Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 49 (1958)

Heft: 24

Artikel: Übersetzungsfehler von Stromwandlern im stationären und im nicht stationären Zustand

Autor: Berger, K. / El-Arabaty, A.M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059748

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

49. Jahrgang Nr. 24 Samstag, 22. November 1958

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Übersetzungsfehler von Stromwandlern im stationären und im nicht stationären Zustand

Von *K. Berger*, Zürich, und *A. M. El-Arabaty*, Kairo

621.314.224.8

Die Arbeit gibt einen Vergleich zwischen den Übersetzungsfehlern von Stromwandlern im stationären Zustand, wie sie gemäss den bestehenden Vorschriften verwendet werden, und den Fehlern, welche bei der Transformation eines asymmetrischen, transienten Stromes auftreten. Es werden dabei Versuchsresultate und Berechnungsformeln angegeben, welche gestatten, den Stromwandler so zu dimensionieren, dass der Fehler in der Übersetzung des transienten Gleichstromanteils innerhalb bestimmter Grenzen bleibt. Dies ist besonders für die Speisung von Schutzrelais mit Summen- oder Differenzschaltungen sehr wichtig, damit Fehlschaltungen vermieden werden, ebenso bei der oszillographischen Messung solcher Ströme.

Comparaison entre les erreurs de transformation de transformateurs de courant à l'état stationnaire, utilisés conformément aux prescriptions en vigueur, et les erreurs qui se produisent lors de la transformation d'un courant transitoire asymétrique. Les auteurs indiquent des résultats d'essais et des formules de calcul, qui doivent permettre de dimensionner les transformateurs de courant, de façon que l'erreur résultant de la transformation du courant continu transitoire demeure dans des limites déterminées. Cela est particulièrement important pour l'alimentation de relais de protection en montage additif ou différentiel, afin d'éviter des couplages intempestifs, de même que pour la mesure oscillographique de ces courants.

Für die Definition und den Vergleich des Verhaltens von Stromwandlern im stationären Betrieb werden die üblichen Methoden angewendet, welche auf den Stromfehler- und Fehlwinkel-Charakteristiken basieren.

Die Genauigkeit von Messwandlern wird für verschiedene Bürden über den normalen Arbeitsbereich des stationären Stromes angegeben. Von Stromwandlern, welche für Relaiszwecke bestimmt sind (Relais-Stromwandler), wird im allgemeinen weniger hohe Genauigkeit gefordert. Entsprechend der Aufgabe der Relais werden dagegen bestimmte zusätzliche Bedingungen gestellt, welche die Genauigkeit im Überstromgebiet betreffen.

Die Notwendigkeit der Installation von schnellwirkenden Schutzausrüstungen ruft einer klareren Analyse des Verhaltens von Stromwandlern bei der Transformierung nicht sinusförmiger Ausgleichsströme, die in der Regel exponentiell abklingen. Nur bei richtiger Transformierung solcher Ströme kann ein einwandfreies Verhalten des Stromwandlers und ein zuverlässiger Kurzschlußschutz schon während den ersten Perioden nach Auftreten des Kurzschlusses gewährleistet werden.

Ein grundsätzlicher Unterschied besteht zwischen Stromwandlern für schnellwirkende Schutzausrüstungen und jenen für verzögert wirkende. Während für die zweiten Ausrüstungen die Verzögerungszeit des Schutzes so gross ist, dass der transiente Gleichstromanteil des Primärstromes abgeklungen ist, bevor das Relais zum Ansprechen kommt, spielt bei Stromwandlern für schnellwirkende Schutzausrüstungen das Verhalten des Wandlers unter dem Einfluss des Gleichstromanteiles eine wesentliche Rolle, insbesondere dann, wenn Summen- oder Differenzströme gebildet werden.

Vom mathematischen Standpunkt aus ist die Theorie des Wandlers für den stationären Fall lediglich ein Sonderfall der allgemeinen Theorie des Transformators, welche die vollständige Lösung liefert. Der gewöhnlich betrachtete stationäre Zustand bildet dabei nur ein partikuläres Integral der allgemeinen Lösung.

Solange keine nichtlinearen Sättigungserscheinungen auftreten, ist es einfacher und praktischer, das allgemeine Problem in zwei Teilprobleme aufzuspalten und die Teillösungen zu superponieren. So kann einerseits das Verhalten des Wandlers im stationären Fall bei 50 Hz betrachtet werden, anderseits kann untersucht werden, wie er sich unter dem Einfluss eines transienten, d. h. eines von einem Maximalwert auf Null abklingenden Gleichstromes verhält.

