

# FEHLERVERMINDERUNG BEI STROMWANDLERN MIT HILFE EINER »NEGATIVEN BÜRDE«

Von

Gy. ISTVÁNFY und Th. SŁUSZKIEWICZ

Lehrstühle für Elektrische Maschinen, Technische Universität, Budapest, und Elektrische  
Maschinen und Messungen, Bergbau und Hüttenkunde Universität, Kraków

(Eingegangen am 30. Dezember 1962)

Vorgelegt von Prof. Dr. O. BENEDIKT

## 1. Einleitung

Zu Verminderung der Fehler von Stromwandlern sind beim Hersteller verschiedene konstruktive Maßnahmen gebräuchlich, die aber bei fertigen und eingebauten Wandlern nicht mehr anwendbar sind. Es gibt jedoch Fälle, in denen nur ein gewöhnlicher, nicht hochpräziser, z. B. in eine Hochspannungsleitung eingebauter Wandler zur Verfügung steht, den man vorübergehend für bestimmte Messungen von außen her »verbessern« möchte, um kleinere Fehler zu erreichen. Ein solches Bedürfnis kann in der Praxis in folgenden Fällen auftreten:

1. Bei Verwendung eines vorhandenen, eingebauten Wandlers einer technischen Genauigkeitsklasse zu exakten Messungen.
2. Bei Überbürdung eines vorhandenen Wandlers allenfalls mit dem Vielfachen seiner Nennbürde.
3. Für Messungen bei Strömen, die viel kleiner sind als der Nennstrom des Wandlers.
4. Bei Messungen außerhalb des Meßbereiches des Wandlers, d. h. im Überstromgebiet.

Die vorliegende Arbeit setzt sich das Ziel, zwei Aufgaben zu lösen, u. zw. erstens die Untersuchung einer Schaltungsmaßnahme zur Fehlerverminderung, die prinzipiell an jedem, auch am eingebauten und arbeitenden Stromwandler durchgeführt werden kann. Diese Maßnahme ist für den Dauerbetrieb aus ökonomischen Gründen vielleicht nicht annehmbar. Die Lösung dieser Aufgabe dient der Praxis.

Die zweite Aufgabe hat theoretische Bedeutung. Es soll ein Versuch unternommen werden, den Stromwandler als Kompensationsgerät zu betrachten. Mit Berücksichtigung der Übersetzung kommt der sekundäre Strom des Stromwandlers dem primären Strom nach Betrag und Phase nahe. Je genauer das der Fall ist, desto besser der Stromwandler. Die Differenz zwischen primären und sekundären Amperewindungen erregt einen Wechselfluß, der die zum

Aufrechterhalten des sekundären Stromes benötigte Spannung induziert. Aber weder die Größe der sekundären Spannung noch die Größe des Flusses wird gemessen, um das Ausmaß des Gleichgewichtes zwischen primären und sekundären Amperewindungen festzustellen. Es wird vielmehr lediglich die Größe der Sekundären Bürde so begrenzt, daß man immer *annehmen* kann, die induzierte Spannung sei sehr klein. Wird aber das Abweichen der Differenz der zu vergleichenden Amperewindungen vom Nullwert irgendwie gemessen, um damit aktiv das Gleichgewicht herzustellen, so ergänzt man den Stromwandler zu einer ev. automatischen Kompensationseinrichtung. Für die weiter unten angegebenen Schaltungen, die einige der möglichen Lösungen dieser Überlegungen verwirklichen, wurde die allgemeine Bezeichnung »negative Bürde« vorgeschlagen.

## 2. Theorie des Stromwandlers

### 2.1. Allgemeine Darstellung der Fehler

In den Wicklungen und im Eisenkern eines *idealen* Stromwandlers treten keine Verluste auf. Er benötigt keinen Magnetisierungsstrom und hat keine Streuung, er arbeitet somit fehlerfrei. Die primären und sekundären Amperewindungen stimmen überein, es ist mithin

$$I_1 W_1 = I_2 W_2$$

$$I_1 = \frac{W_2}{W_1} I_2 = \ddot{u} I_2,$$

wo  $\ddot{u}$  das Übersetzungsverhältnis bedeutet.

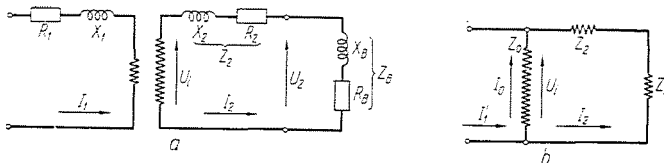


Abb. 1. Ersatzschaltbild des Stromwandlers

Beim *reellen* Stromwandler ergibt die Differenz zwischen primärer und sekundärer Erregung eine resultierende Erregung, die den nötigen Fluß aufrechterhält. Die durch ihn induzierte Spannung treibt den Strom  $I_2$  durch die inneren und äußeren Bürden (Abb. 1).

$$U_i = I_2 [(R_2 + jX_2) + (R_B + jX_B)]. \quad (1)$$

Das Fehlerdiagramm ergibt sich demnach, wie in den Abb. 2 u. Abb. 3 dargestellt. In weiteren finden die Fehlerdiagramme Abb. 3a, 3b und 3c Verwendung, wobei Sekundär- und Primärströme parallel gezeichnet werden.

Der auf die Sekundärseite reduzierte Primärstrom wird mit  $I_1' = \frac{I_1}{\dot{u}}$  bezeichnet.

