Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 27 (1936)

Heft: 23

Artikel: Erhöhung der übertragbaren Nutzleistung in Verteilleitungen durch örtliche Blindleistungslieferung

Autor: Bölsterli, A.A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057541

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVIIe Année | N° 23 | Vendredi, 13 Novembre 1936

Erhöhung der übertragbaren Nutzleistung in Verteilleitungen durch örtliche Blindleistungslieferung.

Von *A. A. Bölsterli*, Hamden, Conn., USA.

621.316.722 : 621.319.4

Der Anschluss von statischen Kondensatoren in Netzen wird meist vom Gesichtspunkt der Kompensation der Blindleistung aus betrachtet. Im folgenden Artikel wird dagegen die Verwendung von Kondensatoren zur Kompensierung des Spannungsabfalles behandelt, also die Begrenzung der auf einer Freileitung übertragbaren Leistung durch den zulässigen Spannungsabfall statt, wie üblich, durch die Strombelastungsfähigkeit. Aus dieser noch wenig bekannten Betrachtungsweise ergeben sich interessante Ergebnisse, die denen, welche sich aus der Betrachtung vom Standpunkt der konstanten Strombelastung aus ableiten lassen, gerade entgegengesetzt sind.

Généralement, on installe des condensateurs statiques dans les réseaux afin de remonter le facteur de puissance. Dans le présent article, l'auteur examine par contre l'utilisation des condensateurs pour compenser la chute de tension; il tend donc à limiter la puissance transmissible par la ligne eu égard à la chute de tension admissible et non comme d'habitude à la charge de courant maximum. Cette méthode encore peu connue aboutit à des résultats intéressants, absolument opposés à ceux qui découlent de la méthode consistant à rechercher une charge de courant constante.

Das Problem der örtlichen Lieferung der an ein Verteilnetz angeschlossenen Blindleistung (wofür hauptsächlich statische Kondensatoren in Frage kommen) wird meist vom Gesichtspunkt der Kompensation von Scheinleistung, d. h. dem der Stromentlastung aus beurteilt. Dabei zeigt sich, dass der Gewinn für eine gegebene Phasenverschiebung, d. h. für gleich grosse Aenderung des cos φ, um so geringer wird, je mehr man sich cos $\varphi = 1$ nähert. Da gleichzeitig auch die zu dieser Phasenschiebung erforderliche Kondensatorenleistung wächst, folgert man allgemein, dass es unvorteilhaft ist, Phasenschiebung anzuwenden, wenn der Leistungsfaktor bereits schon hoch, z. B. 85 % oder höher ist.

Dieser Sachverhalt ist aus Fig. 1 ersichtlich. Das Verhältnis der freigewordenen Scheinleistung ΔP_s zur Kondensatorenleistung P_c ergibt sich, wie leicht ersichtlich, zu:

$$\frac{\Delta P_s}{P_c} = \frac{\dfrac{1}{\cos\varphi_1} - \dfrac{1}{\cos\varphi_2}}{\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2} \qquad (1)$$

Diese Beziehung ist in Fig. 1 dargestellt.

Diese Betrachtungsweise berührt jedoch bloss die Strombelastungsfähigkeit der Leitung, welche, zumal bei Freileitungen, auf welche unsere Betrachtungen hauptsächlich abzielen, höchst selten als das begrenzende Moment auftritt. Viel schwieriger ist es, vom Standpunkte der Kraftverteilung aus gesehen, die richtige Spannung einzuhalten, und die Begrenzung in der Uebertragungsleistung liegt daher viel häufiger im Spannungsabfall zwischen der Verteilstation und den Abnehmern oder zwischen dem ersten und letzten Abnehmer an der Leitung.

Es ist bekannt, dass die Blindleistung zufolge der Winkelbeziehungen im Vektordiagramm der Spannungen, der Endspannung besonders schädlich

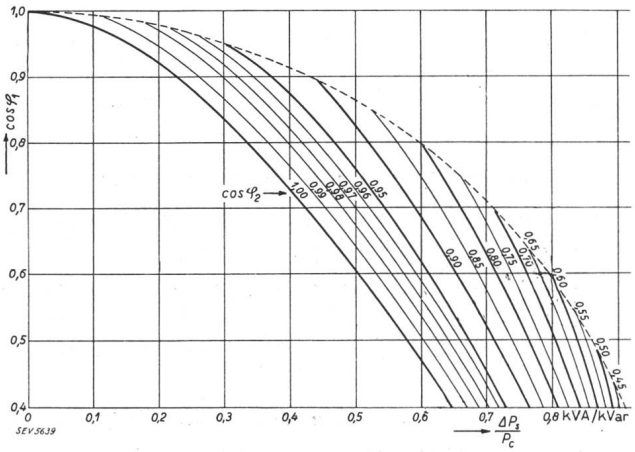

Fig. 1.
Verhältnis des Gewinnes an Scheinleistung zur Kondensatorleistung in Funktion des cos φ vor und nach Phasenschiebung (Gleichung 1).
cos φ_1 (nacheilend) *vor* Anschluss der Kondensatoren.
cos φ_2 (nacheilend) *nach* Anschluss der Kondensatoren.
ΔP_s Gewinn an Scheinleistung (kVA).
P_c Kondensatorenleistung (kVar).

ist. Der durch den Blindstrom erzeugte Abfall pro km Leitungslänge ist lediglich eine Funktion der Leitungskonstanten, d. h. des Wirk- und Blindwiderstandes der Leitung. Das Spannungsgefälle

längs der Leitung lässt sich bei gegebener Belastung nur durch Phasenschiebung der Belastung, d. h. durch örtliche Blindleistungslieferung verringern oder sogar (bei Voreilung) in einen Anstieg umwandeln. Mit im Leitungszug eingefügten Reguliertransformatoren oder Induktionsreglern lässt sich wohl die Spannung in Abständen heben, aber der Abfall längs der Leitung wird dadurch nicht beeinflusst. Fig. 2 gibt ein schematisches Bild der Verhältnisse.

