



Bisherige Beiträge der Reihe »Der Transformator«:
 »de« 23-24.2022: Grundprinzip des Transformators
 »de« 3.2023: Der reale Transformator
 »de« 5.2023: Charakteristische Größen

Quelle: alle Bilder A. Baral

Autor: Prof. Dr.-Ing. Andreas Baral, elektrische Maschinen- und Antriebstechnik, PHWT – Private Hochschule für Wirtschaft und Technik, Vechta

Ruhende elektrische Maschine

Der Transformator (4)

Im vorangegangenen Beitrag (»de« 5.2023, S. 71–73) wurde die messtechnische Ermittlung der charakteristischen Größen eines Transformators vorgestellt. In diesem Beitrag wird der Schaltvorgang eines Einphasentransformators sowie die Parallelschaltung von Transformatoren erläutert.

Bisher wurde der Transformator im stationären Zustand betrachtet, d. h. alle Ausgleichsvorgänge waren abgeklungen. Im Folgenden soll nun ein kurzer Einblick hinsichtlich des dynamischen Verhaltens des Transformators gegeben werden.

Schaltvorgänge bei Einphasentransformatoren

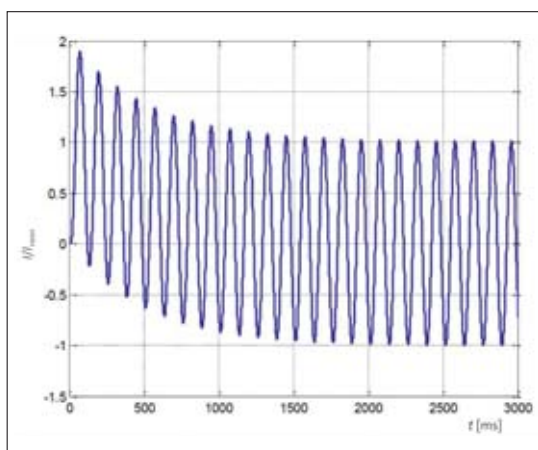
Wird beispielsweise ein leerlaufender Transformator am starren Netz eingeschaltet, entsteht ein Einschaltstoßstrom, der nach der Zeitkonstante τ abklingt.

$$\tau = \frac{L_1}{R_1} \tag{1}$$

Der sinusförmige Nennstrom ist dabei überlagert von einem exponentiell abklingenden Einschaltstrom. Der Verlauf des Einschaltstroms wird in **Bild 1** veranschaulicht. Bei Transformatoren kann der Einschaltstrom ein Vielfaches des Scheitelwerts des Nennstroms betragen. Neben dem Einschaltverhalten des Transformators sind der Dauer- und der Stoßkurzschlussstrom von großem technischem Interesse. Aus dem Ersatzschaltbild in **Bild 2** ergibt sich für den Dauerkurzschlussstrom:

$$i_{K_{Dauer}}(t) = \sqrt{2} \cdot I_K \cdot \sin(\omega t - \varphi_K) \tag{2}$$

Bild 1: Einschaltstrom eines Einphasentransformators



$$I_K = \frac{U_N}{Z_K} \quad \cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K} \quad (3)$$

Entsteht der Kurzschluss im Nulldurchgang des sinusförmigen Stromflusses, ist die zeitliche Stromänderung am größten.

Der Dauerkurzschlussstrom wird von einem Gleichanteil überlagert, der mit der Zeit exponentiell abklingt. Bei größeren Transformatoren erreicht der Spitzenwert des Stoßkurzschlussstroms das ca. 1,9-fache des Dauerkurzschlussstroms. Rechnerisch sieht dies so aus:

$$I_{\text{Stoß}} \approx 1,9 \cdot \sqrt{2} \cdot I_K \quad (4)$$

Tritt der Stoßkurzschlussfall ein, entstehen enorme Wickelkopfkräfte, die durch geeignete konstruktive Wicklungsversteifungen beherrscht werden müssen.

Parallelbetrieb von Transformatoren

Bei der Parallelschaltung zweier Transformatoren müssen technische Randbedingungen eingehalten werden, um Ausgleichströme zu verhindern. Ausgehend vom vereinfachten Ersatzschaltbild des Transformators ist es zweckmäßig, die Transformatorgrößen auf die Seite 2 zu transformieren (Bild 3).

Für den komplexen Widerstand Z_{2K} gilt die folgende Transformationsvorschrift:

$$\underline{Z}_{2K} = R_{2K} + jX_{2K} \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{2K} = \frac{R_1}{\ddot{u}^2} + R_2 + j \left(\frac{X_{1\sigma}}{\ddot{u}^2} + X_{2\sigma} \right) \quad (6)$$

Die beiden Transformatorersatzschaltbilder der Transformatoren können nun parallelgeschaltet werden (Bild 4).