Beim Aufzeichnen eines Wechselstromes mit asymmetrischer Kurvenform mit einem Schleifen-Oszillographen oder mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen über Stromwandler sind grosse Übersetzungsfehler speziell dann zu erwarten, wenn der Wert der Gleichstromkomponente gross genug ist, um eine Sättigung des Magnetkerns zu verursachen, und ganz besonders dann, wenn eine remanente Magnetisierung des Kernes schon im voraus vorhanden ist. In solchen Fällen ist es zur Erreichung einer genügenden Genauigkeit notwendig, die Stromwandler so zu dimensionieren, dass keine Eisensättigung auftritt.

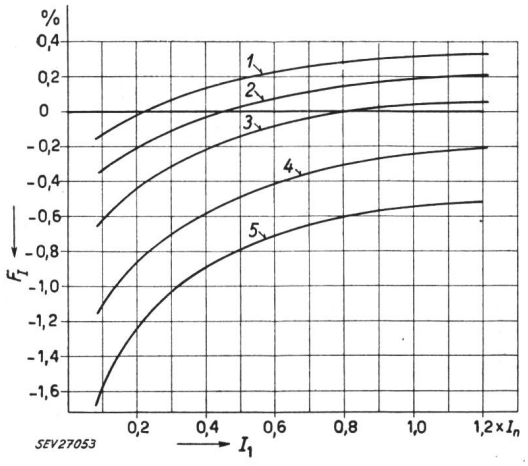

Fig. 1

Stromfehler des Stromwandlers bei stationärem Strom von 0,1...1,2 × Nennstrom

Die Stromfehler wurden mit einer Messbrücke gemessen
Leistungsfaktor der Bürde = 0,8
Sekundärleistungen: *1* = 5 VA; *2* = 15 VA; *3* = 30 VA; *4* = 60 VA; *5* = 100 VA
Die Sekundärleistung ist immer auf den Nennstrom bezogen
F_I Stromfehler in Prozenten; I_1 Primärstrom; I_n Nennstrom

Um die Übersetzungsfehler für einen spezifischen Fall herauszugreifen, wurden an einem Stromwandler mit den folgenden Daten Messungen durchgeführt:

Kern-Material: Gewöhnliches Dynamo-Blech, 0,9 W/kg (warm gewalzt).

Kern-Querschnitt: 23 cm².

Windungszahlen: Primärwicklung 80 Windungen, Sekundärwicklung 238 Windungen.

Nennströme: Primär 15 A, Sekundär 5 A.

Nennbürde: 60 VA.

Sekundärer Wicklungswiderstand: 0,5 Ω.

Sekundäre Streuinduktivität: 2,95 mH.

Gegeninduktivität (*M*) (Neigung der geraden Partie der Magnetisierungskurve): 0,65 H (bezogen auf die Sekundärwicklung).

Die Stromfehler für symmetrische Wechselströme sind in Fig. 1 für das normale Arbeitsgebiet für Messwandler aufgezeichnet. Aus Fig. 2 gehen die Stromfehler im Überstromgebiet hervor, in welchem der Wandler bei Verwendung als Relaiswandler arbeiten können muss.

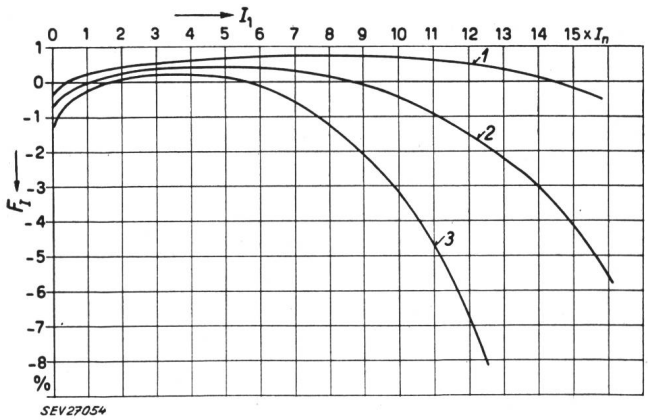

Fig. 2

Stromfehler des Stromwandlers bei stationärem Strom im Überstromgebiet

Die Stromfehler wurden mit einer Messbrücke gemessen
Leistungsfaktor der Bürde = 0,8
Sekundärleistungen: *1* = 7,5 VA; *2* = 30 VA; *3* = 60 VA
Die Sekundärleistung ist immer auf den Nennstrom bezogen
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Die oszillographisch gemessenen, maximalen Übersetzungsfehler bei der Transformation transienter Gleichströme sind aus Fig. 3 für lineare Transformation (nicht gesättigter Magnetkern) ersichtlich, analoge Messwerte für Transformation mit gesättigtem Magnetkern aus Fig. 4. Um diese Fehler bestimmen zu können, wurde im Primärkreis des Stromwandlers ein transienter, von einem stationären Maximalwert auf Null abklingender Gleichstrom mit der Zeitkonstante τ_1 erzeugt.