Die erwähnten generellen Beziehungen sind weitgehend bekannt. Dagegen scheinen die Möglichkeiten ihrer Nutzanwendungen keineswegs erschöpft oder auch nur gebührend anerkannt zu sein. Im Gegensatz zur üblichen Behandlung des Problems soll hier davon ausgegangen werden, dass der Spannungsabfall (folgerichtig auf Spitzenlast bezogen) als das die Nutzbelastungsfähigkeit begrenzende Moment angesehen wird, wobei stillschweigend angenommen ist, dass die Grenze, die durch die Erwärmung der Leitung gesetzt ist, erheblich höher liegt, eine Annahme, die bei Freileitungen immer erfüllt ist. Es werden sich dabei allgemeine Schlüsse von grosser praktischer Bedeutung ziehen lassen.

Die Problemstellung, in Vereinfachung der wirklichen Verhältnisse, sei die folgende: Ueber eine gegebene Leitung werde eine Spitzenleistung mit Wirkkomponente P_{w1} (kW) und Blindkomponente P_{b1} (kVar) übertragen. Der Spannungsabfall zwischen Anfang und Ende der Leitung sei mit den Betriebsbedingungen gerade noch vereinbar, soll aber nicht überschritten werden. Um den Anschluss neuer Abnehmer zu ermöglichen, wird das Mittel

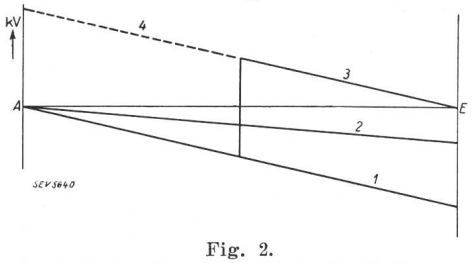

Fig. 2.
Verlauf der Spannung längs der Leitung.
A Anfang, *E* Ende der Leitung.

1 Spannungsverlauf bei Spitzenlast *vor* Anschluss der Kondensatoren.
2 Spannungsverlauf bei Spitzenlast *nach* Anschluss der Kondensatoren.
3 Spannungsverlauf nach Hebung der Spannung in der Mitte der Leitung, durch Induktionsregler oder Reguliertransformatoren.
4, 3 Spannungsverlauf durch Kompoundierung am Leitungsanfang durch Induktionsregler.

der örtlichen Blindleistungserzeugung in Erwägung gezogen, und es soll untersucht werden, wie sich der Gewinn an Nutzleistung zum Aufwand an statischen Kondensatoren stellt unter der Voraussetzung, dass der Spannungsabfall unverändert bleibt.

In Fig. 3 ist das Vektordiagramm des Spannungsabfalls dargestellt, wobei die Abfälle für die Wirk- und Blindkomponenten separat eingetragen sind. Wir beschränken uns ausdrücklich auf die sog. «kurze Leitung» (< 30 km), für welche dieses Diagramm, das den Einfluss der Eigenkapazität der Leitung vernachlässigt, gilt. Die Indizes 1 und 2 beziehen sich auf die beiden betrachteten Belastungszustände, nämlich denjenigen vor und denjenigen nach Anschluss der statischen Kondensatoren. R ist der Ohmsche, X der induktive Widerstand der Leitung, wobei bekanntlich $X = \omega L$.

Begnügt man sich zunächst mit einer Näherungsrechnung, so kann man annehmen, dass sich der Endpunkt des Sendespannungsvektors, bei konstant gehaltener Empfangsspannung und konstantem Spannungsabfall auf der Geraden G anstatt auf dem Kreis K bewegt. Es gilt dann für die zwei Zustände:

$$I_{w2} R - I_{w1} R = I_{B1} X - I_{B2} X$$

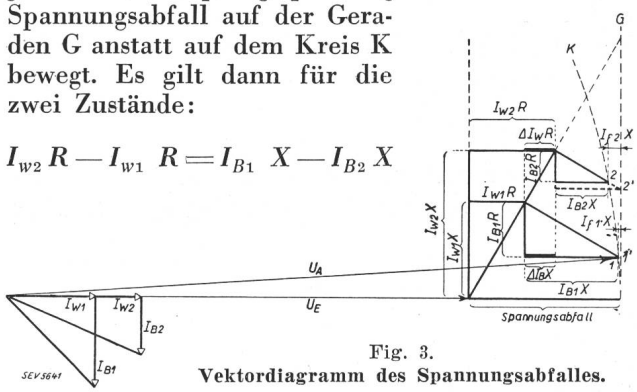

Fig. 3.
Vektordiagramm des Spannungsabfalles.

