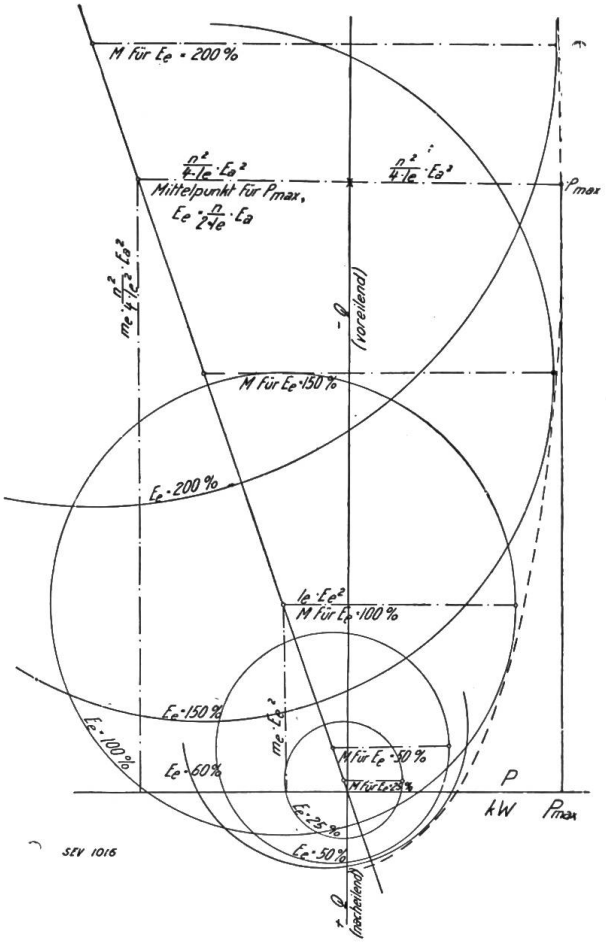


Fig. 9.
Empfangskreise und Hüllkurve für konstante Sende- und veränderliche Empfangsspannung.

Unter der Annahme gleicher Endspannungen, $E_a = E_e$, wird die maximale Leistung ($P_{e\,max}$ in Fig. 7),

$$P_{e\,max} = (n - l)\, E_a^2. \tag{37}$$

Im tatsächlichen Betrieb wird in der Regel die normale Uebertragungsleistung nur einen Bruchteil der maximal möglichen Leistung betragen, weil andernfalls die benötigten Synchronkondensatoren für die zusätzliche Blindleistung unverhältnismässig gross werden. Dagegen kann unter abnormalen Zuständen, z. B. Notbetrieb und Störungen, die Grenzleistung erreicht und überschritten werden.

Betreff der Möglichkeit übertragbarer Energien kann mit Bezug auf das Empfangsdiagramm (Fig. 9) zusammenfassend gesagt werden, dass, wenn eine Last innerhalb der Hüllkurve liegt, sie durch entsprechende Wahl der Spannungsverhältnisse, ohne Hilfe zusätzlicher Apparate, übertragen werden kann. Sind die Spannungsverhältnisse konstant zu halten, so sind Kondensatoren notwendig, sofern der Lastpunkt nicht auf dem betreffenden Empfangskreis liegt. Bei Belastung mit rotierenden Maschinen darf mit Rücksicht auf den synchronen Betrieb ausserdem der zulässige Winkel ψ' nicht überschritten werden. Lasten, die ausserhalb der Hüllkurve, aber innerhalb der Kreistangente liegen, sind bei Verwendung von Synchronkondensatoren übertragbar. Die Grenzleistung kann aber je nach der Charakteristik der Konden-

satoren nur angenähert erreicht werden. Lastpunkte ausserhalb der Tangente sind für die gegebenen Spannungsverhältnisse imaginär.

Wird die Sendespannung nicht konstant gehalten, so ändern die maximalen Leistungen direkt proportional mit ihr. Die Höhe der dazu gehörenden Blindleistungen (Empfangsende) bleibt unverändert (vergl. dazu Fig. 8).

Das Verhalten der selbsttätigen Spannungsregulierung.

Der Umstand, dass sich die Empfangskreise bei verschiedenen Spannungen schneiden, verdient besondere Beachtung bei der Verwendung von selbsttätigen Spannungsreglern. Es gibt nämlich eine Arbeitsgrenze für die Regler, von welcher an einer Verstärkung des Erregerfeldes ein Spannungsrückgang statt eine Erhöhung folgt. Diese Grenze hängt vom Charakter der Leitung, der Kondensatoren und der Last ab und liegt zwischen den durch die Hüllkurve einerseits und den Tangenten anderseits gegebenen Leistungen.

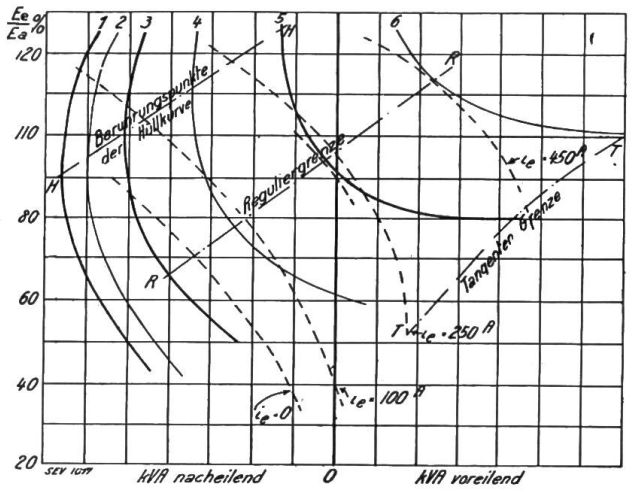


Fig. 10.
Wirkung der Feldverstärkung von Synchronmaschinen auf die Spannung in der Nähe der Grenzbelastung. (Selbsttätige Spannungsregler.)

Kurve	1	gilt für	0%	übertragene	Wirkleistung
„	2	„ „	25%	„	„
„	3	„ „	50%	„	„
„	4	„ „	75%	„	„
„	5	„ „	100%	„	„
„	6	„ „	125%	„	„

In Fig. 10 sind die Spannung und Blindleistungen für verschiedene Wirkleistungen und für verschiedene Erregungen der Synchronmaschinen aufgetragen. Die Linie $H-H$ verbindet die Berührungspunkte der Hüllkurve der Empfangskreise; die Linie $T-T$, die maximalen Tangentenpunkte. Die Reguliergrenze $R-R$ ist durch die Berührungsstelle der Belastungs- und Erregercharakteristiken gegeben. Im Schnittpunkt von $H-H$ werden die Leistungskurven senkrecht, im Schnittpunkt von $T-T$ parallel zur kVA-Achse. Oberhalb von $H-H$ bringt eine Verstärkung der Erregung eine Erhöhung sowohl von voreilender Leistung als auch der Spannung; der Regler arbeitet „normal". Zwischen $H-H$ und $R-R$ dagegen entspricht interessanterweise der Verstärkung des Erregerfeldes eine Abnahme der voreilenden kVA, doch eine Zunahme der Spannung, der Regler arbeitet also richtig. Unterhalb der Reguliergrenze $R-R$ jedoch folgt der Verstärkung des Feldes wohl eine Zunahme der voreilenden Blindlast, aber eine Abnahme der Spannung. Der Regler wird folglich versuchen, das Feld noch mehr zu stärken und treibt, da sich die Wirkungen gegenseitig im unrichtigen Sinn unterstützen, die Spannung gegen Null. Dieser Arbeitsbereich ist mit den heute gebräuchlichen Reglern betriebsunfähig und kann bei hohen Ueberlastungen zu Störungen führen.

Die Grenzen der Kraftübertragung wurden vorstehend aus dem Kreisdiagramm hergeleitet. Es kann also der Einfluss der Transformatoren in den kombinierten Leitungskonstanten bereits mitberücksichtigt werden. Derselbe kommt stark in der Konstanten $n = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}$, d. h. in einer Verkürzung der Kreisradien, also Verringerung der maximalen Wirkleistung und Vergrösserung der benötigten voreilenden Blindleistung zur Geltung. Letztere Wirkung wird durch eine Verschiebung des Kreismittelpunktes, vor allem längs der Q-Achse noch erhöht. Mit Rücksicht auf die Leistungsfähigkeit der Uebertragung ist es folglich angezeigt, Transformatoren mit niedriger Impedanz zu verwenden.

F. Die Stabilität.

Die maximale Betriebsleistung einer gegebenen Kraftübertragung ist einesteils durch die Wirtschaftlichkeit, d. h. die Grösse der benötigten Synchronkondensatoren und den Verlusten gegeben und andernteils durch die Stabilität begrenzt. Ein System ist stabil, wenn es für den betrachteten Belastungszustand in synchronem Betrieb bleibt. Je nachdem die Belastung sich im Beharrungszustand oder in Aenderung befindet, kann man zwischen „statischer" und „dynamischer" Stabilität unterscheiden.

Die statische Stabilitätsgrenze.

Die statische Grenzleistung, welche von einer Leitung übermittelt werden kann, ist uns aus dem Kreisdiagramm, Fig. 7, als der Tangentpunkt T_e bekannt. Die maximal zulässige Phasenverschiebung zwischen der Spannung am Anfang und Ende der Leitung, die sich dabei einstellt und die für irgend ein Spannungsverhältnis dieselbe bleibt, ist durch den Winkel ψ' gegeben. Zwischen diesem Winkel und den Leitungskonstanten besteht die Beziehung:

$$\psi' = \operatorname{arctg} \frac{b_2}{b_1} \tag{38}$$

oder auch in Winkelgraden:

$$\psi' = 90^0 - \delta.$$

Für kürzere Leitungen wird:

$$\psi' = \operatorname{arctg} \frac{X_{\text{Leitung}}}{R_{\text{Leitung}}}.$$

Die Folgen eines Ueberschreitens dieser Grenze wurden auf Seite 490 besprochen und auch auf den Umstand hingewiesen, dass bei Vernachlässigung des Ohmschen Widerstandes (verlustfreie Leitung) der Winkel $\psi' = 90^0$ wird; in andern Worten, die maximale Uebertragungsleistung ist erreicht, wenn der Reaktanzspannungsabfall der Leitung *(I X)* diese Verschiebung zwischen den Endspannungen bedingt.

