Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 42 (1951)

Heft: 20

Artikel: Der Rototrol : eine neue elektrische Gleichstrommaschine

Autor: Tschappu, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061025

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 06.01.2026

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

Mangel an einigen tausend einfachen Leuchtdichte-Messern bestehe, beleuchtet diese Sachlage kräftig. Für den Laboratoriumsbedarf und den fachmännischen Gebrauch ist jedenfalls dieser Mangel bereits behoben.

Literatur

[1] *Schweizerisches Beleuchtungs-Komitee:* Lichttechniker-Tagung über «Licht und Sehen» vom 24. November 1949 in Bern. Vorträge: *Goldmann, H.:* Einiges über die Physiologie der Blendung und das Sehen bei herabgesetzter Beleuchtung. Bull. SEV Bd. 41(1950), Nr. 20, S. 751...760. *Spieser, R.:* Über Leuchtdichte und Blendung durch Leuchten. *Gruber W.:* Praktische Erfahrung mit Blendungen durch Lichtreklamen.

[2] *Dresler, A.:* Methoden zur Bewertung der Beleuchtungsgüte. Eine kritische Übersicht. Bull. SEV Bd. 42(1951), Nr. 15, S. 531...539.

[3] *Taylor, A. H.:* Brightness and Brightness Meters. Illum. Engng. Bd. —(1942), Januar.

[4] *A Brightness Meter,* developed by Luckiesh and Taylor, Lightg. News. Trans". Illum. Eng. Soc. Bd. —(1937), März.

[5] *Luckiesh M.* und *A. H. Taylor:* A Brightness-Meter. J. opt. Soc. Amer. Bd. 27(1937), Nr. 132.

Adresse des Autors:

Prof. *R. Spieser,* Seestrasse 111, Herrliberg (ZH).

Der Rototrol *)

Eine neue elektrische Gleichstrommaschine

Von *F. Tschappu,* Zürich

621.313.226.3

An Hand der Ersatzschemata wird zuerst die prinzipielle Funktionsweise dieses als Regler arbeitenden Gleichstrom-Leistungsverstärkers erläutert. Es folgt darauf eine eingehende Behandlung der in der Maschine induzierten Spannungen, der Kommutationsverhältnisse, sowie der magnetischen Trägheit. Am Schluss des Artikels orientieren einige Beispiele über das ausgedehnte Anwendungsgebiet dieser Maschine in der Praxis.

Exposé, à l'aide du schéma équivalent, du principe de fonctionnement de cet amplificateur de puissance à courant continu, agissant comme régulateur. Etude détaillée des tensions induites dans la machine, des conditions de commutation et de l'inertie magnétique. Quelques exemples illustrent le vaste domaine d'applications pratiques des rototrols.

1. Allgemeines

Unter dem Namen «Rototrol» existiert in Amerika eine Gleichstrommaschine spezieller Art. Rototrol heisst sinngemäss übersetzt *rotierender Kontroller.* Die Maschine arbeitet als rotierender Gleichstromleistungsverstärker und wird für Regulierzwecke mannigfaltiger Art verwendet.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Theorie, dem Aufbau und der Funktionsweise dieser sehr interessanten, in ihrem Aufbau aber komplizierten Maschine. Ihre guten Eigenschaften, nämlich kleine magnetische Trägheit und grosser Leistungs-Verstärkungsgrad, machen den Rototrol-Verstärkerregler für die verschiedensten Regulierzwecke besonders geeignet. Einige Anwendungsbeispiele, welche später eingehender behandelt werden, seien hier erwähnt:

Steuerung bzw. Regulierung der Klemmenspannung von Generatoren, der Drehzahl und Beschleunigung von Gleichstromantrieben, der Hubgeschwindigkeit von Hebewerken usw.

2. Arbeitsweise des Rototrols

Der in Fig. 1 dargestellte elektrische Kreis besteht aus einem Ohmschen Widerstand R_B, einem Gleichstromgenerator G mit Serieerregung und einem Schalter S mit den Klemmen A und B. Der Generator G wird mit konstanter Drehzahl n angetrieben und erzeugt die Rotationsspannung u_s.

Für das ungesättigte Gebiet des aktiven Eisens gilt folgende Beziehung:

$$u_s = -K_s\, i$$

Das negative Vorzeichen von K_s ergibt sich aus der Tatsache, dass der Strom i die entgegengesetzte Richtung wie u_s hat.

*) Vortrag, gehalten am 4. Dezember 1950 im Kolloquium des Elektrotechnischen Institutes der ETH.

