Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 24 (1933)
Heft: 16

Artikel: Die Parallelarbeit von Transformatoren
Autor: Regli, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057251

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: 07.01.2026

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

nen ausserdem um die Vertikalachse gedreht und beliebig geneigt werden. Eine Arretiervorrichtung erlaubt, die einmal durch Versuch als richtig befundene Lage fest einzustellen. Nach umfangreichen Beleuchtungsversuchen wurde die Einstellung der Reflektoren so gewählt, dass jede Stelle des Platzes vom Strahlenbündel von 6 bis 8 Reflektoren getroffen wird. Dadurch wird eine weitgehende Gleichmässigkeit erzielt, die sich bei einem Probespiel als sehr zweckmässig erwies, während die von einigen Spielern gewünschte Vorzugsbeleuchtung der Tore viel ungünstiger bewertet wurde.

Die Messung der Beleuchtungsstärke ergibt in der Horizontalen 1 m über dem Spielfeld einen mittleren Wert von 64 Lux; die Gleichmässigkeit ist 1 : 6 und der Beleuchtungswirkungsgrad, d. h. das Verhältnis des ausgenützten zum ausgestrahlten Lichtstrom beträgt ungefähr 30 %. Die mittlere Beleuchtungsstärke jedes Spielfeldviertels weicht nur um + 5 % bis — 8,5 % vom Mittelwert ab. Diese geringe, von Auge kaum erkennbare Unregelmässigkeit wird jedoch durch nochmalige feinere Einstellung der Lampen innerhalb der Reflektoren und der Reflektoren selbst verringert werden. Die Vertikalbeleuchtungsstärke in 1 m über der Erde beträgt in der Mitte des Feldes 50 Lux, in den Toren 27 Lux und in den Spielfeldecken ungefähr 15 Lux. In der amerikanischen Fachliteratur wird für Fussballspielplätze eine mittlere Beleuchtungsstärke von 24 bis 72 Lux angegeben; die hier erreichte Beleuchtungsstärke liegt also am oberen Grenzwert. Zur Erhöhung des Kontrastes wird natürlich mit einem fast weissen Ball gespielt.

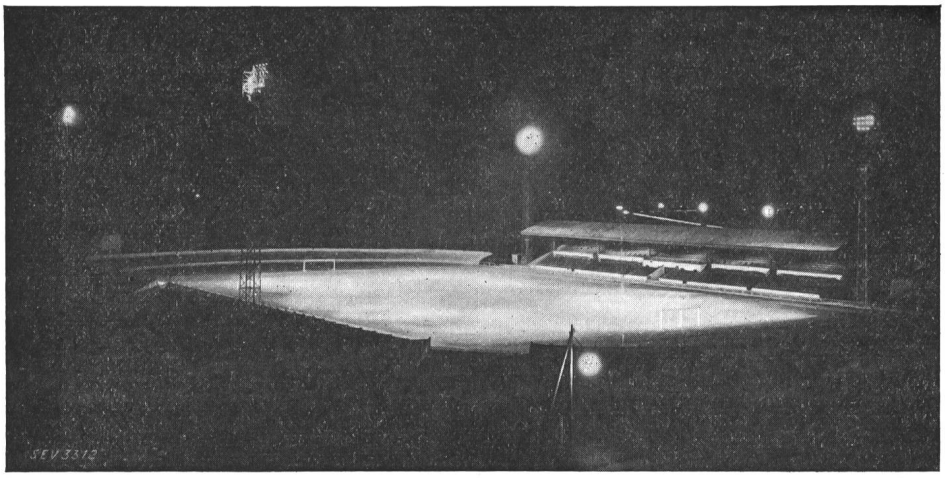

Fig. 2.
Der Hardturm-Sportplatz bei Nacht.

Die Beleuchtungsanlage wird vom Einheitsnetz 380/220 V versorgt und die Schalteinrichtung befindet sich an der dem Eingang zugekehrten Stirnseite der Tribüne. Die Schaltung ist derart getroffen, dass jeder Mast für sich in Betrieb genommen werden kann, was erlaubt, bei Nacht nur auf einem Teil des Platzes zu üben. Der Anschluss ist mit 200 A abgesichert und von jedem der vier Schalter mit Ueberstromauslösung führen je nach der Entfernung der Türme verschieden starke, in der Erde in Tonröhren verlegte Kabel zu der Plattform der einzelnen Maste, wo sich die Verteilkasten befinden. Von dort aus erfolgt der Anschluss an die einzelnen Scheinwerfer, welche mit je 10 A abgesichert sind. Diese Beleuchtungsanlage, welche bei Spielern und Publikum volle Anerkennung gefunden hat — am ersten Probespiel waren etwa 10 000 Zuschauer anwesend — und die als erste derartige Einrichtung in der Schweiz geschaffen werden konnte, ermöglicht nicht nur die Austragung von Fussballspielen bei Nacht, sondern eignet sich auch für andere sportliche Veranstaltungen.