Hierbei wurden stillschweigend zwei Voraussetzungen getroffen, nämlich erstens, dass die Leitung das einzige Glied der Kraftübertragung sei, welches die Leistung begrenze, zweitens, dass die Spannung an den Leitungsenden innerhalb dem Leistungsbereich wirklich konstant gehalten wird oder gehalten werden kann. In Wirklichkeit müssen in die Rechnung noch die Generatoren, Transformatoren, allfällige Synchronkondensatoren eingeschlossen und auch die Art der Last mitberücksichtigt werden, was durch die entsprechende Berechnung der Leitungskonstanten A, B, C, D geschehen kann. Uebersichtlicher und zweckmässiger ist es jedoch, insbesondere mit Rücksicht auf die späteren Untersuchungen, die einzelnen Teile der Kraftübertragung auseinander zu halten.

Das Spannungsvektorendiagramm einer einfachen Kraftübertragung nach Fig. 11 ist in Fig. 12 gegeben.

Fig. 11.
Schema einer Kraftübertragung.

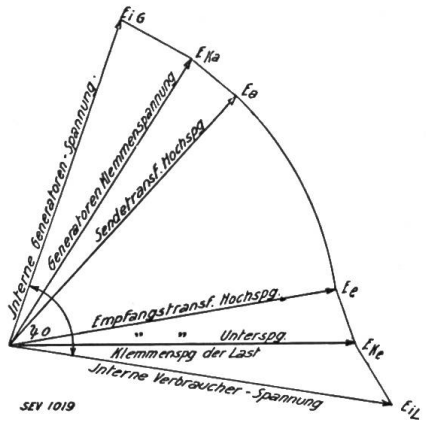


Fig. 12.
Spannungsvektorendiagramm einer Kraftübertragung Fig. 11.

Sinkt aus irgend einem Grund die Spannung an den Leitungsenden, und das ist z. B. bei jeder Belastungszunahme der Fall, so reduziert sich entsprechend die übertragbare Leistung. Im Kreisdiagramm zeigt sich das darin, dass für die Be-

stimmung der Kippleistung kleinere Endspannungen einzusetzen sind oder, indem man im Diagramm mit der normalen Betriebsspannung den zulässigen Winkel der Leitung herabsetzt. In diesem letzteren Fall tritt an Stelle der Endspannungen der Leitung die interne Maschinenspannung, welche bei allmählicher Steigerung, sowie bei den betriebsmässigen Schwankungen der Belastung als gleichbleibend betrachtet werden darf. Zur Phasenverschiebung der Leitung müssen dann naturgemäss auch der Spannungsabfall, hervorgerufen durch die Reaktanz der Transformatoren und Synchronmaschinen, vektoriell addiert werden. Die statische Stabilitätsgrenze ist erreicht, wenn die internen Maschinenspannungen der Uebertragungsenden um den maximal zulässigen Winkel ψ für Synchronbetrieb ($= \sim 90^0$) verschoben sind. Diese Grenzleistung kann praktisch erreicht werden, sofern der benötigte Blindstrom verfügbar ist; im andern Fall ist sie beschränkt durch die vorhandene magnetische Energie der Synchronkondensatoren und der Last.

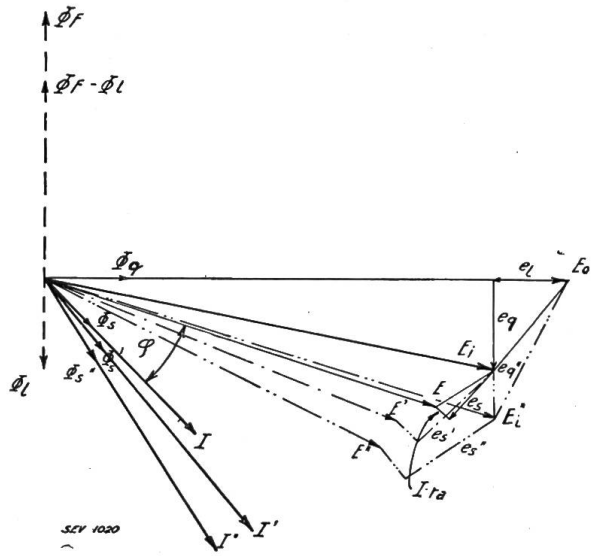


Fig. 13.
Spannungsdiagramm eines Generators bei nacheilendem Strom.

E_0 der eingestellten Erregung, bzw. dem Feld Φ_F entsprechende Leerlaufspannung.
E_i induzierte E. M. K.
E Klemmenspannung bei Belastungsstrom I und $\cos\varphi$.
e_l vom magn. Längsflux Φ_l der Armaturreaktion induzierte E. M. K.
e_q vom magn. Querflux Φ_q der Armaturreaktion induzierte E. M. K.
Ir_a durch den effektiven Ankerwiderstand r_a erzeugter Spannungsabfall.
' Anfangswerte bei Belastungsänderung für langsamlaufende Generatoren.
' Anfangswerte bei Belastungsänderung für Turbogeneratoren.

Der Spannungswinkel der Leitung und der Transformatoren liegt eindeutig fest. Einige Unsicherheit bietet jedoch die Generatorenreaktanz, welche für diese Betrachtung in Rechnung zu setzen ist; denn bei den gegenwärtigen Maschinenkonstruktionen und Art der Spannungsregulierung bleibt bei einer Laständerung in Wirklichkeit kein Spannungsvektor unverändert. Einen Einblick in die Verhältnisse gewährt das Diagramm der Synchronmaschine von A. Blondel, wobei die Reaktanzspannung in ihre Komponenten zerlegt wird (Fig. 13). Bei plötzlichen Belastungsänderungen ist in langsam laufenden Maschinen die Geschwindigkeit der Veränderung der längsmagnetisierenden Wirkung von der Armaturreaktion und in Turbogeneratoren auch des Querfluxes, infolge der in der Erreger- und Dämpferwicklung hervorgerufenen Gegen-E. M. K. bzw. Wirbelströme, gegenüber dem Spannungsabfall des Streufluxes von zweiter Ordnung. Es wird also gewissermassen im ersten Augenblick einer Zustandsänderung die Ausgleichsstromwelle im Luftspalt gestaut, so dass die vom resultierenden Feld der Erregung und Armaturreaktion induzierte E. M. K., E_i, unverändert bleibt, und als Generatorenreaktanz folglich nur die Streureaktanz im Spannungsdiagramm zu verwenden ist.

Dieselbe Annahme, wie sie für die Generatoren getroffen wurde, ist auch auf die Synchronmotoren anzuwenden. Bei gemischter Belastung, oder wenn am Leitungsende ein stark verzweigtes Netz angeschlossen ist, sind die synchronen, induktiven und Ohmschen Lasten zu einer einzigen, aequivalenten Last, unter Einschluss der Reaktanz der Zuleitungen, zusammenzufassen. Dabei ist zu beachten, dass für veränderliche Spannung die Belastung durch Synchron- und Induktionsmotoren gleich bleibt, währenddem der Ohmsche Belastungsanteil quadratisch mit der Spannung variiert. Reine synchrone Last, die durch Zuleitungen von hoher Impedanz mit der Uebertragung verbunden ist, stellt die ungünstigste, die Annahme von unendlichen Sammelschienen, d. h. keine Spannungsänderung auf der sekundären Seite der Transformatoren innert dem Leistungsbereich, die günstigste Art der Belastung dar.

Die dynamische Stabilität.

Die statische Stabilitätsgrenze ist durch eine bestimmte Leistung eindeutig gegeben. Nicht so einfach liegen die Verhältnisse in bezug auf die dynamische Stabilität. Dieselbe hängt in mannigfacher und verwickelter Weise von einer grösseren Anzahl z. T. schwer fassbarer und ineinandergreifender Grössen ab. Es ist deshalb nicht möglich, die dynamische Stabilität in einer allgemeingültigen Beziehung darzustellen. Um einen Ueberblick zu bekommen, müssen wir das Problem in einzelne Glieder auflösen.

Die dynamische Stabilität bezieht sich nach Definition auf eine Belastungsänderung. Eine Aenderung der Leistungsverhältnisse kann, abgesehen von den Leistungsschwankungen, welche von der Ungleichförmigkeit der Antriebsmaschinen herrühren, aus drei Gründen hervorgerufen werden, nämlich durch:

1. Belastungsänderungen,
2. Schaltoperationen,
3. Störungen.

Betrachten wir nun die Verhältnisse an Hand eines einfachen Uebertragungssystems nach Fig. 11, wobei aber angenommen ist, dass an den Leitungsenden sowohl eine einzelne Maschine, wie eine Gruppe von Generatoren oder Kraftwerken bezw. Synchronkondensatoren und Motoren angeschlossen sein können.