Damit im Kreise bei geschlossenem Schalter S ein Strom i entstehen kann, muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$R_B < K_s$$

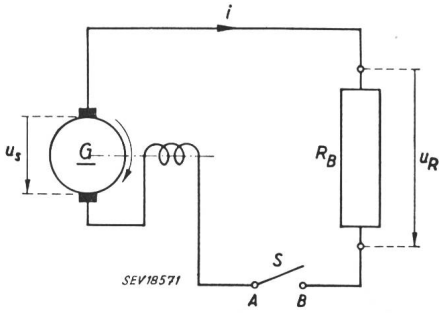

Fig. 1
Arbeitsweise des Rototrols

G Gleichstrom-Generator mit Serieerregung
R_B Ohmscher Widerstand
S Schalter mit den Klemmen A und B

Für $R_B = K_s$ tritt der *Zustand der Selbsterregung* im Kreise ein. Dies soll für die folgenden Betrachtungen stets der Fall sein.

$$u_R = +R_B\, i \qquad u_s = -K_s\, i$$

Die Grössen $u_s = f(i)$ und $u_R = f(i)$ sind in Fig. 2 dargestellt. Ein im Kreise fliessender Strom i befindet sich im indifferenten Gleichgewicht. Er kann jeden Wert zwischen $-i_s$ und $+i_s$ annehmen. Vom Punkte S der Kurve $u_s = f(i)$ an macht sich die Sättigung des aktiven Eisens bemerkbar, und die Linearität zwischen u_s und i wird gestört.

Anstelle des Schalters S werde nun zur Zeit t_1 eine positive Spannungsquelle u_1 mit vernachlässigbarem innerem Widerstand in den Kreis eingeschaltet und zur Zeit t_2 wieder abgeschaltet. Während der Zeit t_1 bis t_2 ist im Kreise nur diese

Spannung u_1 wirksam. Der Strom i_{t_1} schwillt an und hat zur Zeit t_2 den Wert i_{t_2} erreicht. Nun wird die Spannung u_1 wieder abgeschaltet, und der Strom i_{t_2} bleibt konstant und im indifferenten Gleichgewicht. Wird nun eine negative Spannung $-u_1$ an die Klemmen A und B gelegt, so wird der Strom i_{t_2} kleiner und nimmt den konstanten Wert i_{t_3} an, der zur Zeit t_3 des Abschaltens der Spannung $-u_1$ im Kreise fliesst.

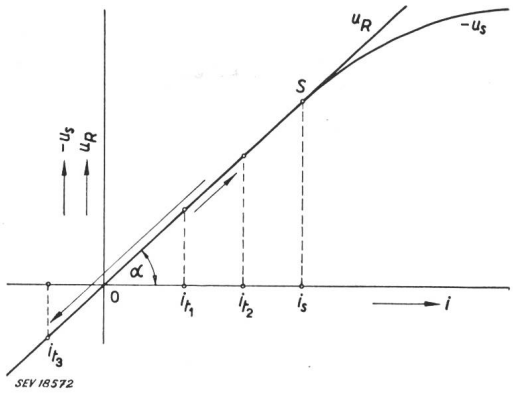

Fig. 2
Spannungskurven in Funktion des Stromes
u_R Spannung am Ohmschen Widerstand R_B
u_s Spannung am serieerregten Generator
i_t Strom im Zeitmoment t

Mit entsprechenden Spannungsimpulsen ist es also möglich, den im Kreise fliessenden selbsterregten Strom i, der sich im indifferenten Gleichgewicht befindet, im ungesättigten Gebiet des aktiven Eisens der Gleichstrommaschine beliebig zu steuern. Die Steuerspannung u_1 reguliert den Strom i in den Grenzen von $-i_s$ bis $+i_s$. Diese Reguliermöglichkeit des Stromes i wird im Rototrol-Verstärkerregler angewandt. Die Maschine vereinigt in sich die Funktionen des Verstärkens der Steuerspannung u_1 und des Regulierens des Stromes i nach bestimmten Gesetzen.

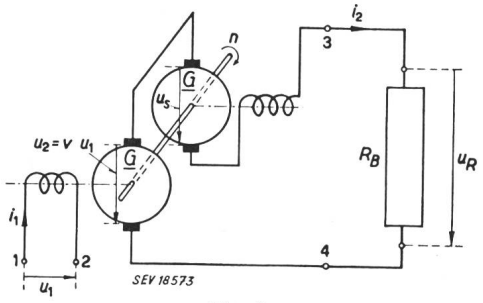

Fig. 3
Prinzipschema des Rototrols
Klemmen 1 und 2:
Eingangsklemmen des Rototrols (Erregerkreis)
Klemmen 3 und 4:
Ausgangsklemmen des Rototrols (Belastungskreis)
u_1 Steuerspannung; u_2 verstärkte Steuerspannung; v Spannungsverstärkungsverhältnis; u_s Seriespannung im Belastungskreis; u_R Spannung am Ohmschen Widerstand R_B; R_B Belastungswiderstand; i_1 Erregerstrom; i_2 Belastungsstrom; n konstante Drehzahl des Rototrols

Das prinzipielle Schema der Maschine ist in Fig. 3 dargestellt. Die Klemmen *1* und *2* sind die Eingangsklemmen, die Klemmen *3* und *4* die Ausgangsklemmen des Rototrols. Als Belastung dient der konstante Widerstand R_B. Der Belastungskreis befindet sich im Zustand der beginnenden Selbsterregung. Die Steuerspannung u_1 wird im Rototrol auf die Ausgangsspannung $u_2 = v\,u_1$ verstärkt, welche die Grösse des Belastungsstromes i_2 reguliert (v Spannungsverstärkungsgrad).