Das Parallelarbeiten von Transformatoren.

Von *E. Regli*, Hindelbank.

621.314.21.016.32

Im nachstehenden Artikel wird das Problem des Parallelschaltens von Transformatoren in elementarer Form behandelt. Der Artikel richtet sich also nicht an Spezialisten, sondern an Betriebspersonal, dem er die Gesichtspunkte vermitteln will, die beim Parallelschalten von Transformatoren zu beachten sind.

L'article ci-dessous traite sous une forme élémentaire le problème de la mise en parallèle de transformateurs. Cet exposé ne s'adresse donc pas aux spécialistes, mais plutôt au personnel d'exploitation pour lui faire ressortir les points à considérer lors du couplage en parallèle de transformateurs.

Das Parallelschalten von Transformatoren wurde in der Literatur schon oft behandelt [1]), jedoch meist in einer Form, die dem Nichttheoretiker in vielen Fällen nicht leicht zugänglich ist. Zweck dieser Arbeit ist die Aufstellung einer kurzen, einfachen und leichtverständlichen Beurteilungsmethode. Einige mathematische Kenntnisse müssen immerhin vorausgesetzt werden.

[1]) Es seien nur folgende Arbeiten erwähnt: Wirz, Bull. SEV 1923, S. 25; 1927, S. 257; E. u. M. 1928, S. 393; Vidmar, E. u. M. 1927, S. 457; Hopp, E. u. M. 1928; S. 565; Richter, E. u. M. 1931, S. 477, usw.

Damit zwei oder mehrere Transformatoren einwandfrei parallel arbeiten können, müssen gewisse Bedingungen mehr oder weniger streng erfüllt sein. Eine Reihe Länder stellten dafür Regeln auf, die hier nicht behandelt werden können.

Die Bedingungen lauten:

1. gleiche Uebersetzungsverhältnisse bei Leerlauf;
2. gleiche oder innerhalb gewisser Grenzen gleiche Spannungsabfälle (bzw. Impedanzen);
3. gleiche oder für Parallelbetrieb zulässige Schaltungen und Verbindung zusammengehöriger Klemmen;
4. Die Leistungen der parallel arbeitenden Transformatoren dürfen nicht zu stark verschieden sein [2]).

Die *erste Bedingung* ist möglichst genau einzuhalten. Bestehen bei zwei Transformatoren ungleiche Uebersetzungsverhältnisse, so fliessen Ausgleichströme, die gleich sind der geometrischen Differenz der sekundären Spannungen, dividiert durch die geometrische Summe der Kurzschlussimpedanzen, die durch den Kurzschlussversuch entweder auf der Oberspannungsseite oder auf der Unterspannungsseite, je nachdem die Messung bequemer auszuführen ist, gemessen werden.

Es gibt Fälle, wo es schwer ist, diese Bedingung restlos einzuhalten, und zwar dann, wenn zwei Transformatoren verschiedener Herkunft zusammenarbeiten müssen. Fehlerloses Einhalten dieser Bedingung gibt es im allgemeinen nur bei Transformatoren mit hohen Windungszahlen oder solchen gleicher Herkunft. Darum ist es angezeigt, bei Bestellung des Transformators, der zu einem vorhandenen parallel arbeiten soll, nach Möglichkeit die Windungszahlen anzugeben, oder, wenn diese nicht bekannt sind, sie oder deren genaues Verhältnis vom Fabrikanten des vorhandenen Transformators zu verlangen. Ein solches Verlangen ist kein Eingriff in die Geheimnisse der Fabrikation. Sehr gefährlich ist es, grosse Transformatoren verschiedener Herkunft parallel zu schalten [2]).

Im allgemeinen wird bei Leerlauf ein Uebersetzungsfehler von etwa ½ % zugelassen. Bei niedrigen Spannungen kann diese Grenze oft nicht eingehalten werden; die grösseren Ausgleichströme müssen dann wohl oder übel in Kauf genommen werden.