Unter der Annahme eines plötzlichen Belastungsstosses spielt sich folgender Vorgang ab: Die zusätzlich belastete Maschine verzögert den räumlichen Winkel ihres Polrades und mit ihm den elektrischen Winkel zwischen der Netz- (Klemmen-) Spannung und der induzierten E. M. K. Die während der Verzögerung der rotierenden Massen freiwerdende kinetische Energie dient zur Deckung des momentanen Belastungsstosses. Anderseits wird gleichzeitig durch das Anwachsen der innern Phasenverschiebung die Maschine in die Lage versetzt, eine grössere elektrische Leistung aufzunehmen. Diese Zunahme wird über die Leitung durch Wanderwellen auf die Generatoren übertragen, wo sich in umgekehrter Richtung ein analoger Vorgang abspielt. Sowohl vom Motor wie Generator wird im ersten Augenblick der Belastungsstoss aus der kinetischen Energie der Schwungmassen bestritten. Dadurch verzögert sich die Winkelgeschwindigkeit (Frequenz) des gesamten Systems. Je aber nach der relativen Grösse des Belastungsstosses zur kinetischen Energie der einzelnen Maschinen bezw. Maschinengruppen, werden die Rotoren, und damit die einzelnen induzierten Maschinenspannungen, um einen grössern oder kleinern Winkel von der normalen, d. h. mittleren Netzspannung abweichen. Infolgedessen werden die Maschinen in einen gegenseitigen Pendelungszustand versetzt. Die Amplituden dieser freien Schwingungen (von praktisch konstanter Frequenz) werden mit wachsender Zeit infolge der Dämpfung (Wirbelströme, Reibung) abnehmen. Das System wird in den früheren Gleichgewichtszustand zurückkehren oder, wenn die Belastungszunahme nicht vorübergehender, sondern dauernder Natur war, sich auf eine neue Gleichgewichtslage, entsprechend der Stellung der Regulatoren, einschwingen; vorausgesetzt natürlich, dass nicht durch den ersten Schwingungsimpuls eine Maschine oder Gruppe ausser Tritt gefallen ist. Da die Schwingungen von verhältnismässig langer Zeitdauer sind, haben in der Regel sowohl Spannungsregler wie Leistungsregulatoren Zeit, in Funktion zu treten, wobei sich den ersterwähnten Pendelungen solche, hervorgerufen vom Reguliermechanismus, überlagern können.[14]) Ihr Einfluss muss meist mitberücksichtigt werden. Aehnlich verhält es sich mit den von den Antriebsmaschinen veranlassten erzwungenen Schwingungen.

Fig. 14 veranschaulicht den Verlauf der Pendelungen mit der Zeit. Kurve I entspricht einer ungedämpften, Kurve II einer gedämpften Schwingung, beide hervorgerufen durch einen plötzlichen, vorübergehenden Belastungsstoss. Kurve III zeigt den Verlauf einer gedämpften Schwingung für eine bleibende Belastungszu-

[14]) Vergl. Schweiz. Bauzeitg. 1922, S. 14.

nahme und Kurve IV die Folgen eines die dynamische Stabilität übersteigenden Stosses.

In Systemen mit mehreren Maschinen, bezw. Maschinen- oder Kraftwerkgruppen, werden nicht alle Maschinen von einer Belastungsänderung gleich beeinflusst. Es ist deshalb notwendig, die Winkelbewegungen für jedes Glied, z. B. Generatoren und Motoren, einzeln zu bestimmen und dann unter Berücksichtigung von Phase, Amplitude und Periodenzahl und der Winkelverschiebung, hervorgerufen durch die Leitung, zu kombinieren. In der Regel wird die resultierende Bewegung recht komplizierter Natur sein, da durch die Ueberlagerung der einzelnen Vorgänge alle Erscheinungen der Interferenz, der Resonanz, der Schwebungen auftreten können, wie sie bei gekuppelten, schwingenden Systemen zu erwarten sind. Der maximale Pendelausschlag tritt deshalb nicht notwendigerweise schon im ersten Schwingungszyklus auf. (Vergl. Fig. 18.)

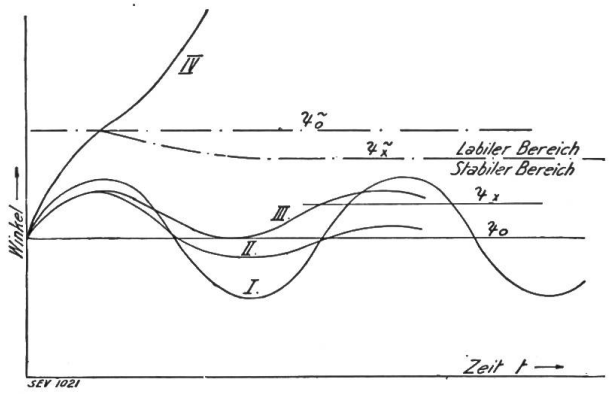


Fig. 14.
Winkelschwingungen der Spannungsvektoren bei stossweiser Belastungserhöhung (konstantes Dämpfungsmoment).
ψ_0 Ruhewinkel der Anfangsbelastung P_0.
ψ_x Ruhewinkel der Endbelastung P_x.
$\psi_0^{\sim}$ max. zul. Schwingungswinkel für P_0.
$\psi_x^{\sim}$ max. zul. Schwingungswinkel für P_x.

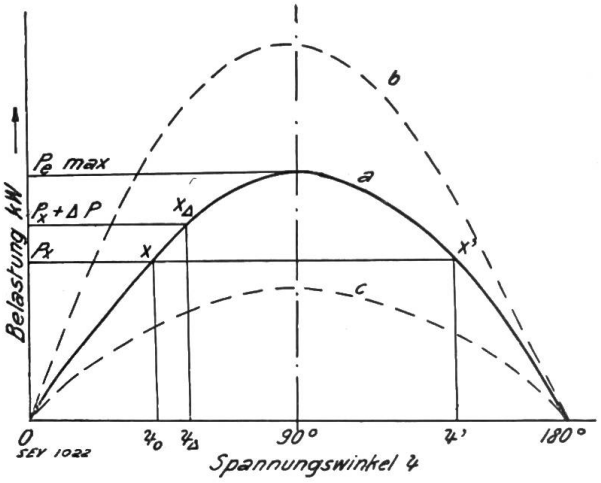


Fig. 15.
Phasenverschiebungswinkel der Endspannungen in Abhängigkeit der Belastung.

Die Beziehung zwischen der übertragenen Leistung und der Phasenverschiebung der Endspannungen einer Kraftübertragung mit zwei E. M. K. erzeugenden Elementgruppen (Generator und Motor) ist bereits im Kreisdiagramm ersichtlich. In etwas anderer Form ist sie ebenfalls in Fig. 15 gegeben. Unter der Annahme, dass das Verhältnis von Reaktanz zu Ohmschem Widerstand so gross ist, dass letzterer ohne wesentliche Ungenauigkeit vernachlässigt werden kann und unter der Annahme konstanter Maschinenreaktanz folgt die Kurve in Fig. 15 der Sinuslinie. Der maximalen statischen Grenzleistung entspricht wie im Kreisdiagramm der Winkel $\psi = 90^0$ $(R = 0)$. Diese Grenze ist eindeutig und kann tatsächlich erreicht werden, wenn die Belastung allmählich, d. h. ohne Schwingungen irgendwelcher Art, gesteigert wird und die Endspannungen wirklich konstant bleiben.

Ein System ist nun dynamisch stabil, wenn durch eine Aenderung der Leistungsverhältnisse keine Winkelschwingungen hervorgerufen werden, die ein Ueberschwingen der Spannungsvektoren über den Spiegelpunkt X' in Fig. 15 mit sich bringen. Es besteht also für einen stabilen Betrieb die Bedingung:

$$\psi_{max}^{\sim} \leqq 180 - \psi_0 \tag{39}$$

wobei $\psi_{max}^{\sim}$ die maximal zulässige Winkelschwingung bedeutet und ψ_0 der Ruhewinkel der Belastung ist, die unmittelbar vor Eintritt der Aenderung übertragen wurde.

Bei zusammengesetzten Systemen, d. h. wenn zwischen dem Sende- und Empfangsende der Kraftübertragung sich noch andere elektromotorische Kräfte erzeugende Quellen befinden (Kraftwerke, Kondensatoren, grosse Synchronmotoren), folgt

die Winkelkurve nicht mehr dem Sinusgesetz, sondern nimmt eine Form z. B. nach Fig. 16 an. Die maximale Belastung wird dann nicht bei 90^0, sondern einem grösseren Winkel erreicht. Ebenso ändert sich die zulässige Winkelschwingung. Sie bleibt aber durch den zum Ruhewinkel korrespondierenden Winkel gegeben.

Die dynamische Stabilität ist also eine Funktion der übertragenen Leistung, bezw. deren Ruhewinkel ψ_0 und einer dazugehörenden maximalen zulässigen Winkelschwingung. Das Problem lässt sich folglich auf die Untersuchung der Pendelungen zurückführen, die ein über längere Leitungen gekoppeltes System parallel arbeitender Synchronmaschinen unter den verschiedenen Betriebsverhältnissen bei plötzlich vorkommenden Belastungsänderungen, Schaltoperationen und den zu erwartenden Störungen ausführt.

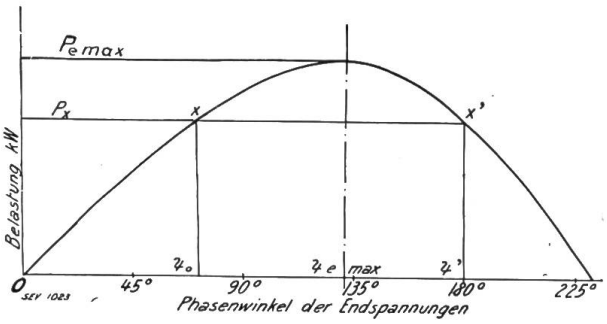


Fig. 16.
Winkeldiagramm eines zusammengesetzten Systems.

Die Pendelerscheinungen parallel laufender Synchronmaschinen wurden schon vor Jahren in einer grösseren Zahl von Arbeiten untersucht und finden sich z. B. in E. Arnold „Wechselstromtechnik" Band IV eingehend behandelt.[15]) Die allgemeine Differentialgleichung einer parallel geschalteten Maschine, der stossweise ein Ueberschuss an mechanischer Energie zugeführt wird, lautet[16]):

$$\frac{J}{P}\,\Omega_m\,\frac{d\omega}{dt} + W_S(\Theta - \Theta_m) + W_D\frac{d\Theta}{dt} = \triangle P \tag{40}$$

wobei: J = Trägheitsmoment der rotierenden Massen; Ω = räumliche, ω = elektrische Winkelgeschwindigkeit; Θ = Phasenverschiebung zwischen induzierter E. M. K. und Klemmenspannung, W_S = synchronisierende Kraft; $W_D = D\,\Omega_m$, D = Dämpfungskonstante.

