

EINE NEUE KOMPENSATIONSMETHODE ZUR MEßWANDLERPRÜFUNG

Von

L. SCHNELL

Lehrstuhl für Elektrische Maschinen und Messungen der Technischen Universität,
Budapest

(Eingegangen am 13. November 1958)

A) Einleitung

Zur Bestimmung der Übersetzungs- und Winkelfehler von Strom- und Spannungswandlern mit der Nullmethode sind sehr viele Verfahren bekannt. Diese können in zwei Gruppen geteilt werden.

In die erste gehören die absoluten Prüfverfahren [2—6]. Diese Verfahren bestehen darin, daß bei Prüfung von Stromwandlern der Primärstrom über einen bekannten Wirkwiderstand geführt wird, und die an diesem abgegriffene Spannung mittels der Kompensationsmethode mit der dem Sekundärstrom verhältnisgleichen Spannung verglichen wird. Bei Prüfung von Spannungswandlern wird die an die Primärklemmen gelangende Spannung durch einen ohmschen oder kapazitiven Spannungsteiler geteilt und diese geteilte Spannung — ebenfalls mittels der Kompensationsmethode — mit der Sekundärspannung des Spannungswandlers verglichen.

Die zweite Gruppe bezieht sich auf das Vergleichsverfahren [2, 7—18]. Bei diesem werden der Sekundärstrom bzw. die Sekundärspannung des zu überprüfenden Meßwandlers mit dem Sekundärstrom bzw. der Sekundärspannung eines Meßwandlers mit bekannten Daten und äußerst kleinem Fehler, des sog. Normalwandlers, verglichen, und zwar ebenfalls mittels der Kompensationsmethode.

Das absolute Prüfverfahren ist in bezug auf Genauigkeit dem Vergleichsverfahren überlegen, die Durchführung der Messung erfordert jedoch große Umsicht und laboratoriumtechnische Umstände. In der Praxis begnügt man sich oft mit einer verhältnismäßig geringeren Meßgenauigkeit, dagegen wird gewünscht, daß die Messung — zeitweise auch unter ungünstigen Verhältnissen — einfach durchführbar sei.

Die Anwendung des absoluten Verfahrens lohnt sich nur bei der Prüfung laboratorischen Charakters von Meßwandlern der strengeren Fehlerklassen und von Normalwandlern, wogegen die Vorteile des Vergleichsverfahrens sich bei den betriebsmäßigen Messungen zeigen.

Die Übersetzungs- und Winkelfehler der Meßwandler werden üblicherweise in Funktion des Stromes bzw. der Spannung, bei gleichbleibender Belastung (Belastungsimpedanz) aufgenommen. Mit Rücksicht darauf, daß

die Fehler sowohl vom Absolutwert der Belastungsimpedanz, wie auch von deren Phasenwinkel abhängig sind, ist es erforderlich, daß diese Werte der Belastungsimpedanz bekannt seien. Die Messung der Belastungsimpedanz verursacht grundsätzlich keine Schwierigkeiten, im allgemeinen stehen jedoch die hierzu nötigen Einrichtungen am Meßort nicht zur Verfügung. Deswegen ist jene Forderung begründet, daß die Meßwandlerprüfeinrichtung gleichzeitig auch zur Messung der Belastungsimpedanz geeignet sei. Dieser Forderung wird von einem Teil der von verschiedenen Firmen hergestellten Einrichtungen auch Genüge geleistet [16, 17].

Die im nachfolgenden beschriebene Einrichtung, die nach dem Vergleichsverfahren arbeitet, ist außer der Messung von Übersetzungs- und Winkelfehlern auch zum Messen der Wirk- und Blindkomponenten der Belastungsimpedanz ebenfalls geeignet. Außerdem ermöglicht sie, als Vektormesser und als Komplex-Kompensator, die Bestimmung der aufeinander normalen Komponenten von Strömen und Spannungen.

B) Meßtechnische Grundlagen

Es ist bekannt, daß der in Abb. 1a dargestellte parallele Stromkreis, falls seine Glieder unter Berücksichtigung der Bedingung

$$R_L = R_C = R = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

gewählt werden, zwei bedeutende Eigenschaften besitzt :

1. \bar{I}_L läuft im Verhältnis zu \bar{I}_C bei jeder Frequenz um $1/4$ Periode nach.
2. Die Impedanz \bar{Z}_{AB} zwischen Punkten $A-B$ ist bei jeder Frequenz rein ohmschen Charakters und ist gleich R :

$$\bar{Z}_{AB} = R_L = R_C = R$$

Es gilt nämlich :

ad 1.

$$\bar{I}_L = \bar{U}_{AB} \frac{1}{R_L \left(1 + j \frac{\omega L}{R} \right)}$$

$$\bar{I}_C = j \bar{U}_{AB} \frac{\omega C}{1 + j \omega C R_C}$$

Falls $\frac{L}{R_L} = C R_C$ und $R_L = R_C = R$, dann ist der Phasenwinkel zwischen \bar{I}_L und \bar{I}_C tatsächlich von der Frequenz unabhängig 90° .

ad 2.

wenn

= \angle

strom

laut
die S
nung
Quac
griffe
daß
sten
Anw
ist e
breit

Ziffe
könn

ad 2.

$$\bar{Z}_{AB} = \frac{(R + j\omega L) \left(R - j\frac{1}{\omega C} \right)}{2R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}} = R \frac{R + \frac{L}{CR} + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{2R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = R$$

wenn $R = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Das Vektordiagramm der Schaltung ist in Abb. 1b dargestellt. $\varphi = \angle(\bar{I}, \bar{I}_L)$ ist selbstverständlich nicht mehr unabhängig von der Frequenz:

$$\varphi = \arctan \omega RC \tag{2}$$

Der von PEDERSEN beschriebene und in Abb. 2 dargestellte Wechselstromkompensator [1] besteht aus zwei gleichen, in Reihe geschalteten Kreisen