3. Aufbau des Rototrol-Verstärkers

Beim Rototrol-Verstärker sind zwei Verstärkerstufen und die Serieerregung zur Erzeugung der Spannung u_s in einer Maschine vereinigt. Theoretisch wären wohl mehrere Verstärkerstufen in einer Maschine möglich, doch begrenzen die praktischen Schwierigkeiten ihre Zahl im allgemeinen auf zwei. Im besonderen der technologische Aufbau sowie die Beherrschung der Kommutationsverhältnisse setzen die maximal mögliche Zahl der Verstärkerstufen fest. Wir befassen uns in der Folge nur mit dem *2stufigen Rototrol.*

Der 2stufige Rototrol-Verstärker wird aus einer gewöhnlichen 4poligen Gleichstrommaschine mit normalem Doppelbürstensatz entwickelt.

Die Ankerwicklung besteht aus einer normalen 4poligen Schleifenwicklung. Aus im Abschnitt 4 erläuterten Gründen ist eine Wellenwicklung für diese Zwecke unbrauchbar. Die vier Bürsten befinden sich in den neutralen Zonen. Der Anker der Gleichstrommaschine muss mit der konstanten Drehzahl n angetrieben werden.

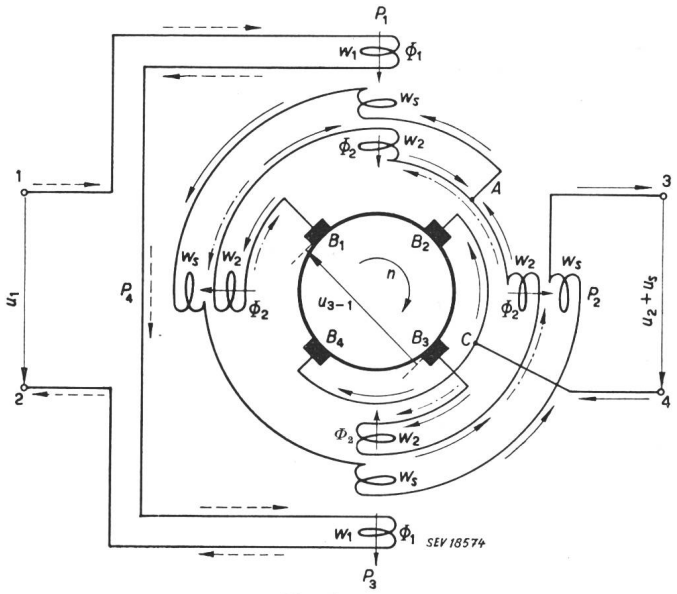

Fig. 4
Prinzipielles Schaltungsschema des Rototrols ohne Wendepol- und Kompensationswicklungen
Klemmen 1 und 2: Eingangsklemmen des Rototrols
Klemmen 3 und 4: Ausgangsklemmen des Rototrols
u_1 Eingangsspannung; u_2 Ausgangsspannung; u_s Seriespannung; u_{3-1} Spannung zwischen den Bürsten B_3 und B_1; w_1 Erregerwindungen der 1. Stufe; w_2 Erregerwindungen der 2. Stufe; w_s Serieerregerwindungen der 2. Stufe; ϕ_1 magnetischer Fluss der 1. Stufe; ϕ_2 magnetischer Fluss der 2. Stufe; i_1 Erregerstrom der 1. Stufe (— — — — →); i_k Kurzschlußstrom = Erregerstrom der 2. Stufe (—·—·—·→); i_2 Belastungsstrom (————→); $P_1 \ldots P_4$ Pole 1...4; $B_1 \ldots B_4$ Bürsten 1...4; n Drehzahl

In Fig. 4 ist das prinzipielle Schaltschema der Maschine ohne Wendepol- und Kompensationswicklungen dargestellt. An den Eingangsklemmen *1* und *2* des Rototrols liegt die Eingangsspannung u_1. Der Strom i_1 erregt die Pole P_1 und P_3 mit den