Das erste Glied entspricht also der Aenderung der Trägheitsleistung; das zweite Glied der Synchronleistung, hervorgerufen durch die Verschiebung des Drehwinkels von der Mittellage Θ_m nach Θ; und das dritte Glied der von der Dämpferwicklung infolge der Winkelverschiebung entwickelten asynchronen Leistung.

Die Zunahme der Phasenverschiebung zwischen dem Spannungsvektor des Netzes und der Maschine ist gegeben durch:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \omega - \omega_N \tag{41}$$

wobei ω die Winkelgeschwindigkeit der Maschine und ω_N diejenige des Netzvektors im betrachteten Zeitmoment bedeutet. Die Winkelgeschwindigkeit des Netzvektors ist nun infolge der Zwischenschaltung der Leitung an den Enden der Kraftübertragung verschieden und zwar besteht die Beziehung:

$$N\,(\omega_{N1} - \omega_{N2}) = \sum \triangle P \tag{42}$$

worin: ω_{N1} und ω_{N2} die Winkelgeschwindigkeit der bezüglichen Leitungsenden sind. N ist die sogenannte Netzkonstante und entspricht der über die Leitung vermittelten Zunahme der Leistung pro Grad Zunahme des Spannungswinkels.

Für alle Maschinen, Generatoren, Motoren, Synchronkondensatoren, lassen sich Differentialgleichungen aufstellen, die alle dieselbe Form haben wie Gleichung (40). Diese Gleichungen können ergänzt werden durch solche, die noch den Ausgleichvorgängen (Magnetfelder, Spannung, Dämpfung) in den Maschinen, der Wirkung

[15]) s. a. Literatur 10 und V. Karapetoff Trans. A. I. E. E. 1920, S. 1217.
[16]) Arnold, W. T. 2. Auflage, Bd. IV. S. 384.

der Spannungsregler und Leistungsregulatoren Rechnung tragen. Mit Ausnahme der einfachsten Fälle wird der rechnerische Weg aber so kompliziert, dass praktisch die Lösung auf analitische Art verunmöglicht wird. Selbst die angenäherte Rechnung durch Annahme endlicher Zeiten für dt und die Bestimmung der Verhältnisse für eine Reihe sich folgender Zeitintervalle, unter jeweiliger Einführung der Korrektur für die nicht direkt berücksichtigten Faktoren, ist umständlich und äusserst mühsam. Es liegt deshalb der Angriff des Problems, vor allem für quantitative Untersuchungen, auf experimentellem Wege nahe.

Hierfür dürften sich zwei Arten als erfolgreich erweisen. Die eine besteht darin, dass man im Laboratorium die Versuche an einem der Wirklichkeit entsprechenden äquivalenten elektrischen System durchführt. Ein anderes Mittel bietet die mechanische Analogie, wobei sich besonders das Verfahren nach einer Idee von S. B. Griscom als sehr zweckmässig gezeigt hat.[17]) Griscom schlug vor, die Wirkleistungen durch Drehmomente – Generatoren, z. B. durch solche im Gegenuhrzeigersinn, Belastungen (Motoren) durch solche im Uhrzeigersinn –, Leitungen durch Federn zu ersetzen. Der jeweiligen Spannung entspricht die Hebelarmlänge, dem Spannungsabfall (prop. Strom) die Länge der Federn und den Reaktanzen die Elastizität der Federn. Die kinetische Energie wird in der Massenträgheit der einzelnen Elemente berücksichtigt. Ausserdem werden je nach den Umständen verschiedene Verfeinerungen angewendet. – Die Blindleistungen ergeben sich als das Produkt von Hebelarm und radialer Komponente der Federspannung. Der Phasenwinkel zweier Spannungen ist gleich dem Winkel zwischen den zwei korrespondierenden Punkten der Federn im mechanischen Modell. Die Funktionen von Relais und Schaltern wird von abgestimmten Schmelzsicherungen übernommen. – Die Vorgänge bei Belastungsänderungen, Schaltoperationen und Störungen werden als am mechanischen Modell kinematographisch aufgenommen und dann nachher bei langsam ablaufendem Film in ihren Phasen untersucht. Man erhält dadurch ein übersichtliches und getreues Bild des Verlaufs der Geschehnisse und kann so die Stabilität eines Systems unter verschiedenen Bedingungen und nach mannigfaltigen Gesichtspunkten auf einfache und rasche Art untersuchen.[18])

Um ein System von hoher dynamischer Stabilität zu erhalten, muss dasselbe möglichst schwingungsträge aufgebaut sein. Es ist also darauf zu achten, dass keine Interferenzerscheinungen zwischen den von den Antriebsmaschinen und ihren Regulierorganen aufgedrückten, erzwungenen Schwingungen und den freien Schwingungen des Netzes, sowohl gegenseitig als unter sich, auftreten können. Ausserdem sind die einzelnen Schwingungsamplituden selbst durch die Wahl grosser Schwungmomente und kräftiger Dämpfung so gering als irgend möglich zu halten. Der diesbezügliche Einfluss und das Verhalten der Dämpfung ist theoretisch bereits eingehend von L. Dreyfuss untersucht worden.[19])

Während diesen Betrachtungen haben wir, ähnlich wie bei der statischen Stabilität, vorausgesetzt, dass die induzierten Maschinenspannungen konstant seien. Diese Annahme bedarf der nähern Prüfung.

Bei einer Belastungszunahme sinkt mit dem Auftreten des Ausgleichstromes die Klemmenspannung. Dadurch werden die Spannungsregler der Generatoren und Synchronkondensatoren in Tätigkeit gesetzt und versuchen durch Verstärkung des Erregerfeldes die Klemmenspannung (bezw. Endspannungen der Uebertragung) wieder auf den Sollwert zu bringen. Inzwischen hat sich aber auch die Wirkung der erhöhten Armaturreaktion geltend gemacht, welche umgekehrt die Tendenz hat, den bestenden Luftspaltkraftfluss und die von ihm induzierte Spannung herabzusetzen. Je nach der räumlichen Lage des Magnetfeldes, die von der Wirkbelastung der Maschine abhängt, ist der Einfluss des rückwirkenden Längs- bezw. Querfeldes

[17]) Literatur 31.

[18]) S. Literatur 61 für Untersuchungen, die mit solch einem Modell für die im Beispiel (II. Teil dieser Arbeit) behandelte Anlage durchgeführt wurden.

[19]) Literatur 33.

mehr oder weniger gross. Da die Spannungsregulierung sowohl wie die Armaturreaktion infolge der magnetischen Trägheit nur allmählich zur Wirkung gelangen, wird die Aenderung der induzierten E. M. K. und damit auch der Klemmenspannung davon abhängig sein, welcher dieser beiden Faktoren der wirksamere ist. Bei Maschinen normaler Konstruktion und der üblichen Spannungsregulierung kann eine Spannungssenkung bei grösseren Belastungsstössen nicht vermieden werden.

Es stehen uns also zwei prinzipielle Wege zur Verbesserung der dynamischen Stabilität offen, nämlich in der Konstruktion der Generatoren und in der Art der Spannungsregulierung. Die Generatoren sind für möglichst kleine Armaturrückwirkung und hohe Eigenregulierung zu bauen. Diese Forderung steht im Gegensatz zur allgemeinen heutigen Praxis. Die Einführung des automatischen Schnellreglers hatte es seinerzeit ermöglicht, billigere Maschinen, d. h. solche mit hohem Spannungsabfall, zu bauen. Die Kostenfrage der einzelnen Elemente eines Kraftübertragungssystems spielt jedoch nur in zweiter Linie eine Rolle und so ist es oft nicht nur zulässig, sondern im Hinblick auf die erhöhte Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage angezeigt, die Generatoren für einen geringeren Spannungsabfall als üblich auszuführen. Anderseits lässt sich die Wahl eines allzu ungünstigen Kurzschlussverhältnisses bei einer rapiden Anpassung der Erregung an die Belastungsänderungen vermeiden. Die Spannungsregulierung muss bestrebt sein, die Wirkung des Spannungsabfalles, hervorgerufen durch die Streuung und Armaturreaktion, in Grösse und Phase während ihres Entstehens zu kompensieren. Eine solche Möglichkeit bietet die Verwendung von Gleichrichtern, die durch den Armaturstrom gespiesen werden, als zusätzliche Erregerquelle. Ein anderes Mittel liegt in der Steigerung der Schnelligkeit der heute verwendeten Schnellregler und der Verminderung der magnetischen Trägheit des Erregersystems. In dieser Beziehung ist der Umstand von Bedeutung, dass während des Verlaufs des Ausgleichvorganges in der Maschiene die Erregerwicklung keine wirksame Impedanz besitzt und folglich die aufgedrückte Erregerspannung nur den eigentlichen Widerstand der Erregerwicklung zu überwinden hat.[20]) Die Zeit, die hierfür zur Verfügung steht, ist in der Grössenordnung von etwa $^1/_3$ bis $^1/_2$ Sekunde. Erreger, die bei einer Maximalspannung von 1000 V einen Spannungsanstieg von 6000—7000 V/sec, also etwa dem 50fachen gewöhnlicher Erreger, aufweisen, sind ausführbar.[21]) Sie genügen also den Zeitanforderungen vollkommen. Neben grosser Schnelligkeit ist auch eine scharfe Ueberregulierung, die eine Erhöhung der Spannungen während eines Störungsvorganges ermöglicht, vorteilhaft. Es wird dadurch die Stabilitätsgrenze künstlich vorübergehend erhöht.

Aehnliche Vorgänge wie bei Belastungsänderungen spielen sich bei Schaltoperationen ab. Dabei werden allerdings nicht die absoluten Belastungen, wohl aber die relativen Leistungsverhältnisse in bezug auf die Grenzleistung verschoben, indem das Zuschalten einer Leitung die Reaktanz des Stromkreises und den Phasenwinkel der Endspannungen verringert (Fig. 15, Kurve *b*), ein Abschalten sie vergrössert (Kurve *c*).

