

## Info-Brief Nr. 13

### Parallelbetrieb von Stufentransformatoren

Die Faustregel, dass beim Parallelbetrieb von Transformatoren das Verhältnis der Bemessungsleistungen den Wert 1 : 2 (nach DIN VDE 0532) nicht unterschreiten soll, kann nur als grobe Orientierung dienen, weil die eigentlichen Kriterien aus dieser Regel nicht direkt erkennbar sind. Ferner ist das zulässige Verhältnis auch vom Stand der Technik abhängig, denn in den letzten Jahrzehnten galt als Grenzwert noch 1 : 3. Insgesamt wird dieser Regel, der eine gewisse Willkür anhaftet, zu viel Beachtung beigegeben.

Ein sicherer und wirtschaftlicher Parallelbetrieb von Transformatoren ist nur dann gewährleistet, wenn deren Leistungsfähigkeit, d.h. deren Bemessungsleistung, vollständig und ohne Überlastung eines einzelnen Transformators ausgenutzt werden kann. Dazu sind zwei Bedingungen zu erfüllen:

- 1) Gleichheit von Betrag, Frequenz und Winkel der Spannungen, weil bei Ungleichheit dieser Größen ein Ausgleichstrom in den parallel geschalteten Transformatorwicklungen fließt.
- 2) Gleichheit der relativen Kurzschlussimpedanzen der Transformatoren (Betrag und Winkel), damit der Anteil der Netzlast bei jedem Transformator proportional zu dessen Bemessungsleistung ist.

Die Transformatoren müssen somit primärseitig an der gleichen Spannung liegen und die Spannungen auf der Sekundärseite jeweils den gleichen Betrag und den gleichen Winkel haben. Für die Merkmale der Transformatoren bedeutet das:

- gleiche Schaltgruppenkennzahlen
- gleiche Übersetzungsverhältnisse
- gleiche relative Kurzschlussimpedanzen (Betrag  $\Delta u_k = < 10 \%$ )

Für die Spannungsregelung mit parallel betriebenen Stufentransformatoren werden keine darüber hinausgehenden Forderungen gestellt.

Die Bemessungsleistung, als wichtigste Kenngröße des Transformators, hat vordergründig im Zusammenhang mit dem Parallelbetrieb zunächst keine Bedeutung. Jedoch ergibt sich unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte, entsprechend den „Wachstumsgesetzen“ der Transformatoren, für eine vorgegebene Bemessungsleistung *zwangsläufig* ein bestimmter Wert für die relative Kurzschlussimpedanz und den relativen Magnetisierungsstrom. Somit besteht letztlich doch ein Zusammenhang zwischen der Bemessungsleistung und den Werten

der beiden Größen. Die quantitativen Beziehungen ändern sich jedoch mit dem Wert der Bemessungsleistung (vergl. Tabelle).

$S_r$	$u_{kr}$	$u_{Rr}$
1 MVA	≈ 6 %	≈ 0,7 %
10 MVA	7 %...10 %	0,5 %
100 MVA	8 %...12 %	0,35 %
1000 MVA	10 %...15 %	0,15 %

Die maximal zulässigen Differenzen zwischen den Werten der Größen Kurzschlussimpedanz und Magnetisierungsstrom bei parallel betriebenen Transformatoren hängen von den jeweils noch akzeptierbaren negativen Auswirkungen ab, die durch diese Differenzen verursacht werden. Ferner auch vom maximalen Auslastungsgrad  $S/S_r$  der Transformatoren, weil bei relativ kleinem Auslastungsgrad die negativen Folgen abgeschwächt werden.

*Diese Zusammenhänge und die tatsächlichen Werte der maßgebenden Größen bilden die Grundlage der Faustregel für das zulässige Verhältnis der Bemessungsleistungen beim Parallelbetrieb von Transformatoren.*

#### Begründung der Anforderungen

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Zusammenhänge für zwei parallel betriebene Transformatoren für das vereinfachte Ersatzschaltbild dargestellt. Obwohl eine Differenz der relativen Magnetisierungsströme auf der Primärseite unterschiedliche Spannungsfälle verursacht und damit auch unterschiedliche sekundäre Leerlaufspannungen, wird wegen des relativ kleinen Anteils des Magnetisierungsstromes, vor allem bei Transformatoren großer Bemessungsleistung, diese Einflussgröße bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