Die *zweite Bedingung* sei rechnerisch behandelt. Der Einfluss des Magnetisierungsstromes kann dabei vernachlässigt werden, weil er meistens nur wenige Prozent des Belastungsstromes beträgt und den Rechnungsgang unnötigerweise erschweren würde. An Hand typischer Beispiele sollen die einzelnen Fälle behandelt werden.

Es bedeuten:

$P^*_1, P^*_2, P^*_3 \ldots P^*_n$ die Nennleistungen der Transformatoren 1, 2, 3 ... n in kVA.

P^* die totale Nennleistung in kVA.

$P_1, P_2, P_3 \ldots P_n$ die bei Parallelbetrieb wirklich auftretenden Leistungen in kVA.

$I^*_1, I^*_2 \ldots I^*_n$ die Nennströme.

I^* den totalen Nennstrom.

$I_1, I_2 \ldots I_n$ die bei Parallellauf auftretenden Ströme.

$\varphi_{K1}, \varphi_{K2} \ldots \varphi_{Kn}$ die Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung bei Kurzschluss und bestimmter Temperatur.

$\varphi_1, \varphi_2 \ldots \varphi_n$ die Phasenverschiebungen der Ströme gegenüber der Betriebsspannung.

$\psi_1, \psi_2 \ldots \psi_n$ Winkel zwischen den Strömen I, $I_2 \ldots I_n$ und dem Gesamtstrom I^* (Fig. 2).

$R_1, R_2 \ldots R_n$ die Ohmschen Widerstände, auf eine Wicklung bezogen, bei bestimmter Temperatur, in Ohm.

$X_1, X_2 \ldots X_n$ die induktiven Widerstände, auf eine Wicklung bezogen, in Ohm.

$Z_1, Z_2 \ldots Z_n$ die Impedanzen, auf eine Wicklung bezogen, bei bestimmter Temperatur.

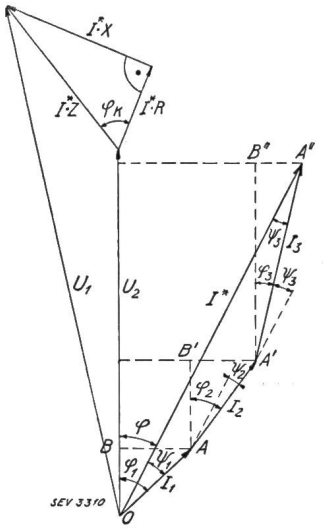

Fig. 1.

Aus Fig. 1 und 2 erkennt man die Phasenverschiebungen der einzelnen Ströme ψ gegenüber dem Gesamtstrom bei drei parallel arbeitenden Transformatoren. Die Phasenverschiebungen rühren von den ungleichen Kurzschlussimpedanzen her, d. h. von den ungleichen charakteristischen Dreiecken OAB, AA'B' und A'A''B''. Sie haben zur Folge, dass die Phasenverschiebungen φ der einzelnen Ströme gegenüber der gemeinsamen Spannung U_2 nicht gleich sind, und dass dadurch die einzelnen Transformatoren eine vom Nennwert verschiedene Last aufnehmen. Es

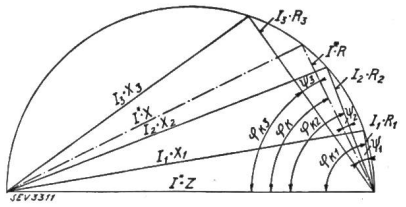

Fig. 2.

verhalten sich die Ströme, bzw. die Leistungen, umgekehrt wie die Kurzschlussimpedanzen.

$$I_1 Z_1 = I_2 Z_2 = \ldots = I_n Z_n = I^* Z \qquad (1)$$

$$I_1 \cos\varphi_1 + I_2 \cos\varphi_2 + \ldots I_n \cos\varphi_n = I^* \cos\varphi \qquad (2)$$

[2]) Der VDE empfiehlt z. B. als Grenze ein Verhältnis der Leistungen von 3 : 1.

