III. Nutzenanwendung. Es ist sicher, daß die in der Praxis vorkommenden Spulenformen im allgemeinen Zwischenstufen zwischen der Zylinderwicklung (Fall 1) und der Wicklung mit kreisrundem Wickelquerschnitt (Fall 2) bilden, oder mit einem dieser beiden Hauptfälle übereinstimmen. Wicklungen dagegen, die als Zwischenstufen zwischen der Wicklung mit kreisrundem Querschnitt und dem Knäuel anzusehen wären, kommen dagegen im allgemeinen nicht vor. Namentlich nicht solche, die sich merklich von der Wicklung mit kreisrundem Querschnitt unterscheiden und sich dem vollen Knäuel nähern. Wir müssen daher erwarten, daß die praktisch vorkommenden Werte des Verhältnisses $\frac{T'_m}{T_h}$ zwischen $2/3$ und $1/2$ liegen und daß Werte, die von $1/2$ merklich nach unten abweichen, sehr wenig wahrscheinlich und Werte in der Nähe von $0,4$ bereits ganz ausgeschlossen sind.

Der Koeffizient 2 in der Vidmarschen Formel 3) dürfte daher im allgemeinen eher etwas zu hoch als zu tief sein. Im allgemeinen dürfte daher Θ_h etwas höher als T_h liegen, was der Sicherheit wegen nicht unerwünscht ist.

Hieraus geht hervor, daß der Vidmarsche Vorschlag, soweit man vom Standpunkte der Rechnung aus urteilen kann, für eine indirekte Messung der höchsten Temperatur eine geeignete Grundlage geben kann.

Zum Diagramm des Stromwandlers.

Von

H. Schering, Berlin-Charlottenburg.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

1. Ziel der Arbeit.

Möllinger und Gewecke¹⁾ haben zur Ermittlung des Übersetzungsverhältnisses und des Winkelfehlers des Stromwandlers ein Diagramm aufgestellt aus dem primären Leerlaufstrom, der aus dem Kurzschlußversuch geschätzten sekundären Streuung, dem sekundären Widerstand und einem annähernd bestimmten Wert des Übersetzungsverhältnisses. Es wird hierbei ein idealer Wandler eingeführt, womit die Arbeit des Umrechnens mehrerer Größen verknüpft ist, unmittelbar aus dem Diagramm abzulesen ist nur der Winkelfehler.

Die vorliegende Arbeit verfolgt den Zweck, die Aufstellung und Ablesung des Diagrammes zu vereinfachen und die Übereinstimmung der aus ihm ermittelten Fehler mit den gemessenen Fehlern zu prüfen.

2. Grundlagen.

Im folgenden wird der Vektor eines Stromes oder einer Spannung kurz als der Strom oder die Spannung angesprochen.

In dem Diagramm der Durchflutungen (Abb. 1) sind $n_1 J_1$ die Amperewindungen des Primärstromes, $n_2 J_2$ die AW des Sekundärstromes, $n_1 J'$ die AW des übertrieben stark gezeichneten Magnetisierungsstromes; der Winkel δ zwischen J_1 und

Abb. 1. Diagramm der Durchflutungen.

¹⁾ Möllinger und Gewecke, Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 33, S. 922, 1912.

— J_2 werde positiv gerechnet, wenn — J_2 vor J_1 voreilt. Zerlegt man den Magnetisierungsstrom J' in die Komponenten J'_p und J'_s parallel und senkrecht zu J_1 , so ergeben sich aus dem Diagramm die einfachen Beziehungen¹⁾:

$$\left. \begin{aligned} \frac{J_1}{J_2} &= \frac{J'_p}{J_2} + \frac{n_2}{n_1} \cos \delta \\ \sin \delta &= \frac{n_1 J'_s}{n_2 J_2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 1)$$

Es bezeichne $\ddot{U} = \frac{J_1}{J_2}$ das tatsächliche Übersetzungsverhältnis, $\ddot{U}_N$ seinen Nennwert, dann ist

$$\ddot{U} = \ddot{U}_N \left(1 + \frac{a}{100} \right) \quad \text{und} \quad \frac{n_2}{n_1} = \ddot{U}_N \left(1 + \frac{b}{100} \right).$$

a ist der Übersetzungsfehler, b die Windungsabweichung in Prozenten. Die sekundäre Windungszahl n_2 wird in der Regel um 1 bis 2 Windungen kleiner gemacht, als wie es dem Nennwert des Übersetzungsverhältnisses entsprechen würde; b ist also negativ. Die Formeln 1) gehen nun in folgende Form über:

$$\left. \begin{aligned} a &= + \frac{100}{\ddot{U}_N} \frac{J'_p}{J_2} - 100 (1 - \cos \delta) + b \cos \delta \\ \sin \delta &= \frac{n_1 J'_s}{n_2 J_2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 2)$$

Es wird angenommen, daß für den Magnetisierungsstrom der Leerlaufstrom bei gleicher Spannung gesetzt werden darf.