Der Stromfehler und der Fehlwinkel werden durch den Magnetisierungsstrom  $I_0$  verursacht. Die entsprechenden Formeln lauten für den Stromfehler

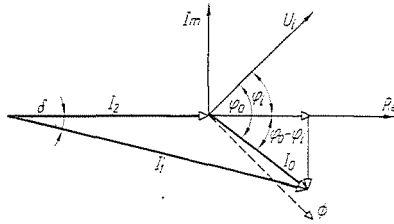


Abb. 2. Fehlerdiagramm des Stromwandlers

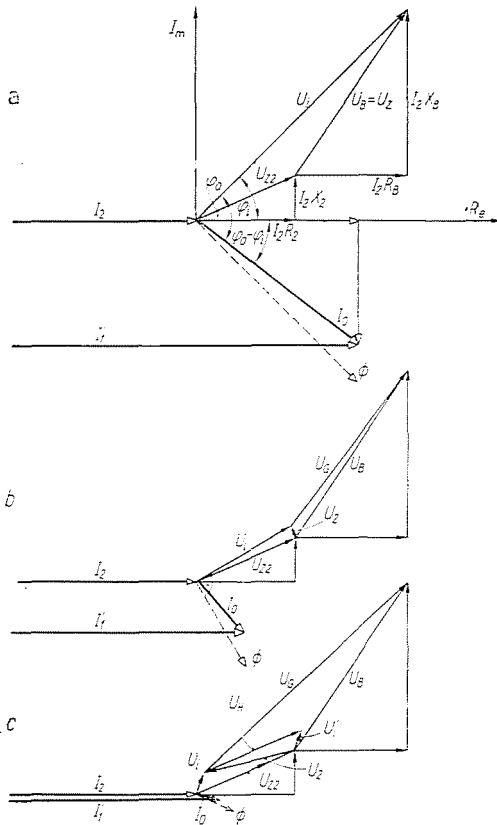


Abb. 3. Fehlerdiagramme des Stromwandlers a) ohne, b) u. c) mit Einsatz »negativen Bürden«

$$f = \frac{\ddot{u} I_2 - I_1}{I_1} = - \frac{\frac{I_1}{\ddot{u}} - I_2}{\frac{I_1}{\ddot{u}}} = - \frac{I_1' - I_2}{I_1'} \\ f \cong - \frac{I_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_i)}{I_1'} = - \operatorname{Re} \frac{I_0}{I_1'}, \quad (2)$$

für den Fehlwinkel

$$\delta \cong \operatorname{tg} \delta = \frac{I_0 \sin(\varphi_0 - \varphi_i)}{I_1'} = - \operatorname{Im} \frac{I_0}{I_1'}. \quad (3)$$

Da sowohl der Stromfehler als auch der Fehlwinkel durch den Magnetisierungsstrom  $I_0$  ausgedrückt werden können, wird zweckmäßig der relative Wert von  $I_0$  als komplexer Fehler definiert:

$$F = f + j\delta = - \frac{I_0}{I_1'}, \quad (4)$$

dessen absoluter Wert mit den Bezeichnungen der Abb. 1b sich zu

$$F = \left| \frac{I_0}{I_1'} \right| = \left| \frac{I_0}{I_2 + I_0} \right| = \left| \frac{\frac{U_i}{Z_0}}{\frac{U_i}{Z_B + Z_2} + \frac{U_i}{Z_0}} \right| = \left| \frac{Z_B + Z_2}{Z_B + Z_2 + Z_0} \right| \quad (5)$$

schreibt.

Aus (5) werden in folgenden Abschnitt Schlußfolgerungen für die Verminderung der Fehler gezogen.

## 2.2. Übliche Maßnahmen zur Verminderung der Fehler

Sowohl aus dem Vektordiagramm als auch aus den Formeln des vorangegangenen Abschnitts ist ersichtlich, daß die Fehler durch Verminderung von  $I_0$  herabgesetzt werden können. Im Nenner der Formel (5) spielt neben dem großen  $Z_0$  der bedeutend kleinere Wert  $Z_2 + Z_B$  keine wesentliche Rolle. Der Fehler wird gering, einerseits wenn  $Z_0$  groß ist, andererseits wenn  $Z_2 + Z_B$  im Zähler kleine Werte annimmt. Es ist daher leichter, einen Stromwandler für eine geringere Nennbürde (Nennlast) mit größerer Genauigkeit herzustellen. Die bisher bekannten Methoden zur Verminderung der Fehler lassen sich wie folgt gruppieren:

1. Zur Verminderung des Erregungsstromes, d. h. zur Erhöhung der Impedanz  $Z_0$  bestehen folgende Möglichkeiten:

a) Durch *Vergrößerung des Eisenkernquerschnitts* sinkt die Induktion des Eisenkerns innerhalb gewisser Grenzen beinahe proportional. Dies Möglichkeit ist jedoch beschränkt.

b) Der Erregungsstrom  $I_0$  vermindert sich durch *Erhöhung der Windungszahl*. Auch diese Möglichkeit wird durch die Menge des einzubauenden Materials beschränkt. Bei Erhöhung der Windungszahl wird überdies  $Z_2$  größer.

c) *Verwendung von Eisenmaterial großer Anfangspermeabilität* (z. B. Permalloy). Bei Herstellung von Präzisions-Stromwandlern ist dies eine äußerst wichtige Maßnahme.

d) Durch *zusätzliche Magnetisierung* kann erzielt werden, daß der Stromwandler auf jenem Abschnitt der Magnetisierungskurve arbeitet, auf dem die magnetische Leitfähigkeit die größte ist. Auch auf diese Weise kann die Intensität des Magnetisierungsstromes stark vermindert werden. Man unterscheidet zwischen belastungsabhängiger bzw. -unabhängiger zusätzlicher Magnetisierung. Auf diesem Gebiete sind zahlreiche schaltungstechnische Lösungen bekannt.

2. Eine andere Möglichkeit zur Verminderung der Fehler besteht in der Verwendung eines besonders *gemischten Eisenkernes*, der aus verschiedenen Werkstoffen so zusammengestellt wird, daß die Durchschnitts-Permeabilität innerhalb weiter Grenzen konstant bleibt. Mit einer linearen Magnetisierungskurve, die im ganzen Arbeitsbereich die gleiche Neigung hat, ergibt sich im ganzen Meßbereich des Wandlers ein konstanter Fehler, der durch Windungsabgleich in die Nähe von »0« verschoben werden kann (siehe Punkt 4).