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi_{K1} &= \frac{X_1}{R_1} \quad \operatorname{tg}\varphi_{K2} = \frac{X_2}{R_2} \\ \ldots \operatorname{tg}\varphi_{Kn} &= \frac{X_n}{R_n} \quad \operatorname{tg}\varphi_{K} = \frac{X}{R} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

R = totaler Ohmscher Widerstand in Ohm,
X = totaler induktiver Widerstand in Ohm, (bezogen auf eine Wicklung).

$$\left.\begin{aligned} \psi_1 &= \varphi_{K1} - \varphi_K \\ \psi_2 &= \varphi_{K2} - \varphi_K \\ \psi_n &= \varphi_{Kn} - \varphi_K \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

woraus

$$\left.\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi + \psi_1 = \varphi - \varphi_K + \varphi_{K1} \\ \varphi_2 &= \varphi + \psi_2 = \varphi - \varphi_K + \varphi_{K2} \\ \varphi_n &= \varphi + \psi_n = \varphi - \varphi_K + \varphi_{Kn} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Diese Bedingungen genügen, um die Einzelbelastungen der Transformatoren zu bestimmen. Aus (1) wird

$$I_2 = I_1 \frac{Z_1}{Z_2} \quad I_3 = I_1 \frac{Z_1}{Z_3} \quad I_n = I_1 \frac{Z_1}{Z_n} \tag{6}$$

Setzt man die Werte φ_1, φ_2, φ_n und die aus (1) erhaltenen Ströme in Gl. (2) ein, so wird:

$$I_1 \cos\varphi_1 + I_1 \frac{Z_1}{Z_2} \cos\varphi_2 + I_1 \frac{Z_1}{Z_3} \cos\varphi_3 + \ldots I_1 \frac{Z_1}{Z_n} \cos\varphi_n = I^* \cos\varphi \tag{7}$$

woraus

$$I_1 = \frac{I^* \cos\varphi}{\cos\varphi_1 + \frac{Z_1}{Z_2} \cos\varphi_2 + \ldots \frac{Z_1}{Z_n} \cos\varphi_n} \tag{8}$$

und

$$I_n = \frac{I^* \cos\varphi}{\frac{Z_n}{Z_1} \cos\varphi_1 + \frac{Z_n}{Z_2} \cos\varphi_2 + \ldots \frac{Z_n}{Z_{n-1}} \cos\varphi_{n-1} + \cos\varphi_n} \tag{9}$$

Multiplizieren wir die Gl. (8) und (9) mit $\frac{U_2}{1000}$ bzw. mit $\frac{U_2 \cdot \sqrt{3}}{1000}$, so erhält man die entsprechenden Leistungen für Einphasentransformatoren bzw. für Drehstromtransformatoren in kVA:

$$P_n = \frac{P^* \cos\varphi}{\frac{Z_n}{Z_1} \cos\varphi_1 + \frac{Z_n}{Z_2} \cos\varphi_2 + \ldots \frac{Z_n}{Z_{n-1}} \cos\varphi_{n-1} + \cos\varphi_n} \tag{10}$$

Gl. (10) gibt also die wirklich auftretende Belastung eines der parallelgeschalteten Transformatoren, auch wenn die Gesamtbelastung nicht gleich der totalen Nennbelastung ist. Die prozentuale Abweichung der wirklichen Last von der Nennlast einer der parallellaufenden Transformatoren beträgt

$$\Delta P_n = \frac{P_n - P^*_n}{P^*_n} \cdot 100\ \% \tag{11}$$

Ist ΔP positiv, so liegt eine Ueberbelastung vor, ist es negativ, so ist Unterbelastung vorhanden.

Weichen die Werte φ_K wenig voneinander ab, bis zu einigen Graden, so können die Werte $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_n = \cos\varphi$ gesetzt werden, und die allgemeine Formel lautet:

$$P_n = \frac{P^*}{\frac{Z_n}{Z_1} + \frac{Z_n}{Z_2} + \ldots \frac{Z_n}{Z_{n-1}} + 1} \tag{12}$$

$$P_1 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_3} + \ldots \frac{Z_1}{Z_n}}$$

Für den Fall zweier Transformatoren wird:

$$P_1 = P^* \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad P_2 = P^* \cdot \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{13}$$

Die Abweichung von der Nennleistung (Gl. 11) ist

$$\Delta P_1 = \frac{P^* \cdot Z_2 - P^*_1 (Z_1 + Z_2)}{P^*_1 (Z_1 + Z_2)} \cdot 100\ \% \tag{14}$$