Die grössten Anforderungen an die Stabilität eines Kraftübertragungssystems rühren jedoch von Kurzschlüssen her. Naturgemäss bilden unter diesen dreiphasige Kurzschlüsse die schärfste Form. Bei Höchstspannungsanlagen wird aber die Konstruktion und Anordnung der Leitungen so gewählt, dass direkte Dreiphasenschlüsse praktisch ausgeschlossen sind. Auch Phasenschluss ist selten zu befürchten; die weitaus grösste Zahl von Störungen finden als Kurzschluss zwischen einem Leiter und Erde statt. Es liegt deshalb die Forderung nahe, dass Erdschlüsse in der Regel zu keinen Betriebsunterbrechungen führen dürfen. Der Systemschutz ist folglich grundsätzlich nach diesem Gesichtspunkt auszulegen. Auch die Stabilitätsuntersuchungen haben sich in erster Linie mit diesen Störungen zu befassen.

---

[20]) Trans. A. I. E. E. 1925, S. 99.

[21]) Literatur 58, 59 und 60 und Fussnote 38.

Erdschlüsse unterscheiden sich von Belastungszunahmen und Schaltoperationen durch den Ort und die Art ihres Auftretens. Je nach der Lage und ob es sich um einen hoch- oder niederohmigen Kurzschluss handelt, werden die Generatoren entlastet oder zusätzlich belastet. Bei niederohmigen Erdschlüssen kann es vorkommen, dass ein Teil des Kurzschlußstromes sogar vom Lastende her geliefert wird. Dabei können enorme Belastungsschwankungen im System ausgelöst werden.[22]) Die weitverbreitete Ansicht, dass jeder Kurzschluss eine Entlastung und Frequenzzunahme mit sich bringt, trifft durchaus nicht immer zu.

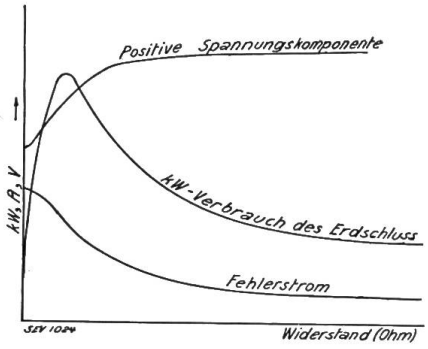


Fig. 17.
Einfluss des Erdschlusswiderstandes auf Spannung, Fehlerstrom und Erdschlusswirkleistung.

Fig. 17 zeigt die Grösse von Fehlerstrom, Leistungsverbrauch des Erdschlusses und der symmetrischen positiven Spannungskomponente in Abhängigkeit vom Erdschlusswiderstand. Vom Standpunkt der Stabilität aus ist also ein hoher Uebergangswiderstand von Leitermasten zu Erde erwünscht. Ebenso kann oft die Nullpunkterdung über einen gewissen Widerstand in grossen Netzen angezeigt sein. Die positive symmetrische Spannungskomponente, das ist diejenige Spannung, welche die Durchgangsleistung bestimmt, sinkt je nach Art und Grösse des Erdschlusses; doch bleibt sie im allgemeinen, d. h. in der Mehrzahl der Fälle, noch meistens über 70 % der Normalspannung. Dagegen kann es bei hochohmigen Erdschlüssen vorkommen, dass in einer der gesunden Phasen eine Spannungserhöhung eintritt. Ist zufällig der Spannungsregler an die gesunden Phasen angeschlossen, so wird er versuchen, die Generatorenspannung zu reduzieren. Das muss und kann verhütet werden z. B. durch Vorschaltung abgestimmter Ohmscher und induktiver Widerstände, so dass dem Regler nur die symmetrische positive Spannungskomponente aller drei Phasen zugeführt wird[23]).

Die Bedeutung der Hochhaltung der Spannungen während eines Störungsvorganges und die Notwendigkeit einer raschen Behebung oder Abschaltung der fehlerhaften Leitungsstrecke lässt sich deutlich aus dem Winkeldiagramm erkennen. Fig. 18 zeigt die Zunahme des Phasenwinkels zwischen der E. M. K_e der einzelnen Kraftwerkgruppen eines verzweigten Energiesystems nach Fig. 19, bei einem Erdschluss in der Uebertragungsleitung in der Nähe des Unterwerkes „*V*". Es wird im betrachteten Zeitpunkt von den Kraftwerken „*F*" über die als Ringleitung ausgebildete Doppelleitung Energie nach „*B*" übertragen. Von der Störung veranlasst, beginnt der Spannungswinkel zwischen den Maschinengruppen „*F*" und „*B*" plötzlich rasch zu wachsen bis nach Verlauf von 0,75 Sekunden die defekte Leitung von den automatisch betätigten Schaltern der Unterwerke „*V*" und „*Z*" abgeschaltet wird. Der Winkel wächst aber wegen den ausgelösten Schwingungen und der erhöhten Leitungsreaktanz (nur mehr eine Leitung zwischen „*V*" und „*Z*") weiter an; doch bleibt der maximale Ausschlag in diesem Fall unterhalb der Stabilitätsgrenze und das System somit im Synchronismus. Die gestrichelte Kurve „*a*" zeigt die Winkelzunahme, wenn die fehlerhafte Leitung nicht abgeschaltet worden wäre. Man erkennt, dass in diesem Fall das System nach ca. $1^3/_4$ Sekunden ausser Tritt fällt. Ebenso hätte ein Ansprechen der Schalter nach 1 Sekunde, Kurve „*b*", nicht mehr vermocht, den Betrieb aufrecht zu erhalten, indem, trotz Behebung der Ursache, durch das Ueberschwingen die Kippgrenze noch überschritten wird.

Die Gerade γ gibt den maximal zulässigen Winkelausschlag, wenn aus irgend welchem Grunde eine Senkung (hier z. B. ca. 10 %) der induzierten Spannungen

[22]) Bei einem Erdschluss einer 220 kV Leitung der Southern California Edison Co. wurden Belastungsschwankungen von 254000 kW gemessen. Die Generatorenleistung betrug 192000 kW, die angeschlossene Synchronmaschinenkapazität 457000 kVA. (Trans. A. I. E. E. Jan. 1928, S. 79.)

[23]) U. S. Patente 1567581/25 und 1571224/26.

eintritt. In diesem Fall ist selbst die Abschaltungszeit innert 0,75 Sekunden noch zu hoch; sie sollte beträchtlich verkleinert werden können. Die Ansprechzeiten der Relais genügen in der Regel den gestellten Anforderungen, dagegen sind die Abschaltzeiten der Schalter verhältnismässig hoch und der Verbesserung noch sehr bedürftig.

Arbeiten Kraftwerke nur über eine einzelne Leitung parallel, so wird man bestrebt sein müssen, selbst bei Störungen ein Abschalten und damit einen Unterbruch zu vermeiden. Man versucht deshalb, den Erdschluss z. B. durch vorüber-

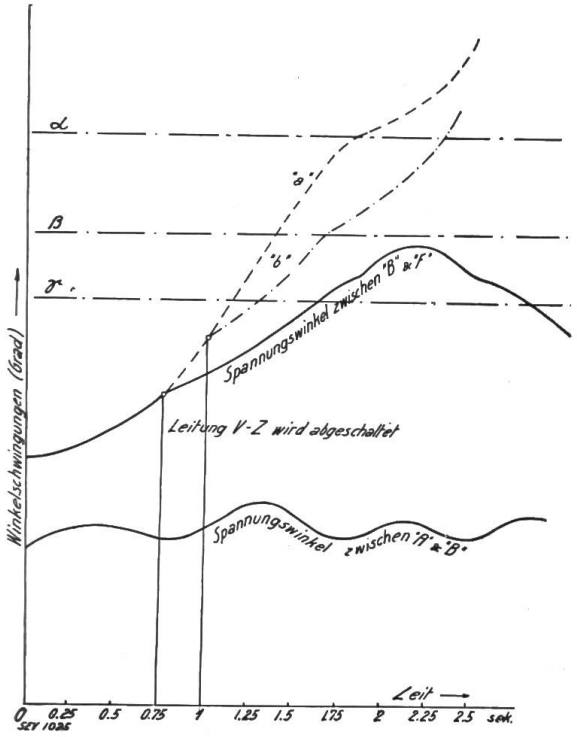


Fig. 18.
Winkelschwingungen eines Systems nach Fig. 19 bei Erdschluss in der Leitung V-Z.
α = max. zulässiger Schwingungswinkel zwischen "B"&"F" bei geschlossenem Ring.
β = " " " zwischen "B"&"F", Leitung V-Z abgeschaltet.
γ = " " " zwischen "B"&"F", Leitung V-Z abgeschaltet, bei ca. 10% Spannungssenkung.

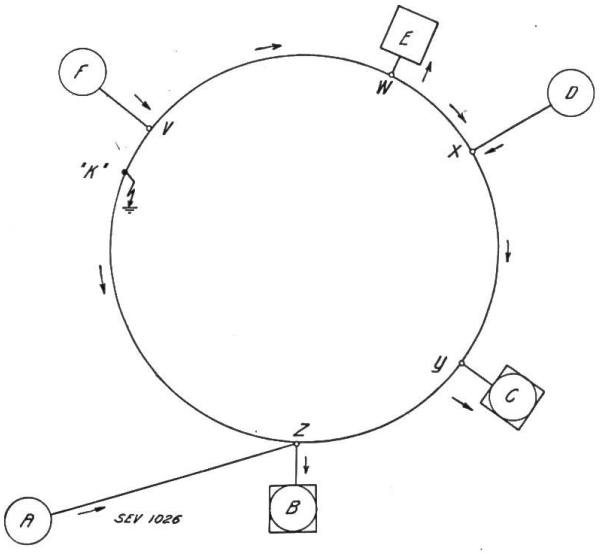


Fig. 19.
Koppelungsring eines Grosskraftsystems.
Kreise: Kraftwerke.
Quadrate: Verteilnetze.
Quadrate mit eingeschriebenem Kreis: Verbrauchersysteme mit eigenen Zentralen.
Die Pfeile geben die Energierichtung zu Fig. 18.

gehende Absenkung der Spannung, zur Löschung des Lichtbogens, zu beheben. Zu diesem Zwecke können vom Erdschlusstrom betätigte Relais verwendet werden, die direkt auf die Erregung der Generatoren einwirken. Selbstverständlich bleibt in diesem Fall das System nur im Synchronismus, wenn die geführte Leistung innerhalb der statischen und dynamischen Stabilität, entsprechend der reduzierten Spannung, liegt, also z. B. bei relativ schwacher Belastung.

