

1 Einphasentransformatoren

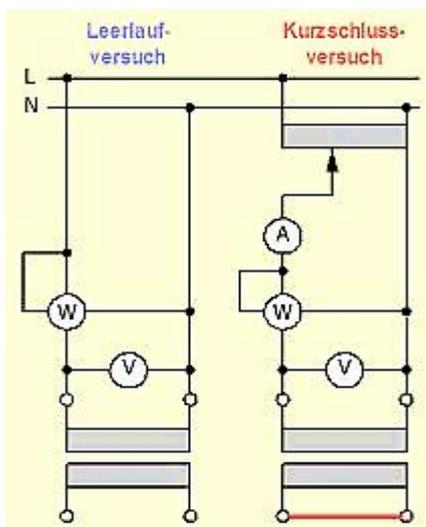
Nach DIN VDE 0550 werden Transformatoren in Kleintransformatoren (bis 16 kVA) und in Grosstransformatoren (über 16 kVA) eingeteilt.

Der Einschaltstrom kann beim einphasigen Transformator den 10-fachen Wert des Bemessungsstromes erreichen. Die Nennstromstärke einer primärseitig vorhandenen Schmelzsicherung muss doppelt so gross wie der Bemessungsstrom sein.

1.1 Kurzschlußspannung

Die Kurzschluss- und Betriebseigenschaften eines Transformators sind von seinen Konstruktionsmerkmalen abhängig. Entscheidend für eine Bewertung ist die Kurzschlußspannung.

Die Kurzschlußspannung wird im Kurzschlussversuch bestimmt. Dabei wird die Eingangsspannung solange erhöht, bis in der Primärwicklung der Bemessungsstrom (I_{1N}) fließt. Die dann an der Primärwicklung anliegende Spannung wird als Kurzschlußspannung (U_k) bezeichnet. Sie entspricht genau dem Spannungsabfall im Nennbetrieb.



Anm.: Die Kurzschlußspannung U_k ist die Spannung, die auf der Primärseite eines auf der Sekundärseite kurzgeschlossenen Transformators angelegt werden muss, damit sowohl in der Primär- als auch in der Sekundärwicklung der jeweilige Nennstrom fließt.

Relative Kurzschlußspannung: Leerlaufspannung:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1N}} \cdot 100 \%$$

$$U_{20} = U_N + U_k$$

Dauerkurzschlußstrom:

Stosskurzschlußstrom:

$$I_{kd} = \frac{I_N}{u_k} \cdot 100 \%$$

$$i_0 \leq 2,55 \cdot I_{kd}$$

Abb. 1

Leerlauf- und Kurzschlussversuch¹

Die *Transformatorhauptgleichung* für sinusförmige Spannungen und Ströme zeigt den Zusammenhang zwischen Leerlaufspannung (U_0), magnetischer Flussdichte (B), Kernquerschnitt (A), erforderlicher Windungszahl (N) und Frequenz (f).

$$U_0 = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

1.2 Kappsches Dreieck

Die Kurzschlußspannung (U_k) ist ein Mass für die Spannungsänderung bei Belastung des Transformators. Im *Kappschen Dreieck* entspricht U_k der Hypotenuse, die durch geometrische Addition von Wirkspannungsabfall und Blindspannungsabfall entsteht.

Die folgende Abbildung zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild beim Kurzschlussversuch. Am Eingang liegt die Kurzschlußspannung ($U_{kN} = U_1$), die den Kurzschlußstrom ($I_k = I_{1N}$) durch den

¹ <http://www.sick-fm.de/m/1-trafo-3.html>

Scheinwiderstand (Z_K) treibt. An Z_K fällt die Kurzschlußspannung ab, so dass die Ausgangsspannung (U_2) an den Klemmen der Sekundärwicklung beim Kurzschlussversuch Null ist.