Wicklungen w_1. Dabei wird das magnetische Feld Φ_1 der 1. Stufe erzeugt. Dieses Feld induziert zwischen den Bürsten B_3 und B_1 die Rotationsspannung $u_{3\text{-}1}$, welche der Spannung u_1 direkt proportional ist, wenn man die Sättigungserscheinungen im aktiven Eisen vernachlässigt. Die Spannung $u_{3\text{-}1}$ ist die Ausgangsspannung der 1. Verstärkerstufe; sie wird zur Eingangsspannung der 2. Verstärkerstufe. Die Bürsten B_1 und B_3 sind über die Erregerwicklungen w_2 der vier Pole kurzgeschlossen. Die Spannung $u_{3\text{-}1}$ bildet den Strom i_k aus, den Erregerstrom der 2. Verstärkerstufe, welcher seinerseits das magnetische Feld Φ_2 der 2. Verstärkerstufe aufbaut. Die Ausgangsspannung u_2 der 2. Verstärkerstufe wird zwischen den Punkten A und C abgegriffen. Zwischen dem Punkte A und der Ausgangsklemme *3* des Rototrols liegen noch die Serieerregerwindungen w_s. An den Ausgangsklemmen *3* und *4* herrscht die Spannung $u_2 + u_s$. Der Punkt C besitzt das Potential der beiden galvanisch kurzgeschlossenen Bürsten B_2 und B_4. Das Potential des Punktes A liegt in der Mitte der Potentiale der Bürsten B_3 und B_1.

Auf den ersten Blick wirkt das Schaltschema der Maschine nach Fig. 4 etwas verwirrend. Es ist daher vorteilhaft, sich an Hand des Ersatzschemas in Fig. 5 Einblick in die inneren Verhältnisse zu verschaffen. Dort wurden zur Vereinfachung des Bildes die Erregerwicklungen aus der Maschine herausgezeichnet. Die Erregerwindungen der 1. Stufe w_2 sind auf den Polen P_1 und P_3, diejenigen der 2. Stufe w_2 und die Serieerregung w_s auf den Polen $P_1 \ldots P_4$ aufgebracht.

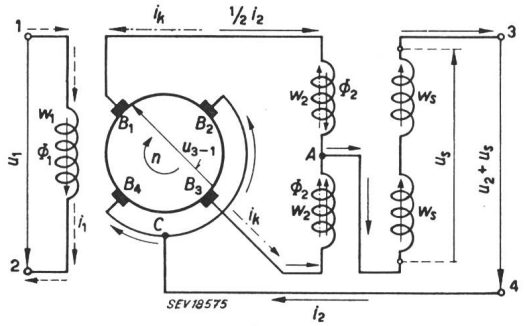

Fig. 5
Ersatzschema des Rototrols
Legenden siehe bei Fig. 4

Beide Verstärkerstufen sind einander in derselben Maschine überlagert. Durch die Superposition zweier magnetischer Felder, eines 2poligen, Φ_1, und eines 4poligen, Φ_2, entsteht eine magnetische Unsymmetrie, und es erhebt sich die Frage, ob sich die beiden Verstärkerstufen nicht gegenseitig beeinflussen. Dies darf natürlich nicht der Fall sein. Die Spannung $u_{3\text{-}1}$, die Ausgangsspannung der 1. Stufe, darf nur vom magnetischen Felde Φ_1 der 1. Stufe, die Spannung u_2, die Ausgangsspannung der 2. Stufe, nur vom magnetischen Felde Φ_2 der 2. Stufe abhängen.

4. Die im Anker induzierten Spannungen

Die Rotorwicklung ist als 4polige Schleifenwicklung ausgebildet. Die in Fig. 6 eingezeichnete Richtung der magnetischen Flüsse wird als positive Richtung definiert. An Hand der Fig. 4 lassen sich folgende Beziehungen aufstellen:

$$\Phi_{P_1} = +\Phi_1 + \Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol } 1 \quad (1)$$

$$\Phi_{P_2} = -\Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol } 2 \quad (2)$$

$$\Phi_{P_3} = -\Phi_1 + \Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol } 3 \quad (3)$$

$$\Phi_{P_4} = -\Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol } 4 \quad (4)$$

Ferner sei angenommen, dass ein positives magnetisches Feld in den Ankerleitern eine positive Rotationsspannung induziere, deren Vektor senkrecht in die Tafelebene hineingerichtet sei (Fig. 6).

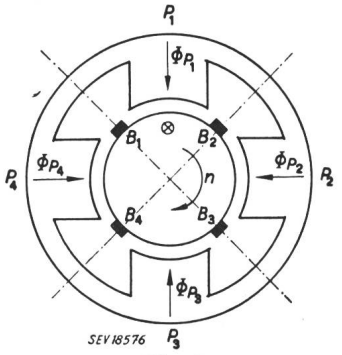

Fig. 6
Im Anker induzierte Spannungen
$\Phi_{P1} \ldots \Phi_{P4}$ magnetische Flüsse der Pole 1...4
$P_1 \ldots P_4$ Pole 1...4; $B_{1 \ldots 4}$ Bürsten; n Drehzahl

a) Erzeugung der Spannung $u_{3\text{-}1}$
($u_{3\text{-}1}$ Spannung zwischen den Bürsten B_3 und B_1)

An dieser Spannungserzeugung sind beteiligt die positiven oberen Spulenseiten von B_3 über B_4 bis nach B_1 und die unteren negativen Spulenseiten, die gegenüber den oberen um eine Polteilung verschoben sind, also von B_4 über B_1 bis nach B_2.