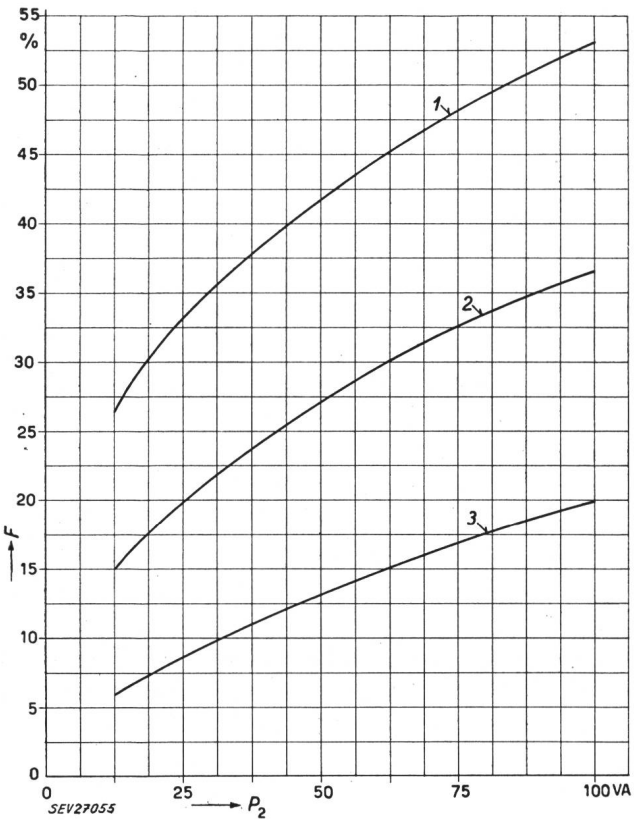

Fig. 3

Maximale Übersetzungsfehler der Transformation des transienten Gleichstromgliedes bei ungesättigtem Magnetkern für verschiedene primäre Strom-Zeitkonstanten τ_1

Die Werte wurden Oszillogrammen entnommen
Bürde rein Ohmisch
1 τ_1 = 0,35 s; *2* τ_1 = 0,15 s; *3* τ_1 = 0,05 s
F maximaler Übersetzungsfehler in Prozenten; P_2 Sekundärleistung, bezogen auf den Nennstrom

Primär- und Sekundärstrom wurden mit Hilfe eines Schleifen-Oszillographen aufgezeichnet, der maximale Übersetzungsfehler wurde dem Oszillogramm entnommen. Wenn der Sekundärstrom auf die Primärseite des Stromwandlers bezogen wird, kann dieser Übersetzungsfehler definiert werden als:

$$F = \frac{(i_1 - i_2)\,max}{I_{1a}}\,100 \quad [\%]$$

wobei

$(i_1 - i_2)_{max}$ maximale momentane Differenz zwischen Primär- und reduziertem Sekundärstrom;

I_{1a} Anfangswert des abklingenden Primärstromes mit der Zeitkonstante τ_1

bedeuten.

Die Fig. 5...7 zeigen 3 Beispiele aus vielen aufgenommenen Oszillogrammen.

Für den untersuchten Stromwandler werden hier die gemessenen Übersetzungsfehler bei 60 VA Sekundärleistung zu Vergleichszwecken angegeben:

	Prozentualer Übersetzungsfehler F
Stationärer, symmetrischer Wechselstrom, 1,0×Nennstrom	0,24%
Stationärer, symmetrischer Wechselstrom, 10×Nennstrom	3,2 %
Mit einer Zeitkonstante τ_1 von 0,15 s abklingender Gleichstromstoss, Stromwandlerkern ungesättigt	29,5 %
Mit einer Zeitkonstante τ_1 von 0,15 s abklingender Gleichstromstoss, Anfangswert 20 A, Stromwandlerkern gesättigt	65,0 %

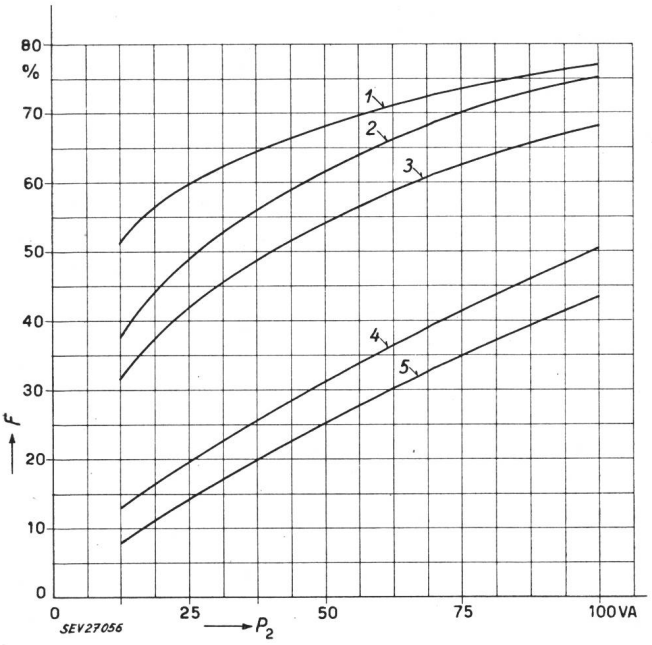

Fig. 4

Maximale Übersetzungsfehler der Transformation des transienten Gleichstromgliedes bei gesättigtem Magnetkern für verschiedene primäre Strom-Zeitkonstanten τ_1 und verschiedene primäre Anfangswerte I_{1a}