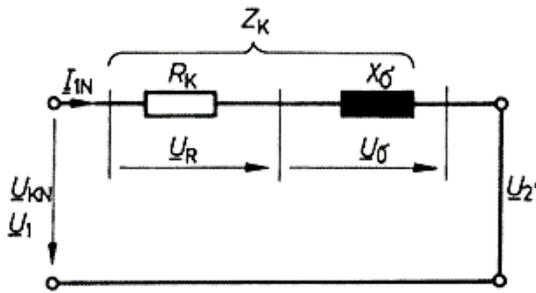


Abb. 2

Ersatzschaltbild Transformator

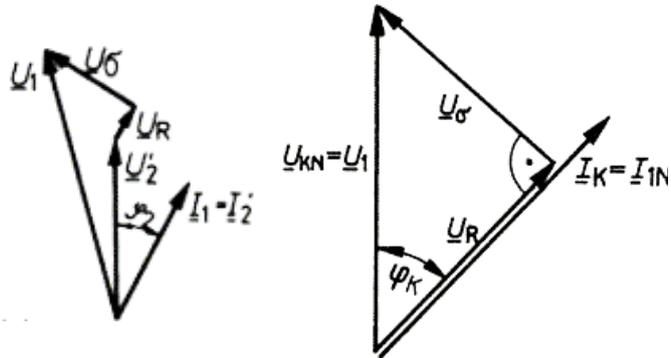


Abb. 3

Kapsches Dreieck

Der Blindspannungsabfall (U_σ) erfolgt an der Reaktanz, der Wirkspannungsabfall (U_R) am ohmschen Widerstand des Transformators.



Abb. 4

Kapsches Dreieck bei induktiver und kapazitiver Last

Die Kurzschlußspannung entspricht der geometrischen Differenz zwischen Eingangss- und Ausgangsspannung.

Bei einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 gilt die Beziehung:

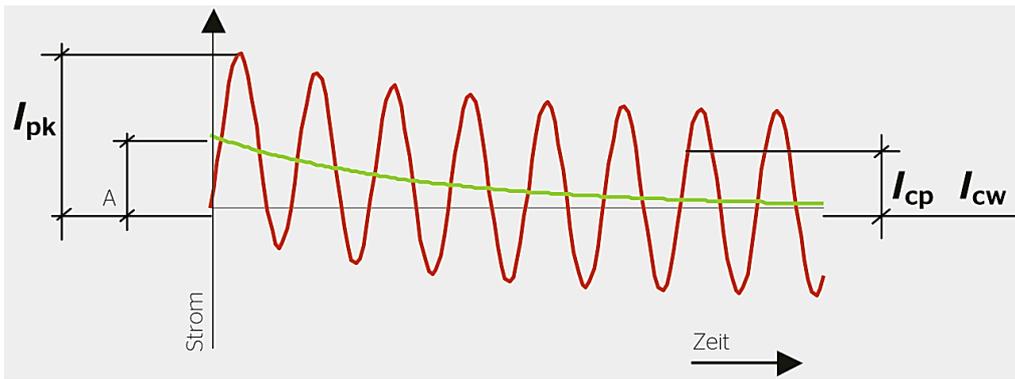
$$U_2 = U_1 - U_k$$

Das Kapsche Dreieck dreht sich bei Veränderung des $\cos\phi$ um die Spitze von U_1 . Abhängig von der Phasenlage kann die Ausgangsspannung somit grösser als die Eingangsspannung werden.

1.2 Kurzschlußstrom

Entsteht an den Ausgangsklemmen eines Transformators ein Kurzschluss, so fließt zunächst der Stosskurzschlußstrom (i_0), welcher etwa den 2,5-fachen Wert des Dauerkurzschlußstromes (I_{kd}) erreicht; danach klingt der Strom auf den Wert des Dauerkurzschlußstromes ab.

Je kleiner die Kurzschlußspannung ist, desto grösser ist der Kurzschlußstrom.