Setzt man $P^* = P^*_1 + P^*_2$, so vereinfacht sich Gl. 14 zu

$$\Delta P_1 = \frac{P^*_2 \cdot Z_2 - P^*_1 \cdot Z_1}{P^*_1 (Z_1 + Z_2)} \cdot 100\ \% \tag{15}$$

Aus dieser Formel geht hervor, dass, je kleiner der Absolutwert des Ausdruckes $P^*_2 \cdot Z_2 - P^*_1 \cdot Z_1$ ist, desto besser wird das Parallelarbeiten der beiden Transformatoren.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Ohmschen Widerstände mit zunehmender Temperatur wachsen; bei Transformatoren kann die Widerstandsänderung bis 25 % betragen. Wird ein kalter Transformator einem warmen zugeschaltet, so kann daher eine grosse Ueberlastung des kalten Transformators auftreten, bis die Betriebstemperatur erreicht ist, trotzdem die Transformatoren in warmem Zustande befriedigend parallel arbeiten.

Ehe die weiteren Bedingungen des einwandfreien Parallelarbeitens von Transformatoren behandelt werden, mögen einige *Beispiele* die Anwendung der gegebenen Formeln zeigen. Es sollen drei Transformatoren 10 000/2000 V, Y/Y, parallel geschaltet werden; einer habe 500 kVA und zwei 1000 kVA Nennleistung. Die Impedanzen wurden absichtlich verschieden gewählt, um die einzelnen Fälle deutlich hervorzuheben. Sie sind in Tabelle I zusammengestellt. Die Werte wurden aus dem Kurzschlussversuch bei warmer Wicklung ermittelt. Wir berechnen nun für das *Beispiel 1* den allgemeinen Fall (Gl. 10). Zunächst ist $\operatorname{tg}\varphi_K$ zu bestimmen. Zu diesem Zweck berechnen wir die Gesamtimpedanz aller Transformatoren mit Hilfe der komplexen Zahlen.

Impedanzen in Ohm der in den Beispielen verwendeten Transformatoren.
(Die Zahlen in Klammern sind die entsprechenden Kurzschlußspannungen in Prozenten.) Tabelle I.

	Transformator 1 500 kVA				Transformator 2 1000 kVA				Transformator 3 1000 kVA			
	Z_1 Ω	X_1 Ω	R_1 Ω	tg φ_{K1}	Z_2 Ω	X_2 Ω	R_2 Ω	tg φ_{K2}	Z_3 Ω	X_3 Ω	R_3 Ω	tg φ_{K3}
Beispiel 1	17,3 (5,00 %)	16,9 (4,87 %)	3,81 (1,10 %)	4,44	9,52 (5,5 %)	9,36 (5,41 %)	1,73 (1,00 %)	5,41	7,79 (4,5 %)	7,60 (4,39 %)	1,73 (1,00 %)	4,39
Beispiel 2	17,3 (5,00 %)	16,9 (4,87 %)	3,81 (1,10 %)	4,44	8,65 (5,00 %)	8,475 (4,90 %)	1,73 (1,00 %)	4,9				
Beispiel 3	17,3 (5,00 %)	16,95 (4,90 %)	3,46 (1,00 %)	4,9	7,79 (4,5 %)	7,64 (4,41 %)	1,56 (0,90 %)	4,9	9,53 (5,50 %)	9,33 (5,39 %)	1,905 (1,10 %)	4,9

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}$$

$$= \frac{1}{R_1 + jX_1} + \frac{1}{R_2 + jX_2} + \frac{1}{R_3 + jX_3}$$

$$= \frac{1}{3{,}81 + j16{,}90} + \frac{1}{1{,}73 + j9{,}36} + \frac{1}{1{,}73 + j7{,}60}$$

$$= \frac{3{,}81 - j16{,}90}{300} + \frac{1{,}73 - j\,9{,}36}{91} + \frac{1{,}73 - j\,7{,}60}{60{,}8} =$$

$$\frac{1}{300}\,(3{,}81 - j16{,}90 + 5{,}70 - j30{,}90 + 8{,}55 - j\,37{,}50)$$

$$= \frac{1}{300}\,(18{,}06 - j\,85{,}30)$$

$$Z = \frac{300\,(18{,}06 + j\,85{,}30)}{7556} = 0{,}716 + j \cdot 3{,}38\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{0{,}716^2 + 3{,}38^2} = 3{,}45\ \Omega$$