Bei der Aufstellung des Stromwandlerdiagramms muß man von der Sekundärseite ausgehen; es ist demgemäß zweckmäßig, den Leerlaufstrom auf der Sekundärseite J'' zu messen und durch diesen den Magnetisierungsstrom auszudrücken. Bei gleicher Magnetisierung ist:

$$n_1 J' = n_2 J''.$$

Es werden nun folgende Vereinfachungen gemacht:

a) Der Winkel δ ist stets so klein, daß $\sin \delta = \frac{\pi}{180 \cdot 60} \cdot \delta$ Minuten gesetzt werden kann.

b) Der Unterschied von $\cos \delta$ gegen 1 kann in der Regel vernachlässigt werden, für $\delta = 1^\circ$ beträgt der Unterschied erst 1,5 Zehntausendstel.

c) Der Winkel δ zwischen — J_2 und J_1 sei so klein, daß die Komponenten des Magnetisierungsstromes parallel und senkrecht zu J_1 ohne merklichen Fehler gleich den Komponenten parallel und senkrecht zu — J_2 gesetzt werden können.

d) Die Windungsabweichung b ist stets so klein, daß sie dort, wo sie als Korrekionsgröße auftritt, zu vernachlässigen ist.

Für die Fälle, in denen δ nicht hinreichend klein ist, werden weiter unten Korrekturen angegeben.

Die Formeln 2) vereinfachen sich dann zu:

$$\left. \begin{aligned} a &= 100 \frac{J''_p}{J_2} + b \\ \delta &= \frac{1}{2,91 \times 10^{-4}} \frac{J''_s}{J_2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 3)$$

In diesen Formeln kommt der Nennwert des Übersetzungsverhältnisses nicht mehr vor.

¹⁾ Robinson, Proc. of the Amer. Inst. of El. Eng., Bd. 28, S. 1004, 1909. — Agnew, Bull. of the Bur. of Stand., Bd. 7, S. 422, 1911. — Alberti und Vieweg, Arch. für Elektrot. 2, S. 209, 1913.

3. Aufstellung des Diagramms für die Nennstromstärke.

Von A aus (Abb. 2) wird die Abszisse nach rechts, die Ordinate nach oben mit einer nach Ohm bezifferten Teilung versehen. Die Abszisse ist für den induktionslosen Widerstand der äußeren sekundären Belastung bestimmt, die Ordinate für ihren Blindwiderstand (Induktivität $\times$ Kreisfrequenz). Multipliziert man die Bezifferung der Teilung mit der sekundären Nennstromstärke 5 A, so erhält man das Koordinatensystem in Volt für die sekundäre Klemmspannung bei der Nennstromstärke. Multipliziert man diese Bezifferung nochmals mit 5, so ergibt sich die Teilung in VA für die äußere sekundäre Belastung; gleiche sekundäre Belastungen mit verschiedenen $\cos \varphi$ liegen auf einem Kreisbogen um A, sekundäre Belastungen mit gleichem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ liegen auf einem Strahl von A, der gegen die Abszisse den Winkel φ bildet. Die sekundäre Belastung wird stets auf die Nennstromstärke bezogen.

Von A aus trägt man nun nach links auf der Abszisse den inneren sekundären Widerstand in Ohm auf und setzt von dem Endpunkt B senkrecht nach unten den zunächst als bekannt angenommenen Blindwiderstand der Streuung (Streuinduktivität $\times$ Kreisfrequenz) in Ohm an bis O. In der Voltteilung ist dann OB die sekundäre Streuspannung, BA der Spannungsabfall am inneren Widerstand, OA der gesamte innere Spannungsabfall E_i bei der Nennstromstärke. Hat man in dem Koordinatensystem von A den einer gegebenen äußeren sekundären Belastung entsprechenden Punkt C aufgesucht, so stellt bei der Nennstromstärke die Strecke AC die sekundäre Klemmspannung E_a , OC die gesamte sekundäre Spannung E , welcher die Magnetisierung entspricht, dar. Der Sekundärstrom J_2 ist von O nach rechts parallel zur Abszisse gerichtet.