Die Werte wurden Oszillogrammen entnommen
Bürde rein Ohmisch

1 τ_1 = 0,35 s, I_{1a} = 15 A
2 τ_1 = 0,15 s, I_{1a} = 20 A
3 τ_1 = 0,15 s, I_{1a} = 15 A
4 τ_1 = 0,05 s, I_{1a} = 20 A
5 τ_1 = 0,05 s, I_{1a} = 15 A

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Aus dem Gesagten geht hervor, dass die transienten Fehler weit grösser sind als jene des stationären Zustandes, besonders in den Fällen, wo das Stromwandlereisen gesättigt wird, was besonders bei Primärströmen mit grösseren Zeitkonstanten τ_1 der Fall ist.

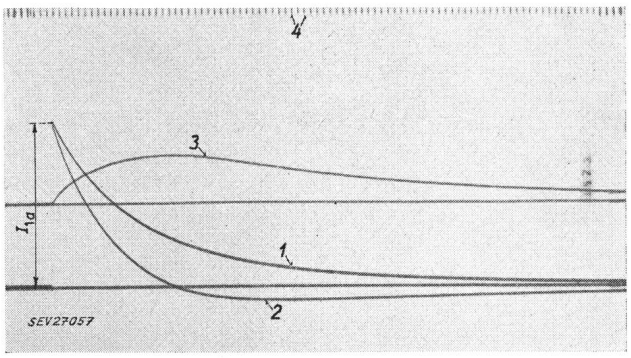

Fig. 5

1. Oszillogrammbeispiel

Transformation eines abklingenden Gleichstromstosses durch einen nicht gesättigten Stromwandler
Rein Ohmsche Bürde

1 Primärstrom i_1; *2* Sekundärstrom i_2 mit dem Nenn-Übersetzungsverhältnis auf die Primärseite des Stromwandlers bezogen; *3* Differenzstrom $(i_1 - i_2)$; *4* Zeitmarke 100 Hz

Maximaler Übersetzungsfehler $F = \dfrac{(i_1 - i_2)_{max}}{I_{1a}} 100$ [%]

Mit einem voll asymmetrischen Ausgleichsstrom in der Form:

$$I_1 \left(\cos \omega t - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)$$

muss oft die Forderung gestellt werden, dass der Stromwandler auch unter der Wirkung des primären Kurzschlußstromes nicht gesättigt werden darf, und dass die Übersetzungsfehler im linearen Teil der Magnetisierungskurve innerhalb gewisser Grenzen liegen.

Für den Fall der rein Ohmschen Bürde kann die obige Bedingung eingehalten werden, wenn der Wandler so dimensioniert ist, dass

$$B_{Trans.} = B_{max}\, m\, K \qquad (1)$$
$$B_{Trans.} \leqq B_K$$

wobei

$B_{Trans.}$ Bei der Messung des Ausgleichsstromes entstehende Induktion;

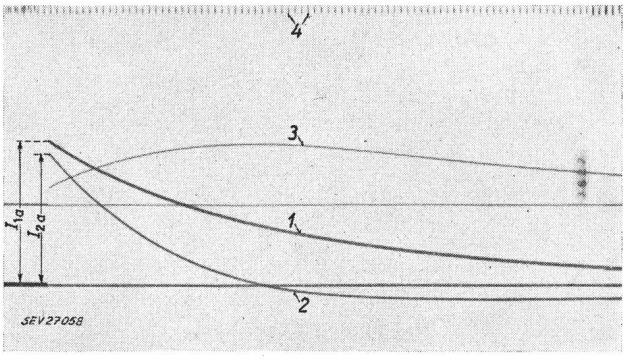

Fig. 6

2. Oszillogrammbeispiel

Transformation eines abklingenden Gleichstromstosses durch einen nicht gesättigten Stromwandler
Gemischte (Ohmisch-induktive) Bürde

Maximaler Übersetzungsfehler $F = \dfrac{(i_1 - i_2)_{max}}{I_{1a}} 100$ [%]

Anfangswert des Übersetzungsfehlers $F_a = \dfrac{I_{1a} - I_{2a}}{I_{1a}} 100$ [%]