3. Die zur Magnetisierung des Hauptkernes notwendige Erregung kann auch von einem anderen *Hilfskern* genommen werden, eine Maßnahme, die schon den Kompensationsprinzip nahe steht. Es gibt eine Fülle von Lösungen, die das Hinzufügen der fehlenden Magnetisierungsamperwindungen in den Sekundärkreis vorsehen. Alle diese Lösungen streben die völlige Entmagnetisierung des Hauptkernes an, ohne daß jedoch diese Entmagnetisierung irgendwie meßtechnisch erfaßt wurde. Auf diese Weise läßt sich z. B. für eine bestimmte Last der Fehler restlos beseitigen.

4. Bei den meisten Stromwandlern kommt als Lösung der *Windungsabgleich* in Frage, durch den die Fehlerkurve parallel verschoben werden kann. Der Windungsabgleich besteht darin, daß sich die effektive Windungszahlübersetzung

$$\ddot{u}_w = \frac{W_2}{W_1}$$

von der Nennübersetzung  $\ddot{u}_N$  des Stromwandlers unterscheidet. Zur Korrektur eines negativen Fehlers werden auf der sekundären Seite weniger oder auf der Primärseite mehr Windungen verwendet, als es die Nennübersetzung erforderlich machen würde. Überschreitet die Nennübersetzung die Windungszahl-

übersetzung um »s« %, so verschiebt sich die Fehlerkurve praktisch um s % senkrecht nach aufwärts in Richtung der positiven Fehler. Die Beziehung der Übersetzungen beträgt mit guter Annäherung

$$\ddot{u}_N = \left(1 + \frac{s}{100}\right) \ddot{u}_w.$$

Auf solche Weise kann der Fehler einfach durch bestimmte Sprünge korrigiert werden, die von der Windungszahl des Stromwandlers abhängig bleiben.

Mit Hilfe eines *Korrektions-Transformators* kann ein ähnlicher Erfolg erzielt werden wie durch den Windungszahlabgleich. Mit Hilfe dieses in den Sekundärkreis eingeschalteten kleinen Autotransformators läßt sich die Fehlerkurve gleichfalls parallel zu sich selbst in senkrechter Richtung verschieben. Mit einem geeigneten Transformator kann die Verschiebung praktisch kontinuierlich erfolgen. Darauf kommen wir noch in Abschnitt 3.4 zurück.

### 3. Fehlerverminderung mit Hilfe einer äußeren Stromquelle

#### 3.1. Stromwandler als Kompensationsgerät

Bei der Kompensations-Meßmethode werden zwei Größen mittels eines Meßgerätes miteinander verglichen. Die beiden Größen wirken, gegeneinander geschaltet, auf ein Null-Gerät, dessen Anzeige »0« wird, wenn die verglichenen Größen miteinander übereinstimmen. Auch der einfache Stromwandler kann als Kompensationsgerät betrachtet werden, in welchem die Primär- und Sekundär-Amperewindungen gegeneinander wirken. Die sekundären Ampere-windungen sind bestrebt, sich sowohl in Größe als auch in Phase der primären Ampere-windungen zu nähern. Ihre Differenz wird einen Fluß erzeugen, der der Spannung entspricht, die den Sekundärstrom aufrechterhält. Bei Stromwandlern wird im allgemeinen kein Gerät zur Anzeige der Gleichheit der Ampere-windungen benutzt. Zur Anwendung eines solchen wäre der Fluß im Eisenkern zu messen. Die Messung des Flusses kann mit Hilfe einer auf den Eisenkern des Stromwandlers gewickelten dritten (Tertiär-) Wicklung erfolgen (3). Zur Messung der in dieser induzierten Spannung dient ein Wechselstrom-Null-instrument. Der Fluß und die erregte Spannung würden vollkommen verschwinden, wenn sich sowohl die äußere als auch die innere Bürde auf »0« vermindern würden. Das aber ist nicht realisierbar, da der Stromwandler eben deshalb verwendet wird, um die äußere Bürde (Geräte, Relais) zu speisen. Auch der innere Widerstand kann nicht beliebig vermindert werden. Die dadurch verursachten Fehler lassen sich jedoch durch Speisung aus einer äußeren Stromquelle beseitigen, die als Verbraucher mit negativen Vorzeichen, d. h. als »negative Bürde« betrachtet werden kann. Gemäß Abbildung 4 sind Betrag

und Phasenwinkel des Stromes der äußeren Stromquelle  $G$  so zu regulieren, daß das Wechselstrom-Nullinstrument den Ausschlag »Null« hat. Nun ist der Fluß des Eisenkernes im Stromwandler Null, die sekundären und primären Erregungen stimmen miteinander überein, der Stromwandler funktioniert fehlerfrei.