Ein weiterer Faktor, der sich bei Störungen geltend machen kann, rührt von den Regulatoren her. Da die Winkelschwingungen von verhältnismässig langer Zeitdauer sind, so wird der Leistungsregulator in Funktion treten und, wenn der Kurzschluss einen Rückgang der Frequenz mit sich brachte, die Antriebsleistung stossweise erhöhen. Die darauf folgende Leistungswelle kann unter Umständen die Kippgrenze überschreiten, so dass das System ausser Synchronismus geworfen wird. Eine Schutzmassnahme dagegen bietet die Blockierung der Regulatoren durch Relais, die momentan auf den Erdschlussfehlerstrom ansprechen.

Statische und dynamische Stabilität hängen teilweise von denselben Faktoren ab. Dennoch besteht keine direkte Beziehung zwischen den beiden. Die Grenze der erstern ist durch die Wahl der Spannung und der Impedanzen des Stromkreises kontrollierbar; die dynamische Stabilität ist dagegen noch abhängig von

der Veränderlichkeit der Spannungen in Grösse und Phase, also von der jeweiligen Belastung, der Systemschaltung, den mechanischen Grössen, der Erregung, dem Schutzsystem, dem Verlauf des elektromagnetischen Ausgleichvorganges in den einzelnen Maschinen u. a. m., wobei je nach den Umständen ein einziger dieser Faktoren für sie ausschlaggebend werden kann.

Die kompensierte Leitung.

Ein Mittel, um die Grenzleistung einer Kraftübertragung zu erhöhen, besitzt man in der Kompensierung der Leitung durch Synchronkondensatoren, wie sie von R. Rüdenberg[24]), F. G. Baum[25]) u. a. vorgeschlagen wurde. Wäre es möglich, die Blindleistungsverluste an Ort und Stelle, wo sie auftreten, vollständig zu kompensieren, also kontinuierlich längs der Leitung, so ergäbe sich eine verzerrungsfreie Leitung. Der Betrieb mit reiner, fortschreitender Welle wäre erreicht, Strom und Spannung blieben an jeder Stelle der Kraftübertragung unverändert in Phase, der Wirkungsgrad würde ein Maximum und die Regulierung verbessert. Aus wirtschaftlichen Gründen ist man gezwungen, den Anschluss von Blindstromerzeugern auf möglichst wenige Stellen zu beschränken.

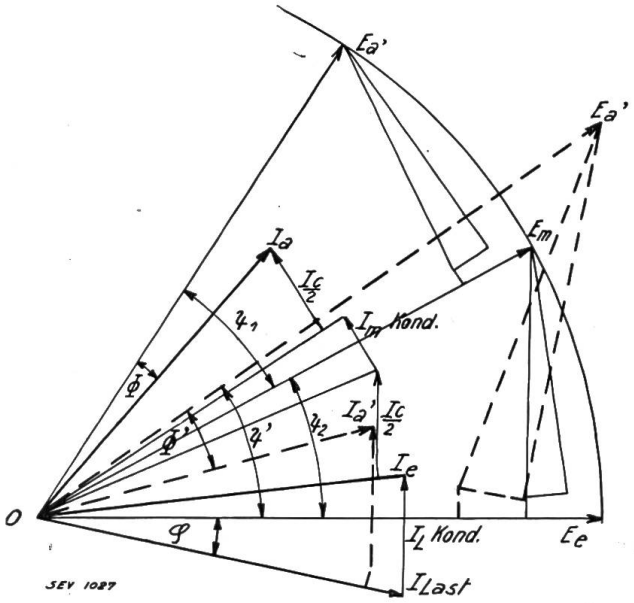


Fig. 20.
Vereinfachtes Diagramm einer kompensierten Leitung.

Die Synchronkondensatoren versuchen mit Hilfe automatischer Regler die Spannung an den Anschlusstellen bei allen Belastungen konstant zu halten, was also praktisch der Unterteilung der Leitung in selbständige Glieder entspricht (Fig. 20). Die maximale Leistung, die mit solch einer kompensierten Leitung übertragen werden kann, ist somit durch die Konstanten der Leitungsstrecke (mit der höchsten Impedanz) zwischen zwei Blindstrom-Unterwerken begrenzt.

Der Winkel $\psi_{max} = \text{arctg}\,\frac{b_2}{b_1} = \sim \text{arctg}\,\frac{X}{R}$ ist unabhängig vom übrigen Teil der Kraftübertragung und für die Erzeugung dieser Phasenverschiebung kommt nur die Reaktanz der Leitungsstrecke in Betracht. Vollständig ist das zwar noch nicht möglich. Inwieweit es verwirklicht werden kann, hängt von der Charakteristik der Kondensatoren und zugehörigen Transformatoren ab, die zu diesem Zweck für möglichst kleine Reaktanz und entsprechend grosser Leistung zu bauen sind. Durch Kompoundierung einer Leitung durch Zwischenwerke dieser Art hat man es in der Hand, jede Leistung auf praktisch irgendwelche Entfernung zu übertragen.

Fig. 20 stellt zwei Glieder einer kompensierten Leitung dar, oder was auf das gleiche herauskommt, eine Kraftübertragung mit Blindstromwerk am Ende und in der Mitte der Leitung. Zur Vereinfachung wurden darin die Transformatoren nicht separat berücksichtigt. Die apostrophierten Vektoren E_a', I_a', ψ', Φ' entsprechen den

[24]) E. T. Z. 1919, S. 85/86, schlug Rüdenberg, unterstützt von den Herren Sarfert & Strecker, parallel zur Leitung geschaltete Drosselspulen, Synchron- oder Asynchronmotoren mit gesättigtem Eisen vor. – In der R. G. E. 1922, S. 757 (Literatur 14), macht Boucherot den Vorschlag, Zusatztransformatoren zu verwenden, deren Stromverbrauch wie eine Vergrösserung der Ableitung und deren Zusatzspannung der Sekundärwicklung wie eine Abnahme des Leitungswiderstandes wirken würde. – Die General Electric Co. hat 1927 einen „Capacitor" zur Kompensierung einer 33 kV Leitung gebaut. Derselbe bildet eine zur Leitungsreaktanz in Serie gestaltete Kapazität, so dass $\frac{1}{2\,\pi\,f\,C} = 2\,\pi\,f\,L$.

[25]) Literatur 7.

Werten der unkompensierten Leitung für dieselbe Belastung. — Die Unterteilung in selbständige Glieder vermeidet auch auf einfache Weise die Gefahr von $^1/_4$ und $^1/_2$ Wellenlängen-Leitungen mit ihren unangenehmen Resonanzerscheinungen[26]).

Die Unterwerke für Blindstrom sind so voneinander zu distanzieren, dass der max. zulässige Phasenwinkel in jeder Leiterstrecke bei derselben Belastung auftritt. Bei nur einem Zwischenwerke ist dasselbe in den Schwerpunkt, d. h. in der Mitte der gesamten Systemimpedanz zu installieren.

Entsprechend der Aufgabe besteht ein ausgesprochener Unterschied zwischen Synchronkondensatoren, die zur Regulierung des Leistungsfaktors der Last (Phasenschieber) und solchen, die zur Erhöhung der Stabilität verwendet werden. Erstere sollen im Verteilnetz selbst, letztere längs der Leitung untergebracht werden. Als Phasenschieber können Maschinen normaler Konstruktionsausführungen verwendet werden. Stabilisierungskondensatoren müssen jedoch imstande sein, nicht nur Magnetisierungsstrom zu erzeugen, sondern, besonders bei langen Leitungen, auch zu absorbieren und zwar mit einer möglichst momentanen Anpassung an Belastungsänderungen und Störungsverhältnisse. Die Anforderungen an solche Maschinen bedingen geringe Reaktanz, grosse, kurzzeitige Ueberlastbarkeit und rapid arbeitende Erregung. Ausser der Beweglichkeit der Leistungsregulierung ist auch ein grosses Schwungmoment von Vorteil.

Wird für eine Uebertragung nur ein Blindstromwerk projektiert, so ist dasselbe an das Empfangsende zu verlegen. Diese Zusammenfassung erlaubt die Wahl grösserer Maschineneinheiten; dafür werden aber die Verluste im Verteilnetz etwas höher. Gegenüber der Lieferung der gesamten Blindlast von Generatoren her, was oft eine unzulässige Erhöhung der Spannung mit sich bringen würde, ist die erstere Anordnung fast durchwegs in grösseren Anlagen die wirtschaftlichere.

Synchronkondensatoren können nicht durch statische Kondensatoren ersetzt werden, wie auf den ersten Blick erscheinen möchte. Der Grund liegt in ihrem ganz verschiedenen Verhalten bei veränderlicher Spannung. Synchronkondensatoren haben die Eigenschaft, Magnetisierungsstrom in das Netz abzugeben und zwar um so mehr, je mehr ihre Klemmenspannung sinkt und umgekehrt. Sie versuchen somit die Spannung zu halten. Diese Eigenschaft wird bei Verstärkung der Erregung noch erhöht. Statische Kondensatoren verhalten sich in dieser Beziehung anders. Ihr Magnetisierungsstrom, also auch ihre Wirkung nimmt bei fallender Spannung proportional mit letzterer ab! Genau so wirkt auch die Kapazität der Leitung.