I_{pk} = Spitzenwert des Kurzschlußstromes
 I_{cp} = unbeeinflusster Kurzschlußstrom
 A = Anfangswert des Gleichstromgliedes
 I_{cw} = Bemessungskurzzeitstromfestigkeit

Abb. 5
 Verlauf des Kurzschlußstromes²

1) Beim *Zwischenkel-Transformator* fällt bei Belastung die sekundäre Klemmenspannung stark ab, weil die aus der Primärspule austretenden Streufelder keine induzierende Wirkung in der Sekundärspule ausüben. Solche Transformatoren sind "spannungsweich" und besitzen eine hohe Kurzschlußspannung von 40 % bis 70 %. Bei kurzgeschlossener Ausgangswicklung fließt aufgrund der nur noch geringen Klemmenspannung kein großer Dauerkurzschlußstrom. Der Transformator erweist sich damit als kurzschlussfest. Verwendung finden solche Transformatoren als Klingel-, Spielzeug- und Experimentiertrafos.

2) Durch gezielte Erhöhung des magnetischen Streuflusses lässt sich die Kurzschlussfestigkeit erhöhen. *Streu Feldtransformatoren* werden z.B. als Neontrafos bei Beleuchtungsanlagen und als strombegrenzende Transformatoren für Schweißanlagen eingesetzt. Bei den letzteren befindet sich ein mittels Handrad oder Hebelmechanismus verstellbares Joch im Transformator.

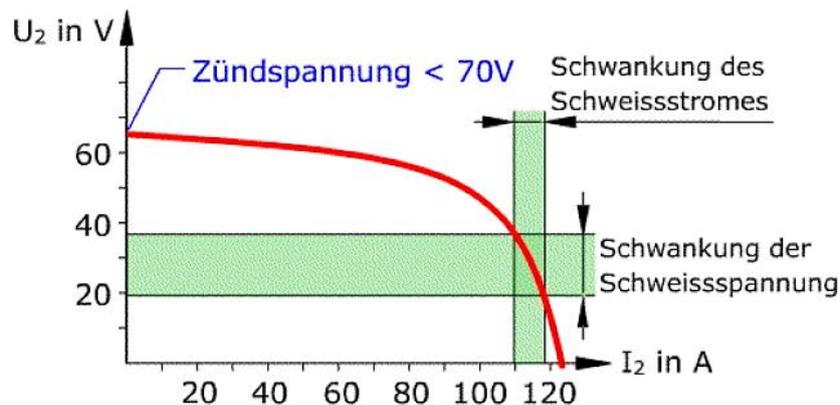


Abb. 6
 U/I-Kennlinie eines Schweißtransformators

3) Beim *Mantelkern-Transformator* mit Zylinderwicklung durchdringen die Streufelder der Primärspule auch die Sekundärspule. Bei Belastung fällt die Ausgangsspannung deshalb nur geringfügig ab und der Strom nimmt zu. Der Transformator erweist sich als "spannungshart" und besitzt eine kleine Kurzschlußspannung zwischen 4 % bis 8 %.

Ein spannungsharter Transformator ändert seine Spannung nur geringfügig zwischen Volllast und Leerlauf. Im Kurzschlussfall können hohe Kurzschlußströme bis zum 25-fachen Nennstrom

² <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/erd-und-kurzschlussfestigkeit.html>

vorkommen. Solche Transformatoren sind folglich nicht kurzschlussfest. Um den Transformator im Störfall zu schützen, sind besondere Schutzeinrichtungen erforderlich.

2 Leistung und Wirkungsgrad

2.1 Nennleistung

Die bei Transformatoren auf dem Leistungsschild angegebene Leistung ist die höchste Dauerleistung, für die der Transformator bemessen wurde und die er unter Nennbedingungen erreicht. Die Angabe der Bemessungsleistung erfolgt in VA, kVA oder MVA und darf keinesfalls überschritten werden.

2.2 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Transformators liegt aufgrund der physikalisch bedingten Verluste zwischen 70 % und 95 %.

Wir unterscheiden Eisen- und Kupferverluste. Hinzu kommen mehr oder weniger grosse Streufeldverluste, die bei Netztransformatoren aber gering sind.

Der Wirkungsgrad berechnet sich beim einphasigen Transformator wie folgt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{P_{V_{Fe}} + P_{V_{Cu}} + U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}$$

Der gelegentlich benötigte Jahreswirkungsgrad ist gleich dem Quotienten aus abgegebener Arbeit pro Jahr und aufgenommener Arbeit pro Jahr.