Trägt man den der Spannung E entsprechenden sekundären Leerlaufstrom J'' unter dem gehörigen Winkel ψ an $OC = E$ an und projiziert ihn auf die Richtung von J_2 und eine Senkrechte dazu in O , so sind die Projektionen die gesuchten Komponenten J_p'' und J_s'' , welche die Fehler α und δ bestimmen. Es sind nun noch die Maßstäbe für diese Fehler festzulegen.

Beträgt der Maßstab für den Magnetisierungsstrom $1 \text{ cm} = k \cdot 10^{-8} \text{ A}$, so ist nach Formel 3) bei der Nennstromstärke $J_2 = 5 \text{ A}$ der Maßstab für (a — b): $1 \text{ cm} = \frac{2k}{100} \%$

und für δ : $1 \text{ cm} = \frac{2k}{2,91} \text{ Min.}$; z. B. für $1 \text{ cm} = 5 \text{ Milliampere}$ ist $\frac{1}{10} \% = 1 \text{ cm}$ und 10 Minuten gleich $2,91 \text{ cm}$. Gemäß dem gewählten Maßstabe ist zunächst b (da es negativ ist, nach rechts) von O aus auf der Richtung von J_2 abzutragen nach D , von diesem Punkt D ist die Teilung für a in $\%$ zu beginnen, und zwar nach rechts

Abb. 2. Diagramm des Stromwandlers.

für die positiven Werte von a . Von O senkrecht auf der Richtung von J_2 ist die Teilung für δ in Minuten anzubringen, und zwar nach unten für die positiven Werte. Im allgemeinen ist es bequemer, die Maßstäbe nicht in das Diagramm selbst, sondern auf die Kanten eines rechtwinkligen Stückes Papier einzuzichnen und mit diesem die Abstände des Vektor-Endpunktes von dem durch Punkt D gelegten Achsenkreuz abzumessen.

4. Ablesung mit Schablone.

Sehr vereinfacht wird die Diagrammabmessung durch Anwendung einer Schablone, welche die jedesmalige Konstruktion des Magnetisierungsstromes erspart.

Man zeichne auf etwas steifem Papier von einem Punkte O' eine Gerade für die Spannung E und versehe sie mit der Voltteilung des Koordinatensystems A. Aus den gemessenen Werten des Magnetisierungsstromes J'' und seiner Phasenverschiebung ψ berechne man die Komponenten $J_w'' = J'' \cos \psi$ und $J_b'' = J'' \sin \psi$, trage diese Werte auf Millimeterpapier (1 cm = 5 Milliampere) als Funktionen der Spannung E auf und verbinde die Punkte durch Kurven. Aus dieser Tafel übertrage man für etwa 6 runde

Abb. 3. Schablone.

Werte von E die Längen J_w'' und J_b'' in die Schablone, und zwar setzt man J_w'' in der Richtung von E und J_b'' senkrecht dazu von O' aus zusammen zum Vektor J'' . Die Endpunkte der Vektoren beziffere man mit den zugehörigen Spannungen, ziehe durch sie eine Kurve und vervollständige die Teilung. Entlang dieser Polarkurve und der Geraden schneide man von O' das Papier aus (Abb. 3). Diese Schablone

lege man mit O' auf den Punkt O in dem Diagramm und mit der geraden Kante durch den betreffenden Belastungspunkt C, lese die Größe $OC = E$ von der Kante ab und markiere die Lage des mit der gleichen Voltzahl bezifferten Punktes der Polarkurve auf dem Diagramm. Dieser Punkt ist der gesuchte Endpunkt des von O gezogen zu denkenden Vektors des Leerlaufstromes J'' . Durch Messen seines Abstandes von den Achsen durch D mit den zugehörigen Maßstäben findet man a und δ .

5. Andere Stromstärken.

Will man nun aus dem Diagramm die Fehler a und δ für eine andere Stromstärke, z. B. $\frac{1}{x}$ der Nennstromstärke ermitteln, so muß man den Maßstab ändern. Man stellt eine neue Schablone in x facher Größe von J'' her, bei der die Längeneinheit der Voltteilung auf der Geraden, an welcher die Spannung E abgelesen wird, ebenfalls x mal größer gemacht ist; da in dem Diagramm der Ohm-Maßstab nicht geändert wird, so ist die Maßeinheit für J_2 ebenfalls x mal größer, an dem Maßstab der Verhältnisse $\frac{J_p''}{J_2}$ und $\frac{J_s''}{J_2}$ wird also nichts geändert, die Teilungen für a und δ im Diagramm bleiben folglich bestehen. Die sekundäre Belastung im VA wird stets bezogen auf die Nennstromstärke angegeben.