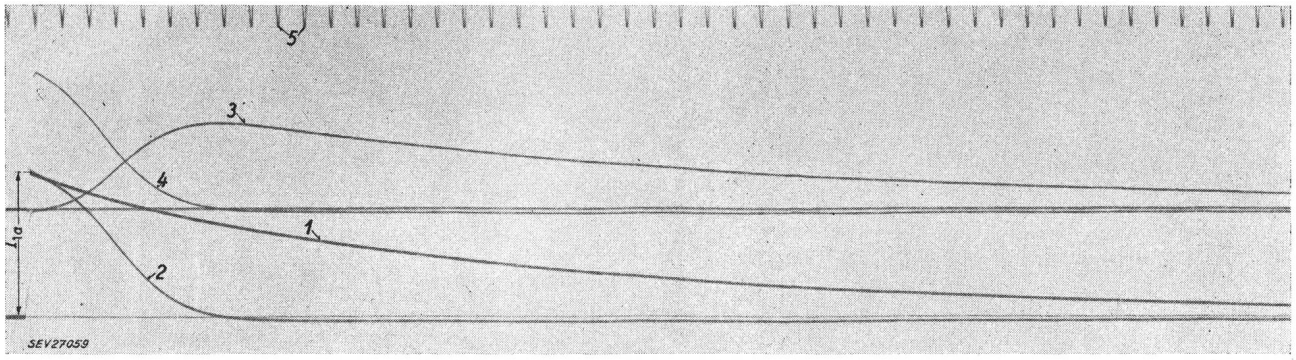

Fig. 7
3. Oszillogrammbeispiel
Transformation eines abklingenden Gleichstromstosses durch einen gesättigten Stromwandler
Rein Ohmsche Bürde
1 Primärstrom i_1; *2* Sekundärstrom i_2 mit dem Nenn-Übersetzungsverhältnis auf die Primärseite des Stromwandlers bezogen; *3* Differenzstrom $(i_1 - i_2)$; *4* im Sekundärkreis induzierte Spannung u_{i2}; *5* Zeitmarke 100 Hz

B_K Magnetische Induktion am Knie der Magnetisierungskurve;

B_{max} Scheitelwert der magnetischen Induktion bei Nennstrom 50 Hz und bei Nennbürde

m $\dfrac{\text{Kurzschlußstrom, bei dem der Fehler } F \text{ auftritt}}{\text{Nennstrom}}$

$$K = 1 + \omega \tau_2 \frac{F}{100} = 1 + \frac{\omega \tau_1}{X} \cdot \frac{F}{100} \qquad (2)$$

ω $2\pi f_N$, f_N Frequenz des stationären Stromes = 50 Hz

τ_1 Zeitkonstante des Primärstromes

τ_2 Zeitkonstante des Sekundärkreises = $= M/R_t$

X τ_1/τ_2

M sekundäre Gegeninduktivität

R_t totaler Sekundärwiderstand = Widerstand der Sekundärwicklung + Widerstand der Bürde

F maximaler zulässiger Fehler in der Transformation des transienten Gleichstromgliedes [%]

bedeuten.

Der Fehler F lässt sich nun auch darstellen als Funktion eines Zeitkonstantenverhältnisses X, nämlich

$$F = X^{\frac{1}{1-X}} \cdot 100 \quad [\%] \qquad (3)$$

Für den ungesättigten Wandler wurden der Faktor K und das Verhältnis X für bestimmte Fehler berechnet und in Fig. 8 dargestellt.

Zur Illustration der Kurven in Fig. 8 dienen die folgenden Beispiele.

Die Dimensionen, das Eisen- und das Kupfergewicht sollen berechnet werden für eine Anzahl von Einleiterstromwandlern mit dem Übersetzungsverhältnis 1000/1 A. Der Primärstrom und die Bürden-Bedingungen für jeden Wandler sind:

SW 1: $\tau_1 = 0{,}102$ s, $m = 20$ $P_n = 10$ VA
SW 2: $\tau_1 = 0{,}102$ s, $m = 20$ $P_n = 1$ VA
SW 3: $\tau_1 = 0{,}051$ s, $m = 20$ $P_n = 10$ VA
SW 4: $\tau_1 = 0{,}051$ s, $m = 20$ $P_n = 1$ VA
SW 5: Normaler Messwandler $P_n = 10$ VA, $\cos \beta_2 = 0{,}8$

Unter Annahme einer Induktion im Knie der Magnetisierungskurve von $B_K = 10\,000$ Gs ergibt sich z. B. für den Wandler *SW 1* folgendes:

Aus Fig. 8 ergibt sich für eine Zeitkonstante des Primärstromes $\tau_1 = 0{,}102$ s und einen prozentualen Fehler $F = 1\%$:

$$K = 32 \quad \text{(Kurve } K_2\text{)}$$

Für $F < 1\%$ benützt man den Wert $K = 33$, der dem Grenzwert $F = 0$ entspricht.