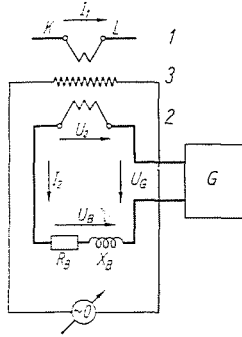


Abb. 4. Schaltungsschema des Wandlers mit Tertiärwicklung und mit äußerer Stromquelle im Sekundärkreis

### 3.2. Berücksichtigung des inneren Spannungsabfalles

Die am Stromwandler verwendete Wicklung »3« verhindert jedoch die Realisierung der gestellten Forderung, den eingebauten, fertigen Stromwandler von außen zu verbessern, ohne ihn einer inneren Änderung unterziehen zu müssen. Am fertigen Stromwandler sind nur Sekundärklemmen zugänglich,

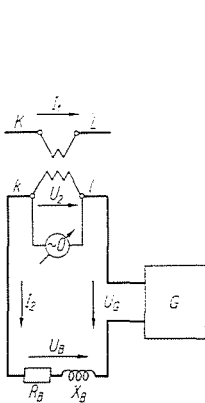


Abb. 5. Schaltungsschema des Wandlers mit äußerer Stromquelle im Sekundärkreis

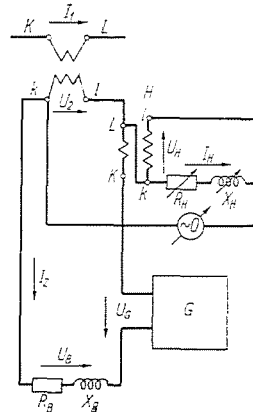


Abb. 6. Schema mit Korrektionsglied für den inneren Spannungsabfall

und somit nur die Klemmenspannung  $U_2$ . Wird hier ein Wechselstrom-Nullinstrument angelegt und die vorherige Methode (Abb. 5) angewendet, so kann die Entmagnetisierung des Kernes nur teilweise erreicht werden. Mit Hilfe der

äußeren Stromquelle läßt sich jetzt der Zustand erzielen, bei dem  $U_2$  Null wird, doch bedeutet dies nur, daß der Stromwandler ohne Außenbürde, im Klemmenkurzschluß arbeiten würde. Das Vektordiagramm der Schaltung ist aus Abb. 3b ersichtlich. Die sekundäre Klemmenspannung  $U_2$  gestaltet sich nun nach der Unempfindlichkeit des Nullinstrumentes. Der an der inneren Impedanz der Sekundärspule auftretende Spannungsabfall  $I_2 (R_2 + jX_2)$  wird auch jetzt durch die induzierte Spannung  $U_i$  gedeckt, zu deren Erregung ein bedeutend kleinerer Erregungsstrom benötigt wird als im ursprünglichen Zustand. Nun soll versucht werden, auch den dadurch verursachten Fehler zu beseitigen bzw. zu vermindern. Eine Lösung zeigt Abbildung 6. Hier ist der Sekundär-Klemmenspannung  $U_2$  die Spannung  $U_H$  des Sekundärkreises des Hilfsstromwandlers »H« hinzuzugeben. Diese stimmt in Betrag und Phase mit dem Spannungsabfall  $U_{Z_2} = I_2(R_2 + jX_2)$  überein. Die Schaltung wirkt so, als ob an die Klemmen des Nullinstrumentes die Spannung  $U_i$  geschaltet wäre. Mit Hilfe der äußeren Stromquelle  $G$  regelt man das Instrument auf Null ein, wodurch der flußfreie Zustand des Stromwandlers, d. h. der fehlerfreie Stromwandler angenähert werden kann. Die Spannungsverhältnisse sind für den Fall einer unvollkommenen Flußfreiheit aus dem Vektordiagramm (Abb. 3c) ersichtlich. Der geringe Wechselstrom im Stromwandler induziert die Spannung  $U_i$ . Praktisch deckt bereits die äußere Stromquelle mit der Klemmenspannung  $U_g$  sowohl den Leistungsbedarf der Außenbürde als auch den der Innenbürde auf der Sekundärseite des Stromwandlers. Im Vektordiagramm laut Abb. 3a war der Stromwandler noch Erzeuger, im Vektordiagramm laut Abb. 3c ist er bereits Verbraucher, die relative Lage der Klemmenspannung  $U_2$  hat sich im Vergleich zum Strom  $I_2$  geändert. Im Vektordiagramm laut Abb. 3c ist auch der auf das Nullinstrument auffallende Spannungsvektor

$$U'_i = U_2 + U_H$$

eingezeichnet, der im Falle eines empfindlichen Nullinstrumentes und eines richtig eingestellten Korrektionsgliedes  $U_i$  gleich ist.

### 3.3. Verwendung eines Verstärkers als negative Bürde

An Stelle der von Hand regulierbaren Stromquelle und des Wechselstrom-Nullinstrumentes kann gemäß Abb. 7 ein Verstärker eingeschaltet werden, wodurch man ein automatisches Korrektionsgerät erhält. An Stelle des Nullinstrumentes schaltet man die Eingangsklemmen des Verstärkers, die Ausgangsklemmen hingegen an die Stelle der äußeren Stromquelle. Hier erhält man die für den Sekundärkreis notwendige Spannung  $U_G$ . In der Funktion des Stromwandlers ist keine wesentliche Änderung im Vergleich zur Darstellung unter 3.1. eingetreten. Das Vektordiagramm kann auch jetzt ähnlich wie



in Abb. 3c aufgezeichnet werden. Die Spannung  $U_i'$  ist die Eingangsspannung des Verstärkers. Die Größe und die Phasenlage des Stromwandler-Flusses und damit auch die des Stromes  $I_0$  ändern sich derart, daß das durch den

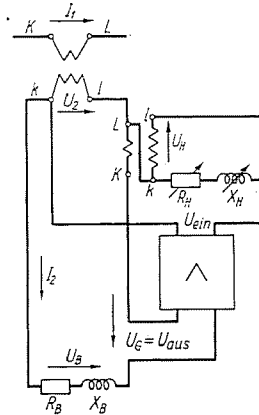


Abb. 7. Schaltungsschema mit Verwendung eines Verstärkers als negativer Bürde

Verstärker bestimmte Spannungsverhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung zustande kommt.