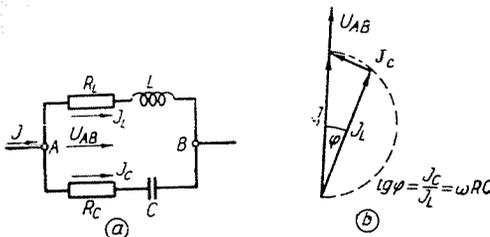


Abb. 1

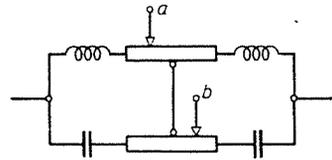


Abb. 2

laut Abb. 1a. Der Kompensator liefert zwischen den Schleifkontakten a—b die Summe zweier, zueinander um $1/4$ Periode in Phase verschobenen Spannungen und ist zum Kompensieren von Spannungsvektoren in jedwedem Quadrant geeignet. Das Verhältnis der an den einzelnen Widerständen abgegriffenen Spannungen ist laut Gleichung (2) frequenzabhängig. Um zu erreichen, daß die Absolutwerte der an den Schleifkontakten a und b abgreifbaren höchsten Spannungen gleich groß seien, ist im Falle niedriger Frequenzen die Anwendung eines Kondensators von sehr hoher Kapazität erforderlich. Dies ist eben eine der Ursachen, warum sich diese Kompensatorart nicht verbreiten konnte.

C) Beschreibung der neuen Einrichtung

Abb. 3 zeigt die Grundschaltung der Meßwandlerprüfeinrichtung. Die Ziffern 1—10 bezeichnen die Klemmen des Gerätes. Mit dieser Einrichtung können folgende Messungen vorgenommen werden:

a) Bei *Stromwandlerprüfung* schließt sich der Sekundärstrom \bar{I}_{2N} des Normalwandlers N über Nebenschlußwiderstand R_N , der Sekundärstrom \bar{I}_{2X} des zu prüfenden Stromwandlers X über Nebenschlußwiderstand R_X . Die Schalter K_1-K_2 sind in Stellung I , so daß der Widerstand R_N mit dem Kreis AB und der Widerstand R_X mit dem Kreis $A'B'$ parallel geschaltet ist. Kreis

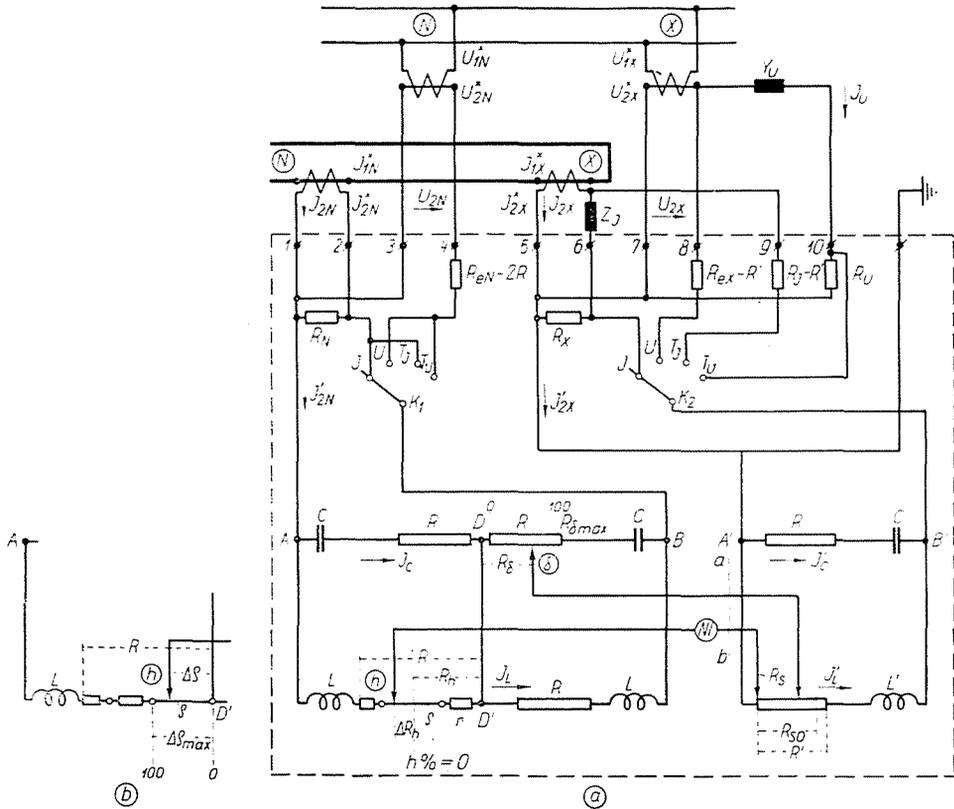


Abb. 3

AB besteht aus zwei, in Reihe geschalteten, aus gleichwertigen Gliedern aufgebauten parallelen Resonanzkreisen AD und DB . Die Glieder der Kreise AD, DB und $A'B'$ befriedigen aufs Genaueste die Bedingung (1). Da in diesem Falle die resultierende Impedanz sowohl des Kreises AB als auch des Kreises $A'B'$ rein ohmschen Charakters ist, ist \bar{I}_{2N} mit \bar{I}'_{2N} und \bar{I}_{2X} mit \bar{I}'_{2X} in Phase. Es soll auch noch die Bedingung gestellt werden, daß für Kreise AB und $A'B'$ die Gleichung

$$\frac{L}{R} = \frac{L'}{R'} \quad (3)$$

des \bar{I}_{2X}
Die
Kreis
Kreis

bestehe. Hiermit wird erreicht, daß der Phasenwinkel zwischen \bar{I}_L und \bar{I}'_L mit jenem zwischen \bar{I}_{2N} und \bar{I}_{2X} übereinstimme. Demzufolge wird daher, falls \bar{I}_{2N} und \bar{I}_{2X} in gleicher Phase sind, auch \bar{I}_L und \bar{I}'_L in Phase sein.