Mit diesen Schablonen kann man bequem und schnell für jede beliebige äußere sekundäre Belastung die Fehler a und δ ermitteln.

6. Korrekturen.

Es bleibt noch festzustellen, welche Korrekturen anzubringen sind, wenn der Winkel δ nicht so klein ist, daß die Vereinfachungen b) und c) auf Seite 48 zutreffen.

Gemäß der Vereinfachung c) waren die Komponenten von J'' parallel und senkrecht zu J_1 gleich den Komponenten parallel und senkrecht zu J_2 gesetzt. Der Winkel δ zwischen J_1 und $-J_2$ ist aus dem Diagramm wenigstens in erster Annäherung ermittelt, man kann also δ an J_2 in O antragen (nach unten, wenn δ positiv ist) und erhält damit die Richtung von $-J_1$; auf diese und eine Senkrechte dazu in O kann man J'' projizieren; diese Projektionen geben dann (unter Berücksichtigung der Windungsabweichung b) die richtigen Werte für a und δ . Bequemer ist es, die Korrekturen aus den geometrischen Beziehungen zu berechnen.

Unter Vernachlässigung der Größen zweiter Ordnung ergibt sich

die Korrektur für a

$$= +100 \frac{\sin^2 \delta}{\cos \delta},$$

die Korrektur für δ

$$= -\frac{a+b}{100} \delta.$$

Bei der Vereinfachung b) war in der Formel für a das Glied $-100(1 - \cos \delta)$ fortgelassen worden, vereinigen wir es mit der oben angegebenen Korrektur für a, so ergibt sich bei Vernachlässigung kleiner Größen zweiter Ordnung

$$\text{die Gesamtkorrektur für } a = +100(1 - \cos \delta),$$

sie ist von dem Vorzeichen des Winkels δ unabhängig.

Die folgende Tabelle gibt eine Anschauung über das Anwachsen der Korrektur mit zunehmendem Winkel.

δ	Korr. f. a	
48'	+ 0,01	
69'	0,02	
84'	0,03	Die Korrekturen für a und δ kommen erst bei großen Fehlern δ und a in Betracht, im allgemeinen wird aber dann das Anbringen der Korrekturen praktisch nicht von Interesse sein.
97'	0,04	
109'	0,05	
119'	0,06	
128'	0,07	
137'	0,08	
146'	0,09	
154'	0,10	

7. Die sekundäre Streuung.

Die sekundäre Streuinduktivität war in dem Vorhergehenden als bekannt angenommen worden. Tatsächlich ist sie bisher der Messung unmittelbar nicht zugänglich. Beim Kurzschlußversuch ergibt sich die Summe der primären und sekundären Streuinduktivitäten auf gleiche Windungszahlen reduziert. Möllinger und Gewecke nehmen an, daß die reduzierten primären und sekundären Streuinduktivitäten einander gleich sind, wie es in der Technik des Arbeitstransformators üblich ist. Ob diese Annahme richtig ist, ist bisher nicht nachgewiesen.

In unserem Diagramm ist also der Punkt O unbekannt, wir wissen nur, daß er auf der Senkrechten in b zu AB liegen muß. Außerdem sei auch noch die Windungsabweichung B unbekannt, jedoch seien für den Wandler bei einer sekundären Belastung die Fehler a und δ genau gemessen. Wir können nun mit Hilfe der Schablone leicht durch Probieren den Punkt O und damit den Blindwiderstand der Streuung OB, ferner den Punkt D und damit die Windungsabweichung b finden, für welche das Diagramm die gemessenen Fehler a und δ richtig wiedergibt.

Es ist von Interesse, festzustellen, ob die aus diesem Diagramm für andere Belastungen und Stromstärken abgelesenen Fehler mit den gemessenen Fehlern übereinstimmen.