Der verwendete Verstärker arbeitet in dieser Schaltung mit starker Rückkopplung, er muß daher entsprechend hohen Anforderungen gerecht werden, damit der Betrieb stabil wird und keine Selbsterregung eintritt. Ein einfacheres Blockschema des mit Verstärker verkoppelten Stromwandlers ist

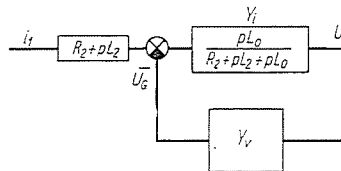


Abb. 8. Blockschema des Steuerkreises

in Abb. 8 dargestellt. Der mit der Übertragungsfunktion  $Y_v$  arbeitende Verstärker gibt die Ausgangsspannung  $U_G$  auf das Differenzbildungsglied. Die Formel des Steuergliedes lautet nach den Berechnungen von dr. I. Rác

$$Y_i(p) = \frac{pL_0}{R'_2 + p(L_0 + L'_2)},$$

worin  $L_0$  die Induktivität, die die Reaktanz  $Z_0$  bestimmt,  $R'_2 = R_2 + R_B$  die Widerstände im Sekundärkreis und  $L'_2 = L_2 + L_B$  die Resultante der Induktivitäten im Sekundärkreis bezeichnen.

Der Verstärker ist so zu bemessen, daß die Funktion  $Y_v$  z. B. das Stabilitätskriterium Nyquist erfülle, d. h. also das Amplitudenphasendiagramm  $Y(j\omega) = Y_i \cdot Y_v$  darf den Punkt  $(-1, +j0)$  nicht durchschneiden oder umfassen. Da der Verstärker nur in einem kleinen Frequenzband arbeitet, kann diese Forderung ohne größere Schwierigkeiten erfüllt werden. An den Verstärker werden noch folgende Forderungen gestellt:

Frequenzband	10 Hz — einige kHz	
Ausgangsleistung	100 VA oder mehr	
Eingangsspannung	0,1 V oder weniger	
Eingangswiderstand	mehr als 5 kOhm	
	bei 5 A Sekundär-Nennstrom	bei 1 A Sekundär-Nennstrom
Ausgangsspannung	10 V oder mehr	50 V oder mehr
Ausgangsstrom	5—10 A oder mehr	1—2 A
Anpassungswiderstand	0,5—2 Ohm	2—10 Ohm oder mehr

### 3.4. Möglichkeiten der praktischen Anwendung

Durch die beschriebenen Schaltungen kann der praktisch fehlerfreie Stromwandler nur in dem Falle verwirklicht werden, wenn die Nennübersetzung des Stromwandlers der Windungszahl gleich ist. In der Praxis werden

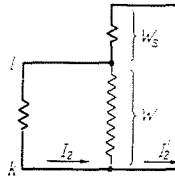


Abb. 9. Autotransformator zur Kompensation des Windungsabgleichs

aber »leider« fast alle Stromwandler mit Windungsabgleich hergestellt. Bei der oben beschriebenen Methode sind die primären und sekundären Amperewindungen des Stromwandlers einander gleich, d. h. der mit der effektiven Windungsübersetzung  $\ddot{u}_w$  multiplizierte Sekundärstrom wird dem Primärstrom gleich sein. Rechnen wir mit den Nennstromübersetzung, so erhalten wir positive Fehler, die dem Windungsabgleich gleich entsprechen. Da wir wissen, daß sich die Fehlerkurven durch den Windungsabgleich parallel zueinander verschieben, könnten wir anhand des bekannten Ausgleichsmaßes die gemessenen Ströme durch Berechnung ermitteln. Das ist aber keine der Praxis angepaßte Methode. Zweckmäßiger wird die Wirkung des Windungsabgleiches mit Hilfe eines weiteren Korrektionsgliedes korrigiert, d. h. die Windungszahlkorrektur »zurückkorrigiert«.

Der Korrektionstransformator kann ein kleiner Autotransformator sein, da es sich nur um eine 1–2 %ige Stromübersetzung handelt. Bezeichnen wir (wie früher) die Windungszahlkorrektion des geprüften Stromwandlers mit  $s$  — d. h. daß die Windungszahlübersetzung um » $s$ « % kleiner ist als die Nennübersetzung —, so muß der Korrektionstransformator den Strom um » $s$ « % vermindern. Das Windungszahlverhältnis wird daher auf Grund der Abbildung 9 zu

$$I_2 W = I'_2 (W + W_s)$$

$$\frac{I_2}{I'_2} = \frac{W + W_s}{W}$$

$$\frac{I_2 - I'_2}{I'_2} = \frac{W_s}{W} = \frac{s}{100}$$

ermittelt.

Das endgültige Schaltschema kann auf Grund der Abbildung 10 gezeichnet werden. Hier figurieren drei Elemente: 1. der Verstärker, 2. das Glied, das den inneren Spannungsabfall des Stromwandlers kompensiert, und 3. der

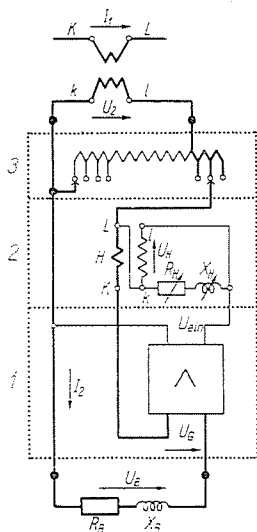


Abb. 10. Schema der Endschaltung

Korrektionswandler. Sie können in einen gemeinsamen Kasten zusammengebaut werden. Zwei Klemmen dieses »Korrektionsgerätes« sind mit den Sekundärklemmen des betreffenden Stromwandlers, die anderen zwei mit der Bürde zu verbinden. Vor der Messung stellt man mit Hilfe zweier Regelelemente die dem Sekundärwiderstand  $R_2 + jX_2$  des Stromwandlers entsprechenden Werte an  $R_H$ ,  $X_H$ , und den dem Windungsabgleich entsprechenden Wert am

Autotransformator ein. Kennt man die Daten der sekundären Bürde des Wandlers nicht genau, so kann man z. B. bei Niederspannungs-Stromwandlern die Korrektur von  $X_2$  oft auch unterlassen, bei Hochspannungswandlern dagegen annehmen, daß  $X_2$  ungefähr die Größe von  $R_2$  hat. Der Hilfsstromwandler  $H$  kann z. B. eine Übersetzung von  $5/0,05$  A haben, es entspricht also auch  $R_H$  einem Widerstand von geringer Belastbarkeit, der natürlich einen 100fach größeren Ohm-Wert aufweist als der Sekundärwiderstand des geprüften Stromwandlers.