Der Widerstand R' des Kreises $A'B'$ ist als Spannungsteiler ausgebildet. Die an der Strecke R_s dieses Widerstandes abgegriffene Spannung wird mit der Summe der beiden, an Strecke $R_h + \Delta R_h$ des Kreises AB und an Strecke R_δ abgegriffenen, aufeinander normalen Spannungen kompensiert. Im ausgeglichenen Zustand — was vom Nullinstrument NI angezeigt wird — gibt die Lage des Schleifkontaktes h unmittelbar den prozentuellen Übersetzungsfehler und die Lage des Schleifkontaktes δ — bei einer gegebenen Frequenz — unmittelbar den Winkelfehler an. Der Spannungsteiler R_s ist auf einen Wert einzustellen, bei welchem — fehlerlose Stromwandler vorausgesetzt — die am R_s auftretende Spannung mit jener am Widerstand R_h gleich sei. Beim Wert R_h findet man daher den Nullwert des prozentuellen Übersetzungsfehlers ($h\%$).

Hat der Winkelfehler negativen Wert, bewegt sich der Schleifkontakt δ am Widerstand R der Strecke AD .

Im Falle mehrerer Meßgrenzen ist jedem sekundären Nennstromwert je ein bestimmter Wert R_N und R_X zugeordnet. Diese Werte sind so zu wählen, daß die Werte von I'_{2N} und I'_{2X} bei Nennstrom stets konstant bleiben. Bei eingehender Untersuchung der Verhältnisse ergeben sich folgende Resultate.

Mit den Bezeichnungen der Abb. 3 ergeben sich die Zweigströme des Kreises AB zu:

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_{AD}}{R \left(1 + j \frac{\omega L}{R} \right)} = \frac{\bar{U}_{AD}}{R (1 + j \omega CR)} = \frac{\bar{U}_{AD}}{R} \frac{1 - j \operatorname{tg} \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} = \frac{\bar{U}_{AD}}{R} \bar{A}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{U}_{AD}}{R + \frac{1}{j \omega C}} = j \omega C \bar{U}_{AD} \frac{1}{1 + j \omega CR} = j \omega C \bar{U}_{AD} \frac{1 - j \operatorname{tg} \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} = j \omega C \bar{U}_{AD} \bar{A}$$

$$\bar{A} = \frac{1 - j \operatorname{tg} \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$$

Es sei $\bar{I}_{2N} = k_N \bar{I}_{2N}$ und $\bar{I}'_{2X} = k_X \bar{I}_{2X}$

wo $k_N = \frac{R_N}{R_N + 2R}$ und $k_X = \frac{R_X}{R_X + R'}$

Nachdem

$$\bar{U}_{AD} = \bar{I}'_{2N} R = k_N \bar{I}_{2N} R,$$

$$\bar{I}_L = k_N \bar{I}_{2N} \bar{A}$$

$$\bar{I}_C = j \omega k_N \bar{I}_{2N} C R \bar{A}$$

(3)

auf-
reise
a in
1 des
mit
reise

Ähnlicherweise wird im Kreis $A'B'$

$$\bar{I}'_L = \frac{\bar{U}_{A'B'}}{R' \left(1 + j \frac{\omega L'}{R'}\right)} = \frac{\bar{U}_{A'B'}}{R'} \frac{1 - j \operatorname{tg} \varphi'}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi'} = \frac{\bar{U}_{A'B'}}{R'} \bar{A}' = k_X \bar{I}_{2X} \bar{A}'$$

$$\bar{A}' = \frac{1 - j \operatorname{tg} \varphi'}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi'}$$

Beim Einhalten der Bedingung laut (3) wird erreicht, daß

$$\bar{A} = \bar{A}'$$

sei.

Im ausgeglichenen Zustand stimmt die an den Schleifkontakten h und δ abgegriffene Spannung $\bar{U}_{h\delta}$ mit der am Widerstand R_s abgegriffenen Spannung \bar{U}_s überein :

$$\bar{U}_{h\delta} = \bar{U}_s$$

$$k_N \bar{I}_{2N} \bar{A} (R_h + \Delta R_h + j \omega R C R_\delta) = k_X \bar{I}_{2X} \bar{A} R_s \quad (4)$$

Es sei die Meßgrenze der Einrichtung an der Seite des Normalwandlers I_{2N}^* , an der Seite des zu überprüfenden Wandlers I_{2X}^* und

$$\frac{I_{2X}^*}{I_{2N}^*} = \frac{I_{2X}}{I_{2N}} = \frac{a_N}{a_X} = m_I \quad (5)$$

wo I_{2X} und I_{2N} — fehlerlosen Zustand vorausgesetzt — die effektiven Sekundärströme, a_N und a_X aber die Nennstromübersetzungen der Stromwandler bedeuten. In diesem Falle wird im ausgeglichenen Zustand der Schleifkontakt δ in Stellung $R_\delta = 0$ sein (der Wert des Winkelfehlers ist Null), und es wird gewünscht, daß der Schleifkontakt h in Stellung $\Delta R = 0$ sei, was einem Übersetzungsfehler von 0% entspricht. Um dies zu erreichen, ist der Wert R_s auf einen bestimmten Wert R_{s0} einzustellen. Gleichung (4) wird sich daher folgend ändern :

$$k_N \bar{I}_{2N} R_h = k_X \bar{I}_{2X} R_{s0} \quad (6)$$

woraus

$$R_{s0} = \frac{k_N R_h}{k_X m_I}$$

Es ist zweckmäßig, für den Widerstand R_{s0} einen runden Wert, z. B. 100 Ohm zu wählen. Damit der Widerstand R_{s0} bei jedweder Meßgrenze

seinen Wert unverändert behalte, — nachdem Wert R_h konstant ist — soll auch $\frac{k_N}{k_X m_I}$ auf konstantem Wert gehalten werden.