$$\operatorname{tg} \varphi_K = \frac{3{,}38}{0{,}716} = 4{,}72$$

$$\operatorname{tg} \varphi_K = \frac{3{,}38}{0{,}716} = 4{,}72 \qquad \varphi_K = 78^0\,02', \text{ wie}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{K1} = \frac{16{,}9}{3{,}81} = 4{,}44 \qquad \varphi_{K1} = 77^0\,18'$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{K2} = \frac{9{,}36}{1{,}73} = 5{,}41 \qquad \varphi_{K2} = 79^0\,31'$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{K3} = \frac{7{,}60}{1{,}73} = 4{,}39 \qquad \varphi_{K3} = 77^0\,10'$$

$$\cos \varphi = 0{,}8 \text{ (Annahme)} \qquad \varphi = 36^0\,51'$$

Unter Berücksichtigung der Winkel-Vorzeichen werden nun nach Gl. (5) die Winkel φ_1, φ_2 und φ_3 berechnet.

$$\varphi_1 = 37^\circ\,35' \qquad \cos \varphi_1 = 0{,}79235$$
$$\varphi_2 = 35^\circ\,22' \qquad \cos \varphi_2 = 0{,}81531$$
$$\varphi_3 = 37^\circ\,43' \qquad \cos \varphi_3 = 0{,}79087$$

Für $\cos \varphi = 0{,}8$ ergeben die Einzelbelastungen folgende Werte:

$$P_1 = \frac{P^* \cos \varphi}{\cos \varphi_1 + \frac{Z_1}{Z_2} \cos \varphi_2 + \frac{Z_1}{Z_3} \cos \varphi_3}$$

$$= \frac{2500 \cdot 0{,}8}{0{,}79235 + \frac{17{,}3}{9{,}52} \cdot 0{,}81531 + \frac{17{,}3}{7{,}79} \cdot 0{,}79087}$$

$$= \frac{2000}{4{,}0323} = \underline{496{,}5 \text{ kVA}}$$

$$P_2 = \frac{P^* \cos \varphi}{\cos \varphi_2 + \frac{Z_2}{Z_1} \cos \varphi_1 + \frac{Z_2}{Z_3} \cos \varphi_3}$$

$$= \frac{2000}{2{,}2182} = \underline{903 \text{ kVA}}$$

$$P_3 = \frac{P^* \cos \varphi}{\cos \varphi_3 + \frac{Z_3}{Z_1} \cos \varphi_1 + \frac{Z_3}{Z_2} \cos \varphi_2}$$

$$= \frac{2000}{1{,}81537} = \underline{1102 \text{ kVA}}$$

Die Abweichungen werden:

$$\Delta P_1 = \frac{-3{,}5 \cdot 100}{500} = -0{,}7\ \%$$

$$\Delta P_2 = \frac{-97 \cdot 100}{1000} = -9{,}7\ \%$$

$$\Delta P_3 = \frac{+102 \cdot 100}{1000} = +10{,}2\ \%$$

Lässt man die einzelnen Phasenverschiebungen unberücksichtigt (Gl. 12), so werden:

$$P_1 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_3}} = 498 \text{ kVA}; \quad \text{Abweichung} = -0{,}4\ \%$$

$$P_2 = \frac{P^*}{\frac{Z_2}{Z_1} + 1 + \frac{Z_2}{Z_3}} = 902 \text{ kVA}; \quad \text{Abweichung} = -9{,}8\ \%$$

$$P_3 = \frac{P^*}{\frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_2}{Z_1} + 1} = 1102 \text{ kVA}; \quad \text{Abweichung} = +10{,}2\ \%$$

Der Vergleich der Resultate zeigt, dass die Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Strömen und dem Gesamtstrom vernachlässigt werden können.

Im *Beispiel 2* sind nur zwei Transformatoren gegeben, beide mit gleicher Kurzschlußspannung, aber mit verschiedenen Komponenten. Ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebungen ergeben sich die Belastungen zu:

$$P_1 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{1500}{3} = 500 \text{ kVA}$$

$$P_2 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} = \frac{1500}{1{,}5} = 1000 \text{ kVA.}$$

Es finden also keine Ueberlastungen statt.