Multipliziert man beide Seiten mit der Empfängerspannung, so erscheinen an Stelle der Ströme die mit P bezeichneten bezüglichen Blind- und Wirkleistungen

$$P_{w2} R - P_{w1} R = P_{B1} X - P_{B2} X$$
$$R\,(P_{w2} - P_{w1}) = (P_{B1} - P_{B2})$$

$P_{w2} - P_{w1}$ stellt den Gewinn an Wirkleistung dar und soll mit ΔP_w bezeichnet werden. $P_{B1} - P_{B2} = \Delta P_B$ stellt die Blindleistung dar, die man am Ende der Leitung liefern muss. Es ergibt sich somit die einfache Beziehung:

$$\Delta P_B = \frac{R}{X} \Delta P_w \quad \text{oder} \quad \Delta P_w = \frac{X}{R} \Delta P_B \qquad (2)$$

Praktisch wird nun aber ein Wirkleistungsinkrement auch eine zusätzliche Blindleistung mit sich bringen, da ja die neu angeschlossene Belastung kaum eine reine Wirklast sein dürfte. Macht man die plausible Annahme, dass die zusätzliche Belastung den gleichen cos φ aufweist wie die ursprüngliche Belastung, d. h. cos φ_1, so wird ΔP_w eine Blindlast $\Delta P_w \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$ beitragen. Der Kondensator muss auch diesen Anteil, neben dem durch Gl. (2) bestimmten, aufbringen und daher eine Blindleistung P_c besitzen gemäss:

$$P_c = \frac{R}{X} \Delta P_w + \Delta P_w \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \qquad (3)$$

Das Verhältnis der verfügbar gewordenen Wirkleistung zur benötigten Kondensatorleistung ist daher:

$$\frac{P_c}{\Delta P_w} = \frac{R}{X} + \operatorname{tg} \varphi_1 \qquad (4)$$

Diese interessante Formel, die noch ausführlich diskutiert werden soll, lässt sich auch direkt aus

der bekannten Näherungsformel für den Spannungsabfall ableiten, die ebenfalls auf der Annahme basiert, dass der Endpunkt des Spannungsvektors sich auf der Senkrechten zum Vektor der Endspannung bewegt anstatt, wie es streng genommen der Fall ist, auf dem Kreis. Die Ableitung sei hier angeführt, da einige Zwischenergebnisse später gebraucht werden.

Es ist bekanntlich:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3} \cdot P_s}{10\,(U)^2}\,(R \cos\varphi + X \sin\varphi) \qquad (5)$$

wo ε prozentualer Spannungsabfall,
P_s die übertragene Scheinleistung in kVA,
U die verkettete Spannung in kV,
R der Wirkwiderstand einer Leitungsphase in Ohm,
X der Blindwiderstand einer Leitungsphase in Ohm,
φ der Phasenverschiebungswinkel.

Da $P_w = \frac{P_s}{\cos\varphi}$ kann Gl. (5) auch geschrieben werden als

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}\,P_w}{10\,(U)^2}\,(R + X \operatorname{tg}\varphi) \qquad (6)$$

Wendet man diese Gleichung unter der Voraussetzung gleichbleibenden Spannungsabfalles wie zu-

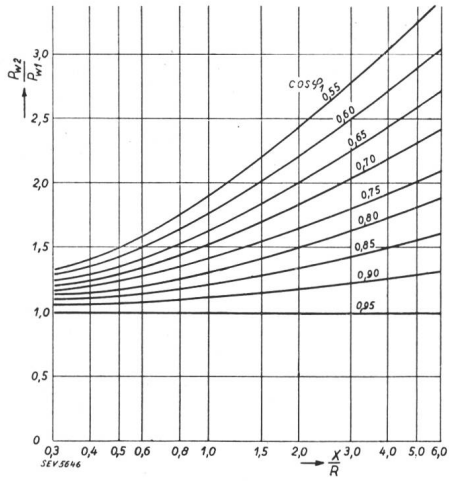

Fig. 4.
Verhältnis der Wirkleistungen bei Phasenschiebung von cos φ (nacheil.), auf cos $\varphi_2 = 0{,}95$.

vor auf die zwei Belastungszustände an, so ergibt sich:

$$\frac{P_{w2}}{P_{w1}} = \frac{\frac{R}{X} + \operatorname{tg}\varphi_1}{\frac{R}{X} + \operatorname{tg}\varphi_2} \qquad (7)$$

Es ergibt sich also durch Phasenschiebung von φ_1 auf φ_2 eine erhöhte Wirkleistung nach Massgabe dieser Gleichung. Diese Beziehung ist in Fig. 4 für eine Phasenverbesserung auf cos $\varphi = 0{,}95$ dargestellt.

Aus Gl. (7) ergibt sich:

$$\frac{\Delta P_w}{P_{w2}} = \frac{P_{w2} - P_{w1}}{P_{w2}} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2}{\frac{R}{X} + \operatorname{tg}\varphi_1} \qquad (8)$$

oder auch

$$\Delta P_w = \frac{P_{w2}\,(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{\frac{R}{X} + \operatorname{tg}\varphi_1}$$

$P_{w2}\,(\operatorname{tg}\varphi_1 - \varphi_2)$ stellt nichts anderes als die zur Phasenschiebung von cos φ_1 auf cos φ_2 erforderliche Blindleistung P_c dar, d. h. die Leistung des erforderlichen Kondensators, unter der Voraussetzung, dass die totale neue Nutzlast den cos φ der ursprünglichen Belastung, d. h. cos φ_1 aufweist. Diese Voraussetzung bedeutet einfach, dass die zusätzliche Wirklast mit dem gleichen cos φ behaftet ist wie die ursprüngliche Belastung, eine Annahme, die auch bei der ersten Ableitung gemacht wurde. Es ergibt sich daher genau wie früher:

$$\frac{P_c}{\Delta P_w} = \frac{R}{X} + \operatorname{tg}\varphi_1 \qquad (4)$$

Bevor näher auf die Beziehung (4) eingetreten wird, soll noch untersucht werden, wie weit das Resultat durch den Ersatz des Kreises K durch die Gerade G im Diagramm der Fig. 3 beeinflusst wird. Da es sich bei der Ableitung um die Differenzenbildung von mit Fehlern behafteten Grössen handelt, ist zu erwarten, dass der begangene Fehler nicht vernachlässigbar ist. Es wird sich jedoch zeigen, dass Gl. (4) trotzdem mit befriedigender Annäherung gilt.