Hat der zu überprüfende Stromwandler im Vergleich zum Normalwandler einen Übersetzungs- und Winkelfehler, dann wird (Abb. 4)

$$\bar{I}_{2X} \neq m_I \bar{I}_{2N}, \quad \text{sondern} \quad \bar{I}_{2X} = m_I \bar{I}_{2N} (a + jb)$$

und annäherungsweise, bei den vorkommenden kleinen Winkeln,

$$I_{2X} \approx m_I I_{2N} \cdot a \quad (7)$$

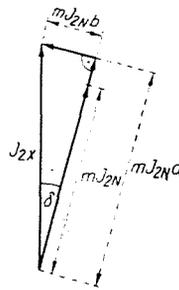


Abb. 4

$a = 1 + \frac{h\%}{100}$, wo $h\%$ den prozentuellen Fehler der Projektion in Richtung I_{2N} von I_{2X} im Verhältnis zu I_{2N} bedeutet, und

$$\frac{b}{a} = \operatorname{tg} \delta$$

wo δ den Winkel zwischen \bar{I}_{2X} und \bar{I}_{2N} bedeutet.

Dementsprechend ändert sich Gleichung (4) folgenderweise:

$$k_N \bar{I}_{2N} \bar{A} (R_h + \Delta R_h + j \omega R C R_\delta) = k_X m_I \bar{I}_{2N} (a + jb) R_{s0} \bar{A} \quad (8)$$

Wird der Realteil dieser Gleichung durch Gleichung (6) dividiert, erhält man:

$$\frac{\Delta R_h}{R_h} \cdot 100 = h \%$$

Da R_h konstant ist, kann die Skala des Schleifkontaktes h unmittelbar in % kalibriert werden. Der in dieser Weise abgelesene Übersetzungsfehler

$h\%$ gibt, streng genommen, nur in dem Falle den tatsächlichen Fehler $h\%$, wenn $\delta = 0$. Übrigens wird im allgemeinen mit einem vernachlässigbar kleinen Fehler gemessen.

Streng genommen ist

$$I_{2X} = m_I I_{2N} \sqrt{a^2 + b^2}$$

Wird dies in Betracht gezogen und die vernachlässigbar kleinen Werte außer acht gelassen, ergibt sich der genaue Wert zu

$$h_p \% = h \% + \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{2} 100 \% \quad (8a)$$

Das Glied $\frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{2} 100$ bedeutet im Falle eines Winkelfehlers von $\delta = 50'$ eine Korrektur von $0,01\%$.

Der Wert des Winkelfehlers beträgt :

$$\delta \approx \operatorname{tg} \delta = \frac{b}{a} = \omega RC \frac{R_\delta}{R_h + \Delta R_h} = \omega RC \frac{R_\delta}{R_h \left(1 + \frac{h\%}{100}\right)} = \omega RC \frac{R_\delta}{R_h} \left(1 - \frac{h\%}{100}\right) \quad (9)$$

Die Winkelfehlerskala kann bei $h\% = 0$ und z. B. bei $f = \frac{\omega}{2\pi} = 50$ Hz unmittelbar in Minuten oder in $\frac{\operatorname{rad}}{100}$ Einheiten, in Funktion von R_δ , aufgezeichnet werden. Ist aber $h\% \neq 0$ und $f \neq 50$ Hz, so kann der abgelesene Wert auf Grund der Gleichung (9) berichtigt werden.

Ist z. B. im Falle $f \neq 50$ Hz der an einer für 50 Hz gefertigten Skala abgelesene Winkelwert δ_{50} , so ergibt sich der umgerechnete Wert δ_f , unter Berücksichtigung des Übersetzungsfehlers, zu

$$\delta_f = \delta_{50} \frac{f}{50} \left(1 - \frac{h\%}{100}\right) \quad (10)$$

Bisher wurde vorausgesetzt, daß laut Gleichung (5) das Verhältnis der Nennübersetzungen der Stromwandler mit jenem der Strommeßgrenzen der Einrichtung übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall, d. h. wenn

$$\frac{I_{2X}^*}{I_{2N}^*} = m_I \neq \frac{a_N}{a_X} = m_I'$$

dann muß, damit die Stelle von $h\% = 0$ an der Skala h unverändert bleibe, der Wert für R_δ anstatt $R_{\delta 50}$ derart gewählt werden, daß die an demselben

abgegriffene Spannung — fehlerlose Stromwandler vorausgesetzt — mit der am Widerstand R_h (Stelle $h\% = 0$) abgegriffenen Spannung übereinstimmt. Der nötige Wert von R_s ergibt sich zu :

$$R_s = \frac{m_I}{m'_I} R_{s0} \quad (10 a)$$

Die an den Skalen h und δ abgelesenen Fehlerwerte sind auch in solchen Fällen unverändert gültig.

b) Bei *Spannungswandlerprüfung* ist der Betriebsartwähler K_1-K_2 in Stellung U zu setzen. In dieser Stellung schließt sich der Kreis AB , dessen Widerstand $2R$ beträgt und mit dem Wirkwiderstand vom Werte $R_{eN}-2R$ in Reihe geschaltet ist, an die Sekundärklemmen des Normalspannungswandlers an, der Kreis $A'B'$ mit Widerstand R' aber über Vorschaltwiderstand $R_{eX}-R'$ an die Sekundärklemmen des zu überprüfenden Spannungswandlers. Mit Rücksicht darauf, daß der ganze Widerstand R_{eN} bzw. R_{eX} rein ohmschen Charakters ist, sind die über Kreise AB bzw. $A'B'$ durchfließenden Ströme $\frac{\bar{U}_{2N}}{R_{eN}} = \bar{I}_{2N}$ und $\frac{\bar{U}_{2X}}{R_{eX}} = \bar{I}_{2X}$ mit den Sekundärspannungen \bar{U}_{2N} bzw. \bar{U}_{2X} in Phase. Die Werte von R_{eN} und R_{eX} sind so gewählt, daß bei Nennsekundärspannungen die Ströme \bar{I}_{2N} und \bar{I}_{2X} die gleichen Werte besitzen sollen, die sie im Falle Stromwandlerprüfung bei Nennstrom hatten. Somit können die Fehler an denselben Skalen abgelesen werden, wie bei der Stromwandlerprüfung.