Beispiel 3 behandelt drei Transformatoren mit ähnlichen charakteristischen Dreiecken. Alle Ströme sind mit dem Gesamtstrom in Phase. Die Rechnung ergibt folgende Ueberlastungen:

$$P_1 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_3}} = \frac{2500}{5{,}04} = 496 \text{ kVA; Abweichung} = -0{,}8\ \%$$

$$P_2 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_2}{Z_3}} = \frac{2500}{2{,}266} = 1102 \text{ kVA; Abweichung} = +10{,}2\ \%$$

$$P_3 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_3}{Z_2}} = \frac{2500}{2{,}775} = 901 \text{ kVA; Abweichung} = -9{,}9\ \%$$

Schaltet man den Transformator 1 (500 kVA) mit Transformator 2 (1000 kVA) parallel, so ergibt sich die folgende Lastverteilung:

$$P_1 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{1500}{3{,}225} = 465 \text{ kVA; Abweichung} = -7{,}0\ \%$$

$$P_2 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} = \frac{1500}{1{,}45} = 1035 \text{ kVA; Abweichung} = +3{,}5\ \%$$

Schaltet man den Transformator 1 (500 kVA) mit dem Transformator 3 (1000 kVA) parallel, so wird:

$$P_1 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_1}{Z_3}} = \frac{1500}{2{,}82} = 533 \text{ kVA; Abweichung} = +6{,}6\ \%$$

$$P_3 = \frac{P^*}{1 + \frac{Z_3}{Z_1}} = \frac{1500}{1{,}551} = 967 \text{ kVA; Abweichung} = -3{,}3\ \%$$

Es geht daraus hervor, dass bei Parallelschaltung zweier Transformatoren ungleicher Nennleistung der kleinere Transformator gefährdet ist, wenn er die kleinere Kurzschlußspannung hat als der grössere; wenn die Kurzschlußspannungen nicht gleich sein können, so soll der kleinere Transformator wenn möglich die grössere Kurzschlussspannung haben.

Das Kapitel der Transformatorenschaltungen *(dritte Bedingung)* ist sehr umfangreich; es sei hier nur auf folgendes hingewiesen:

Für den Parallelbetrieb von Drehstromtransformatoren muss der *Drehsinn* unter allen Umständen der gleiche sein, sonst treten unmögliche Zustände auf. Er kann mit einem Drehfeldrichtungsanzeiger bestimmt werden; es kann hiezu auch eine Phasenlampe oder ein Voltmeter benützt werden. Sind z. B. zwei Transformatoren oberspannungsseitig an die Sammelschienen angeschlossen, so muss die Spannung zwischen den zu verbindenden Klemmen der Unterspannungsseite stets Null sein. Ist dies nicht der Fall, so müssen die Phasen so lange vertauscht werden, bis der gewünschte Zustand eingetreten ist. Oft genügt es nicht, die Phasen nur auf der Sekundärseite zu vertauschen; es muss das gleiche auch auf der Primärseite gemacht werden. Wenn durch das Vertauschen der Phasen keine richtige Parallelschaltung erfolgen kann, so ist der Transformator nicht richtig geschaltet, d. h. die Lage der sekundären Spannungsvektoren stimmt nicht überein. Am deutlichsten kommt dies bei Einphasentransformatoren zur Geltung. Die beiden Wicklungen können ungleichen Wicklungssinn haben. Schaltet man einen Transformator mit gleichem Wicklungssinn mit einem solchen ungleichen Wicklungssinnes parallel, so tritt Kurzschluss auf. Beim Vertauschen irgendeiner Wicklung, d. h. irgend zweier Klemmen, erhält man einwandfreien Betrieb. Parallel zu schaltende Drehstromtransformatoren müssen der gleichen Schaltgruppe [3]) angehören, d. h. die Lage der Spannungsvektoren muss übereinstimmen. Folgende Schaltungen können beispielsweise gute Parallelschaltungen ergeben:

A. Δ/∇ mit $\curlywedge/\curlywedge$ oder mit $\Delta/\curlywedge$

B. Δ/∇ mit $\curlywedge/Y$ oder mit Δ/Y

Transformatoren der Schaltgruppe A können mit Transformatoren der Schaltgruppe B nicht parallel geschaltet werden, weil die Phasenlage der Spannungsvektoren der miteinander zu verbindenden Klemmen nicht übereinstimmt. In solchen Fällen muss durch Aendern der inneren Verbindungen die Schaltung geändert werden, was jedoch nicht immer möglich ist.

Ueber die *vierte Bedingung* wurde das nötige bereits gesagt.

---

[3]) Bull. SEV 1931, Nr. 10, S. 240, Fig. 1.