Man könnte natürlich die Ableitung von vorneherein unter Verwendung des Kreises K vornehmen. Es zeigt sich aber, dass der im folgenden eingeschlagene Weg zur Fehlerabschätzung bequemer ist. Man führt einen fiktiven Fehlerstrom I_f ein, der den Charakter eines Blindstromes hat. Wenn man den zugehörigen Spannungsabfall $I_f X$, der den Abstand zwischen der Geraden G und dem Kreis K (siehe Fig. 3) ausfüllt, zur Summe $I_w R + I_B X$ addiert, so wird wie bei der angenäherten Methode wiederum Gleichheit des totalen Abfalles für die verschiedenen Belastungszustände hergestellt. Man liest aus der Fig. 3 direkt ab:

$$I_{w1} R + I_{B1} X + I_{f1} X = I_{w2} R + I_{B2} X + I_{f2} X$$
$$R\,(I_{w1} - I_{w2}) + X\,(I_f - I_{f1}) = X\,(I_{B1} - I_{B2})$$

oder, indem man wieder das Zeichen Δ für die Differenz einführt:

$$R \cdot \Delta I_w + X \cdot \Delta I_f = X \cdot \Delta I_B$$
$$\Delta I_B = \frac{R}{X} \cdot \Delta I_w + \Delta I_f$$

oder in Leistungen:

$$\Delta P_B = \frac{R}{X} \cdot \Delta P_w + \Delta P_f \qquad (9)$$

Da die Wirkleistung ΔP_w eine Blindleistung $\Delta P_w \cdot \operatorname{tg} \varphi$ mit sich bringt, die ebenfalls durch die Kondensatorleistung P_c kompensiert werden muss, so ist schliesslich:

$$P_c = \frac{R}{X} \cdot \Delta P_w + \Delta P_w \cdot \operatorname{tg} \varphi + \Delta P_f \qquad (10)$$

ΔP_f stellt daher eine «Fehlerleistung» dar, um die der Kondensator grösser sein muss als nach der angenäherten Berechnung gemäss Gl. (3). Es ist ferner:

$$\frac{P_c}{\Delta P_w} = \frac{R}{X} + \operatorname{tg} \varphi_1 + \frac{\Delta P_f}{\Delta P_w} \qquad (11)$$

und indem man das Fehlerglied $\frac{\Delta P_f}{\Delta P_w}$ mit F bezeichnet

$$\frac{P_c}{\Delta P_w} = \frac{R}{X} + \operatorname{tg} \varphi_1 + F \qquad (12)$$

Dies ist die frühere Gl. (4), ergänzt durch das Fehlerglied F. Die Berechnung von F läuft darauf hinaus, analytisch die Differenz der Strecken $I_{f_2} X - I_{f_1} X$ im Diagramm Fig. 3 zu ermitteln und im Maßstab der Blindströme, bzw. -leistungen auszudrücken. Man geht von der Beziehung aus:

$$X \cdot \Delta I_f = \qquad (13)$$
$$U_a \left[\sqrt{1 - \left(\frac{I_{w1} X - I_{B1} R}{U_A} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{I_{w2} X - I_{B2} R}{U_A} \right)^2} \right]$$

und bringt diese Gleichung für die praktische Anwendung in die folgende Form:

$$\Delta P_f = \frac{1000\, U^2}{X} \cdot \frac{100}{100 - \varepsilon} \cdot \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{P_{w1} \left(1 - \frac{R}{X} \operatorname{tg} \varphi_1 \right)}{\frac{1000\, U^2}{X} \cdot \frac{100}{100 - \varepsilon}} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{P_{w2} \left(1 - \frac{R}{X} \operatorname{tg} \varphi_2 \right)}{\frac{1000\, U^2}{X} \cdot \frac{100}{100 - \varepsilon}} \right)^2} \right\} \qquad (14)$$

Diese Gleichung liefert die genauen Werte der «Fehlerleistung». Für die praktisch vorkommenden Werte der Klammerausdrücke unter den Wurzelzeichen kann man mit grosser Annäherung von der Beziehung $\sqrt{1 - \delta} = 1 - \frac{1}{2} \delta$ Gebrauch machen.

Bei Anwendung auf Gl. (14) muss man allerdings wegen der Differenzenbildung mit einer Verschlechterung der Näherung rechnen. Praktisch ist diese nicht bedeutend und wir verfolgen diesen Weg, um zu bequemeren Resultaten zu kommen, zumal man in Gl. (14) ein Mittel hat, die Abweichung jederzeit zu bestimmen. Man leitet auf diese Weise den folgenden Ausdruck ab:

$$\Delta P_f = \frac{X \left(1 - \frac{\varepsilon}{100} \right)}{2000 \cdot U^2} \left\{ \left(P_{w2} - \frac{R}{X} P_{B2} \right)^2 - \left(P_{w1} - \frac{R}{X} P_{B1} \right)^2 \right\} \qquad (15)$$

Darin ist ε der prozentuale Spannungsabfall zwischen Anfang und Ende der Leitung, auf die Endspannung bezogen, und U die Spannung in kV am Ende. Die Blindleistungen können nach den Beziehungen $P_{B1} = P_{w1} \operatorname{tg} \varphi_1$ und $P_{B2} = P_{w2} \operatorname{tg} \varphi_2$ durch die Wirkleistungen ausgedrückt werden.