Wenn die Spannungsmeßgrenze der Einrichtung an der Seite des Normalwandlers U_{2N}^* und an der Seite des zu überprüfenden Wandlers U_{2X}^* ist und folgende Beziehung besteht :

$$\frac{U_{2X}^*}{U_{2N}^*} = \frac{U_{2X}}{U_{2N}} = m_U$$

wo U_{2X} und U_{2N} bei Voraussetzung von fehlerlosen Wandlern die effektiven Sekundärspannungen bedeuten, dann ist der Spannungsteiler des Kreises $A'B'$ auf den Wert R_{s0} einzustellen.

Ist

$$\frac{U_{2X}^*}{U_{2N}^*} = m_U \neq \frac{U_{2X}}{U_{2N}} = \frac{a_N}{a_X} = m'_U$$

wo a_N und a_X die Nennübersetzungen der Spannungswandler bedeuten, so ist der Spannungsteiler des Kreises $A'B'$ auf den Wert

$$R_s = \frac{m_U}{m'_U} R_{s0} \quad (11)$$

einzustellen.

c) *Die Messung von Stromwandlerbürden.* Die Aufgabe ist die Bestimmung der Wirk- und Blindkomponenten der in den Sekundärkreis des Stromwandlers X eingeschalteten Impedanz $\bar{Z}_I = R_b + jX_b$. Die Messung kann ohne Änderung der Schaltung vorgenommen werden, bloß ist die stromwandlerseitige Klemme von Z_I mit der Klemme 9 der Einrichtung zu verbinden (Abb. 3). Der Betriebsartwähler K_1-K_2 ist in Stellung T_I zu legen. Die Speisung des Kreises AB bleibt unverändert, der Kreis $A'B'$ wird laut Abb. 3 mit dem Wirkwiderstand von konstantem Wert R_I-R' in Reihe geschaltet. Der in dieser Weise entstandene Serienkreis wird von jener Spannung gespeist, die an der den Stromwandler tatsächlich belastenden Impedanz $\bar{Z}_I + R_X$ auftritt. Die Einrichtung mißt die Komponenten der Impedanz $\bar{Z}_I + R_X$. Nachdem der Wert von R_X bekannt ist, können die Komponenten von Z_I aus den Meßergebnissen unmittelbar bestimmt werden.

Durch Umschaltung des Betriebsartwählers K_1-K_2 in Stellung T_I erfolgt zwischen den Widerständen ϱ und r des Kreises AD' auf eine in Abb. 3a nicht dargestellte Weise ein Stellenwechsel. Die neue Lage zwischen Punkten AD' ist in Abb. 3b dargestellt. Der übrige Teil der Schaltung bleibt unverändert.

Die am Widerstand R_s abgegriffene Spannung ist das $\frac{R_s}{R_I}$ \bar{A} -fache der an der Impedanz $\bar{Z}_I + R_X$ auftretenden Spannung. Diese Spannung ist mit der Summe der an den Widerständen $\Delta\varrho$ und R_s auftretenden Spannungen zu kompensieren. Der über Impedanz $\bar{Z}_I + R_X = (R_b + R_X) + jX_b = R'_b + jX_b$ durchfließende Strom ist, von den Fehlern der Stromwandler abgesehen,

$$I_{2X} = I_{2N} \frac{a_N}{a_X} = I_{2N} m'_I$$

Im ausgeglichenen Zustand ergibt sich

$$k_N \bar{I}_{2N} \bar{A} (\Delta\varrho + j\omega RCR_s) = \bar{I}_{2N} m'_I (R'_b + jX_b) \frac{R_s}{R_I} \bar{A}$$

Die Realkomponente der Impedanz ist :

$$R'_b = \frac{\Delta\varrho}{\Delta\varrho_{\max}} \Delta\varrho_{\max} k_N \frac{R_I}{R_{s0}} \cdot \frac{1}{m'_I} \frac{R_{s0}}{R_s}$$

Die Skala h ist außer der prozentuellen Teilung auch mit einer Teilung von 0 bis 100 versehen. Teilstrich 0 bezeichnet die Stelle des Widerstandes $\Delta\varrho = 0$, Teilstrich 100 jene von $\Delta\varrho = \Delta\varrho_{\max}$, und Teilstrich a_R jene von $\Delta\varrho$.

Die Schaltungselemente von konstantem Wert können in eine Konstante zusammengefaßt werden :

$$100 c_R = \Delta \varrho_{\max} k_N \frac{R_I}{R_{s0}}$$

Somit ergibt sich :

$$R'_b = a_R \cdot c_R \frac{1}{m'_I} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (12)$$

Der Imaginärteil der Impedanz beträgt :

$$X_b = \frac{R_\delta}{R_{\delta\max}} R_{\delta\max} k_N R C \omega \frac{R_I}{R_{s0}} \frac{1}{m'_I} \frac{R_{s0}}{R_s}$$

Die Skala δ ist mit ähnlicher Teilung 0—100 versehen, wie die Skala h . Analog dem Vorangehenden, unter Voraussetzung von $\omega = \text{konstant}$, erhält man :

$$100 c_X = R_{\delta\max} k_N R C \omega \frac{R_I}{R_{s0}}$$

$$X_b = a_X c_X \frac{1}{m'_I} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (13)$$

Es kann gesichert werden, daß bei einer gegebenen Frequenz $c_R = c_X$ sei, wenn

$$R_{\delta\max} = \frac{\Delta \varrho_{\max}}{R \omega C} = \frac{\Delta \varrho_{\max}}{\text{tg } \varphi} \quad (14)$$

und in diesem Falle wird die Tangente des Phasenwinkels β der Impedanz :

$$\text{tg } \beta = \frac{X_b}{R'_b} = \frac{a_X}{a_R}$$

Aus Gleichungen (12) und (13) ist ersichtlich, daß durch Änderung des Wertes R_s die Meßgrenzen weitläufig geändert werden können, so daß es möglich ist, stets die günstigste Meßgrenze zu wählen.