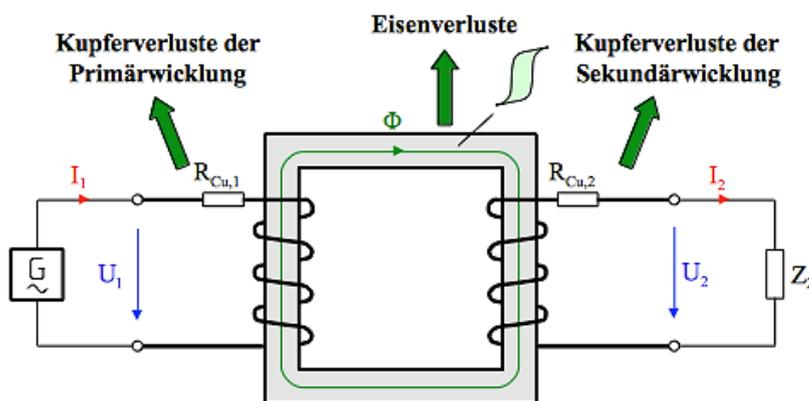


Abb. 7
Verluste im Transformator³

1) Die durch Ummagnetisierung entstehenden belastungsunabhängigen Eisenverluste $P_{V(Fe)}$ werden im Leerlauf ermittelt, um so die Kupferverluste zu vernachlässigen. Sie werden deshalb auch Leerlaufverluste genannt. Der bei Nennspannung in der Primärwicklung fließende Strom ist gross genug, um den Kern voll zu magnetisieren. Die Sekundärwicklung bleibt dabei offen.

2) Die durch den ohmschen Widerstand entstehenden Kupfer- bzw. Wicklungsverluste $P_{V(Cu)}$ werden bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung bestimmt. An der Primärwicklung liegt die

³ <http://elektronik-kurs.net/elektrotechnik/leistungsübertragung-wirkungsgrad/>

Kurzschlußspannung, so dass der aufgenommene Strom klein ist und die Eisenverluste niedrig ausfallen.

3 Dreiphasentransformatoren

Spannungsharte Transformatoren werden als Verteiltransformatoren in der Energieversorgung verwendet. In elektrischen Verteilnetzen kommen somit Transformatoren mit einer Kurzschlußspannung von $\approx 4\%$ zum Einsatz. In Industrieanlagen werden zur besseren Beherrschung von Kurzschlußströmen meist Leistungstransformatoren mit einer Kurzschlußspannung von $\approx 6\%$ verwendet.



a) Dreiphasentrafo in offener Bauart



b) Öltransformator 16/0,4 kV

Abb. 8

Drehstromtransformatoren

Die Wicklungen von Grosstransformatoren befinden sich in einem mit Isolieröl oder SF₆-Gas gefüllten Kessel. Das Medium dient der Isolation und auch der Wärmeabfuhr. Als Transformatorenöle werden Mineralöle und dünnflüssige Silikonöle verwendet. Öltransformatoren müssen PCB-frei sein. Um Öltransformatoren im Kurzschlussfall zu schützen und sicher abzuschalten, befindet sich ein als *Buchholzschutz* bekannter Mechanismus auf dem Transformator. Bei Überschreitung der Grenztemperatur bei hoher Last wird über einen Alarmkontakt ein Warnsignal ausgelöst. Bei unzulässig grosser Erwärmung und Gasbildung im Kurzschlussfall löst ein zweiter Schalter die Netzabschaltung aus.

Das Buchholzrelais wurde 1921 von Max Buchholz, Oberrat bei der Preußischen Elektrizitäts-A.G. in Kassel, erfunden. Seit dieser Zeit ist es ein wichtiges Schutz- und Überwachungsgerät für isolierflüssigkeitsgefüllte Transformatoren mit Ausdehnungsgefäß und Erdschlußspulen sowie für getrennte Überwachung von ölgefüllten Durchführungen oder Kabelanschlusskästen. Es wird in den Kühlkreislauf des zu schützenden Gerätes eingebaut und reagiert auf Störungen wie Gasbildung, Verlust sowie zu hohe Strömung der Isolierflüssigkeit.