Führt man weiter den Faktor f ein, welcher durch die Beziehung $P_{w2} = (1 + f)\, P_{w1}$ definiert sein soll und daher ein Mass für den Gewinn an Wirkleistung darstellt, so erhält man, da $\Delta P_w = f P_{w1}$:

$$F = \frac{1 - \frac{\varepsilon}{100}}{2000\, U^2} \cdot \frac{P_{w1} X}{f} \left\{ (1 + f)^2 \left(1 - \frac{R}{X} \operatorname{tg} \varphi_2 \right)^2 - \left(1 - \frac{R}{X} \operatorname{tg} \varphi_1 \right) \right\} \qquad (16)$$

Diese Gleichung ist bequem, wenn der Faktor f bekannt ist, d. h. wenn man sich klar ist, welchen Gewinn an Wirkleistung man anstrebt. Begnügt man sich mit einer verhältnismässig ungenauen Fehlerabschätzung, so lässt sich f angenähert als Funktion von $\operatorname{tg} \varphi_1$ und $\operatorname{tg} \varphi_2$ ausdrücken, nämlich nach Gl. (7), die man schreiben kann:

$$1 + f \sim \frac{\frac{R}{X} + \operatorname{tg} \varphi_1}{\frac{R}{X} + \operatorname{tg} \varphi_2} \qquad (17)$$

Es soll davon für den Spezialfall $\cos \varphi = 1$ Gebrauch gemacht werden. Man kann auch in Gl. (15) den prozentualen Blind-Spannungsabfall einführen, der durch die Wirkkomponente P_{w1} verursacht wird. Bezeichnet man diesen mit

$$\varepsilon_{wx} \text{ wo } \varepsilon_{wx} = \frac{X P_{w1}}{10\, U^2}$$

so geht Gl. (16) über in:

$$F = \frac{\varepsilon_{wx}}{100} \left(1 - \frac{\varepsilon}{100} \right) \frac{1}{2 f} \left\{ (1 + f)^2 \left(1 - \frac{R}{X} \operatorname{tg} \varphi_2 \right)^2 - \left(1 - \frac{R}{X} \operatorname{tg} \varphi_1 \right)^2 \right\} \qquad (18)$$

welche Form zur Fehlerberechnung am bequemsten sein dürfte.

Um einen anschaulichen Begriff von der Grössenordnung des Fehlergliedes F zu erhalten, soll der Spezialfall der Phasenschiebung auf $\cos \varphi_2 = 1$, $(\operatorname{tg} \varphi_2 = 0)$ betrachtet werden, der in den meisten Fällen den maximalen Fehler ergibt, wie man leicht aus Fig. 3 ersieht. Für diesen Fall ist:

$$F = \frac{\varepsilon_{ax}}{100}\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)$$

$$\left[1 + \frac{1}{2}\frac{X}{R}\,\mathrm{tg}\,\varphi_1 + \left(\frac{R}{X}\right)^2\left(1 - \frac{1}{2}\frac{R}{X}\,\mathrm{tg}\,\varphi_1\right)\right] \quad (19)$$

Der Ausdruck in der eckigen Klammer, der mit α bezeichnet sei, ist in Fig. 5 als Funktion von $\frac{R}{X}$ und $\cos\varphi_1$ dargestellt und man erhält daher F einfach durch Einsetzen von α aus Fig. 5 in:

$$F = \frac{\varepsilon_{ax}}{100}\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\cdot\alpha \quad (20)$$

Dass α für $\frac{R}{X} = 1$ für alle $\cos\varphi_1$ den gleichen Wert annimmt, ist nicht streng richtig, sondern eine Folge der stufenweisen Vereinfachungen, die in der Ableitung vorgenommen wurden. Nichtsdestoweniger liefert Fig. 5 eine praktisch brauchbare Fehlerabschätzung.

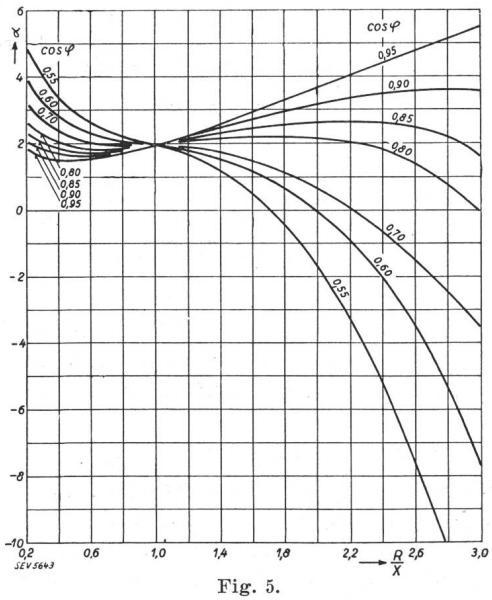

Fig. 5.

Koeffizient α zur Berechnung des Fehlergliedes für den Fall der Phasenschiebung auf $\cos\varphi_2 = 1$ (Gleichungen 19 und 20).
$\cos\varphi_1$ *vor* Phasenschiebung (nacheilend).