Wie bereits erwähnt, wurden bei den Ableitungen die Fehler der Stromwandler außer acht gelassen. Im Falle fehlerhafter Stromwandler werden selbstverständlich auch die erhaltenen Werte von R'_b und X_b fehlerhaft sein. Nachdem aber beim Messen der Bürde keine allzu große Genauigkeit gewünscht

wird, kann dieser Fehler im allgemeinen vernachlässigt werden. Eine genauere Methode ist in Abb. 5 dargestellt.

Der primäre Nennstrom I_{1N}^* des Normalstromwandlers N sei dem Nennstrom der Belastung gleich, der sekundäre Nennstrom I_{2N} aber dem der Meßgrenze zwischen Klemmen 1—2 der Einrichtung entsprechenden Strom. Der etwaige Fehler des Normalwandlers kann vernachlässigt werden.

Auch der mit $Z_I + R_X$ parallelgeschaltete Widerstand R_I kann einen Fehler verursachen. Wählt man den Wert von R_I im Vergleich zu $Z_I + R_X$ genügend hoch, dann kann auch dieser Fehler vernachlässigt werden.

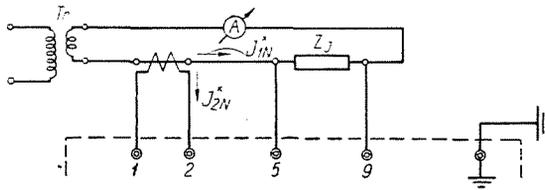


Abb. 5

d) Die Messung von Spannungswandlerbürden. Mit der Einrichtung können die Real- und Imaginärkomponenten der Admittanz der Belastung unmittelbar bestimmt werden. Die Spannungswandlerbürde von Admittanz $\bar{Y}_U = G - jB$ ist laut Abb. 3 mit einem Wirkwiderstand R_U von konstantem Wert in Reihe geschaltet. Der Wert von R_U ist so gewählt, daß $Y_U \ll \frac{1}{R_U}$ sei. Der Betriebsartwähler $K_1 - K_2$ ist in Stellung T_U zu legen. In dieser Stellung erhält der Kreis AB dieselbe Speisung wie bei der Spannungswandlerprüfung. Die Strecke AD' der Abb. 3 ist mit der Abänderung laut Abb. 3b zu denken. Der Kreis $A'B'$ wird mit dem Widerstand R_U parallelgeschaltet. Der vom Belastungsstrom \bar{I}_U hervorgerufene Spannungsabfall wird vom Spannungsteiler R_s im Verhältnis von $\frac{R_s}{R'}$ \bar{A} geteilt.

Die am Widerstand R_s abgegriffene Spannung wird durch die Summe der mittels Schleifkontakte h und δ abgegriffenen, aufeinander normalen Spannungen kompensiert. Im nachfolgenden wird der Wert von \bar{Y}_U so betrachtet, daß darin auch der Wert $\frac{1}{R_U}$ inbegriffen ist. Von den Fehlern der Spannungswandler wird abgesehen.

Die der Admittanz \bar{Y}_U zufallende Spannung beträgt :

$$\bar{U}_{2X} = \bar{U}_{2N} \frac{a_N}{a_X} = \bar{U}_{2N} m'_U$$

Im ausgeglichenen Zustand ergibt sich :

$$\frac{\bar{U}_{2N}}{R_{eN}} \bar{A} (\Delta q + j \omega R C R_{\delta}) = \bar{U}_{2N} m'_{U'} (G - jB) R_U \frac{R_s}{R'} \bar{A}$$

Die Realkomponente der Admittanz ist :

$$G = \frac{\Delta q}{\Delta q_{\max}} \Delta q_{\max} \frac{1}{R_{eN} R_U} \frac{R'}{R_{s0}} \frac{1}{m'_{U'}} \frac{R_{s0}}{R_s}$$

$$100 c_G = \Delta q_{\max} \frac{1}{R_{eN} R_U} \frac{R'}{R_{s0}} \quad (14a)$$

Die Ablesung erfolgt an der Teilung 0–100 der Skala h . Somit wird

$$G = \alpha_G c_G \frac{1}{m'_{U'}} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (15)$$

Die Imaginärkomponente der Admittanz gestaltet sich, unter Berücksichtigung der Teilung 0–100 der Skala δ , wie folgt :

$$B = - \frac{R_{\delta}}{R_{\delta \max}} R_{\delta \max} R C \omega \frac{1}{R_{eN} R_U} \frac{R'}{R_{s0}} \frac{1}{m'_{U'}} \frac{R_{s0}}{R_s}$$

$$100 c_B = R_{\delta \max} R C \omega \frac{1}{R_{eN} R_U} \frac{R'}{R_{s0}}$$

Es ergibt sich daher :

$$B = - \alpha_G c_G \frac{1}{m'_{U'}} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (16)$$

Das negative Vorzeichen bedeutet, daß im Falle induktiver Belastung der Widerstand R_{δ} an der Strecke AD des Kreises AB abzutasten ist (ähnlich wie der negative Winkelfehler bei Meßwandlerprüfung).