Der Korrekturtransformator ist mit mehreren Abgriffen zu versehen, mit Windungszahlen, die den in der Praxis vorkommenden Windungszahlkorrekturen entsprechen.

Der Korrekturtransformator kann auch in eine Schaltung mit der von Hand geregelten Stromquelle  $G$ , z. B. in eine Schaltung gemäß Abbildung 6 eingebaut werden. Dies macht ihn zur Erfüllung der am Anfang unseres Artikels bereits erwähnten folgenden praktischen Aufgaben geeignet:

1. Eingebaute Stromwandler von geringer Klassengenauigkeit (z. B. solche der Klasse 3) können ohne jede Umgestaltung zu Präzisionsmessungen geeignet gemacht werden. Dies ist besonders für Hochstromwandler eine wichtige Feststellung, denn selbst wenn ein Präzisions-Stromwandler zur Verfügung stünde, stellt der Einbau große Hindernisse dar. Mit Hilfe der negativen Bürde kann aber nach Anschluß an die Sekundärklemme des eingebauten Stromwandlers sofort gemessen werden. Statt einer Reihe von Präzisions-Stromwandlern genügt es, über *eine* negative Bürde zu verfügen.

2. Von dem mit negativer Bürde ausgerüsteten Stromwandler kann praktisch jede beliebig große Bürde gespeist werden, ohne daß sich die Meßfehler wesentlich ändern würden. Die Belastungsbürde kann ohne weiteres ein Vielfaches der Nennbürde betragen. In der Praxis entsteht oft dieser Anspruch, z. B. wenn die Bürde weit entfernt vom Stromwandler liegt.

3. Mit der negativen Bürde läßt sich der Meßbereich des eingebauten Stromwandlers weitgehend in Richtung der kleinen Ströme erweitern. Selbst bei einigen Prozent des Nennstromes können Präzisionsmessungen mit verhältnismäßig großen Bürden vorgenommen werden.

4. Der Meßbereich des eingebauten Stromwandlers kann auch auf das Gebiet der Hochströme ausgedehnt werden, u. zw. bis zu der durch die Erwärmung bzw. die Leistungsfähigkeit der negativen Bürde bestimmten Grenze. Besonders wenn ein Verstärker verwendet wird, bedeutet seine Ausgangsleistung eine Beschränkung. Will man mit üblichen Geräten messen, so braucht auch kein Zwischenstromwandler eingeschaltet zu werden.

Zur Messung von zeitlich veränderlichen Vorgängen verwendet man als negative Bürde selbstverständlich nur einen Verstärker. Bei der Nachprüfung sehr langsam veränderlicher stationärer Vorgänge kann sich auch die von Hand geregelte negative Bürde gut bewähren. Zum Beispiel können mit

Hilfe der von Hand geregelten negativen Bürde auch die Leerlaufverluste einer an das Netz angeschlossenen Synchronmaschine auch mit einem zur Messung der Betriebsströme bestimmten, eingebauten Stromwandler, entsprechend genau gemessen werden. Regelt man die leerlaufende Synchronmaschine auf  $\cos \varphi = 1$  ein, so nimmt sie nur einige Prozent ihres Nennstromes auf. Trotzdem kann mit Hilfe der negativen Bürde so gemessen werden, als ob man einen Stromwandler des entsprechenden Meßbereiches und einer höheren Genauigkeitsklasse verwenden würde.

#### 4. Experimentelle Ergebnisse mit einer Modellschaltung

Um sicher feststellen zu können, wie die vorgeschlagene Schaltung arbeitet, wurde im Laboratorium ein Modell zusammengestellt. Die technischen Daten der Modellschaltungselemente sind folgende:

Prüfling	Stromwandler »Transvill« Bp. Typ. ALO Nv 175 1962 J. Genauigkeitsklasse 3 Nennstrom 30/5A. Nennleistung 5VA. Nennbürde 0,2 $\Omega$ Windungszahlverhältnis: $\ddot{u}_w = \frac{10}{59}$
Verstärker	Handelsüblicher NF-Verstärker Typ VR 102/mit Röhren $2 \times 0551, 2 \times ECC4,$ $3 \times AZ4$ Leerlauf $U_{\text{aus}}: U_{\text{eing}} = 140\text{V/IV}$ , bei 50 Hz Kurzschluß $I_{\text{aus}}: U_{\text{eing.}} 2,5\text{A/IV}$ , bei 50 Hz Sättigung bei $\sim 0,5\text{V}$ Eingangsspannung. max. unverzerrte Ausgangsleistung ca. 25 VA (gemessen bei 50 Hz)
Anpassungstrafo	Leistung 1kVA Primär 100V. Sekundär 7,5V u. 12,5V. Innere Bürde 8/0,08 $\Omega$
Äußere Stromquelle »G« bestehend aus	Induktionsphasenschieber 0,5kVA 380/220V. Toroid-Transformator 220/0 : 240V 2,5 A mit Anpassungstrafo wie oben.

Nullgerät Vibrationsgalvanometer RFT.

Stromwandlerprüfeinrichtung nach Schering-Alberti, Hersteller Hartmann Braun.