G. Die Wahl der Betriebsleistung.

Bei der Bestimmung der Betriebsleistung kann nicht an die maximal-übertragbare, statische Leistung gegangen werden, weil die Kraftübertragung nicht nur unter normalen, sondern mit möglichst wenigen Ausnahmen, auch unter allen vorkommenden abnormalen Zuständen in synchronem Betrieb zu bleiben hat. Als entscheidende Faktoren treten folglich in erster Linie die statische und dynamische Stabilität als fixierte, die Betriebsleistung und die zu erwartenden Belastungsstösse bezw. Störungen als veränderliche Grössen in Beziehung zu einander. Die beiden letztgenannten Faktoren stehen in umgekehrter Proportion einander gegenüber, d. h. je kleiner der mögliche Belastungsstoss, desto grösser wird die zulässige Betriebsleistung. Die Höhe des Stosses ist abhängig vom Charakter der Störung (meist Erdschluss) und ihrer Zeitdauer. Je wirksamer der Fehlereffekt im Ausmass und in der Zeit beschränkt werden kann, um so höher darf die übertragene Leistung sein. Dies hängt also ebenfalls von der Güte des selektiven Schutzsystemes ab.

Entsprechend den jeweiligen örtlichen Bedingungen sind in verschiedenen Kraftnetzen Störungen ganz verschieden häufig. Sie können auch nach der Jahres- und Tageszeit, den Witterungsverhältnissen usw. veränderlich sein. Im allgemeinen ist es wohl grundsätzlich angängig, Kraftübertragungen, an denen Störungen selten

[26]) C. P. Steinmetz: „Transient Electric Phenomena and Oszillations", 3. Aufl. 1920, S. 592 ff.

zu erwarten sind, mit einer höheren Leistung normalerweise zu betreiben, als Anlagen, in denen Erdschlüsse zur Alltäglichkeit gehören. Im selben Zusammenhang steht die Anforderung an die Kontinuität des Betriebes. Wird ein Versorgungsgebiet nur von einer Fernleitung gespiesen, so wird ein Betriebsunterbruch schwerere Folgen haben als dort, wo beim Ausbleiben der Energie der Uebertragung, das Defizit von anderer Seite, z. B. den örtlichen Maschinen, geliefert werden kann.

In konkreten Fällen ist es zweckmässig, folgende Kurven aufzustellen und zu Hilfe zu ziehen:

1. Häufigkeit der Störungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der Zeit (Tag, Jahr).
2. Prozentzahl der zu erwartenden Unterbrechungen in Abhängigkeit der Belastung, und daraus
3. die Wahrscheinlichkeit und der voraussichtliche Zeitpunkt einer Unterbrechung in Abhängigkeit vom Leistungsdiagramm.

Je nach dem letzteren Ergebnis sind die notwendigen Aenderungen bzw. Vorkehrungen zu treffen.

Selbst unter der Voraussetzung, dass eine Kraftübertragung vom rein technischen Standpunkt aus bis zu ihrer maximalen Leistungsfähigkeit ausgenützt werden könnte, kann doch im Hinblick auf die Kosten der dazu erforderlichen Synchronkondensatoren-Anlagen nicht so hoch gegangen werden. In der Regel liegen die Grenzen der zulässigen Betriebsleistung, sowohl mit Rücksicht auf die Stabilität wie auf die Wirtschaftlichkeit, nahe beieinander.

Bei Parallelschaltung von Leitungen wird, wie wir gesehen haben, die statische Grenzleistung im Verhältnis der verringerten Impedanz erhöht. Nicht immer ist hiermit eine prozentuale Steigerung der zulässigen Betriebsleistung verbunden. Werden z. B. bei den Unterwerken und zwischengeschalteten Synchronstationen und Zentralen die Uebertragungsleitungen parallel geschaltet, so wird im allgemeinen die dynamische Stabilität ungünstig beeinflusst. Bei Kurzschlüssen in einer der Leitungen in der Nähe der Werke werden die andern Leitungen direkt in Mitleidenschaft gezogen, währenddem bei getrennter Führung sie die Tendenz haben, dem Störungseffekt entgegen zu wirken. Es folgt daraus der Grundsatz, dass jede einzelne Uebertragungsleitung von den Generatoren bis zur Last bezw. zwischen den Hauptzentren eines Systems möglichst als selbständige Einheit zu bauen und zu betreiben ist.

H. Die Strom- und Spannungsverhältnisse längs der Leitung.

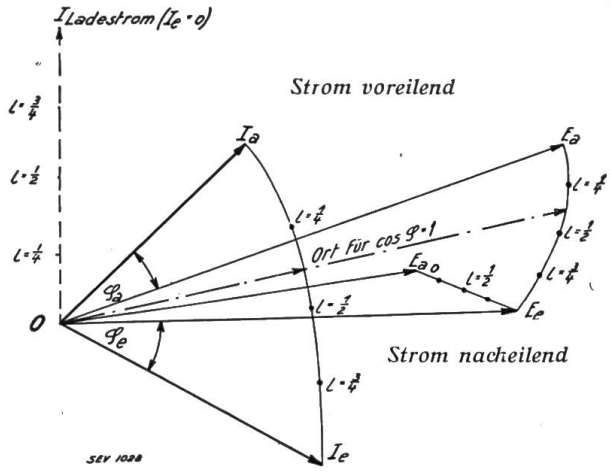


Fig. 21.
Verhalten von Strom und Spannung längs einer längern Leitung.

Die Verhältnisse längs der Leitung bzw. eines Gliedes lassen sich auf dieselbe Weise finden wie für den Endpunkt, indem man statt der ganzen Länge nur die unter Betrachtung stehende Leitungsstrecke in Rechnung setzt. Dazu eignen sich die hyperbolischen Funktionen, die in einfacher Beziehung zur Leiterlänge stehen, besonders gut[27]). Ein ganz vorzügliches Bild ergibt sich aber bei Verwendung des Sinus- und Tangensrelief nach F. Emde[28]). Die Aenderung von Strom, Spannung und Phasenverschiebung lassen sich dabei für jeden Ort der Leitung aus dem Kurvennetz

[27]) A. E. Kennelly: „Tables and Atlas of Complex Hyperbolic and Circular Functions", Harvard University Press 1914.

[28]) Fritz Emde: „Sinusrelief und Tangensrelief in der Elektrotechnik", Sammlung Vieweg 1924, Heft 69. S. a. Literatur 50.

des Reliefs, in welches die Leitungssstrecke bildlich eingezeichnet wird, direkt ablesen.

Das Vektordiagramm, Fig. 21, zeigt die Veränderungen, denen Strom und Spannung längs einer längeren Leitung unterworfen sind. Die Leistungsfähigkeit einer gegebenen Uebertragung nimmt etwa nach einer Hyperbel, mit zunehmender Länge, ab.

Das Ergebnis und die wichtigsten Folgerungen

der vier vorstehenden Kapitel E, F, G und H, lassen sich kurz folgendermassen zusammenfassen:

Die *maximal übertragbare Leistung* einer Kraftübertragung wird begrenzt durch:

1. die Sendespannung;
2. bei statischer Belastung:
   a) die Impedanz der Leitung,
   b) die Zusammensetzung bezw. dem $\cos\varphi$ der Last;
3. bei synchroner Belastung:
   die Notwendigkeit des synchronen Betriebes, d. h. die verfügbare magnetische Energie oder, wenn diese unbegrenzt, durch die statische Stabilitätsgrenze.

PS. Die übertragbare Leistung einer Leitung mit gegebenem Verhältnis von Reaktanz zu Ohmschem Widerstand nimmt angenähert hyperbelförmig mit der Leitungslänge ab.

Die *statische Stabilität* wird bei gegebener Sendespannung begrenzt durch:

1. die verfügbare Blindleistung am Empfangsende;
2. die innere Charakteristik, hauptsächlich der Streureaktanz der Synchronmaschinen;
3. der Charakteristik, hauptsächlich der Reaktanz, der Uebertragungsleitung, einschliesslich Transformatoren und eventueller Kompensierung;
4. die Art und Zusammensetzung der Last.

PS. Sie wird bei Störungen herabgesetzt je nach:

a) dem Rückgang der Spannungen;
b) der Grösse der Pendelungen.

Die *dynamische Stabilität* hängt ab von:

1. der elektrischen Charakteristik der Leitung;
2. der Impedanz der Transformatoren;
3. dem elektrischen und magnetischen Charakter, hauptsächlich der Streureaktanz; dem Kurzschlussverhältnis und der Dämpfung der Generatoren und übrigen Synchronmaschinen;
4. der kinetischen Energie der Turbinen und Generatoren in den Kraftwerken;
5. der kinetischen Energie der Synchronkondensatoren in den Unterwerken;
6. der kinetischen Energie der Synchronmotoren der Belastung;
7. der Beweglichkeit der Spannungsregulierung;
8. der Wirkungsweise der Leistungsregulatoren;
9. der Güte des Schutzsystems (Geschwindigkeit der Relais und Schalterbetätigung);
10. der Systemschaltung;
11. der Grösse der übertragenen Leistung;
12. der Grösse und Dauer der Belastungsänderungen bezw. Störungen.

Mittel zur Haltung und Verbesserung der Stabilität:

1. ein kräftiges Erregerfeld mit möglichst kleiner Aenderung der benötigten Erregung zwischen Leerlauf und maximaler Maschinenleistung;
2. geringe Streureaktanz;
3. rapide Spannungsregulierung zur Anpassung an die Belastungsänderungen, d. h. Kompensierung der Armaturreaktion nach Grösse und Phase, und des Spannungsabfalles der Streureaktanz;

4. rasches und korrektes Arbeiten der Regulatoren;
5. hochwertiges, selektives Schutzsystem zur Abschaltung, Lokalisierung und Reduzierung auftretender Störungen (Schnellschalter, Differentialschutz):
6. Kompensierung der Leitung (Synchronkondensatoren, Zusatztransformatoren, in gewissen Fällen Drosselspulen und statische Kondensatoren).

