

Info-Brief Nr. 10

Spannungsregelung mit Stufen-Transformatoren im Parallelbetrieb an Sammelschienen (Teil 2)

Die folgenden Betrachtungen gelten für einen symmetrischen Betrieb des Drehstromnetzes, so dass das gesamte Drehstromsystem durch ein einsystemiges Ersatzschaltbild nachgebildet werden kann. Dabei ist jedoch zu beachten, dass beim Drehstrom-Transformator die Nennspannung und auch die Kurzschlussspannung dennoch als Außenleiterspannungen angegeben werden. Die auf dem Leistungsschild angegebenen Nennspannungen U_{10} und U_{20} (Ober- und Unterspannung) beziehen sich stets auf den Betrieb im Leerlauf. Das Nennübersetzungsverhältnis ist $\ddot{u}_N = U_{10} / U_{20}$.

Die im Teil 1 durchgeführten grundsätzlichen Überlegungen für den Parallelbetrieb von Gleichspannungsquellen lassen sich auch auf den Parallelbetrieb von Transformatoren übertragen.

Anforderungen für einwandfreien Parallelbetrieb

Die Hauptaufgaben beim Parallelbetrieb lauten:

- Vermeidung/Minimierung des Kreisstromes
- Vermeidung einer ungleichen relativen Belastung der Transformatoren

Diese Aufgaben lassen sich erfüllen, wenn die folgenden Voraussetzungen gegeben sind:

- gleiche Nennspannungen, gleiches Übersetzungsverhältnis (gleiche Leerlaufspannungen)
- gleicher Nennwert der Kurzschlussspannungen
- Verhältnis der Nennleistungen nicht größer als 1:2. Bei Überschreitung liegen die von der Nennleistung abhängigen Werte von u_k so weit auseinander, dass bei der Parallelschaltung zu große Differenzen zwischen den relativen Belastungen auftreten.

Verteilung des Laststromes

Werden die Transformatoren A und B primärseitig und sekundärseitig jeweils unmittelbar an die gleiche Sammelschiene gelegt, müssen die Spannungszeiger der beiden Eingangsspannungen und der beiden Ausgangsspannungen in Betrag und Winkel gleich sein. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Impedanz der Verbindungsleitungen zwischen A und B gleich null ist! Für den Spannungsfall \underline{U}_F an den Wicklungen muss deshalb gelten.

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

Daraus folgt, dass die Summe aller Spannungsfälle an den Kurzschlussimpedanzen für jeden der parallel arbeitenden Transformatoren identisch sein muss; auch bei unterschiedlichen Werten für u_k und φ_k .

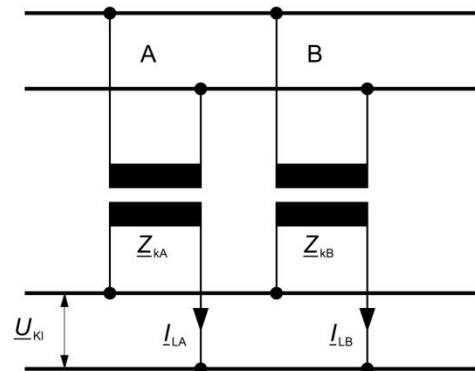


Bild 2 Parallelschaltung der Transformatoren an den Sammelschienen

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

$$\frac{\underline{I}_{LA}}{\underline{I}_{LB}} = \frac{\underline{Z}_{kB}}{\underline{Z}_{kA}} = \frac{Z_{kB}}{Z_{kA}} e^{j(\varphi_B - \varphi_A)}$$

Beispiel 3

Transformator A	Betrag	Winkel
I_{LA} [A]	197,12	-41,41
Z_{kA} [Ω]	3,12	79,76
$I_{LA} Z_{kA}$ [V]	614,56	38,35

Transformator B	Betrag	Winkel
I_{LB} [A]	322,56	-43,29
Z_{kB} [Ω]	1,91	81,64
$I_{LB} Z_{kB}$ [V]	614,56	38,35

Bei $\varphi_B - \varphi_A = 0$ gelten diese Beziehungen auch für die Beträge (Effektivwerte) der Lastströme und der Impedanzen und darüber hinaus auch für die relativen Kurzschlussspannungen/Nennleistungen der Transformatoren.

$$\left| \frac{\underline{I}_{LA}}{\underline{I}_{LB}} \right| = \left| \frac{\underline{Z}_{kB}}{\underline{Z}_{kA}} \right| = \frac{S_{TA}}{S_{TB}} \cdot \frac{u_{kB}}{u_{kA}}$$

Es besteht Proportionalität zwischen den Lastströmen, Impedanzen und Nennleistungen, wenn $u_{kB} = u_{kA}$ ist. Bei ungleichen Kurzschlussspannungen gelten diese direkten Beziehungen nicht mehr!

Wir regeln das.

Der Betrag der Kurzschlussimpedanz (pro Strang) kann aus den Kenndaten des Transformators errechnet werden.

$$Z_k = \frac{u_{kr} U_r}{I_r \sqrt{3}} = \frac{u_k \cdot U_r^2}{S_r}$$

Relative Belastungen, Begrenzung des Ausnutzungsgrades

Die Verteilung des Laststromes I_L auf die Transformatoren ist abhängig von dem Verhältnis der Impedanzen.