8. Beispiele.

Der sekundäre Leerlaufstrom wurde in der Wechselstrombrücke mit dem Vibrationsgalvanometer als Nullinstrument gemessen. Mit dieser Methode ist es möglich, die Messung auch für kleine Magnetisierungsspannungen auszuführen¹⁾. Übersetzungs- und Winkelfehler der Wandler wurden nach der Kompensationsmethode²⁾ gemessen, die absolute Genauigkeit beträgt bis $\frac{1}{5} J_N$ etwa 0,05 % und 1'. Der sekundäre innere Widerstand wurde mit der Gleichstrombrücke ermittelt. Dadurch wird der Wandler ein wenig remanent magnetisiert, er muß also nachher wieder mit einer höheren Wechselstromstärke entmagnetisiert werden. Zweckmäßig mißt man daher den Widerstand vor Beginn oder nach Abschluß aller anderen Messungen, auch muß man stoßweises Aus- und Einschalten bei den Wechselstrommessungen vermeiden, es können hierbei remanente Magnetisierungen eintreten, welche sich besonders in einer Änderung der Fehler bei $\frac{1}{10}$ der Nennstromstärke bemerkbar machen.

Beim Kurzschlußversuch wurden die Primärklemmen kurzgeschlossen und in der Wechselstrombrücke die Induktivität zwischen den Sekundärklemmen bei 2 A gemessen, sie ist gleich $l_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 l_1$, worin l_2 bzw. l_1 die betreffenden Streuinduktivitäten bedeuten.

Beispiel 1.

Stromwandler 150/5 A, 15 VA, Frequenz 40—60.

Sekundärer innerer Widerstand $r_2 = 0,34 \Omega$

Windungsabweichung, bekannt $b = -0,83 \%$

Blindwiderstand der sekundären Streuung, aus dem Diagramm . $\omega l_2 = 0,35 \Omega$

Blindwiderstand bei primärem Kurzschluß . . $\left(\omega l_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \omega l_1\right) = 0,91 \Omega$

Sekundärer Leerlaufstrom gemessen bei der Frequenz 50.

E	J_b''	J_w''	E	J_b''	J_w''
Volt	Milliamp.	Milliamp.	Volt	Milliamp.	Milliamp.
0,213	3,47	0,36	3,74	26,4	7,6
0,336	4,95	0,71	4,95	31,5	10,2
0,562	7,29	1,15	6,70	36,4	13,8
0,865	9,65	1,79	8,35	40,0	17,1
1,535	14,63	3,19	10,83	45,3	21,8
2,341	19,62	4,78			

Übersetzungsfehler a in % und Winkelfehler δ in Minuten bei der Frequenz 50.

Sekundäre Belastung VA $\cos \varphi$		Art der Fehlerbestimmung	$\frac{1}{10} J_N$		$\frac{1}{5} J_N$		$\frac{1}{2} J_N$		$\frac{1}{1} J_N$	
			a %	δ'	a %	δ'	a %	δ'	a %	δ'
3	1	Messung	-0,28	+23',0	-0,37	+18',8	-0,46	+13',9	-0,51	+10',4
		Diagramm	-0,21	+21',8	-0,30	+17',8	-0,41	+13',0	-0,47	+10',3
15	1	Messung	-0,22	+40',5	-0,29	+33',5	-0,39	+24',7	-0,46	+17',7
		Diagramm	-0,20	+40',6	-0,28	+32',6	-0,37	+25',6	-0,42	+18',5

¹⁾ Über die Ausführung der Messung und die Übereinstimmung der Ergebnisse mit den nach anderen Methoden gemessenen Werten wird ein besonderer Aufsatz erscheinen.

²⁾ Schering und Alberti, Archiv f. Elektrot. 2, S. 263, 1914.

Sekundäre Belastung VA	$\cos \varphi$	Art der Fehler- bestimmung	$\frac{1}{10} J_N$		$\frac{1}{5} J_N$		$\frac{1}{2} J_N$		$\frac{1}{1} J_N$	
			a ‰	δ'	a ‰	δ'	a ‰	δ'	a ‰	δ'
15	0,5	Messung	+ 0,37	+ 24',0	+ 0,18	+ 19',2	+ 0,06	+ 12',6	- 0,21	+ 8',0
		Diagramm	+ 0,41	+ 22',8	+ 0,20	+ 17',5	+ 0,01	+ 11',8	- 0,17	+ 7',8
30	1	Messung	- 0,11	+ 59',0	- 0,19	+ 47',7	- 0,29	+ 34',2	- 0,37	+ 23',7
		Diagramm	- 0,14	+ 58',8	- 0,20	+ 48',0	- 0,29	+ 34',4	- 0,35	+ 24',3
30	0,5	Messung	+ 0,89	+ 29',0	+ 0,61	+ 22',1	+ 0,24	+ 13',3	+ 0,01	+ 6',9
		Diagramm	+ 0,92	+ 27',4	+ 0,64	+ 20',8	+ 0,30	+ 12',6	+ 0,03	+ 6',0

Beispiel 2.