Das folgende der Praxis entnommene *Beispiel* soll einen Begriff von der Grösse des Fehlergliedes und die Näherung durch die verschiedenen angeführten Fehlerformeln geben:

$P_w = 1400$ kW, $\cos\varphi_1 = 0{,}88$, $\mathrm{tg}\,\varphi_1 = 0{,}54$
$R = 1$ Ohm, $X = 2$ Ohm, $U = 4{,}15$ kV

a) Phasenschiebung auf $\cos\varphi = 0{,}97$ ($\mathrm{tg}\,\varphi_2 = 0{,}25$)
Fehlerglied nach Gl. (14) $F = 0{,}193$ (genau)
do. Gl. (15) $F = 0{,}175$ (angenähert)

b) Phasenschiebung auf $\cos\varphi = 1{,}00$ ($\mathrm{tg}\,\varphi_2 = 0$)
Fehlerglied nach Gl. (14) $F = 0{,}255$ (genau)
do. Gl. (19) $F = 0{,}24$ (angenähert)
(α-Wert aus der Kurve Fig. 5)

Nach Gl. (4) ergibt sich unabhängig vom $\cos\varphi_2$

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_w} = 0{,}50 + 0{,}54 = 1{,}04$$

als angenäherter Wert. Unter Berücksichtigung der obigen Werte für das Fehlerglied folgen als genauere Werte von $\frac{\Delta P_c}{\Delta P_w}$:

für Phasenschiebung auf $\cos\varphi_2 = 0{,}97$: 1,23 bzw. 1,22
» » » $\cos\varphi_2 = 1{,}00$: 1,30 bzw. 1,28

Der relative Fehler ist also nicht unbeträchtlich.

Ganz allgemein gilt, dass die Beziehungen (4) und in geringerem Masse auch (2) für den Bereich der Variabeln, der praktisch in Frage kommt, auch ohne Berücksichtigung des Fehlergliedes brauchbare Werte liefert. Die Berechnung des Fehlergliedes nach Gl. (18) ist jedoch zur Kontrolle und Korrektion empfohlen.

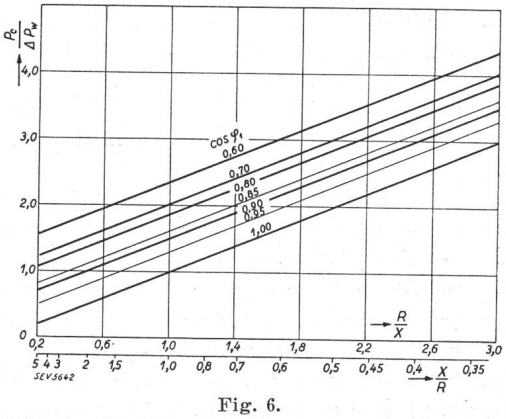

Fig. 6.

Verhältnis der Kondensatorleistung zum Gewinn an Wirkleistung in Funktion des Verhältnisses des Wirk- und Blindwiderstandes der Leitung und des $\cos\varphi$ vor Phasenschiebung (Gleichung 4).
P_c Kondensatorleistung (kVar).
ΔP_w Gewinn an Wirkleistung (kW).
$\cos\varphi_1$ *vor* Phasenschiebung (nacheilend).

Gl. (4) ist in Fig. 6 dargestellt. Da es in der Praxis der Leitungsberechnung üblich ist, mit dem Verhältnis $\frac{X}{R}$ statt $\frac{R}{X}$ zu rechnen, und da weiter der Gewinn an Wirkleistung bezogen auf die erforderliche Kondensatorenleistung interessanter ist als das reziproke dieses Verhältnisses, ist Gl. (4) in reziproker Form, d. h.

$$\frac{\Delta P_w}{P_c} = \frac{\frac{X}{R}}{1 + \frac{X}{R}\,\mathrm{tg}\,\varphi_1} \quad (21)$$

in Fig. 7 dargestellt. Um die Anwendung zu erleichtern, sind noch in Fig. 8 die Werte von $\frac{x}{r}$ für die verschiedenen Leiterquerschnitte und -abstände dargestellt. x und r bezeichnen dabei Blind- bzw. Wirkwiderstand in Ohm/km. Besitzt die ganze Leitung gleichen Querschnitt und gleiche Abstände, so ist $\frac{x}{r} = \frac{X}{R}$, andernfalls sind R und X einzeln aus den Teilstrecken zu berechnen. Es können dabei sinngemäss auch die entsprechenden Beiträge von Auf- und Abspannungstransformatoren im Leitungszuge einbezogen werden, wenn solche in Frage kommen.

Sieht man von der Verfeinerung durch Einführung des Fehlergliedes ab, so lassen sich aus den bisherigen Betrachtungen die folgenden Schlussfolgerungen ziehen, die grosse praktische Tragweite besitzen.

1. Vermindert man bei gleichbleibendem Spannungsabfall die übertragene Blindleistung um einen Betrag P_c (Leistung der angeschlossenen Kondensatoren), so kann die Wirkleistung um einen Betrag ΔP_w vermehrt werden, welcher gemäss der Beziehung (2) einzig vom Verhältnis der Leitungskonstanten abhängt, dagegen vom cos φ vor und nach der Phasenschiebung unabhängig ist.

2. Besitzt die zusätzliche Nutzlast ausser der Wirkkomponente ΔP_w auch noch eine Blindkomponente, nach cos φ_1 der Belastung vor der Phasenschiebung, so ist die Vermehrung der übertragbaren Wirkleistung, gleichbleibenden Spannungsabfall vorausgesetzt, pro kVar örtlich gelieferter Blindleistung gemäss Gl. (2) und (4) nur abhängig von den Leitungskonstanten und vom cos φ_1 v o r der Phasenschiebung, dagegen unabhängig vom cos φ_2 n a c h der Phasenschiebung.

3. Unter den in Ziffer 2 gemachten Voraussetzungen ist der Gewinn an Wirkleistung pro kVar örtlich gelieferter Blindleistung um so grösser, je höher der anfängliche cos φ, d. h. der cos φ v o r Phasenschiebung, und je grösser das Verhältnis von Blind- und Wirkwiderstand, d. h. je grösser der Querschnitt der Drähte und ihr Abstand ist.