Wir können daher folgende Beziehung aufstellen:

$$u_{3\text{-}1} = k\,(\Phi_{P_3} + \Phi_{P_4} - \Phi_{P_4} - \Phi_{P_1})$$

Setzen wir die Formeln (1)...(4) oben ein, so erhalten wir

$$\underline{u_{3\text{-}1} = -2\,k\,\Phi_1} \quad (5)$$

Im andern Ankerzweig von B_3 über B_2 nach B_1 muss natürlich die gleiche Spannung $u_{3\text{-}1}$ induziert werden, was sich durch eine Kontrolle leicht bestätigen lässt. Die Spannung $u_{3\text{-}1}$, die Ausgangsspannung der 1. Verstärkerstufe, hängt also erwartungsgemäss nur vom magnetischen Feld der 1. Stufe ab. Φ_2 hat keinen Einfluss auf $u_{3\text{-}1}$.

Wäre im Rotor eine gewöhnliche Wellenwicklung vorhanden, so wären an der Erzeugung der Bürstenspannung $u_{3\text{-}1}$ sämtliche Ankerleiter beteiligt. Die Summe der Spannungen aller Ankerleiter ist aber immer gleich null, da sich das Spannungspolygon schliessen muss. Infolgedessen wäre die Spannung $u_{3\text{-}1}$ (also die Spannung zwischen zwei elektrisch um 360° verschobenen Bürsten) ungeachtet der Unsymmetrie der magnetischen Felder immer gleich null. Das ist der Grund, warum beim Rototrol nur Schleifenwicklung im Anker in Frage kommt.

b) Erzeugung der Spannung u_2

(u_2 Ausgangsspannung der 2. Verstärkerstufe zwischen den Punkten A und C, siehe Fig. 5)

Der Punkt C hat das Potential der Bürsten B_2 und B_4, welche galvanisch miteinander verbunden sind.

Das Potential des Punktes A liegt zwischen dem Wert der Potentiale der Bürsten B_3 und B_1.

Zur Bestimmung der Spannung u_2 ist vorerst die Kenntnis der Spannungen u_{3-4} und u_{1-4} notwendig. u_2 berechnet sich nach folgender Formel:

$$u_2 = \tfrac{1}{2}\,(u_{3-4} + u_{1-4}) \qquad (6)$$

An der Erzeugung der Spannung u_{3-4} sind beteiligt die positiven oberen Spulenseiten von B_3 bis B_4 und die negativen unteren Spulenseiten von B_4 bis B_1.

$$u_{3-4} = k\,(\Phi_{P3} - \Phi_{P4}) = \underline{k\,(-\Phi_1 + 2\,\Phi_2)} \qquad (7)$$

An der Erzeugung der Spannung u_{1-4} sind beteiligt die negativen oberen Spulenseiten von B_4 bis B_1 und die positiven unteren Spulenseiten von B_2 bis B_1.

$$u_{1-4} = k\,(-\Phi_{P4} + \Phi_{P1}) = \underline{k\,(+\Phi_1 + 2\,\Phi_2)} \qquad (8)$$

Setzen wir die Gleichungen (7) und (8) ein in die Gleichung (6), so erhalten wir:

$$u_2 = \tfrac{1}{2}\,k\,(4\,\Phi_2) = \underline{2\,k\,\Phi_2} \qquad (9)$$

Die Spannung u_2, die Ausgangsspannung der 2. Verstärkerstufe, hängt also erwartungsgemäss nur vom magnetischen Feld Φ_2 der 2. Verstärkerstufe ab. Φ_1 hat keinen Einfluss auf u_2.

An der Schaltung der 2. Verstärkerstufe müssen wir noch eine kleine Korrektur anbringen, weil der Belastungsstrom i_2 das magnetische Feld Φ_2 beeinflusst (siehe Fig. 5). Der Verstärkungsgrad darf natürlich nicht von der Belastung abhängen. Im Kurzschlusskreis, dem Erregerkreis der 2. Stufe, fliesst neben dem Kurzschlußstrom i_k noch je die Hälfte des Belastungsstromes i_2. An Hand des Ersatzschemas der Fig. 5 lässt sich der Weg des Belastungsstromes i_2 verfolgen. Er fliesst von der Klemme *4* nach dem Punkte C, von wo er je zur Hälfte über die Bürsten B_2 und B_4 in den Anker eintritt. Bei den Bürsten B_3 und B_1 tritt er je zur Hälfte wieder aus dem Anker aus, durchfliesst die Erregerwindungen w_2 der 2. Verstärkerstufe und sammelt sich beim Punkte A wieder.