Es wurden die Stromfehler und Phasenfehler des Wandlers mit Einsatz der negativen Bürde bei (1%, 3%), 10%, 20%, 50%, 100%, (200%) des Nennstromes und bei 0,1—1,8 Bürde, d. h. bei 50% + 900% der Nennlei-

stung, gemessen. Die Fehlerkennlinien des Wandlers in gewöhnlichem Betrieb wurden jedes Mal zum Vergleich aufgenommen, und dies auch deshalb, weil sich der Charakter der Bürde von Schaltung zu Schaltung etwas änderte.

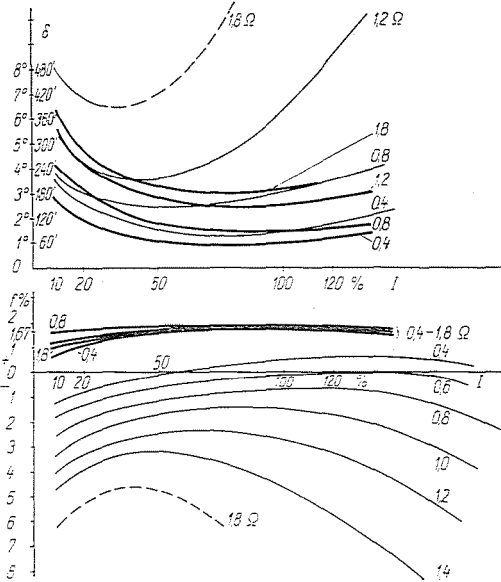


Abb. 11. Abhängigkeit von Stromfehler und Winkelfehler vom Strom ohne und mit Verstärker ohne Korrektionstransformator. Der Parameter ist die Bürde

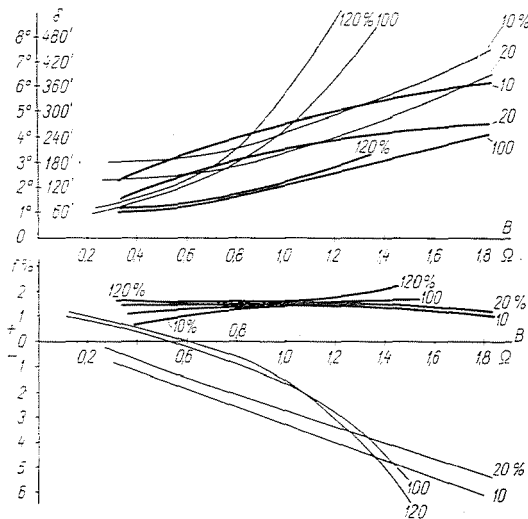


Abb. 12. Abhängigkeit von Stromfehler und Winkelfehler von der Bürde ohne und mit Verstärker ohne Korrektionsglied. Der Parameter ist der Strom

Die Abb. 11—14 stellen die Ergebnisse dar, u. zw. bezeichnen die dünnen Linienzüge den gewöhnlichen Betrieb des Wandlers, die stark ausgezogenen Linienzüge den Wandler mit negativer Bürde.

Die Abb. 11 und 12 zeigen die Ergebnisse der gleichen Meßreihe, die an einer Schaltung ähnlich der in Abb. 5 dargestellten durchgeführt wurde, d. h.: Wandler in gewöhnlichem Betrieb und Wandler mit negativer Bürde ohne Korrektionsglied, aber mit Verstärker statt der Stromquelle G.

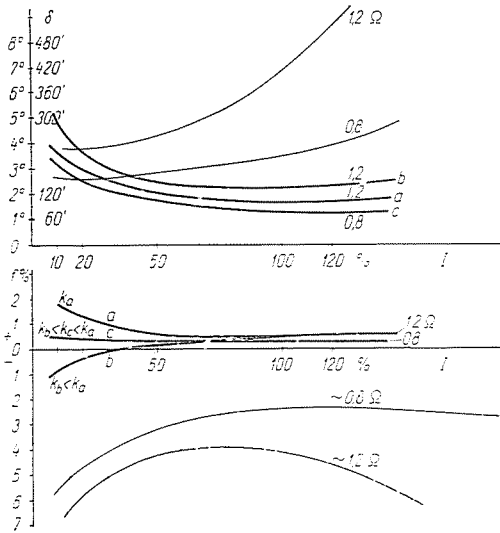


Abb. 13. Fehlerkurven ohne und mit Verstärker mit Korrektionstransformator

Die Abb. 13 zeigt die Ergebnisse mit der Schaltung laut Abb. 10, d. h. mit Einsatz des Autotransformators zur Aufhebung des Windungsabgleiches, aber ohne Korrektionsglied für den inneren Spannungsabfall. Dabei wurde der Verstärkungsfaktor  $K$  geändert, und zwar so, daß die Kurve »a« (wegen der Selbsterregung) dem größtmöglichen Verstärkungsfaktor ( $K_a$ ), die Kurve »b« einem willkürlich kleineren Verstärkungsfaktor ( $K_b$ ) und die Kurve »c« einem Verstärkungsfaktor ( $K_c$ ) entspricht, der so gewählt wurde, daß die Fehlerkennlinie fast parallel zur »x« Achse verläuft. Auf diese Weise wurde es klar, daß die Krümmung der Stromfehlerkennlinie bei kleinen Strömen, einschließlich des Vorzeichens der Krümmung, von der Größe des Verstärkungsfaktors abhängt. Man kann also durch geeignete Wahl des Verstärkungsfaktors auch bei kleineren Strömen mit verringerten Stromfehlern messen.