4 Schaltgruppen und Phasenverschiebung

4.1 Schaltgruppen

Bei Drehstromtransformatoren (Netz- und Verteiltransformatoren) unterscheidet man unterschiedliche Schaltungen der Wicklungsstränge:

- Dreieckschaltung (D, d)
- Sternschaltung (Y, y)
- Zickzackschaltung (Z, z)

Die Schaltgruppe mit Kennzahl (auch Stundenzahl genannt) zeigt die Schaltungsart und konstruktionsbedingte Phasenverschiebung an.

Bezeichnung		Zeigerbild		Schaltungsbild		dauernde Sternpunktbelastbarkeit
Schaltgruppe	Kennzahl	oberspannungsseitig	unterspannungsseitig	oberspannungsseitig	unterspannungsseitig	
Yyn1	0					10 % des Bemessungsstroms ($0,10 \cdot I_{rT}$)
Dyn5	5					Bemessungsstrom ($1,0 \cdot I_{rT}$)
YNd5						Bemessungsstrom ($1,0 \cdot I_{rT}$)
Yzn5						Bemessungsstrom ($1,0 \cdot I_{rT}$)

Abb. 9

Schaltgruppen mit Zeiger- und Schaltungsbild

Eine Spezialität im Transformatorenbau ist die sog. *Zickzackschaltung*, die verwendet wird, um Asymmetrien bei ungleicher Belastung der Wicklungen auszugleichen.

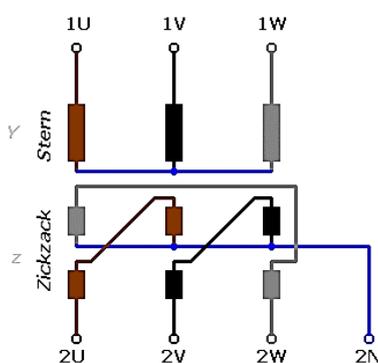


Abb. 10

Schaltbild eines Transformators der Schaltgruppe Yzn11

OS-Seite in Stern- und US-Seite in Zickzackschaltung.

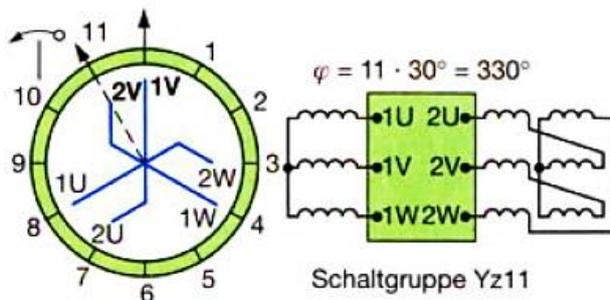
Die sekundären Wicklungsstränge sind geteilt und auf zwei Schenkeln angeordnet. Durch die Umverteilung der magnetischen Flüsse werden Lastungleichheiten kompensiert.

Die Wicklungsanfänge sind mit den Aussenleitern verbunden, die Enden werden zu einem Sternpunkt zusammengefasst.⁴

⁴ <https://de.wikipedia.org/wiki/Zickzackschaltung>

4.2 Phasenverschiebung

Die Spannungszeiger der OS-Wicklung eilen den Spannungszeigern der US-Wicklung um einen bestimmten Winkel voraus. Um die Phasenverschiebung geometrisch darzustellen, werden im Zeigerdiagramm von 1V beginnend im Uhrzeigersinn die "Stundenzahlen" abgezählt. Bei Schaltgruppe Yz11 in Abb. 3 steht der resultierende Zeiger folglich auf 11 Uhr.



Beispiele:

Dd3 Dreieck-Dreieck mit 90° Phasenverschiebung

Dyn5 Dreieck-Stern mit Neutralleiter und 150° Phasenverschiebung

Yzn11 Stern-Zick-Zack mit Neutralleiter und 330° Phasenverschiebung

Abb. 11

Bestimmung der Phasenverschiebung⁵

Um die Phasenverschiebung zu erhalten, wird die Kennzahl mit 30° multipliziert.