Die Gleichung $c_G = c_B$ besteht, ähnlich wie bei der Messung von Stromwandlerbürden, bei einer gegebenen Kreisfrequenz ω in dem Falle, wenn

$$R_{\delta \max} = \frac{\Delta q_{\max}}{R \omega C} = \frac{\Delta q_{\max}}{\operatorname{tg} \varphi}$$

und dann ist die Tangente des Phasenwinkels β der Admittanz :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{B}{G} = \frac{\alpha_B}{\alpha_G}$$

Ebenso wie Beziehungen (12) und (13), zeigen auch Gleichungen (15) und (16) die Möglichkeit einer weitläufigen Änderung der Meßgrenzen durch Modifizierung des Wertes R_s . Falls der Spannungswandler einen viel zu großen Fehler aufweist, kann die Messung auch laut Abb. 6 durchgeführt werden.

Die primäre Nennspannung U_{1N}^* des angewendeten Normalspannungswandlers von niedriger Primärspannung (zweckmäßig $\frac{100\text{ V}}{100\text{ V}}$) sei der Nennspannung der Spannungswandlerbelastung gleich, die sekundäre Nennspannung U_{2N}^* aber der Nennspannung zwischen Klemmen 3—4 der Einrichtung.

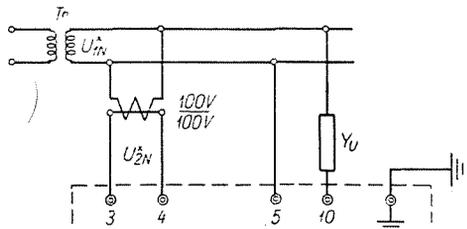


Abb. 6

In diesem Falle kann der Fehler des Normalspannungswandlers vernachlässigt werden.

e) Anwendung als Vektormesser

1. Spannungsmessung. Gemäß Abb. 7 wird an die Klemmen 1—2 der Einrichtung ein Stromwandler von beliebiger Übersetzung, jedoch mit einem, den Klemmen 1—2 entsprechenden sekundären Nennstrom ge-

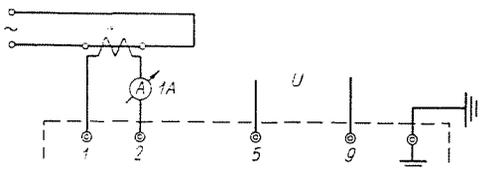


Abb. 7

schaltet. An dem eingeschalteten Amperemeter ist der Nennstrom einzustellen und dieser auf konstantem Wert zu halten. Der Betriebsartwähler K_1-K_2 ist in Stellung T_1 , Strecke AD' des Kreises AB entspricht der Abb. 3b. Die zu messende Spannung ist an die Klemmen 5—9 zu legen. Die am Widerstand R_s abgreifbare Spannung beträgt das $\frac{R_s}{R_f}$ \bar{A} -fache der Spannung zwischen Klemmen 5—9. Diese geteilte Spannung ist mit der Summe beider,

durch Schleifkontakte h und δ abgegriffenen Spannungen von aufeinander normaler Phasenlage zu kompensieren.

Die zu messende Spannung kann als die Resultante zweier, aufeinander normaler Spannungsvektoren aufgefaßt werden :

$$\bar{U} = U_R + j U_X$$

wo U_R die Komponente in Richtung I_{2N} und U_X die darauf normale Komponente ist.

Im ausgeglichenen Zustand ergibt sich :

$$\bar{I}_{2N}^* k_N \bar{A} (\Delta \varrho + j \omega R C R_\delta) = (U_R + j U_X) \frac{R_s}{R_I} \bar{A}$$

$$U_R = \frac{\Delta \varrho}{\Delta \varrho_{\max}} \Delta \varrho_{\max} k_N \frac{R_I}{R_{s0}} I_{2N}^* \frac{R_{s0}}{R_s}$$

$$U_X = \frac{R_\delta}{R_{\delta \max}} R_{\delta \max} k_N R \omega C \frac{R_I}{R_{s0}} I_{2N}^* \frac{R_{s0}}{R_s}$$

Die Ablesung erfolgt an den Teilungen 0–100 der Skalen h und δ . Die Konstanten zusammengefaßt, erhält man :

$$100 c_{UR} = \Delta \varrho_{\max} k_N \frac{R_I}{R_{s0}} I_{2N}^*$$

$$100 c_{UX} = R_{\delta \max} k_N R \omega C \frac{R_I}{R_{s0}} I_{2N}^*$$

$$U_R = a_{UR} c_{UR} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (17)$$

$$U_X = a_{UX} c_{UX} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (18)$$

und

$$U = \sqrt{\bar{U}_R^2 + \bar{U}_X^2}$$

Die Gleichheit $c_{UR} = c_{UX}$ wird auch hier durch die Bedingungen laut (14) gesichert. Somit ergibt sich die Tangente des Phasenwinkels φ_U zwischen \bar{I}_{2N} und \bar{U} zu :

$$\operatorname{tg} \varphi_U = \frac{U_X}{U_R} = \frac{a_{UX}}{a_{UR}}$$

wo

$$\varphi_U = \sphericalangle (\bar{I}_{2N}, \bar{U})$$

Aus Gleichungen (17) und (18) ist ersichtlich, daß mittels Änderung von R_s die Meßgrößen weitläufig geändert werden können.

2. Strommessung. An die Klemmen 3—4 der Einrichtung wird ein Spannungswandler von beliebiger Übersetzung, jedoch mit einer den Klemmen 3—4 entsprechenden sekundären Nennspannung geschaltet (Abb. 8). Die Sekundärspannung ist auf den Nennwert einzustellen und konstant zu halten. Der Betriebsartwähler K_1-K_2 ist in Stellung T_U zu legen. Strecke AD' des Kreises AB entspricht der Abb. 3b. Der zu messende Strom ist über Klemmen 5—10 zu führen.