P. S. Die Anwendung von 1, 2, 3 und 6 erhöht die Anforderungen an die Schalter.

Die *zulässige Betriebsleistung* ist abhängig von:

1. der statischen Stabilitätsgrenze;
2. der dynamischen Stabilität;
3. der Netzschaltung;
4. der Art und Grösse der zu erwartenden Störungen;
5. der Wirtschaftlichkeit;
6. den Anforderungen an die Kontinuität des Betriebes.

P. S. Faktoren 3 und 4 können oft nach Tages- und Jahreszeit veränderlich sein, also auch die zulässige Betriebsleistung. Sie beeinflussen u. a. deshalb bis zu einem gewissen Grad die Betriebsführung.

(Fortsetzung folgt.)

Literatur-Verzeichnis.

1. *R. A. Philip:* „Economic Limitations of Aggregation of Power Systems". Trans. A. I. E. E. Vol. XXX. 1911.
2. *H. B. Dwight:* „The Calculation of Constant Voltage Transmission Lines". Electrical Journal 1914, S. 487.
3. *M. Dolivo-Dobrowolsky:* „Ueber die Grenzen der Kraftübertragung durch Wechselströme". E. T. Z. 1919, No. 1, Diskussion S. 84.
4. *T. R. Rosebrugh:* „The Calculation of Transmission Line Networks". University of Toronto, Bulletin 1919, No. 1.
5. *Wm. Nesbit:* „Electrical Characteristics of Transmission Circuits". Electr. Journal 1919/20/21/22.
6. *C. P. Steinmetz:* „Power Control and Stability of Electrical Generating Stations". Trans. A. I. E. E. 1920, S. 1215.
7. *F. G. Baum:* „Voltage Regulation and Insulation for Large Power, Long Distance Transmission Systems". Trans. A. I. E. E. 1920.
8. *L. Thielemans:* „Calculus, diagrammes et régulation des lignes de transport d'énergie à longue distance." R. G. E. 1920, S. 403, 435, 475, 515; 1921, S. 451, 599, 675, 878, 929.
9. *R. D. Evans & H. K. Sels:* „Circuit Constants and Circle Diagrams for Transmission Systems." Electr. Journal July, Aug., Dez. 1921 und Feb. 1922.
10. *J. Fischer-Hinnen:* „Ueber das Pendeln parallel arbeitender Wechselstromgeneratoren." Schweiz. Bauzeitung 1922, S. 13 und 29.
11. *J. Ossanna:* „Fernübertragungsmöglichkeiten grosser Energiemengen". E. T. Z. 1922, No. 32 und 33.
12. *E. Schönholzer:* „Ueber eine moderne und praktische Berechnungsmethode sehr langer Hochspannungsleitungen mit Potentialregelung durch Synchronmotoren". S. T. Z. 1922, No. 6 bis 9.
13. *P. Boucherot:* „L'aspect physique de la propagation des courants alternatifs sur les longues lignes". R. G. E. 7. Okt. 1922, S. 499.
14. *P. Boucherot:* „La transmission d'énergie sans onde de retour". R. G. E. 18. Nov. 1922, S. 755.
15. *M. W. Smith:* „Waterwheel Generators and Synchronous Condensers for Long Transmission Lines". Trans. A. I. E. E. 1923, S. 1043.
16. *R. Brüderlin:* „Drehfeldmaschinen mit veränderlicher Reaktanz". A. f. E., Bd. XIII. 1924, S. 12.
17. *P. H. Thomas:* „Superpower Transmission". Trans. A. I. E. E. 1924, S. 1.
18. *C. L. Fortescue & C. F. Wagner:* „Some Theoretical Considerations of Power Transmission". Trans. A. I. E. E. 1924, S. 16.
19. *R. D. Evans & H. K. Sels:* „Power Limitations of Transmission Systems". Trans. A. I. E. E. 1924, S. 26.
20. *R. D. Evans & R. C. Berqvall:* „Experimental Analysis of Stability and Power Limitations". Trans. A. I. E. E. 1924, S. 39.
21. *S. B. Shand:* „The Limitations of Output of a Power System involving Long Transmission Lines". Trans. A. I. E. E. 1924, S. 59.
22. *A. Boyajian:* „Theory of Three-Circuit Transformers". Trans. A. I. E. E. 1924, S. 508.
23. *H. H. Spencer & H. L. Hazen:* „Artificial Representation of Power Systems". Trans. A. I. E. E. 1925, S. 72.
24. *V. Bush & R. D. Booth:* „Power System Transients". Trans. A. I. E. E. 1925, S. 80.

25. *C. A. Nickle:* „Oscillographic Solution of Electro-Mechanical Systems". Trans. A. I. E. E. 1925, S. 844.
26. *E. T. Burnham:* „Overvoltage on Transmission Systems due to Dropping of Load". Trans. A. I. E. E. 1925, S. 872.
27. *M. F. Garden:* „Corona Investigation on an Artificial Line". Trans. A. I. E. E. 1925, S. 897.
28. *R. T. C. Wood:* „220 kV Transmission Transients and Flashovers". Trans. A. I. E. E 1925, S. 961.
29. *R. E. Doherty & H. H. Dewey:* „Fundamental Considerations of Power Limits of Transmission Systems". Trans. A. I. E. E. 1925, S. 972.
30. *F. C. Fortescue:* „Transmission Stability". Trans. A. I. E. E. 1925, S. 984.
31. *S. B. Griscom:* „A Mechanical Analogy to the Problem of Transmission Stability". El. Journal May 1926.
32. *Franz Ollendorff:* „Erzwungene Schwingungen in angefachten Systemen". A. f. E. 1926, Bd. XVI, S. 280.
33. *L. Dreyfuss:* „Ueber die Stabilität des Parallelbetriebes bei Zusammenschluss grosser Kraftwerke". A. f. E. 1926, Bd. XVI, S. 307.
34. *A. Mandl:* „Die Selbsterregung von Dreiphasengeneratoren infolge der Kapazität grosser Leitungsnetze". E. & M. 8. Aug. 1926.
35. *H. Thoma:* „Regel- und Schutzeinrichtungen für Kraftwerke mit Fernleitungsbetrieb". E. T. Z. 1926, S. 864.
36. *Wilhelm Peters:* „Parallelbetrieb von Kraftwerken über lange Koppelleitungen". E. T. Z. 1926, S. 917.
37. *C. A. Nickle & F. L. Lawton:* „Investigation of Transmission System Power Limits". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 1.
38. *Edith Clarke:* „Calculation of Steady-State Stability in Transmission Lines". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 22.
39. *R. Wilkins:* „Practical Aspects of System Stability". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 41.
40. *R. D. Evans & F. C. Wagner:* „Studies of Transmission Stability". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 51.
41. *H. B. Dwight:* „Transmission Systems with Overcompound Voltage". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 95.
42. *V. Karapetoff:* „Variable Armature Leakage Reactance". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 729.
43. *F. E. Terman:* „The Circle Diagram of a Transmission Network". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 1081.
44. *O. E. Shireley:* „Stability Characteristics of Alternators". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 1108.
45. *H. V. Putmann:* „Synchronising Power in Synchronous Machines under Steady and Transient Conditions". Trans. A. I. E. E. 1926, S. 1116.
46. *E. Schönholzer:* „Der leerlaufende Synchronmotor als wirtschaftlicher Spannungsregler von Drehstrom-Fernleitungen". Bull. S. E. V. 1926, S. 105.
47. *R. D. Evans & F. C. Wagner:* „Stability Characteristics of Machines". Electrical World 1927, S. 141.
48. *J. Hak:* „Bemerkung zur Berechnung längerer Wechselstromleitungen". E. T. Z. 1927, No. 15.
49. *A. K. Katelnikoff:* „Diagrammes des tensions et des courants dans les lignes de transmission d'énergie à longue distance". R. G. E. 21. Mai 1927.
50. *Richard Wengler:* „Sinus- und Tangensrelief in der Elektrotechnik". E. T. Z. 1927, No. 22 und 23.
51. *Günther Oberdorfer:* „Zur Kraftübertragung auf langen Hochspannungsleitungen". E. T. Z. 1927, No. 46.
52. *Regnar Holm:* „Die Theorie der Wechselstromkorona an Hochspannungsleitungen". A. f. E. Bd. XVIII. Sept. 1927. Vergl. dazu auch die Vorträge über dieses Thema der „Summer Convention des A. I. E. E.", Juni 1927.
53. *R. E. Doherty & C. A. Nickle:* „Synchronous Machines Torque-Angle Characteristics under Transient Conditions". J. A. I. E. E. 1927, S. 1369.
54. *Breisky, North & King:* „Directional Ground Relay Protection". J. A. I. E. E. 1927, S. 1184.
55. *F. L. Blume:* „Characteristics of Interconnected Power Systems as affected by Transformer Ratio Control". J. A. I. E. E. 1927, S. 1365.
56. *Wood, Hunt & Griscom:* „Transients due to Short Circuits". J. A. I. E. E. 1927, S. 985.
57. *C. F. Wagner & R. D. Evans:* „Static Stability Limits and the Intermediate Condenser Station". J. A. I. E. E. 1927, S. 1423.
58. *C. A. Powel:* „Quick Response Excitation for Alternating Current Synchronous Machines". El. Journal April 1927.
59. *D. M. Jones:* „Super Excitation". G. E. Review Dec. 1927.
60. *O. A. Gustafson:* „Super-Excited Condensers". El. World 1928, S. 349.
61. *R. C. Bergvall & P. H. Robinson:* „Quantitative Mechanical Analysis of Power System Transient Disturbances". J. A. I. E. E. 1928, S. 419.
62. *D. M. Jones:* „Super-Excitation for the Synchronous Condensers for the Conowingo System. J. A. I. E. E. 1928, S. 357.

(Fortsetzung folgt.)