Ist die Spannungsdifferenz $\Delta U \neq 0$, fließt im Leerlauf ein Ausgleichstrom der Größe:

$$I_{2A} = \frac{\Delta U}{\underline{Z}_{2KA} + \underline{Z}_{2KB}} \quad (7)$$

Damit der Ausgleichstrom gleich null ist, müssen der Betrag und die Phase der beiden Leerlaufspannungen identisch sein. Wird die Parallelschaltung der beiden Transformatoren am Ausgang belastet, überlagern sich der Ausgleichstrom und der Laststrom. Die Transformatoren werden auf Grund des Ausgleichstroms zusätzlich belastet oder gegebenenfalls unbeabsichtigt überlastet.

Um die einzelnen Transformatoren nicht zu überlasten, müssen bei Parallelschaltung zweier oder mehrerer Transformatoren folgende Bedingungen eingehalten werden:

- gleiche Nennfrequenz und Nennspannung
- annähernd gleiche Kurzschlussspannung
- Nennleistungsverhältnis höchstens 1:3

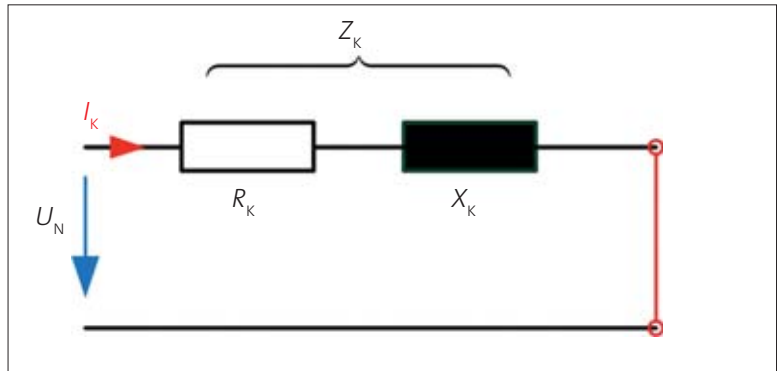


Bild 2: Transformatorersatzschaltbild

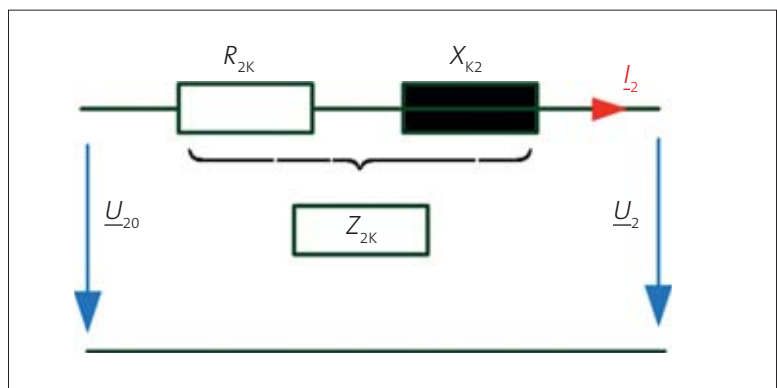


Bild 3: Transformatorersatzschaltbild – transformiert auf die Seite 2

- phasenrichtiger Anschluss
 - gleiche Schaltgruppenkennzahl (bei Drehstromtrafos).
- Als Ergänzung des Themas »Einphasentransformator« sind auf unserer Online-Seite unter www.elektro.net/123140/ noch einmal alle wesentlichen Formeln in einer Tabelle zusammengefasst. Außerdem finden Sie dort auch ein Berechnungsbeispiel, in dem die wesentlichen Transformatorparameter ermittelt werden.

(wird fortgesetzt)

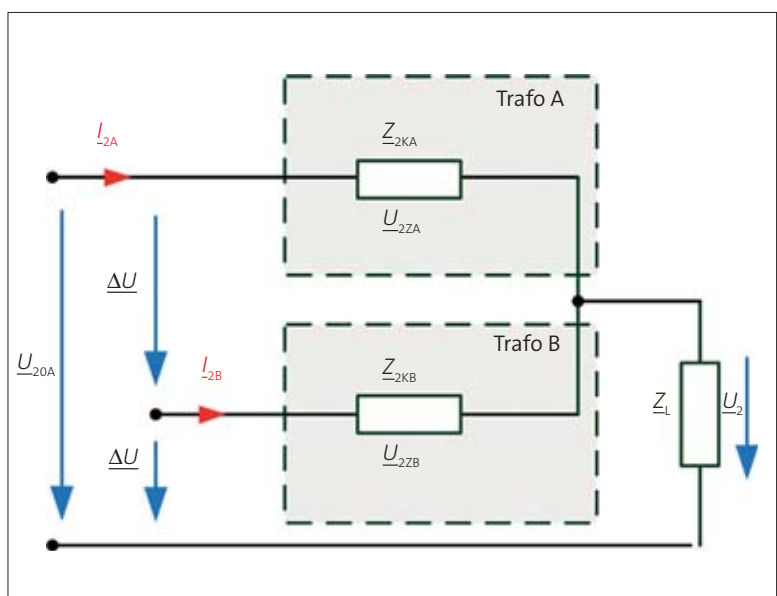


Bild 4: Parallelschaltung zweier Transformatoren