

Kurzschlussspannung

Wichtige Kenngröße von Verteilungstransformatoren (2)

Für die Auswahl von Verteilungstransformatoren der Energieversorgung wird zusätzlich zur Übersetzung, Bemessungsleistung und Schaltgruppe noch die relative Kurzschlussspannung als typische Kenngröße angegeben. Die Betriebszustände Leerlauf und Belastung waren Schwerpunkt der Betrachtungen im ersten Teil.

Wesen der Kurzschlussspannung

Die Kurzschlussspannung eines Transformators ist die geometrische Summe der über den Wicklungen entstehenden inneren Spannungsfälle.

Da die inneren Spannungsfälle lastabhängig sind, wird die Kurzschlussspannung grundsätzlich bei Bemessungslast angegeben.

Werden die Spannungsgrößen

$U_1 = U_{R1} + \hat{u} \cdot U_{S1} + \hat{u} \cdot U_{R2} + \hat{u} \cdot U_{S2}$ als Zeiger dargestellt, ist zu berücksichtigen, dass die Streuspannungsfälle U_{S1} und U_{S2} als induktive Größen zu den ohmschen Spannungsfällen U_{R1} und U_{R2} um 90° phasenverschoben sind. Aus dem Zeigerbild (Bild 3) kann dann aus der geometrischen Addition eine arithmetische abgeleitet werden.

Nach dem Lehrsatz des Pythagoras ist die Kurzschlussspannung

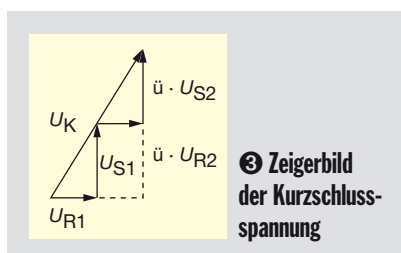
$$U_k^2 = (U_{R1} + \hat{u} \cdot U_{R2})^2 + (U_{S1} + \hat{u} \cdot U_{S2})^2$$

bzw. mit

$$U_{R1} + \hat{u} \cdot U_{R2} = U_R \quad (10)$$

und

$$U_{S1} + \hat{u} \cdot U_{S2} = U_S \quad (11)$$



$$U_k = \sqrt{U_R^2 + U_S^2} \quad (12)$$

Übersetzungsverhältnis. Da ein Transformator ohne konstruktive Änderungen sowohl herauf- als auch herabtransformieren kann, ergeben sich je nach seiner Arbeitsweise für das Übersetzungsverhältnis

$$\hat{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \text{ zwei Zahlenwerte.}$$

Herauftransformieren

$$N_1 = N_{US} \quad N_2 = N_{OS}$$

$$\hat{u} = \frac{N_{US}}{N_{OS}}$$

Herabtransformieren

$$N_1 = N_{OS} \quad N_2 = N_{US}$$

$$\hat{u}' = \frac{N_{OS}}{N_{US}} \quad \hat{u}' = \frac{1}{\hat{u}}$$

Hat zum Beispiel ein Transformator die Übersetzung 20 kV/0,4 kV (ungekürztes Verhältnis der Bemessungsspannungen), dann betragen die Zahlenwerte der Übersetzungsverhältnisse beim Herauftransformieren $\hat{u} = \frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} = 0,02$ und beim

$$\text{Herabtransformieren } \hat{u}' = \frac{1}{\hat{u}} = 50.$$

Nach den Gleichungen (10) und (11) entstehen durch das Umrechnen der Sekundärgrößen auf die Primärseite desselben Transformators zwei Zahlenwerte für die Kurzschlussspannung. Dies wird im Kurzschlussversuch bestätigt. Bei kurzgeschlossener Unterspannungswicklung muss eine größere Spannung primär im Vergleich zur kurzgeschlossenen Oberspannungswicklung angelegt werden, damit in beiden Fällen die Bemessungsströme in den Wicklungen fließen.

Bezogene Größen. Bezieht man jedoch die in Volt gemessene absolute Kurzschlussspannung auf die entsprechende primäre Bemessungsspannung, ergibt sich unabhängig von der Arbeitsweise ein übereinstimmender Prozentwert, die relative Kurzschlussspannung

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Der Vorteil der Angabe der relativen Kurzschlussspannung besteht darin, dass

- auf dem Leistungsschild des Verteilungstransformators nur ein Wert angegeben werden muss und
- ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Transformatoren möglich ist.

Analog werden der ohmsche und der

Streuspannungsfall auch als bezogene Größen angegeben.

Relativer ohmscher Spannungsfall

$$u_R = \frac{U_R}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (14)$$

bzw. bei Erweiterung des Quotienten mit der Bemessungsstromstärke I_n als Verhältnis der Kurzschlussverluste P_k zur Bemessungsleistung S_n

$$u_R = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100\% \quad (15)$$

Relativer Streuspannungsfall

$$u_S = \frac{U_S}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Ebenso geht die Gleichung (12) für die bezogenen Größen (u_k in %) in folgende Form über

$$u_k = \sqrt{u_R^2 + u_S^2} \quad (17)$$

Beispiel. Im Kurzschlussversuch eines 630-kVA-Transformators 20 kV/0,41 kV wurden bei kurzgeschlossener Oberspannungswicklung die Kurzschlussspannung zu 24,6 V und die Kurzschlussverluste zu 6,8 kW gemessen.