Stromwandler 100/5 A, 15 VA, Frequenz 50.

Der Stromwandler hat eine Kompensation der Blindkomponente des Magnetisierungsstromes, ferner eine Einrichtung zur Feineinstellung des Übersetzungsverhältnisses; die Windungsabweichung soll etwa $-\frac{1}{2}\%$ sein.

Sekundärer innerer Widerstand $r_2 = 0,25 \Omega$ Windungsabweichung, aus dem Diagramm $b = -0,49\%$ Blindwiderstand der sekundären Streuung, aus dem Diagramm $\omega l_2 = 0,10 \Omega$ Blindwiderstand bei primärem Kurzschluß gemessen $\left(\omega l_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \omega l_1\right) = 0,35 \Omega$

Sekundärer Leerlaufstrom gemessen bei der Frequenz 50.

E	J_b''	J_w''	E	J_b''	J_w''	E	J_b''	J_w''
Volt	Milli-ampere	Milli-ampere	Volt	Milli-ampere	Milli-ampere	Volt	Milli-ampere	Milli-ampere
0,077	+ 2,47	+ 0,36	1,778	+ 1,35	+ 8,89	3,66	- 14,70	+ 19,40
0,336	+ 4,45	+ 1,64	1,960	+ 0,04	+ 9,91	4,58	- 24,40	+ 24,40
0,528	+ 4,96	+ 2,58	2,11	- 1,04	+ 10,72	5,62	- 36,9	+ 29,8
0,955	+ 4,71	+ 4,69	2,44	- 3,87	+ 12,62	6,77	- 59,5	+ 35,2
1,402	+ 3,25	+ 6,88	3,14	- 9,50	+ 16,62	9,87	- 88,2	+ 48,5

Übersetzungsfehler a in ‰ und Winkelfehler δ in Minuten bei der Frequenz 50.

Sekundäre Belastung VA	$\cos \varphi$	Art der Fehler- bestimmung	$\frac{1}{10} J_N$		$\frac{1}{5} J_N$		$\frac{1}{2} J_N$		$\frac{1}{1} J_N$	
			a ‰	δ'	a ‰	δ'	a ‰	δ'	a ‰	δ'
3	1	Messung	- 0,14	+ 18',8	- 0,19	+ 12',0	- 0,25	+ 4',2	- 0,32	- 2',7
		Diagramm	- 0,21	+ 22',0	- 0,19	+ 13',7	- 0,24	+ 3',0	- 0,31	- 2',3
15	1	Messung	+ 0,06	+ 32',0	+ 0,01	+ 15',8	- 0,04	- 3',2	- 0,10	- 17',1
		Diagramm	+ 0,04	+ 31',0	- 0,02	+ 15',7	- 0,05	- 4',5	- 0,11	- 16',5
15	0,5	Messung	+ 0,46	+ 10',0	+ 0,12	+ 0',6	- 0,25	- 12',0	- 0,52	- 20',5
		Diagramm	+ 0,50	+ 10',7	+ 0,15	+ 1',0	- 0,24	- 12',3	- 0,51	- 20',0
30	1	Messung	+ 0,30	+ 32',0	+ 0,28	+ 9',7	+ 0,25	- 22',0	+ 0,17	- 40',7
		Diagramm	+ 0,31	+ 33',1	+ 0,25	+ 8',5	+ 0,22	- 21',0	+ 0,16	- 41',0
30	0,5	Messung	+ 0,67	+ 1',0	+ 0,17	- 12',5	- 0,50	- 31',5	- 0,92	- 41',8
		Diagramm	+ 0,76	+ 1',0	+ 0,18	- 12',7	- 0,48	- 31',5	- 0,94	- 42',3

9. Folgerung.

Die gemessenen Fehler stimmen mit den aus dem Diagramm abgelesenen Fehlern gut überein. Das Diagramm stellt also das Verhalten des Wandlers bei großen und kleinen, induktionslosen und induktiven sekundären äußeren Belastungen von der Nennstromstärke bis herab zu $\frac{1}{10}$ derselben richtig dar.

Es folgt daraus:

1. Der Magnetisierungsstrom im Betriebe darf praktisch durch den in der Wechselstrombrücke gemessenen Leerlaufstrom ersetzt werden.
2. Die sekundäre Streuung ist in dem ganzen in Frage kommenden Bereich praktisch konstant.

Da die beiden Wandler so grundsätzlich verschieden gebaut sind, ist es wohl erlaubt, diese Folgerung als allgemein gültig anzusehen.