Der Belastungsstrom i_2 verstärkt die Durchflutungen der Pole P_3 und P_4 und schwächt diejenige von P_1 und P_2. Eine Ungleichheit der Durchflutungen auf den Polen P_1 und P_3 beeinflusst die Spannung u_{3-1}. Eine Ungleichheit der Durchflutungen auf den Polen P_2 und P_4 hätte eine Spannung u_{2-4} zwischen den Bürsten B_2 und B_4 zur Folge, die einen Ausgleichstrom zwischen diesen beiden Bürsten verursachen würde, da sie galvanisch miteinander verbunden sind. Darunter hätte natürlich in erster Linie die Kommutation zu leiden.

Durch folgenden Kniff kann man den schädlichen Einfluss des Belastungsstromes i_2 auf den magnetischen Fluss der 2. Verstärkerstufe eliminieren (Fig. 7):

Die Pole P_1 bis P_4 werden in der Weise bewickelt, dass sich die Durchflutung des Stromes $\tfrac{1}{2}\,i_2$ in beiden Teilwicklungen pro Pol aufhebt, diejenige von i_k addiert. Auf diese Weise gelingt es, das magnetische Feld Φ_2 der 2. Verstärkerstufe nur vom Kurzschlußstrome i_k abhängig zu machen.

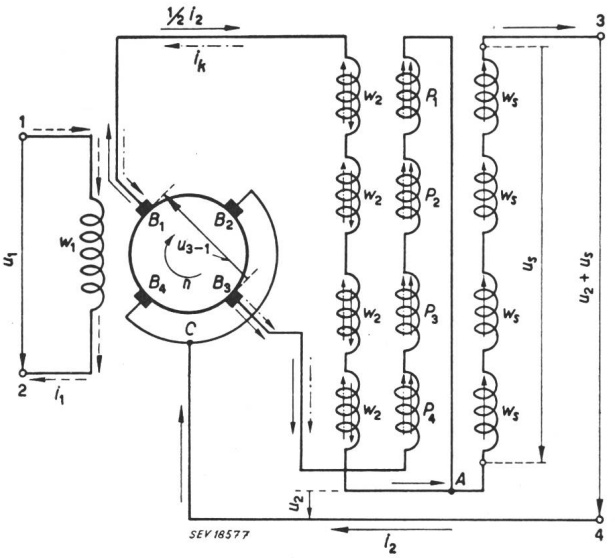

Fig. 7
Vollständiges Ersatzschema des Rototrols
Legenden siehe bei Fig. 4

5. Kommutation

Das Vorhandensein einer Unsymmetrie der magnetischen Felder nötigt zu einer sorgfältigen Betrachtung der Kommutationsverhältnisse.

Da die Polzahl in Stator und Rotor gleich ist, können zur Verbesserung der Kommutationsverhältnisse Wendepole verwendet werden. Gemäss Ersatzschema Fig. 5 kann man für die Bürstenströme schreiben:

$$i_{B1} = +\,i_k - \tfrac{1}{2}\,i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_1 \qquad (10)$$

$$i_{B2} = +\,\tfrac{1}{2}\,i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_2 \qquad (11)$$

$$i_{B3} = -\,i_k - \tfrac{1}{2}\,i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_3 \qquad (12)$$

$$i_{B4} = +\,\tfrac{1}{2}\,i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_4 \qquad (13)$$

In Fig. 8 sind die von den Bürsten $B_1 - B_4$ kurzgeschlossenen Ankerwindungen und die zur Kompensation der Kommutationsspannungen notwendigen Wendepole $WP_{1-2} \ldots WP_{4-1}$ dargestellt.

Wir nehmen ganz allgemein an, dass zur Erzeugung der einzelnen Wendefelder alle vier Bürstenströme $i_{B1} \ldots i_{B4}$ notwendig seien, und machen daher folgenden Ansatz:

$$AW_{WP1-2} = (a\,i_{B1} + b\,i_{B2} + c\,i_{B3} + d\,i_{B4})\,k \qquad (14)$$

Dabei sind die Koeffizienten *a...d* nur Vergleichsgrössen.