Aus Gl. (1) ist:

$$B_{max} = \frac{B_K}{m\,K} = \frac{10\,000}{20 \cdot 33} = 15{,}15 \text{ Gs}$$

und da

$$B_{max} = 4{,}5 \cdot 10^5 \frac{I_{2n}}{A} \text{ Gs bei 50 Hz} \qquad (4)$$

folgt, dass:

$$A = \frac{q\,N_2}{R_t} = 2{,}97 \cdot 10^4\, I_{2n}$$

Für einen Einleiterstromwandler 1000/1 A gilt:

$$N_1 = 1 \quad N_2 = 1000 \quad \text{und} \quad I_{2n} = 1 \text{ A}$$

Für eine sekundäre Nennleistung $P_n = 10$ VA und einen angenommenen Widerstand der Sekundärwicklung von 3 Ω ergibt sich

$$R_t = 10 + 3 = 13\ \Omega$$

Daraus folgt:

$$q = \frac{2{,}97 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 13}{1000} = 386 \text{ cm}^2$$

Unter der Annahme einer mittleren Länge des magnetischen Pfades l von 1,0 m ergibt sich ein Eisengewicht von

$$386 \cdot 100 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} = 293{,}8 \text{ kg}$$

Die Kupferdrahtlänge der Sekundärwicklung kann roh geschätzt werden zu:

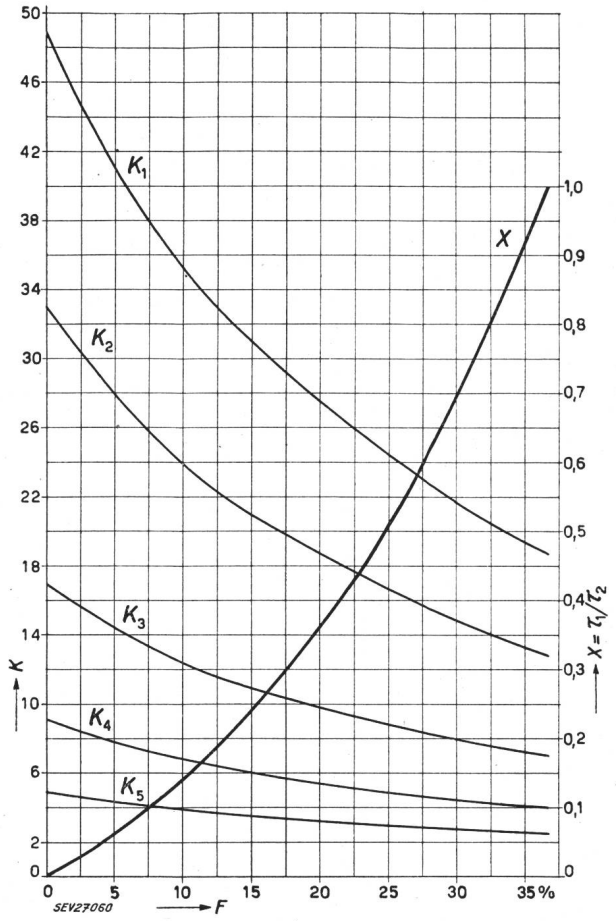

Fig. 8

Kurven für die Bestimmung der Grösse eines nicht gesättigten Stromwandlers mit einem bestimmten zulässigen Fehler in der Übersetzung des transienten Gleichstromanteils

Rein Ohmsche Bürde

Kurve X [Gl. (3)]: $X = \tau_1/\tau_2$ als Funktion des prozentualen Fehlers (F) in der Übersetzung des transienten Gleichstromes

$$F = X^{\frac{1}{1-X}} \quad 100 \ [\%]$$

Kurven K [Gl. (2) und (3)]: Faktor K als Funktion des prozentualen Fehlers (F) für verschiedene Primärstrom-Zeitkonstanten τ_1

$$K = 1 + \omega\tau_2 \frac{F}{100} = 1 + \frac{\omega\tau_1}{X} \cdot \frac{F}{100} \ 100 \ [\%]$$

K_1 für $\tau_1 = 0{,}153$ s; K_2 für $\tau_1 = 0{,}102$ s; K_3 für $\tau_1 = 0{,}051$ s; K_4 für $\tau_1 = 0{,}0255$ s; K_5 für $\tau_1 = 0{,}01275$ s

$$4\sqrt{q} \cdot N_2 = 4\sqrt{386} \cdot 1000 \frac{1}{100} = 786 \text{ m}$$

Nimmt man einen Querschnitt der Sekundärwicklung von 5 mm² an, so ergibt sich ein Kupfergewicht für die Sekundärwicklung von:

$$\frac{5}{100} 786 \cdot 100 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 35 \text{ kg}$$

und einen Widerstand der Sekundärwicklung:

$$\frac{0{,}0175 \cdot 786}{5} = 2{,}75 \ \Omega$$

Um den Fehler F in der Übersetzung des Gleichstromgliedes zu überprüfen, setze man ein:

$$\tau_2 = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot \mu C \qquad (5)$$

$$C = \frac{q N_2^2}{l R_t} = \frac{386 \cdot (1000)^2}{100 \cdot 12{,}75} = 30{,}25 \cdot 10^4$$

Mit einer mittleren Permeabilität von $\mu = 3000$ Gs · cm/A ergibt sich:

$$\tau_2 = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 3000 \cdot 30{,}25 \cdot 10^4 = 11{,}45 \text{ s}$$

Damit ist:

$$X = \tau_1/\tau_2 = \frac{0{,}102}{11{,}45} = 0{,}00895$$

woraus folgt, dass

$$F < 1\% \quad \text{(aus Fig. 8)}$$

Dasselbe Verfahren wird angewandt, um die Daten der Stromwandler (*SW 2*, *SW 3* und *SW 4*) zu erhalten.