Endlich zeigt die Abb. 14 die Fehler beim Einsatz eines »idealen« Verstärkers laut Abb. 6, aber gleichfalls mit einem Autotransformator, d. h. bei Handregelung der Hilfsstromquelle G. gemäß der Anzeige eines Vibrationsgalvanometers. Die Kurve »d« entspricht den Fehlern der Schaltung mit Windungsabgleichkompensation durch den Autotransformator mit einem Über-

setzungsverhältnis  $\frac{59}{60}$ , aber ohne Korrektionsglied für innere Spannungsabfälle. Der kleine negative Stromfehler ergibt sich durch den Magnetisierungsstrom, der für den Fluß zum Induzieren der inneren Spannung  $U_i$  gemäß Abb. 3b nötig ist. Die Kurve »e« entspricht den Fehlern der Schaltung mit Windungsabgleichkompensation durch den Autotransformator  $\frac{59}{60}$  und mit Korrektionsglied für innere Spannungsabfälle. Dieses Korrektionsglied wurde

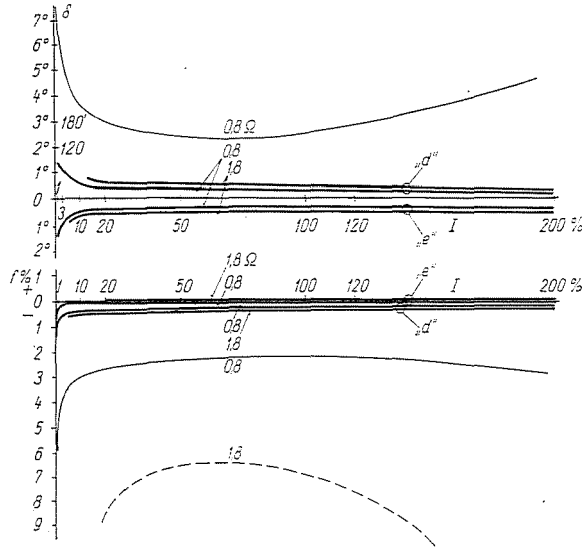


Abb. 14. Fehlerkurven ohne und mit handgeregeltem »idealem« Verstärker mit Korrektionstransformator. »d« ohne Korrektionsglied, »e« mit Korrektionsglied

gebildet durch einen Normalwandler und einen Widerstand im Sekundärkreis, so daß nur der innere Widerstand des Prüflings und nicht auch der Blindwiderstand korrigiert wurde. Man sieht, daß der Wandler trotz der fast 10fachen Bürde im Sekundärkreis in einem weiten Strombereich mit sehr kleinen Fehlern arbeitet.

Schließlich sei noch erwähnt, daß die Schaltung bei höheren Frequenzen (einige kHz) und bei niedrigen Frequenzen (einige Hz) zur Selbsterregung neigte. Die höhere Eigenfrequenz wurde mit einem Filter am Verstärkerausgang mit Erfolg gedämpft. Die niedrigen nichtlinearen Eigenschwingungen erzwangen eine Verstärkungsbegrenzung, so daß mit einem Spannungsverstärkungsfaktor von knapp mehr als 1 gearbeitet wurde. Die Ursache liegt in der nicht besonders guten Qualität des handelsüblichen Verstärkers, der eben zur Verfügung stand, und der auch im Grenzgebiet seines Arbeitsbereiches benutzt wurde. Die unvollkommene Glättung der Anodenspannung des Verstärkers dürfte auch die positiven Fehler der Abbildung 13 verursacht haben.



## 5. Zusammenfassung

Die Arbeit bespricht bekannte Maßnahmen zur Fehlerverminderung in Stromwandlern. Es wurde darauf hingewiesen, daß diese Maßnahmen nur während der Fertigung des Wandlers anwendbar sind. Häufig taucht die Forderung auf, am fertigen eingebauten Wandler von außen her (ohne Berührung der Konstruktion) die Fehler vermindern zu können. Mit Hilfe der Formeln für die Fehler des Wandlers wird nachgewiesen, daß man den Fehler gänzlich ausschalten kann, wenn die gesamte Belastungsbürde des Wandlers auf Null herabgesetzt wird. Zugleich unternehmen die Verfasser den Versuch, am Wandler ein Kompensationsmeßverfahren anzuwenden, und mit einem Nullgerät das Verschwinden des Flusses und der inneren Spannung als Gleichgewichtsmerkmal festzulegen. Um dies zu verwirklichen, wird die für die Kompensation benötigte Vergleichsgröße, nämlich der sekundäre Strom, einer getrennten, von Hand geregelten Stromquelle entnommen. Mit einem Verstärker wurde diese Anordnung zu einer automatischen Kompensationseinrichtung entwickelt. Der Windungsabgleich und die innere Bürde wurden bei der genauen Strommessung als störend erkannt. Verfasser geben Maßnahmen zur Beseitigung dieser Störungen an. Die Besprechung der einzelnen Glieder der kompletten Schaltung, einschließlich der Stabilitätsbedingungen der rückgekoppelten Automatik, schließt den theoretischen Teil ab.

Auch die Möglichkeiten der praktischen Anwendung der Schaltung werden besprochen. Als Ergänzung werden experimentelle Ergebnisse einer Modellschaltung mit Stromwandler 5VA, Kl. 3, 30/5A angegeben, die beweisen, daß mit diesem Wandler selbst bei 9facher Bürde im Sekundärkreis das Messen in der vorgeschlagenen Schaltung mit hoher Genauigkeit möglich ist.

## Literatur

1. HAGUE: Instrument Transformer. Pitman 1936.
2. BAUER, R.: Die Meßwandler. Springer 1953.
3. OBRADOVIC, I.—MILJANI, P.—SPIRIDONOVIC, S.: »Prüfung von Stromwandlern mittels eines Stromkompensators und eines elektrischen Hilfssystems.« ETZ/A Bd. 78/H. 19.
4. LINCK, H. E.: »Die Entwicklung der Wandlermeßtechnik«. Zt.f. Instr. 1959, S. 1—7.
5. NEUMAN: Das Messen mit elektrischen Geräten. Springer Verlag 1958.

GY. ISTVÁNFY TH. SŁUSZKIEWICZ,	}	Budapest, XI., Egry József u. 18. Ungarn
-----------------------------------	---	--