Um einen einwandfreien Parallelbetrieb zu gewährleisten kommt es im wesentlichen darauf an, die Netzlast proportional zu den Bemessungsleistungen der Transformatoren zu verteilen. Somit muss gelten

$$\frac{S_A}{S_{rA}} = \frac{S_B}{S_{rB}}$$

Die Bedingung wird erfüllt, wenn das Verhältnis der Kurzschlussimpedanzen gleich dem umgekehrten Verhältnis der Bemessungsleistungen ist und die Leerlaufspannungen (Übersetzungsverhältnisse) der Transformatoren gleich sind, so dass kein Ausgleichsstrom fließt. Denn für

die Beziehung zwischen den Beträgen von Kurzschlussimpedanz und Bemessungsleistung gilt:

$$Z_k = \frac{z U_r^2 \sqrt{3}}{S_r} = c \frac{1}{S_r}$$

Werden zwei Transformatoren an einer Sammelschiene betrieben, sind die Spannungszeiger der beiden Ausgangsspannungen in Betrag und Winkel gleich. Bei Vernachlässigung der Impedanz der Verbindungsleitungen zwischen Transformator  $T_A$  und Transformator  $T_B$  gilt für den durch den Laststrom verursachten Spannungsfall an den Kurzschlussimpedanzen der beiden Transformatoren  $T_A$  und  $T_B$

$$\underline{I}_{LA} \underline{Z}_{kA} = \underline{I}_{LB} \underline{Z}_{kB}$$

Dieser Zusammenhang gilt für jeden Belastungsfall; auch bei unterschiedlichen Werten von  $u_{kr}$  und  $\varphi_{kr}$  sowie für beliebige Werte von  $\Delta \underline{U}_0 = \underline{U}_{A0} - \underline{U}_{B0}$ .

### Verhältnis der Lastströme

Für die komplexen Größen eines Stranges ergeben sich somit die folgenden Beziehungen

$$\frac{\underline{I}_{LA}}{\underline{I}_{LB}} = \frac{\underline{Z}_{kB}}{\underline{Z}_{kA}} = \frac{\underline{Z}_{kB}}{\underline{Z}_{kA}} e^{j(\varphi_{krB} - \varphi_{krA})}$$

Bei  $\varphi_{krB} = \varphi_{krA}$  gelten diese Beziehungen auch für die *Beträge* (Effektivwerte) der Lastströme und der Kurzschlussimpedanzen oder für die relativen Kurzschluss-Spannungen und Bemessungsleistungen der Transformatoren

$$\frac{|\underline{I}_{LA}|}{|\underline{I}_{LB}|} = \frac{|\underline{Z}_{kB}|}{|\underline{Z}_{kA}|} = \frac{S_{rA}}{S_{rB}} \cdot \frac{u_{krB}}{u_{krA}}$$

Es bestehen somit bei  $u_{krB} = u_{krA}$  und  $\varphi_{krB} = \varphi_{krA}$  feste Beziehungen zwischen den Beträgen der Lastströme, den Kurzschlussimpedanzen und den Bemessungsleistungen.

Der gesamte Laststrom  $I_L$  teilt sich auf die Transformatoren  $T_A$  und  $T_B$  gemäß den folgenden Formeln auf. Das gilt sinngemäß ebenso für die Scheinleistungen  $S_A$  und  $S_B$ .

$$\underline{I}_{LA} = \underline{I}_L \frac{\underline{Z}_{kB}}{\underline{Z}_{kA} + \underline{Z}_{kB}} \quad \underline{I}_{LB} = \underline{I}_L \frac{\underline{Z}_{kA}}{\underline{Z}_{kA} + \underline{Z}_{kB}}$$

### Beispiel 1

Wie groß ist der Unterschied der relativen Belastung der Transformatoren bei den gegebenen Daten?

	$T_A$	$T_B$
$U_r$	10,5 kV	10,5 kV
$S_r$	10 MVA	6,3 MVA
$z, u_{kr}$	8,0 %	6,0 %
$z_{Rr}, u_{Rr}$	0,7 %	1,0 %
$\underline{Z}_L$	9,66 $e^{j29,5^\circ} \Omega$	9,66 $e^{j29,5^\circ} \Omega$
$\underline{U}_0$	10,500 $e^{j0^\circ} \text{kV}$	10,500 $e^{j0^\circ} \text{kV}$
$\Delta \underline{U}_0 = \underline{U}_{A0} - \underline{U}_{B0}$	0,000 kV, $0^\circ$	-