10. Kurzschluß- und Streuinduktivitäten.

Bei beiden Stromwandlern ist der tatsächliche, aus dem Diagramm sich ergebende Blindwiderstand der sekundären Streuung kleiner als die Hälfte des Blindwiderstandes bei Kurzschluß. Die Vermutung liegt nahe, daß die primäre Streuung, reduziert auf die sekundäre Windungszahl, bei Wandlern für große Nennstromstärke mit wenigen Primärwindungen aus starkem Kupferband größer ist als die Streuung einer dünnadrhtigen dicht zusammengepackten Wicklung, wie sie bei der Primärspule für kleine Nennstromstärken und bei der Sekundärspule verwandt wird. Das müßte sich darin zeigen, daß der Blindwiderstand bei Kurzschluß bei Wandlern großer Nennstromstärke größer ist als bei kleinem Übersetzungsverhältnis. An Wandlern verschiedener Nennstromstärke der gleichen Form wie bei den obigen Beispielen ergab die Messung des Blindwiderstandes bei Kurzschluß der Primärklemmen, mit 2 A in der Sekundärwicklung folgendes;

1. Beispiel		2. Beispiel	
Übersetzungsverhältnis	Blindwiderstand bei Kurzschluß	Übersetzungsverhältnis	Blindwiderstand bei Kurzschluß
750/5	2,44 Ω 1,56 Ω ¹⁾ 0,91 Ω 0,80 Ω 0,85 Ω	100/5	0,35 Ω
150/5		5/5	0,25 Ω
10/5			Blindwiderstand der sekundären Streuung aus dem Diagramm
5/5			
150/5	Blindwiderstand der sekundären Streuung aus dem Diagramm 0,35 Ω	100/5	0,10 Ω

Die Vermutung bestätigt sich. Die Messungen zeigen, daß bei Wandlern für kleine Nennstromstärken die sekundäre Streuinduktivität tatsächlich annähernd gleich der Hälfte der Induktivität bei Kurzschluß gesetzt werden darf, bei Wandlern für sehr große Nennstromstärken jedoch nicht. Weitere Versuche sind noch im Gange.

11. Benutzung des Diagramms bei Konstruktionsänderungen. Aluminiumspulen.

Der praktische Wert des Diagramms liegt natürlich weniger darin, daß man für das untersuchte Exemplar von Wandler bei jeder Belastung und Stromstärke schnell die Fehler finden kann, als vielmehr darin, daß das innere Wesen einer Form von

¹⁾ Der Wandler 750/5 hatte sekundär die 1,25fache Windungszahl wie die folgenden Wandler, der gemessene Wert ist durch Division mit $(1,25)^2$ auf gleiche Windungszahl reduziert.

Stromwandlern ergründet wird; das obige Diagramm hat den Vorzug, daß es ausschließlich aus Größen der Sekundärseite aufgebaut ist — das Übersetzungsverhältnis selbst kommt gar nicht darin vor — es gilt also ohne weiteres für jeden Stromwandler beliebiger primärer Nennstromstärke dieser Form, soweit die Sekundärwicklung und der Eisenkörper unverändert bleiben. Der Konstrukteur ist in der Lage, die Wirkung von vorzunehmenden Änderungen an den Wandlern aus dem Diagramm im voraus zuverlässig zu berechnen.

Als Beispiel möge noch angeführt werden, wie sich das Verhalten der Form, welcher der Wandler 150/5 angehört, ändern würde, wenn die Spulen aus Aluminium statt aus Kupfer hergestellt würden, mit der Maßgabe, daß der Widerstand derselben mit Rücksicht auf die zulässige Erwärmung derselbe bleibt.

Es ist

$$r = \frac{\sigma \cdot n \lambda}{q}; \quad Q = n \cdot f \cdot q; \quad n^2 = \frac{r \cdot Q}{\sigma \cdot f \cdot \lambda}.$$

r Widerstand λ mittlere Länge einer Windung
q Leiterquerschnitt Q Querschnittfläche der Wicklung
 σ spezif. Widerstand f Faktor der Querschnittsvergrößerung durch
n Windungszahl die Umspinnung (Füllfaktor).

Nur n, σ , q und f seien veränderlich.