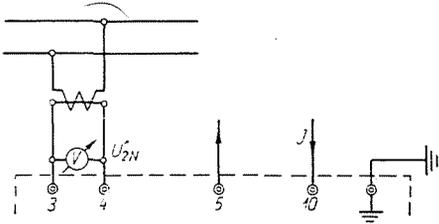


Abb. 8

Der zu messende Strom kann folgenderweise aufgeschrieben werden:

$$\bar{I} = I_R + jI_X$$

wo I_R die mit I'_{2N} in Phase befindliche, I_X aber die darauf normale Komponente ist.

Nach Ausgleichung mittels Schleifkontakten h und δ erhält man:

$$\frac{U_{2N}^*}{R_{eN}} \bar{A} (\Delta\varrho + j\omega R C R_\delta) = (I_R + jI_X) R_U \frac{R_s}{R'} \bar{A}$$

$$I_R = \frac{\Delta\varrho}{\Delta\varrho_{\max}} \Delta\varrho_{\max} \frac{R'}{R_U R_{s0} R_{eN}} U_{2N}^* \frac{R_{s0}}{R_s}$$

$$I_X = \frac{R_\delta}{R_{\delta\max}} R_{\delta\max} R \omega C \frac{R'}{R_U R_{s0} R_{eN}} U_{2N}^* \frac{R_{s0}}{R_s}$$

Die Ablesung erfolgt an den Teilungen 0—100 der Skalen h und δ . Die Konstanten sind:

$$100 c_{IR} = \Delta\varrho_{\max} \frac{R'}{R_U R_{s0} R_{eN}} U_{2N}^*$$

$$100 c_{IX} = R_{\delta\max} R \omega C \frac{R'}{R_U R_{s0} R_{eN}} U_{2N}^*$$

Hiermit ergibt sich :

$$I_R = a_{IR} c_{IR} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (19)$$

$$I_X = a_{IX} c_{IX} \frac{R_{s0}}{R_s} \quad (20)$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_X^2}$$

Die Gleichheit $c_{IR} = c_{UR}$ wird durch die Bedingung laut (14) gesichert. Die Tangente des Phasenwinkels φ_I zwischen \bar{I}_{2N} und \bar{I} beträgt:

$$\operatorname{tg} \varphi_I = \frac{I_X}{I_R} = \frac{a_{IX}}{a_{IR}}$$

wo

$$\varphi_I = \sphericalangle (\bar{I}'_{2N}, \bar{I})$$

Aus Gleichungen (19) und (20) ist ersichtlich, daß mittels Änderung von R_s die Strommessungsgrenzen weitläufig geändert werden können.

Bei Strommessung entspricht der Verbrauch jenem eines Amperemeters mit einem inneren Widerstand von R_I .

f) Anwendung als Kompensator

Wird der Kreis an der in Abb. 3 eingezeichneten Stelle $a-b$ unterbrochen, so kann die in Richtung des Kreises AB angelegte Spannung U mit der Summe der an Widerständen R_s und Δq abgegriffenen Spannungen kompensiert werden. Strecke AD' entspricht der Abb. 3b, und der Kreis AB wird der Abb. 7 oder 8 entsprechend angeschlossen.

Zusammenfassung

Die beschriebene Kompensatorschaltung kann zur Messung der Fehler von Meßwandlern, sowie zur Bürdenmessung vorteilhaft angewendet werden. Als Vektormesser kann sie auch zur Messung aufeinander normaler Komponenten der Spannungen und Ströme gebraucht werden. Außerdem ist sie auch zur Messung ohne Stromaufnahme der aufeinander normalen Komponenten von niedrigen Wechselspannungen geeignet.

Eine Besonderheit der Schaltung ist, daß hierbei frequenzunabhängige Kreise mit einer Phasenverschiebung von 90° zur Anwendung gelangen, die bei jedweder Frequenz Widerstände rein ohmschen Charakters aufweisen. Hiedurch wird es möglich, den Kompensationskreis — ähnlich wie bei einem Drehspulinstrument — mit Vorschaltwiderstand oder Nebenschlußwiderstand zu versehen und die Meßgrenzen dem Bedarf entsprechend zu ändern.

Auf Grund der beschriebenen Schaltung wurden bereits mehrere Meßeinrichtungen gebaut und diese sind seit ungefähr 2 bis 3 Jahren in Gebrauch. Die gemachten Erfahrungen sind zufriedenstellend, die Einrichtungen entsprechen den ihnen gegenüber gestellten Forderungen bezüglich Genauigkeit und Brauchbarkeit.

Literatur

1. PEDERSEN, O.: Electrician **83**, 523 (1919).
2. HAGUE, B.: Instrument Transformers, Verlag J. Pittman, London 1936, 407—528.
3. SCHERING—ALBERTI: Arch. f. El. **2**, 263 (1914).
4. SILSBEE, F. B.: Bur. Stand. J. Res. **4**, 91 (1930).
5. SILSBEE, F. B.—SMITH—FORMAN—PARK: Bur. Stand. J. Res. **11**, 93 (1933).
6. SCHERING, H.: Z. f. Instrumentenkunde **37**, 98 (1917).
7. SIEBER: Siemens Zeitschrift **9**, 845 (1929).
8. HOHLE, W.: Arch. f. El. **27**, 849 (1933).
9. ARNOLD, A. H. M.: J. Inst. Electr. Eng. **74**, 424 (1934).
10. ZWIERINA, O.: E. u. M., **55**, 1 (1937).
11. GEYGER, W.: ATM, J 94—1 (1937).
12. TAUBER—GRETHER: Sitzungsbericht Nr. 111 der CIGRÉ-Tagung (1937).
13. KEINATH, G.: ATM, Z 224—1 (1932).
14. HOHLE, W.: ATM, Z 224—4 (1934).
15. GEYGER, W.: ATM, Z 224—9 (1938).
16. SIEMENS u. HALSKE AG.: ATM, Z 224—10 (1938).
17. ALLGEMEINE EL. GES.: ATM, Z 224—11 (1940).
18. HOHLE, W.: ATM, Z 33—1; Z 33—2.

L. SCHNELL; Budapest XI. Budafoki út 8., Ungarn.