

Projekt-Labor

Messung von Wechselstrom

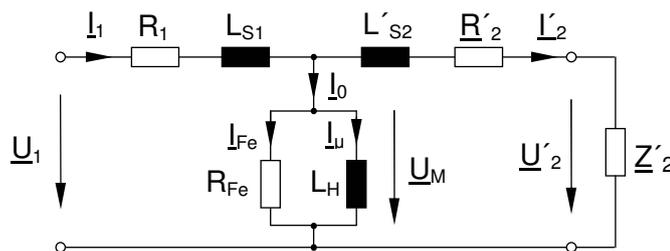
Messaufgabe: Messung von Wechselstrom bis zu 16 A im 230 V-Netz

Bei Arbeiten am 230 V-Netz steht zu allererst die *Sicherheit* im Vordergrund.

Es ist daher dringend geboten, *Potentialtrennung* vorzusehen. Diese wird am Einfachsten und sehr sicher mit einem *Wechselstromwandler* als Durchsteckwandler erreicht.

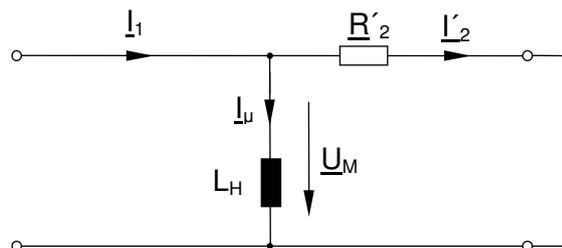
Dieser Beitrag schlägt eine geeignete Schaltungsanordnung vor, erläutert diese und gibt anhand eines Ausführungsbeispiels die Dimensionierungsgrundlagen an.

Die elektrischen Zusammenhänge eines Wechselstromwandlers, der ja nichts Anderes ist als ein Transformator, zeigt das Transformator-Ersatzschaltbild (siehe auch Skript „Trafo-Ersatz“):



Vollständiges Ersatzschaltbild eines Transformators

Im vorliegenden Anwendungsfall ist der Strom I_1 als eingeprengt anzusehen, die Spannungen U_1 , U_M und U'_2 sind somit abhängige Größen. Bei der Realisierung des Stromwandlers ist ein Ringkern aus Ferrit vorgesehen und deswegen sind die Streuinduktivitäten L_{S1} und L_{S2}' und auch der Eisenverlustwiderstand R_{Fe} vernachlässigbar. Wegen der Stromeinprägung ist auch der primäre Wicklungswiderstand R_1 bedeutungslos. Zudem ist es zur optimalen Ausnutzung des Kernmaterials am Günstigsten, den Wandler im sekundären Kurzschluss zu betreiben. Es verbleibt ein stark vereinfachtes Ersatzbild:



Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Wechselstromwandlers

Aus dem vereinfachten Ersatzbild kann man zwei Gleichungen für die Dimensionierung ableiten:

$$U_M = I'_2 \cdot R'_2 \quad \text{mit } U_M \text{ als die Spannung, aus der die Flussdichte des Kerns folgt}$$

$$\text{und } I'_2 = I_1 - I_\mu \quad \text{Diese Gleichung beschreibt den Übersetzungsfehler.}$$

I'_2 und I_μ stehen im Zeigerbild senkrecht aufeinander.

Projekt-Labor

Messung von Wechselstrom

Der Übersetzungsfehler lässt sich in Betragsfehler F_B und in Winkelfehler F_W trennen:

$$F_B = \frac{I_1 - I_2'}{I_1}$$

Aus $I_1^2 - I_2'^2 = I_\mu^2$ erhält man $I_1 - I_2' = \frac{I_\mu^2}{I_1 + I_2'}$ und mit der Näherung $I_1 \approx I_2'$ dann auch

$$F_B \approx \frac{1}{2} \left(\frac{I_\mu}{I_1} \right)^2$$

Der Winkelfehler zwischen I_1 und I_2' beträgt $F_W = \arctan \frac{I_\mu}{I_1}$

Ausführungsbeispiel:

Stromwandler mit $N_1 = 1$ (der Primärleiter wird nur durch den mit der Sekundärwicklung bewickelten Kern durchgesteckt) und $N_2 = 100$ mit Kupferlackdraht CuLL 0,315.

Kerndaten: Ferrit-Ringkern R 12,5-N30

Außendurchmesser $d_a = 12,5$ mm; Innendurchmesser $d_i = 7,5$ mm; Kernhöhe $h = 5$ mm
Kernmaterial: N30; mittlere Eisenlänge $l_{Fe} = 30,14$ mm; mittlerer Eisenquerschnitt $A_{Fe} = 12,28$ mm²

Widerstand der Sekundärwicklung $R_2 = \frac{N_2 \cdot l_m}{\kappa \cdot A_{Cu}}$ (mittlere Windungslänge $l_m = 17$ mm)

$$R_2 = \frac{100 \cdot 17 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{57 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2} \cdot 0,315^2 \text{ mm}^2 \cdot \frac{\pi}{4}} = 0,383 \Omega \quad (\text{gemessen am Ausführungsbeispiel: } 0,35 \Omega)$$

$$R_2' = R_2 \cdot \dot{u}^2 = 38,3 \mu\Omega$$

Mit $I_1 = 16$ A wird dann $U_M = 16 \text{ A} \cdot 38,3 \mu\Omega = 612,8 \mu\text{V}$