Ergebnisse

(Berechnung mit Programm E-2.6.1; siehe Hinweis)

	$T_A$	$T_B$
$I_r$	550 A	346 A
$I_{Tx}$	331 A	278 A
Belastung	60 % von $I_{rA}$	80 % von $I_{rB}$

### Zulässige Differenz der Kurzschlussimpedanzen

Bei *ungleichen* relativen Kurzschlussimpedanzen nimmt der Transformator  $T_x$  mit der kleineren relativen Kurzschlussimpedanz den relativ größeren Anteil des Laststromes  $I_{Lx}$  auf. Bei hohem Auslastungsgrad kann deshalb eine Überlastung dieses Transformators auftreten, so dass die gesamte tatsächlich verfügbare Scheinleistung bei ungleichen relativen Kurzschlussimpedanzen kleiner ist als die Summe der beiden Bemessungsleistungen.

### Überlagerung von Laststrom und Kreisstrom

Eine nicht-proportionale Lastaufteilung wird durch einen Ausgleichsstrom  $I_{cir}$  (Kreisstrom; lastunabhängiger Blindstrom) nochmals verstärkt. Der Kreisstrom überlagert sich in jedem Transformator dem Laststrom der in das Netz geliefert wird, wobei die Richtung des Kreisstromes vom Vorzeichen der Differenz  $\underline{U}_{A0} - \underline{U}_{B0}$  der Leerlaufspannungen bestimmt wird. Bei  $U_{A0} > U_{B0}$  gilt für die in den Transformatoren  $T_A$  und  $T_B$  fließenden Ströme  $\underline{I}_{TA}$  und  $\underline{I}_{TB}$ .

$$(\underline{I}_{LA} + \underline{I}_{cir}) + (\underline{I}_{LB} - \underline{I}_{cir}) = \underline{I}_{TA} + \underline{I}_{TB}$$

Für  $U_A < U_B$  kehrt sich das Vorzeichen von  $\underline{I}_{cir}$  um. Wegen der jeweils entgegengesetzten Richtung des Kreisstromes in den Transformatoren wird somit die Belastung des einen durch den Kreisstrom erhöht und die des anderen Transformators verkleinert. Für den Laststrom  $I_L$  gilt

$$\underline{I}_L = \underline{I}_{TA} + \underline{I}_{TB} = \underline{I}_{LA} + \underline{I}_{LB}$$

Wir regeln das.

### Beispiel 2

Wie groß ist die Änderung der relativen Belastung der Transformatoren?

Gegebene Daten wie in Beispiel 1, jedoch

	$T_A$	$T_B$
$\underline{U}_0$	10,500 $ej0^\circ$ kV	10,710 $ej0^\circ$ kV
$\Delta\underline{U}_0 = \underline{U}_{A0} - \underline{U}_{B0}$	- 0,210 kV (2 %), $0^\circ$	

Ergebnisse

(Berechnung mit Programm E-2.6.1; siehe Hinweis)

	$T_A$	$T_B$
$I_r$	550 A	346 A
$I_{Tx}$	296 A	322 A
Belastung	54 % von $I_{rA}$	93 % von $I_{rB}$

Die relative Belastung von Transformator  $T_B$  steigt von 80 % auf 93 % an. Die relative Belastung von Transformator  $T_A$  sinkt dagegen von 60 % auf 54 %.

### Hinweis

Die Kurzschlussimpedanz und die Kurzschluss-Spannung werden üblicherweise in bezogener Form als Prozentwert angegeben. Die Bezugsgrößen sind vorzugsweise  $U_r^2/S_r$  und  $U_r$ . Um das zu kennzeichnen, werden diese Größen als „bezogene“ oder „relative“ Größen mit den kleinen Buchstaben  $z$  und  $u_{kr}$  bezeichnet.

Für die Kurzschlussimpedanz  $Z$  gilt somit:

$$Z = u_{kr} \frac{U_r}{I_r \sqrt{3}} = z \frac{U_r^2}{S_r}$$

Verfasser: Helmut Karger

Die für die Beispiele verwendeten EXCEL-Programme können abgerufen werden unter:

[www.a-eberle.de](http://www.a-eberle.de) (Download Center)

Die Reihe wird fortgesetzt.

Fehlende Info-Briefe liefern wir Ihnen jederzeit gerne nach.

Ausgabe: 03-2013 / I013-1-D-1-001-04.docx