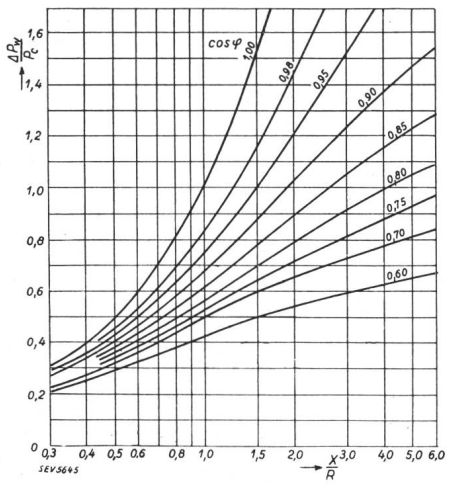

Fig. 7.

Verhältnis des Gewinnes an Wirkleistung zur Kondensatorleistung in Funktion des Verhältnisses von Blind- und Wirkwiderstand und des Leistungsfaktors v o r Phasenschiebung.

ΔP_w Gewinn an Wirkleistung (kW).
P_c Kondensatorleistung (kVar).
cos φ_1 *vor* Phasenschiebung (nacheilend).

Vom Standpunkte konstanten Spannungsabfalles aus gesehen gelangt man daher zu Resultaten, welche denjenigen, die man vom üblichen Gesichtspunkt der konstanten Strombelastung aus erhält, entgegengesetzt sind.

Die gesamte mögliche Erhöhung der Wirkleistungs-Uebertragungsfähigkeit wird natürlich durch die zulässige Strombelastung des Leiters begrenzt. Eine weitere Grenze liegt in der Spannungserhöhung bei geringer Belastung, z. B. nachts, wenn man die Kondensatoren ständig an der Leitung lässt. In diesem Falle wird man die gesamte Kondensatorenleistung so bemessen, dass sie die Grundbelastung an Blindleistung, die sich im wesentlichen aus den Erregerströmen der angeschlossenen Transformatoren zusammensetzt, nicht wesentlich über-

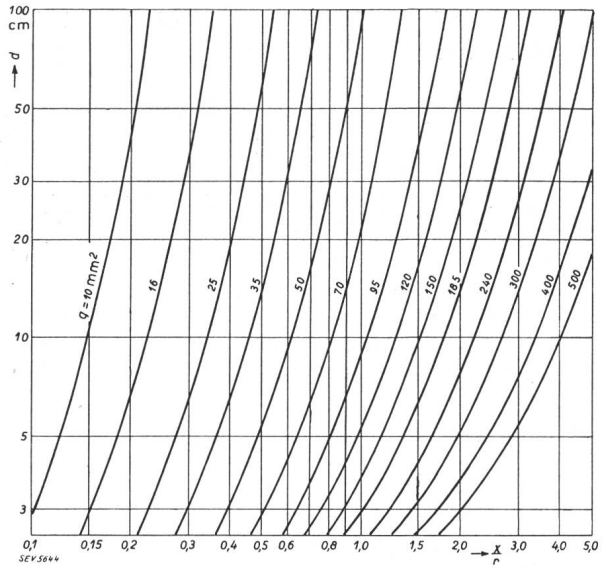

Fig. 8.

Verhältnis des Blindwiderstandes zum Wirkwiderstand einer Leitung in Funktion des Leiterquerschnitts q und Drahtabstandes d für Kupferleitung bei 25° C und 50 Per./s

(für ungleiche Drahtabstände ist für d der Wert $d = \sqrt[3]{d_1\, d_2\, d_3}$ zu verwenden).

steigt. Auch mit dieser Beschränkung zeigt sich in ausgeführten Anlagen, dass eine Erhöhung der Nutzleistung um 30 bis 40 % im Bereich des Möglichen liegt.

Es sei hier erwähnt, dass die *Spannungsänderung*, d. h. die Spannungsdifferenz zwischen Vollast und Minimallast durch den Anschluss der Kondensatoren *nicht merklich beeinflusst* wird, wenn es sich um dauernd angeschlossene Kondensatoren handelt. Werden die Kondensatoren dagegen nach Massgabe des Blindleistungsbedarfes zu- und abgeschaltet, so lässt sich auch die Spannungsänderung im gewünschten Sinne beeinflussen. Zum Verständnis dieser Betrachtungen ist es aber wichtig, dass man Spannungsabfall, der eine Funktion des Ortes ist, und mit dem wir uns hauptsächlich beschäftigt haben, und Spannungsänderung, die einem bestimmten Punkte der Leitung zugeordnet eine Funktion der Belastung darstellt, streng auseinanderhält.

Die praktische Anwendung der abgeleiteten Resultate erstreckt sich in erster Linie auf den eingangs der Problemstellung zugrunde gelegten Fall, der sich etwa wie folgt charakterisieren lässt. Eine bestehende Leitung, die an ihrer ganzen Länge angezapft ist, hat die Grenze der Belastbarkeit vom Standpunkt des Spannungsabfalles bei Spitzenlast erreicht. Was die Spannungsänderung anbetrifft,

wird diese durch Regulierung am Leitungsanfang in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten. Um neue Abnehmer beliefern zu können, müsste eine zweite Leitung verlegt werden. Hier setzt unsere Untersuchung ein, die zeigt, dass durch Anschluss von Kondensatoren, d. h. örtliche Blindleistungslieferung, ein u. U. ganz erheblicher Betrag von Mehrleistung übertragbar wird ohne Vergrösserung des Spannungsabfalles, so dass sich der Bau einer zweiten Leitung hinausschieben lässt.