Eingesetzt in die Bemessungsgleichung für Wechselstromspulen (siehe auch Skript „Idealer Transformator“) ergibt sich für den zu erwartenden Flussdichtescheitelwert

$$\hat{B} = \frac{U_M}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot A_{Fe}} = \frac{612,8 \mu\text{V}}{4,44 \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 1 \cdot 12,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 225 \text{ mT}$$

In der Magnetisierungskurve für das Kernmaterial N30 findet man dazu: $\hat{H} = 36 \frac{\text{A}}{\text{m}}$

Daraus ergibt sich ein Magnetisierungsstrom $\hat{I}_\mu = \frac{\hat{H} \cdot l_{Fe}}{N_1} = \frac{36 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot 30,14 \text{ mm}}{1} = 1,085 \text{ A}$

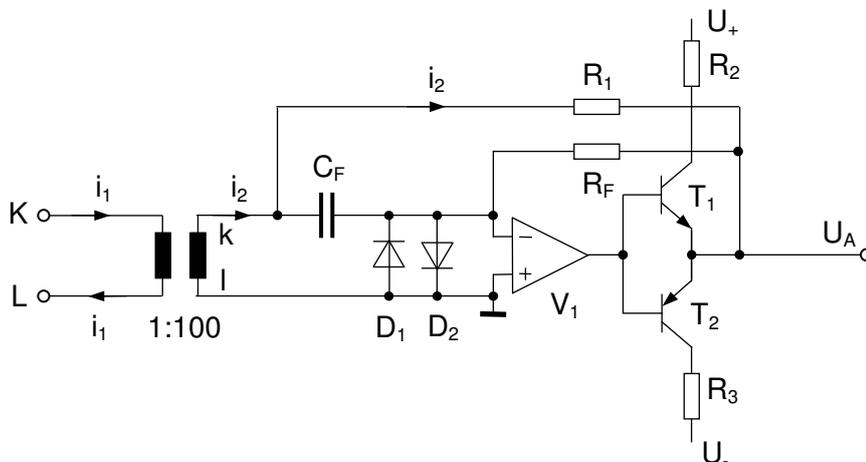
Fehlerbetrachtung

$$\text{Übersetzungs-Betragsfehler: } F_B = \frac{1}{2} \left(\frac{I_\mu}{I_1} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1,085}{\sqrt{2} \cdot 16} \right)^2 = 1,15 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Winkelfehler: } F_W = \arctan \frac{I_\mu}{I_1} = 2,75^\circ$$

Elektronische Auswerteschaltung

Die Voraussetzung, dass der Stromwandler im sekundären Kurzschluss betrieben werden soll, erfordert an der Sekundärwicklung einen OPV, der als Invertierer geschaltet ist.



Auswerteschaltung für einen Wechselstromwandler

Der zu messende Strom i_1 wird über den Stromwandler mit dem Übersetzungsverhältnis (hier: $\ddot{u} = 1:100$) als i_2 auf die Sekundärseite übertragen. Bei Primär 16 A fließt sekundär 0,16 A. Ein normaler OPV kann einen Ausgangsstrom von 5 mA führen. Es ist somit notwendig, stromverstärkende Bauelemente nachzuschalten, wobei aber diese innerhalb der Rückführungsschleife liegen müssen, damit ihre nichtlinearen und großen Toleranzen unterworfenen Eigenschaften nicht im Ausgangssignal erscheinen. In der ausgeführten Schaltung fließt der Sekundär-Wechselstrom in R_1 und die Ausgangsspannung hat den Wert $u_A = -i_2 \cdot R_1$. Der Strom wird bei positiver Richtung von i_2 vom Transistor T_2 geführt, bei negativer Richtung von T_1 . Der jeweilige vom OPV zu führende Strom ist um den Stromverstärkungsfaktor der Transistoren reduziert. Bei Annahme von $B = 100$ wären das jeweils 1,6 mA. Die beiden Widerstände R_2 und R_3 haben die Aufgabe, einen Teil der Verlustleistung aufzunehmen, den sonst die Transistoren verheizen müssten. Gleichzeitig bilden sie einen wirkungsvollen Kurzschlusschutz. Die beiden Dioden dienen als Schutz des OPV vor Zerstörung für den Fall, dass der Primärstrom fließt, ohne dass die Versorgungsspannung für die Auswerteschaltung eingeschaltet ist.

Fehlerbetrachtung

Die Offsetspannung des OPV wird (ohne das R-C-Glied aus R_F und C_F) mit dem Widerstandsverhältnis R_1 / R_{W2} verstärkt am Ausgang als Gleichglied erscheinen. (R_{W2} ist der sekundäre Wicklungswiderstand)

Das hinzugefügte R-C-Glied aus C_F und R_F hat die Aufgabe, dieses durch die Offsetspannung des OPV verursachte Gleichspannungsglied in der Ausgangsspannung auf die Offsetspannung selbst zu reduzieren, da bei Gleichspannung nur der Widerstand R_F als Rückführung wirkt und die Verstärkung gleich eins ist (Spannungsfolgerschaltung). Bei $f = 50$ Hz ist der Widerstand des Kondensators C_F bereits als gute Verbindung anzusehen und die oben abgeleiteten Zusammenhänge sind zutreffend.