

## Info-Brief Nr. 11

# Spannungsregelung mit Stufen-Transformatoren im Parallelbetrieb an Sammelschienen (Teil 3)

### Messung der Kreisstromstärke

Eine direkte Messung der Kreisstromstärke mit den üblichen Messmitteln ist nicht möglich. Die Berechnung der Kreisstromstärke aus der Differenz der Leerlaufspannungen und den Kurzschlussimpedanzen der Wicklungen erfordert einen relativ hohen Aufwand, weil dazu die genauen Istwerte der komplexen Größen erforderlich sind. Für die Spannungsregelung nach dem Prinzip der Kreisstrom-Minimierung werden deshalb Ersatzgrößen für den Kreisstrom verwendet. Diese Ersatzgrößen sind zwar nicht allgemeingültig, aber für eingegrenzte praktische Gegebenheiten annähernd proportional der Kreisstromstärke und ausreichend genau für die stufenweise Spannungsregelung.

### Berechnung der Kreisstromstärke

Der Betrag und der Winkel des Kreisstromes können mit den durchwegs verfügbaren komplexen Messwerten der Transformatorströme  $I_{TA}$  und  $I_{TB}$  errechnet werden.

$$\underline{I}_{\text{cir}} = \underline{I}_{TA} - (\underline{I}_{TA} + \underline{I}_{TB}) \left( \frac{\underline{Z}_{kB}}{\underline{Z}_{kA} + \underline{Z}_{kB}} \right)$$

Mit dieser Formel lässt sich die Kreisstromstärke auch bei  $S_{rA} \neq S_{rB}$ ;  $u_{krA} \neq u_{krB}$ ;  $\varphi_{krA} \neq \varphi_{krB}$  richtig ermitteln. Die Daten der Last (Belastungsgrad, Lastart, Leistungsfaktor) haben keinen Einfluss auf das Ergebnis.

### Ermittlung der Kreisstromstärke nach dem $\Delta \sin \varphi$ -Verfahren

Bei Parallelbetrieb an einer Sammelschiene ergibt sich für  $S_{rA} = S_{rB}$  und  $u_{krA} = u_{krB}$  und  $\varphi_{krA} = \varphi_{krB} = 90^\circ$  die Kreisstromstärke aus den gemessenen Blindströmen  $I_{qA} = I_{TA} \sin \varphi_{TA}$  und  $I_{qB} = I_{TB} \sin \varphi_{TB}$  der Transformatoren A und B. Werden diese Bedingungen eingehalten, dann ist es zulässig nur mit den Beträgen der komplexen Größen zurechnen.

$$I_{\text{cir}}^* = \frac{1}{2} (I_{TA} \sin \varphi_{TA} - I_{TB} \sin \varphi_{TB})$$

Wenn jedoch  $\varphi_{krA}$  und/oder  $\varphi_{krB} < 90^\circ$  ( $u_r / u_{kr} > 0$ ) sind, dann ist der dadurch verursachte Fehler der gemessenen Kreisstromstärke  $I_{\text{cir}}^*$  umso größer, je kleiner der  $\cos \varphi$  der Last ist. Ebenso nimmt bei  $S_{rA} \neq S_{rB}$  und/oder  $u_{krA} \neq u_{krB}$  die Ungenauigkeit der Messwerte von  $I_{\text{cir}}^*$  mit zunehmender Differenz zwischen den Größen zu. Auch bei  $U_{A0} - U_{B0} = 0$  ist  $I_{\text{cir}}^* \neq 0$ .

### Hinweis

Der Kurzschlussphasenwinkel ist eine Funktion der Nennleistungsklassen der Transformatoren. Die Abweichung

von  $90^\circ$  kann bei Transformatoren mit relativ kleiner Nennleistung erheblich sein.

Tabelle 2

$S_r$ [kVA]	100	500	1000
$u_{kr}$ [%]	4	6	6
$u_R$ [%]	2,14	1,56	1,35
$\varphi_{kr}$ [°]	58	75	77
$\sin \varphi_{kr}$	0,845	0,966	0,974

$S_r$ [kVA]	5000	10000	40000
$u_{kr}$ [%]	8	10	11
$u_R$ [%]	0,82	0,72	0,53
$\varphi_{kr}$ [°]	84	86	87
$\sin \varphi_{kr}$	0,995	0,997	0,999

### Ermittlung der Kreisstromstärke nach dem $\Delta \sin \varphi$ (S)-Verfahren

Bei Parallelbetrieb von Transformatoren mit ungleichen Nennleistungen ergibt sich für  $u_{krA} = u_{krB}$  und  $\varphi_{krA} = \varphi_{krB} = 90^\circ$  die Kreisstromstärke  $I_{\text{cir}}^*$  aus den gemessenen Blindströmen  $I_{qA} = I_{TA} \sin \varphi_{TA}$  und  $I_{qB} = I_{TB} \sin \varphi_{TB}$  und den Nennleistungen der Transformatoren A und B.