Transformator A

$$I_{LA} = I_L \frac{Z_{kB}}{Z_{kA} + Z_{kB}}$$

Transformator B

$$I_{LB} = I_L \frac{Z_{kA}}{Z_{kA} + Z_{kB}}$$

Nur bei $u_{kA} = u_{kB}$ ist der Laststrom I_{LA} proportional der Nennleistung S_{rA} und der Laststrom I_{LB} proportional der Nennleistung S_{rB} . Bei $u_{kB} \neq u_{kA}$ gilt dieser Zusammenhang nicht mehr. Der Transformator mit der kleineren Impedanz nimmt den größeren Laststrom auf, der dann nicht mehr proportional der Nennleistung S_r ist. Das betrifft ebenso auch die Verteilung der vom Netz aufgenommenen Wirk- und Blindleistung auf die beiden Transformatoren.

Die unproportionale Verteilung des Laststromes kann bei hohem Auslastungsgrad zur Überlastung eines der beiden Transformatoren führen. Die verfügbare Gesamtleistung ist somit bei ungleichen Kurzschlussspannungen kleiner als die arithmetische Summe der beiden Nennleistungen.

Kreisstrom

Bei ungleichen Leerlaufspannungen treibt die Differenzspannung $\Delta U = U_A - U_B$ als EMK einen Strom durch die Wicklungen der parallel betriebenen Transformatoren, der unabhängig vom Laststrom ist. Wegen der überwiegend induktiven Kurzschlussimpedanzen der Transformatoren wird anstelle der Bezeichnung *Kreisstrom* häufig der Ausdruck „*Kreisblindstrom*“ verwendet.

(siehe Tabelle 2, Teil 3/Info-Brief 12)

Die Ursachen für unterschiedliche Beträge und Winkel der Leerlaufspannungen können sein

- bei baugleichen Transformatoren: unterschiedliche Stellung der Stufenschalter (ungleiche Übersetzungsverhältnisse)
- bei nicht baugleichen Transformatoren: unterschiedliche Spannungssprünge der Spannungsstufen und ungleiche Kurzschlussimpedanzen

Für den Betrag und den Winkel des Kreisstromes sind nur die in Reihe liegenden Kurzschlussimpedanzen Z_k der parallel betriebenen Transformatoren einschließlich der Impedanz Z_{Ltg} der Verbindungsleitung zwischen den beiden Transformatoren maßgebend, nicht jedoch die Impedanz der Last. Auch bei fehlender Last ($Z_L = \infty$) fließt dieser Kreisstrom durch die Transformatoren. In diesem Abschnitt werden zunächst alle zwischen den beiden Transformatoren liegenden Impedanzen (Verbindungsleitungen/Sammelschiene, Schalter, Anschlusskontakte) vernachlässigt.

Kreisstromstärke

$$I_{cir} = \frac{E_{A0} - E_{B0}}{Z_{kA} + Z_{kB}}$$

Weil die Kreisstromstärke wegen der kleinen Kurzschlussimpedanzen der Transformatoren schon bei geringen Unterschieden der Leerlaufspannungen (der Stufenstellungen) erhebliche Werte annehmen kann, muss bei der Spannungsregelung mit parallel betriebenen Transformatoren der Kreisstrom überwacht und minimiert werden. Auch wenn gleichartige Transformatoren stets auf der gleichen Stufenstellung betrieben werden, muss die Kreisstromstärke für die Dauer einer zeitlich nicht deckungsgleichen Umschaltphase beachtet werden.

Beispiel 4

Gegebene Werte:

$$u_{krA} = u_{krB} = 10 \%;$$

$$\varphi_{kA} = \varphi_{kB};$$

$$I_{rA} = 288,7 \text{ A};$$

$$I_{rB} = 721,7 \text{ A};$$

$$\Delta u_0 = 4 \%, \text{ Nennspannung } U_r = 20 \text{ kV}$$

Wegen $u_{kA} = u_{kB}$ und $\varphi_{kA} = \varphi_{kB}$ erhält man bei der Rechnung mit den Beträgen das gleiche Ergebnis wie bei der Rechnung mit komplexen Größen.

$$u_{kA} = u_{kB} = 1156 \text{ V};$$

$$\Delta u_0 = 800 \text{ V}$$

$$Z_{kA} = 1156 \text{ V} / (288,7 \text{ A}) = 4,00 \Omega;$$

$$Z_{kB} = 1156 \text{ V} / (721,7 \text{ A}) = 1,60 \Omega$$

$$Z_{kA} + Z_{kB} = 5,60 \Omega$$

$$I_{cir} = 800 \text{ V} / (5,6 \Omega \sqrt{3}) = 82,5 \text{ A}$$

Weil die Kreisstromstärke mit den üblichen Messmitteln nicht direkt messbar ist, werden indirekt ermittelte Ersatzgrößen für den Kreisstrom verwendet.

Fortsetzung des Themas im Teil 3 Info-Brief Nr. 11

Verfasser: Helmut Karger

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

www.a-eberle.de (Download Center)

Die Reihe wird fortgesetzt.

Fehlende Info-Briefe liefern wir Ihnen jederzeit gerne nach.

Ausgabe: 03-2013 / I010-1-D-1-001-04.docx