Für die Dimensionierung des normalen Stromwandlers (*SW 5*) siehe [3] [1]).

Nach Durchführung der Berechnungen ergeben sich folgende Stromwandlerdaten:

	SW 1	*SW 2*	*SW 3*	*SW 4*	*SW 5*
Leistung . . . . [VA]	10	1	10	1	10
Primäre Windungszahl .	1	1	1	1	1
Sekundäre Windungszahl .	1000	1000	1000	1000	1000
Mittlere Eisenlänge [m] (Annahme)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Eisenquerschnitt [cm²] .	386	62,4	183,4	27,6	10,8
Kerngewicht [kg] . . .	293,8	47,4	140	21,8	8,2
Kupferdrahtlänge [m] .	786	316	544	210	132
Kupferdrahtquerschnitt [mm²]	5	5	5	5	2
Kupfergewicht [kg] . .	35	14,1	24,2	9,35	2,35
Wicklungswiderstand [Ω]	2,75	1,11	1,9	0,735	1,15

Aus diesen Zahlen geht deutlich hervor, dass für den Fall, wo der Stromwandler auch den transienten Bedingungen genügen soll (SW 1, SW 2, SW 3 und SW 4), sowohl seine Dimensionen, wie auch Eisen- und Kupfergewicht die entsprechenden Grössen des normalen Stromwandlers (SW 5) weit übersteigen.

Nach diesem, für Ohmsche Bürde berechneten Beispiel ist das Verhalten des Stromwandlers bei nicht Ohmscher Bürde zu betrachten.

Wenn ein Stromwandler für vernachlässigbare sekundäre Wicklungswiderstände bei Annahme einer *rein induktiven Bürde* dimensioniert wird, so wird der maximale Fluss auf das Doppelte seines Wertes für den stationären Zustand bei 50 Hz beschränkt.

Der maximale, in der Übersetzung des transienten Gleichstromgliedes auftretende Fehler ist dann $F = L_t/M_t$. Er tritt am Anfang des Ausgleichsvorganges auf.

Die optimale Dimensionierung für den Fall einer *gemischten Bürde* ergibt sich, wenn dafür gesorgt wird, dass

$$\frac{L_t}{R_t} \geqq \tau_1 \qquad \text{oder} \qquad X \leqq \frac{L_t}{M_t} \qquad (6)$$

wobei

L_t Sekundäre Streuinduktivität + Induktivität der Bürde

R_t Widerstand der Sekundärwicklung + Bürden-Widerstand

M Gegeninduktivität des Stromwandlers

$M_t = M + L_t$

$X = \tau_1/\tau_2$

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

τ_1 Zeitkonstante des Primärstromes

τ_2 M_t/R_t Zeitkonstante des sekundären Stromkreises bei gemischter Bürde

bedeuten.

In diesem Falle tritt der maximale Fehler in der Übersetzung der transienten Gleichstromkomponente auch am Anfang auf und beträgt L_t/M_t. Der maximale Induktionsfluss wird auch hier doppelt so gross sein als im Fall der rein induktiven Bürde von L_t im stationären Zustand.

Das folgende Zahlenbeispiel zeigt den Berechnungsgang für einen Einleiterstromwandler (*SW 6*) mit dem Übersetzungsverhältnis von 1000/1 A für *induktive Bürde*. Danach wird der Fluss auf den doppelten Wert seiner stationären Grösse begrenzt. Der Primärstrom und die Bürden-Bedingungen seienl

$$\tau_1 = 0{,}051 \text{ s}, \qquad m = 20$$
$$P_n = 10 \text{ VA, induktiv}$$

Für diesen Fall gilt also:

$$\frac{B_K}{B_{max}} \geqq m\, K_i \qquad (1a)$$

wobei K_i ein Faktor ist, entsprechend dem Faktor K für eine rein Ohmsche Bürde. In diesem Beispie: ist $K_i = 2$ [2].