Da die Bürstenströme am Ankerumfang sowie die Wendepole zyklisch vertauscht sind, kann man annehmen, dass es auch die Koeffizienten *a...d* seien.

$$AW_{WP_{1-2}} = (a\, i_{B_1} + b\, i_{B_2} + c\, i_{B_3} + d\, i_{B_4})\, k \quad (14)$$

$$AW_{WP_{2-3}} = (d\, i_{B_1} + a\, i_{B_2} + b\, i_{B_3} + c\, i_{B_4})\, k \quad (15)$$

$$AW_{WP_{3-4}} = (c\, i_{B_1} + d\, i_{B_2} + a\, i_{B_3} + b\, i_{B_4})\, k \quad (16)$$

$$AW_{WP_{4-1}} = (b\, i_{B_1} + c\, i_{B_2} + d\, i_{B_3} + a\, i_{B_4})\, k \quad (17)$$

Die Spannung der Selbstinduktion u_L in den kurzgeschlossenen Windungen ist proportional der Stromänderung unter der betreffenden Bürste während der Kommutation, also gleich dem Bürstenstrom i_B. Die Wendefeldspannung u_w muss daher

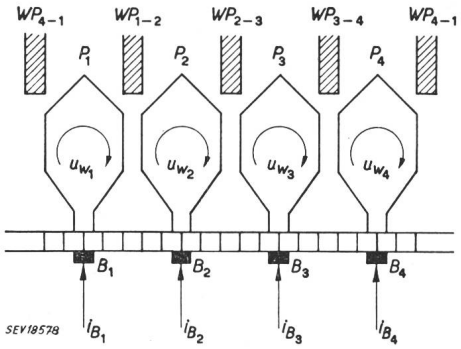

Fig. 8

Schema der kurzgeschlossenen Ankerwindungen und der Wendepole

WP_{x-y} Wendepol zwischen den Polen P_x und P_y
u_{wx} Wendefeldspannung induziert in den von der Bürste B_x kurzgeschlossenen Windungen
i_B Bürstenströme

auch proportional dem Bürstenstrom i_B sein. In einer Kurzschlusswindung werden Spannungen von 2 Wendefeldern induziert (siehe Fig. 8).

Wir können daher setzen:

$$u_{w_1} = k\,(AW_{WP_{4-1}} - AW_{WP_{1-2}}) \quad (18)$$

$$u_{w_2} = k\,(AW_{WP_{1-2}} - AW_{WP_{2-3}}) \quad (19)$$

$$u_{w_3} = k\,(AW_{WP_{2-3}} - AW_{WP_{3-4}}) \quad (20)$$

$$u_{w_4} = k\,(AW_{WP_{3-4}} - AW_{WP_{4-1}}) \quad (21)$$

u_{wx} Wendefeldspannung in der von der Bürste B_x kurzgeschlossenen Windungen.

AW_{WPx-y} Ampèrewindungen des Wendepols WP_{x-y} zwischen den Bürsten B_x und B_y.

Wir setzen die Beziehung (14) und (17) ein in die Gleichung (18)

$$u_{w_1} = k\,[i_{B_1}(b - a) + i_{B_2}(c - b) + i_{B_3}(d - c) + i_{B_4}(a - d)] \quad (22)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_2} = -i_{B_1} + i_k$$
$$i_{B_3} = i_{B_1} - 2\, i_k$$
$$i_{B_4} = -i_{B_1} + i_k$$

so erhalten wir:

$$\underline{u_{w_1} = k\,[i_{B_1}(-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k(+a - b + 3c - 3d)]} \quad (23)$$

Wir setzen die Beziehung (14) und (15) ein in die Gleichung (19)

$$u_{w_2} = k\,[i_{B_1}(a - d) + i_{B_2}(b - a) + i_{B_3}(c - b) + i_{B_4}(d - c)] \quad (24)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_1} = -i_{B_2} + i_k$$
$$i_{B_3} = -i_{B_2} - i_k$$
$$i_{B_4} = +i_{B_2}$$

so erhalten wir:

$$\underline{u_{w_2} = k\,[i_{B_2}(-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k(+a + b - c - d)]} \quad (25)$$

Wir setzen die Beziehung (15) und (16) ein in die Gleichung (20)

$$u_{w_3} = k\,[i_{B_1}(d - c) + i_{B_2}(a - d) + i_{B_3}(b - a) + i_{B_4}(c - b)] \quad (26)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_1} = i_{B_3} + 2\, i_k$$
$$i_{B_2} = -i_{B_3} - i_k$$
$$i_{B_4} = -i_{B_3} - i_k$$

so erhalten wir:

$$\underline{u_{w_3} = k\,[i_{B_3}(-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k(-a + b - 3c + 3d)]} \quad (27)$$

Wir setzen die Beziehung (16) und (17) ein in die Gleichung (21)

$$u_{w_4} = k\,[i_{B_1}(c - b) + i_{B_2}(d - c) + i_{B_3}(a - d) + i_{B_4}(b - a)] \quad (28)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_1} = -i_{B_4} + i_k$$
$$i_{B_2} = +i_{B_4}$$
$$i_{B_3} = -i_{B_4} - i_k$$

so erhalten wir:

$$\underline{u_{w_4} = k\,[i_{B_4}(-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k(-a - b + c + d)]} \quad (29)$$

Die Gleichungen (23), (25), (27) und (29) stellen die Wendefeldspannungen der vier kurzgeschlossenen Windungen in Funktion des betreffenden Bürstenstromes und des Kurzschlußstromes dar.