5 Parallelschaltung von Transformatoren

Transformatoren dürfen nach DIN VDE 0532 nur dann parallelgeschaltet werden, wenn die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- Die ausgangsseitigen Leerlaufspannungen müssen gleich sein, da es sonst zu hohem Leistungsdurchfluss zwischen den beiden Oberspannungsnetzen über das Niederspannungsnetz kommen kann.
- Die Kurzschlußspannungen der Transformatoren dürfen maximal 10 % voneinander abweichen, weil sonst der Transformator mit der kleinsten Kurzschlußspannung (spannungssteif) überlastet wird.
- Das Verhältnis der Nennleistungen soll kleiner als 3:1 sein, da sonst Ausgleichsströme fließen können, die eine Phasenverschiebung zwischen den Ausgangsspannungen verursachen.
- Die Kennzahl der Schaltgruppen muss gleich sein. Transformatoren mit den Kennzahlen 5 und 11 dürfen unter bestimmten Bedingungen parallel betrieben werden.

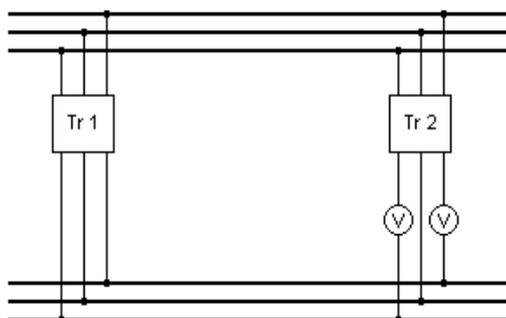


Abb. 12

Überprüfung der Phasenlage von Transformatoren⁶

Die Phasenlage muss vor Inbetriebnahme überprüft werden. Bei Phasengleichheit dürfen die Spannungsmesser keine Spannung anzeigen. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, kann der zweite Transformator auf die Sammelschienen zugeschaltet werden. Ansonsten müssen die Anschlüsse vertauscht werden.

⁵ Elektronik Tabellen, Betriebs- und Automatisierungstechnik (Westermann).

⁶ <http://www.antriebstechnik.fh-stralsund.de>

6 Praxisbeispiele

6.1 Wirkleistungsgewinn durch Blindleistungskompensation

Eine Fabrik für die Bearbeitung von Gussteilen wird mit einem Netztransformator der Schaltgruppe Dyn5 (16/0,4 kV; 630 kVA) mit elektrischer Energie versorgt. Die über einen bestimmten Zeitraum gemessene Stromaufnahme stieg bei einem $\cos \varphi$ von 0,6 bis auf 420 A.

Neu soll ein Bearbeitungsbereich für die Teilevergütung mit einer Gesamtleistung von 270 kW und einem Bemessungsstrom von 530 A eingerichtet werden.

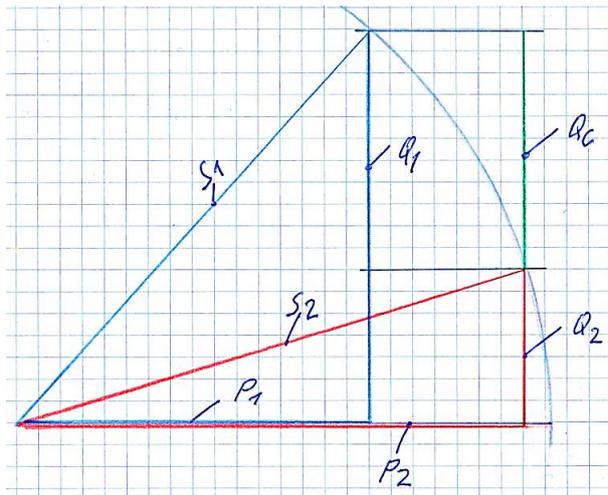


Abb. 13

Prinzip der Erhöhung nutzbarer Wirkleistung durch Blindleistungskompensation

$$S_1 = S_2 = const$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_c$$

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$\angle \varphi = \arccos f(\varphi)$$

$$C = Q \cdot U^2 \cdot \omega$$

$$C_{str} = \frac{1}{3} C$$

1) Leistungsbilanz ohne Kompensationsmassnahme

Größen	Bestehende Anlage	Neue Anlage	Summenwerte
Scheinleistung $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$	290,6 kVA	366,8 kVA	657,4 kVA
Wirkleistung $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$	174,4 kW	270 kW	444,4 kW
Blindleistung $Q = \sqrt{(S^2 - P^2)}$	232,4 kvar	248,3 kvar	480,7 kvar
Leistungsfaktor $\cos \varphi = P/S$	0,6	0,74	0,67
Stromaufnahme	420 A	530 A	950 A