Nach Gleichung (13) ist die relative Kurzschlussspannung

$$u_k = \frac{24,6 \text{ V}}{410 \text{ V}} \cdot 100\% = 6\%$$

nach Gleichung (15) der relative ohmsche Spannungsfall

$$u_R = \frac{6,8 \text{ kW}}{630 \text{ kW}} \cdot 100\% = 1,79\%$$

und nach Gleichung (17) der relative Streuspannungsfall

$$u_S = \sqrt{(6\%)^2 - (1,79\%)^2} = 5,73\%$$

Bedeutung der Kurzschlussspannung

Da im Kurzschlussversuch der Primärnennstrom I_{n1} nur durch die ohmschen Widerstände und Streuwiderstände der Wicklungen begrenzt wird, ist der Betrag der Kurzschlussspannung ein Maß für die Größe der Transformatorimpedanz, auch als Kurzschlussimpedanz Z_k bezeichnet, die als Quotient aus Kurzschlussspannung und Nennstromstärke zu berechnen ist: Kurzschlussimpedanz

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{n1}} \quad (18)$$

Mit der Gleichung (13) und der Leistungsformel wird dann die Kurzschlussimpedanz

$$Z_k = \frac{\sqrt{3}}{100\%} \cdot u_k \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n} \quad (19)$$

Ebenso wie die Betriebsgrößen der Stromquellen durch ihre Innenwiderstände beeinflusst werden, bestimmt der Betrag der Kurzschlussspannung das Kurzschlussverhalten der Transformatoren und die Änderung der sekundären Klemmenspannung bei Laständerung.

Betriebszustand Kurzschluss. Der wesentliche Unterschied zwischen dem unter Laborbedingungen durchzuführenden Kurzschlussversuch und dem Betriebszustand *Kurzschluss* besteht darin, dass unter Betriebsbedingungen die Nennspannung am Transformator anliegt. Der fließende Kurzschlussstrom I_k wird ein Vielfaches des Nennstromes sein und nur durch die innere Impedanz des Transformators begrenzt werden.

Kurzschlussstrom

$$I_k = \frac{U_{n1}}{Z_k} \quad (20)$$

Mit den Gleichungen (18) und (13) wird

$$I_k = \frac{U_{n1}}{U_k} \cdot I_{n1} \text{ bzw. Kurzschlussstrom}$$

$$I_k = \frac{100\%}{u_k} \cdot I_{n1} \quad (21)$$

Beispiel. Für den im vorhergehenden Beispiel gegebenen 630-kVA-Transformator wird durch die Kurzschlussspannung von 6 % der Kurzschlussstrom

$$I_k = \frac{100\%}{6\%} \cdot I_{n1} \text{ das } 16,67\text{-fache des}$$

primären Nennstromes betragen.

Werden konstruktiv zum Beispiel durch

einen größeren Jochabstand der Transformatorspulen oder durch einen breiteren Hauptstreukanal die Streuwiderstände so erhöht, dass eine Kurzschlussspannung von 16 % erreicht wird, beträgt der Kurzschlussstrom nur noch das 6,25-fache des Nennstromes.

Dem günstigeren Kurzschlussverhalten steht als Nachteil gegenüber, dass durch die größeren inneren Spannungsfälle sich die sekundäre Klemmenspannung in einem wesentlich größeren Bereich ändert. Wird die in Abhängigkeit von der Belastungsart ($\cos\varphi_2$) entstehende Erhöhung oder Verringerung der sekundären Klemmenspannung auf die sekundäre Leerlaufspannung (Bemessungsspannung) U_{20} bezogen, ist die Spannungsänderung

$$u_\varphi = \frac{\Delta U}{U_{20}} \cdot 100\% \quad \text{bzw.}$$

$$u_\varphi \approx u_R \cdot \cos\varphi_2 + u_S \cdot \sin\varphi_2. \quad (22)$$

Bei einem sekundären Leistungsfaktor $\cos\varphi_2 = 0,8$ entsteht mit den Werten des 630-kVA-Transformators eine Änderung der sekundären Klemmenspannung beim Übergang vom Leerlauf zur Nennbelastung von

$$u_\varphi \approx 1,78\% \cdot 0,8 + 5,73\% \cdot 0,6 \approx 4,86\%.$$

An den Klemmen des Transformators stellt sich eine sekundäre Klemmenspannung

$$U_2 = U_{20} \cdot \left(1 - \frac{u_\varphi}{100\%} \right)$$

$$U_2 = 410\text{V} \cdot \left(1 - \frac{4,86\%}{100\%} \right)$$

von $U_2 = 390\text{V}$ ein.

Parallelaufbedingung von Verteilungstransformatoren. Auf der Grundlage der bisherigen Aussagen ist abzuleiten, dass eine nicht unwesentliche Parallelaufbedingung von Verteilungstransformatoren lautet:

Im Netz- oder Sammelschienenparallelbetrieb dürfen die Kurzschlussspannungen der Verteilungstransformatoren untereinander maximal nur um $\pm 10\%$ voneinander abweichen.

So kann mit dem 630-kVA-Transformator noch ein zweiter mit einer Kurzschlussspannung von 6,6 % oder 5,4 % parallel geschaltet werden. Die Last des Transformators mit der kleineren Kurzschlussspannung kann dann unter Umständen geringfügig über seiner Bemessungsleistung liegen. Unter üblichen Betriebsbedingungen ist jedoch kaum mit einer zeitlich unbegrenzten Überlastung zu rechnen.

Fazit

Die Bedeutung der durch den Werkstoff und durch die Art der Spulen sowie ihrer Anordnung auf dem Eisenkern konstruktiv geprägten Kurzschlussspannung besteht darin, dass sie wesentlich die Betriebsgrößen der Verteilungstransformatoren beeinflusst. *H. Spanneberg*