$$B_{max} = 4{,}5 \cdot 10^5 \frac{I_{2n}}{A_1} \text{ Gs bei 50 Hz} \qquad (4a)$$

wo

$$A_1 = \frac{q\, N_2}{\omega\, L_t}$$

Für

$$B_K = 10000 \text{ Gs und}$$
$$m = 20$$

ergibt sich

$$B_{max} = \frac{B_K}{m\, K_i} = \frac{10000}{20 \cdot 2} = 250 \text{ Gs}$$

und

$$A_1 = 1{,}8 \cdot 10^3\, I_{2n}$$

Für einen Einleiterstromwandler mit dem Übersetzungsverhältnis 1000/1 A sind

$$N_1 = 1 \qquad N_2 = 1000 \qquad \text{und} \qquad I_{2n} = 1 \text{ A}$$

Für eine induktive Nennleistung von 10 VA ist $\omega L_t = 10\ \Omega$, woraus folgt:

$$q = \frac{1{,}8 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10}{1000} = 18 \text{ cm}^2$$

Unter der Annahme einer mittleren Länge des magnetischen Pfades von $l = 1{,}0$ m ergibt sich ein Eisengewicht von

$$18 \cdot 100 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} = 13{,}7 \text{ kg}$$

Die Kupferdrahtlänge für die Sekundärwicklung kann roh geschätzt werden zu

$$4 \sqrt{q} \cdot N_2 = 4 \sqrt{18} \cdot 1000 \frac{1}{100} = 170 \text{ m}$$

Einen Leiterquerschnitt von 5 mm² angenommen, ergibt sich ein Kupfergewicht von

$$\frac{5}{100}\, 170 \cdot 100 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 7{,}56 \text{ kg}$$

und einen Widerstand der Sekundärwicklung von

$$\frac{0{,}0175 \cdot 170}{5} = 0{,}595\ \Omega$$

Um Gl. (6) zu überprüfen, setze man:

Induktivität der Bürde $\frac{10}{314} = 0{,}0318$ H

Widerstand der Sekundärwicklung 0,595 Ω

Daraus ist

$$\frac{L_t}{R_t} = 0{,}0534 \text{ s}$$

was grösser ist als $\tau_1 = 0{,}051$ s.

Die Dimensionen dieses Wandlers sind die Folgenden:

	SW 6	
Primäre Windungszahl	1	
Sekundäre Windungszahl	1000	
Mittlere Eisenlänge (Annahme)	1,0	m
Eisenquerschnitt	18	cm²
Kerngewicht	13,7	kg
Kupferdrahtlänge	170	m
Kupferdrahtquerschnitt	5	mm²
Kupfergewicht	7,56	kg
Wicklungswiderstand	0,595	Ω

Aus diesen Zahlen ist deutlich ersichtlich, dass die Dimensionen wesentlich reduziert werden konnten gegenüber denjenigen des Stromwandlers *SW3*, welcher für die gleichen Bedingungen berechnet wurde, jedoch bei einer rein Ohmschen Bürde.

Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass die Fehler, welche bei stationärem Zustand auftreten, weit übertroffen werden von den Fehlern, die durch das vorübergehende Gleichstromglied bedingt sind, speziell dann, wenn der Stromwandler gesättigt ist. Zahlenbeispiele zeigen, dass Stromwandler, welche die benötigte Genauigkeit einhalten, trotzdem mit vernünftigen Dimensionen gebaut werden können. Dazu ist allerdings erforderlich, dass dem Problem der Fehler bei transienten Gleichstromgliedern schon bei der Berechnung des Wandlers volle Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Literatur

[1] *Concordia, C., C. N. Weygandt* und *H. S. Shott:* Transient Characteristics of Current Transformers During Faults. Trans. AIEE Bd. 61(1942), Mai, S. 280...285.

[2] *El-Arabaty, A.:* Experimental and Theoretical Investigations of Current Transformer Performance when Transforming D. C. Transient Currents. Diss. ETH. Zürich: Juris-Verlag 1958.

[3] *Ernst, A.:* Oerlikon-Stromwandler. Bull. Oerlikon Bd. -(1956), Nr. 316, S. 44...53, Nr. 317, S. 64...73.

[4] *Gray, W.* und *A. Wright:* Voltage Transformers and Current Transformers Associated with Switchgear. Proc. IEE Bd. 100 (1953), Part 2, Nr. 75, S. 223...243.

[5] *Marenesi, R.:* Enregistrement des courants transitoires de court-circuit à l'aide des transformateurs de courant. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 3, Rapp. 319, 7 S.

[6] *Marshall, D. E.* und *P. O. Langguth:* Current Transformer Excitation under Transit Conditions. Trans. AIEE Bd. 48 (1929), Nr. 4, S. 1464...1474.

[7] *Mathews, P.:* Protective Current Transformers and Circuits. London: Chapman & Hall 1955.

Adressen der Autoren:

Prof. Dr. sc. techn. *K. Berger*, Hochspannungslaboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 6, und

Dr. sc. techn. *A. M. El-Arabaty*, Electrical Department, Faculty of Engineering, Abbassia, Cairo (Egypt).