Die maximal verfügbare Leistung beträgt 630 kVA. Der Transformator wird bei maximaler Verbraucherleistung (Gussputzerei plus Teilevergütung) überlastet. Entweder muss ein grösserer Transformator eingesetzt oder anderweitige Abhilfe durch Blindleistungskompensation geschaffen werden.

Die Betriebsleitung entscheidet sich aus Kostengründen für eine Kompensationsanlage. Wie gross muss die Strangkapazität bei Dreieckschaltung der Kondensatoren sein, wenn darüber hinaus ein Gesamtleistungsfaktor von 0,92 erzielt werden soll?

2) Leistungsbilanz mit Kompensationsmassnahme

Grössen	Bestehende Anlage	Neue Anlage	Summenwerte
Scheinleistung $S = P/\cos \varphi$			483 kVA
Wirkleistung	174,4 kW	270 kW	444,4 kW
Blindleistung $Q = \sqrt{(S^2 - P^2)}$			189,3 kvar
Leistungsfaktor $\cos \varphi = P/S$			0,92
Stromaufnahme $I = S/(\sqrt{3} \cdot U)$			697,9 A

Infolge der Kompensationsmassnahme bleibt eine theoretische Leistungsreserve von 147 kVA übrig.

Zu erbringende Kompensationsblindleistung:

$$Q_C = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Bestimmung des Tangens:

$$\cos \varphi_1 = 0,67 \quad \cos \varphi_2 = 0,92$$

$$\angle \varphi_1 = \arccos \varphi_1 = 47,9^\circ \quad \angle \varphi_2 = \arccos \varphi_2 = 23^\circ$$

$$\tan \varphi_1 = 1,1 \quad \tan \varphi_2 = 0,43$$

Die kapazitive Blindleistung beträgt:

$$Q_C = 444,4 \text{ kW} \cdot 0,67 = 297,7 \text{ kvar}$$

Die Strangkapazität der Kondensatoren beträgt:

$$C_{str} = \frac{Q_C}{3 \cdot \omega \cdot U^2} = \frac{297,7 \text{ kvar}}{3 \cdot 314 \cdot (400 \text{ V}^2)} = 1,98 \text{ mF}$$

Es werden Kondensatoren mit einer Kapazität von 2 mF eingesetzt. Um auf den errechneten Wert zu kommen, müssen pro Strang mehrere Kondensatoren parallel geschaltet werden. Dabei ist auf die Spannungsfestigkeit zu achten (min. $\sqrt{2} \cdot 400 \text{ V}$, z.B. 750 VAC).

6.2 Leistungserhöhung durch Parallelschaltung

Eine dritte Möglichkeit zur Leistungssteigerung des Verteilnetzes besteht in der Parallelschaltung zweier Netztransformatoren. Durch diese Massnahme kann der erste Transformator weiterhin verwendet werden. Zur Verfügung steht ein revidierter Netztransformator der Schaltgruppe Yzn5 (16/0,4 kV; 250 kVA).

Bei Parallelschaltung von Transformatoren müssen folgende Kriterien übereinstimmen:

- Nennspannung und Nennfrequenz
- Schaltgruppen
- Kurzschlußspannungen (max. Abweichung 10 %)
- Nennleistungen (Verhältnis nicht größer als 3:1)

Nach einem Typenvergleich steht fest, dass die für einen Parallelbetrieb erforderlichen Voraussetzungen erfüllt sind. Die summierte Leistung beträgt 880 KVA.

7 Fachliteratur

Janus, Nagel: Transformatoren (VDE)

Europa Lehrmittel: Elektrische Maschinen

Westermann: Elektronik Tabellen, Betriebs- und Automatisierungstechnik