Auf konkrete Fälle angewandt zeigt sich, dass bei den heute üblichen Preisen für statische Kondensatoren deren Verwendung im untersuchten Sinne vielfach sehr rentabel ist. Für eine Leitung von 95 mm² Querschnitt und 35 cm Abstand der Drähte und einem cos φ_1 der Belastung von 85 % gewinnt man z. B. 0,78 kW pro kVar Kondensatorleistung. 1 kW Nutzleistung kostet damit also heute etwa 30 bis 40 Fr., je nach Spannung. Daneben ergeben sich noch alle die Ersparnisse zufolge Einsparung an Kupferverlusten in Leitungen und Transformatoren usw., die hier ganz ausser acht gelassen wurden und die in der Praxis der Phasenverbesserung zur Genüge bekannt sind.

Gegenüber andern Mitteln, mit denen sich der Spannungsabfall bekämpfen lässt, wie etwa Induktionsreglern auf der Strecke, hat die Verwendung von Kondensatoren noch den folgenden betriebstechnisch wichtigen Vorteil: Wenn die Richtung des Energieflusses aus irgendeinem Grunde, z. B. zufolge Abtrennung einer fehlerhaften Strecke und Speisung vom andern Ende, umkehrt, wird der Induktionsregler falsch wirken, es sei denn, dass spezielle Relais und Schalter vorgesehen sind, welche Massnahme jedoch den Kostenpunkt noch mehr zugunsten der Kondensatoren verschieben würde. Im Gegensatz dazu wirken die Kondensatoren unabhängig vom Schaltzustand immer im richtigen Sinne, sofern sie dem Blindleistungsbedarf entsprechend im Netze verteilt sind.

Le réglage des conducteurs et le montage des chaînes d'isolateurs des lignes aériennes en profil très accidenté.

Par *Bernard Jobin*, Bâle.

621.315.17

Dans un article fortement documenté, paru dans le Bull. ASE, 1936, Nos. 2 et 3, M. E. Maurer a rappelé d'une manière très heureuse toutes les notions fondamentales nécessaires pour le calcul mécanique des lignes aériennes. Dans un chapitre spécial (voir cet article, annexe I, chapitre 5), il examine les conditions particulières des lignes montées sur chaînes d'isolateurs de suspension en admettant que dans les portées successives d'un même tronçon de ligne, les conducteurs décrivent des chaînettes ayant même paramètre. Cette hypothèse est admissible dans la très grande majorité des cas, mais il est des conditions particulières, celles des lignes en montagne en particulier, où cette hypothèse peut conduire à des divergences appréciables entre le calcul et la réalité. C'est ce problème qui fait l'objet de l'article qu'on va lire [1]).

In einem im Bull. SEV 1936, Nrn. 2 und 3, erschienenen Aufsatz hat E. Maurer in sehr glücklicher Art die Grundbegriffe der mechanischen Berechnung der Freileitungen zusammengestellt. In einem besonderen Abschnitt (siehe Anhang I, Kapitel 5) behandelt er die Frage des Zustandes der Freileitungen mit Hängeketten und setzt für seine Ueberlegungen voraus, dass die Parameter der durch die Leiter beschriebenen Kettenlinien sämtlicher Spannweiten einer Leitungsstrecke gleich gross sind. Diese Hypothese trifft für den allergrössten Teil der Fälle zu, kann aber unter gewissen Verhältnissen, z. B. bei steilen Bergstrecken, zu grösseren Differenzen zwischen Berechnung und Wirklichkeit führen. Diese Frage wird in dem folgenden Aufsatz behandelt [1]).

1° Introduction.

Pour les calculs mécaniques des conducteurs des lignes à haute tension, et en particulier pour la préparation des tableaux de réglage des flèches, on admet généralement que les paramètres des chaînettes des diverses portées d'un même canton de pose sont égaux [2]). Or, si cette hypothèse est légitime dans la très grande majorité des cas, il existe cependant des conditions particulières, où elle est nettement inapplicable, où elle conduit même à des divergences inadmissibles entre le calcul et la réalité. Les conditions spéciales sont celles des tronçons de lignes à profil très accidenté qui sont assez fréquents dans nos régions de montagnes. Là, au moment du déroulage et du réglage des conducteurs sur poulies, on peut constater, sous l'effet du poids propre du conducteur, une augmentation systématique de la tension mécanique, lorsque l'on passe des portées inférieures aux portées supérieures d'un tronçon. Ceci revient à dire que le paramètre des chaînettes tracées par les conducteurs varie d'une portée à l'autre et qu'il est plus grand au sommet des pentes qu'à leur base. Cette variation du paramètre pose, au point de vue du réglage des conducteurs, un problème spécial que nous nous proposons de traiter brièvement. Nous citerons d'ailleurs, ci-après, un cas concret, où la portée la plus élevée d'un tronçon accuse un paramètre de chaînette environ 100 % supérieur à celui de la portée inférieure. Suivant la manière dont le réglage des conducteurs est réalisé, la fatigue des conducteurs peut, dans un cas semblable, atteindre des valeurs inadmissibles.

Pour ce qui va suivre, nous admettrons la même notation que celle fixée par M. Maurer dans l'article déjà cité. Nous y apporterons cependant un petit complément en désignant par les indices «i» et «s» les caractéristiques aux points inférieur et supérieur

[1]) Cette même matière a été développée, par l'auteur, d'une manière plus complète dans un rapport présenté à la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension, session de Juin 1933 à Paris. Voir compte rendu, volume II, rapport No. 39.

[2]) C'est notamment l'hypothèse faite par M. E. Maurer dans son article «Le calcul mécanique des lignes aériennes», Bull. ASE 1936, No. 3, page 67, paragraphe 5 c.