Werden die Bedingungen  $u_{krA} = u_{krB}$  und  $\varphi_{krA} = \varphi_{krB} = 90^\circ$  eingehalten, dann ist es zulässig nur mit den Beträgen der komplexen Größen zu rechnen.

$$I_{\text{cir}}^* = I_{qA} - (I_{qA} + I_{qB}) \left( \frac{S_{rA}}{S_{rA} + S_{rB}} \right)$$

Abweichungen der Transformator-Daten von den genannten Bedingungen haben auch bei diesem Messverfahren die bereits beschriebenen Einflüsseffekte.

### Beispiel 5

Die Transformatoren A und B werden an einer Sammelschiene parallel betrieben.

Transformator	A	B
$U_r$	11 kV	11 kV
$S_r$	11,5 MVA	11,5 MVA
Last	5,7 MW	5,0 MW
$u_{kr}$	7,98 %	9,64 %
$u_R$	2,00 %	2,41 %

In der folgenden Tabelle sind die richtigen Werte des Kreisstromes und die nach dem  $\Delta \sin \varphi$ -Verfahren ermittelten Werte, abhängig vom  $\cos \varphi$  der Last eingetragen.

## Wir regeln das.

$\cos\varphi$	$U_{A0} - U_{B0}$	$I_{\text{cir}}$	$I_{\text{cir}}^* (\Delta I \sin\varphi)$
0,90	0,22 kV	69 A	85 A
0,90	0,0 kV	0 A	18 A
0,70	0,22 kV	59 A	94 A
0,70	0,0 kV	0 A	28 A

### Gerätetechnik für die indirekte Kreisstrommessung

Die Abbildung der Messwerte (ausschließlich die Beträge) von  $I_{qA}$  und  $I_{qB}$  durch eine analoge oder digitale Größe erlaubt die rechnerische Weiterverarbeitung der Messwerte ohne besonderen gerätetechnischen Aufwand. Die Weiterleitung der Messwerte von Transformator A zu Transformator B und umgekehrt ist problemlos. Eine Rechnung mit komplexen Größen ist nicht erforderlich.

### Zulässige Messfehler

Die Ungenauigkeiten der Messwerte von  $I_{\text{cir}}^*$  bei Abweichungen von den Voraussetzungen (siehe dort) können für die Spannungsregelung nach dem Prinzip der Kreisstrom-Minimierung akzeptiert werden, wenn jeweils eine für die Regelung genügend große Differenz zwischen dem Maximalwert von  $I_{\text{cir}}^*$  bei Stufenstellung  $n$  und dem Minimalwert von  $I_{\text{cir}}^*$  bei Stufenstellung  $n+1$  vorhanden ist.

### Überlagerung von Laststrom und Kreisstrom

Der Kreisstrom überlagert sich den Transformatorströmen die in das Netz geliefert werden und addiert sich zum Strom des Transformators mit der größeren sekundären Leerlaufspannung.

### Beispiel 6

Die Transformatoren A und B werden an einer Sammelschiene parallel betrieben.

Transformator	A	B
$U_r$	10,5 kV	10,5 kV
$S_r$	10 MVA	6,3 MVA
$U_{kr}$	8,00 %	7,73 %
$u_r$	0,7 %	0,7 %

Bei  $U_{A0} - U_{B0} = 0,187$  kV ergeben sich die folgenden Werte:

Transformator A	$I$ [A]	$I, Re$ [°]
Laststrom $I_{LA}$	320	-34
Kreisstrom $I_{\text{cir}}$	48	-85
Summe $I_{TA}$	352	-40

Transformator B	$I$ [A]	$I, Re$ [°]
Laststrom $I_{LB}$	209	-34
Kreisstrom $I_{\text{cir}}$	48	+95
Summe $I_{TB}$	182	-22

Die Belastung von Transformator A wird durch den Kreisstrom wegen  $U_{A0} > U_{B0}$  erhöht und die von Transformator B verkleinert. Bei hohem Auslastungsgrad besteht somit für einen der beiden Transformatoren die Gefahr einer Überlastung.

### Beispiel 7

Daten von Beispiel 6

Transformator	A	B
$I_r$	550 A	346 A
$I_{Tx} (U_{A0} - U_{B0} = 0)$	316 A	206 A
$I_{Tx}/I_{rx}$	0,58	0,60
$I_{Tx} (U_{A0} - U_{B0} = 315 \text{ V})$	433 A	166 A
$I_{Tx}/I_{rx}$	0,79	0,48

Das praktische Beispiel zeigt, dass die relative Belastung von Transformator A zwar von 58 % auf 79 % ansteigt, jedoch noch unterhalb des Bemessungswertes liegt. Umgekehrt betrachtet heißt das: die Nennleistung des Transformators A kann nur zu etwa 80 % ausgenutzt werden.

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 / I011-1-D-1-001-04.docx