Bezeichnen wir die auf die Aluminiumwicklung sich beziehenden Größen mit n' so ist sowohl für die Primär- wie die Sekundärwicklung

$$n' = n \sqrt{\frac{\sigma f}{\sigma' f'}} = n \sqrt{\frac{17,8}{30,6} \frac{f}{f'}} = n \times 0,763 \sqrt{\frac{f}{f'}} \dots \dots \dots 4)$$

Da wir zur Herstellung von Wandlern für verschiedene Nennstromstärken eine sekundäre Windungszahl, die möglichst viele ganze Faktoren enthält, haben müssen, wählen wir $n' = 0,75 n$.

Um hier nicht zu weit auf weniger wichtige Einzelheiten einzugehen, möge angenommen werden, daß f' so viel größer ist als f — etwa durch Anwendung von Papier- anstatt Baumwollbespinnung —, daß die Beziehung 4) genau erfüllt ist, dann ist

$$r_2' = r_2 = 0,34 \, \Omega; \quad \omega l_2' = \left(\frac{n_2}{n_2'}\right)^2 \omega l_2 = 0,18 \, \Omega; \quad b' = \frac{n}{n'} b$$

oder besser $b' = \frac{1}{2} \frac{n}{n'} b = -0,56\%$.

Bei der verminderten Windungszahl n_2' gehört jetzt zu der Spannung E' derselbe Leerlaufstrom J'' wie zu der Spannung $E' \left(\frac{n_2}{n_2'}\right)^2$ bei der Windungszahl n_2 . Bei der Diagrammablesung mit den bisherigen Schablonen ist also die abgelesene Spannung E' mit $\left(\frac{n_2}{n_2'}\right) = 1,78$ zu multiplizieren und der diesem Produkt entsprechende Punkt der Polarkurve im Diagramm zu markieren.

Es ergibt sich für Stromwandler des Beispiels 1) mit Aluminiumspulen:

Übersetzungsfehler a in %, Winkelfehler δ in Minuten aus dem Diagramm entwickelt.

Sekundäre Belastung		$\frac{1}{10} J_N$		$\frac{1}{5} J_N$		$\frac{1}{2} J_N$		$\frac{1}{1} J_N$	
VA	$\cos \varphi$	a %	δ'	a %	δ'	a %	δ'	a %	δ'
3	1	+ 0,03	+ 36'	+ 0,05	+ 29'	- 0,12	+ 22'	- 0,18	+ 17'
15	1	+ 0,13	+ 62'	+ 0,06	+ 50'	- 0,01	+ 37'	- 0,07	+ 25'
15	0,5	+ 1,07	+ 36'	+ 0,83	+ 28'	+ 0,52	+ 18'	+ 0,27	+ 10',5

Bei $b' = \frac{n}{n'} b = -1,11\%$ würden die Werte von a um $0,55\%$ weiter nach der negativen Seite hin ausgefallen sein.

Der Wandler mit Aluminiumspulen hält zwar nicht mehr überall die Beglaubigungsfehlergrenzen für Stromwandler $a < \pm 0,5\%$; $\delta < \pm 40'$ zwischen $\frac{1}{10} J_N$ und $\frac{1}{5} J_N$ und $a < \pm 1,0\%$; $\delta < \pm 60'$ bis $\frac{1}{10} J_N$ für 15 VA sek. Belastung ein, wie es der Stromwandler mit Kupferspulen tat; aber die Überschreitungen sind nicht groß, er ist immer noch ein recht guter Wandler.

Zusammenfassung.

Ein Diagramm des Stromwandlers zur unmittelbaren Ablesung der Übersetzungs- und Winkelfehler a und δ wird ausschließlich aus Größen der Sekundärseite: Leerlaufstrom, Windungsabweichung, innerer Widerstand und Streuung aufgestellt; die Diagrammablesung wird durch Anwendung von Schablonen vereinfacht. Die sekundäre Streuung und die Windungsabweichung ergibt sich aus dem Diagramm unter Zuhilfenahme einer genauen Messung von a und δ . Für zwei verschieden geartete Stromwandler sind bei mehreren Belastungen und Stromstärken die aus dem Diagramm ermittelten Fehler mit den gemessenen Fehlern verglichen. Die gute Übereinstimmung beweist, daß der Magnetisierungsstrom durch den Leerlaufstrom ersetzt werden darf, und daß die Streuung in weitem Bereich konstant ist.

Bei Wandlern großer Nennstromstärke ist die sekundäre Streuinduktivität merklich kleiner als die Hälfte der Kurzschlußinduktivität, bei Wandlern kleiner Nennstromstärke scheint sie sich diesem Wert zu nähern. Zum Schluß wird an einem Beispiel gezeigt, wie sich die Fehler ändern, wenn die Spulen aus Aluminium hergestellt werden.