Die Wendefeldspannungen dürfen aber nur vom jeweiligen Bürstenstrom abhängig sein. Folglich müssen in den Gleichungen (23), (25), (27) und (29) die Klammerausdrücke bei i_k den Wert null ergeben. Dies liefert uns die notwendigen Beziehungen zum Berechnen der Koeffizienten a, b, c und d. Aus Gleichung (23) folgt:

$$+a - b + 3c - 3d = 0 \qquad (30)$$

Aus Gleichung (25) folgt:

$$+a + b - c - d = 0 \qquad (31)$$

Aus Gleichung (27) folgt:

$$-a + b - 3c + 3d = 0 \qquad (32)$$

Aus Gleichung (29) folgt:

$$-a - b + c + d = 0 \qquad (33)$$

Da die Koeffizienten a, b, c und d nur Vergleichsgrössen sind, genügen schon die Gleichungen (30) und (31), oder (32) und (33), um sie zu bestimmen.

Die Werte $a = +1$ $c = -1/3$
$b = -1$ $d = +1/3$

erfüllen die Gleichungen (30) bis (33).

Wir setzen die Werte der Koeffizienten a, b, c und d ein in die Gleichungen (14) bis (17) und erhalten:

$$AW_{WP_{1-2}} = k\,(+i_{B_1} - i_{B_2} - 1/3\, i_{B_3} + 1/3\, i_{B_4}) \qquad (34)$$

$$AW_{WP_{2-3}} = k\,(+1/3\, i_{B_1} + i_{B_2} - i_{B_3} - 1/3\, i_{B_4}) \qquad (35)$$

$$AW_{WP_{3-4}} = k\,(-1/3\, i_{B_1} + 1/3\, i_{B_2} + i_{B_3} - i_{B_4}) \qquad (36)$$

$$AW_{WP_{4-1}} = k\,(-i_{B_1} - 1/3\, i_{B_2} + 1/3\, i_{B_3} + i_{B_4}) \qquad (37)$$

Zur einwandfreien Kompensation der Spannung der Selbsinduktion in den kurzgeschlossenen Windungen sind also alle vier Bürstenströme notwendig. Dies bedingt vier getrennte Wicklungen pro Wendepol. Ausserdem kommt dazu noch eine Wicklung pro Wendepol zur Kompensation des Ankerfeldes, wie man im folgenden Kapitel sehen wird.

6. Ankerrückwirkung

Im Anker fliessen zwei Ströme, der Kurzschlussstrom i_k, der dem 2poligen System, und der Belastungsstrom $1/2\, i_2$, der dem 4poligen System zugeordnet ist. Beide Ströme erzeugen ein Ankerquerfeld.

Der *Kurzschlußstrom* i_k erzeugt ein *2poliges Ankerquerfeld* Φ_{A_1} (Fig. 9a). Es wirkt in der Achse der Pole P_2 und P_4. Dieses Feld Φ_{A_1} muss durch eine auf den beiden Polen P_2 und P_4 aufgebrachte Kompensationswicklung w_{k_1} mit dem Kompensationsfeld Φ_{k_1} kompensiert werden. Das Ankerfeld Φ_{A_1} würde sonst zwischen den Bürsten B_2 und B_4 einen Ausgleichstrom verursachen. Dieser Ausgleichstrom würde seinerseits ein Ankerquerfeld erzeugen, das dem magnetischen Fluss Φ_1 der 1. Stufe entgegenwirkte und so den Verstärkungsgrad beeinflussen würde.

Die Kompensationswindungen w_{k_1} auf den Polen P_2 und P_4 müssen vom Kurzschlußstrom i_k durchflossen sein. Da diesem Strom jedoch stets der halbe Belastungsstrom überlagert ist, müssen die Wicklungen w_{k_1} auf beiden Polen P_2 und P_4 aus zwei Teilwicklungen bestehen, die so geschaltet sind, dass sich die magnetisierende Wirkung des Stromes $1/2\, i_2$ in der Kompensationswicklung aufhebt. Die gleiche Schaltung wurde für die Erregung der 2. Verstärkerstufe angewendet (Fig. 7).

Der *Belastungsstrom* $1/2\, i_2$ erzeugt im Anker ein *4poliges Ankerquerfeld* Φ_{A_2} (Fig. 9b). Dieses Feld wirkt in den Bürstenachsen. Seine schädliche Wirkung besteht in der Verzerrung der Erregerflüsse der Pole, in der Vergrösserung der Lamellenspannung und in der Entstehung eines Feldes in den neutralen Zonen.

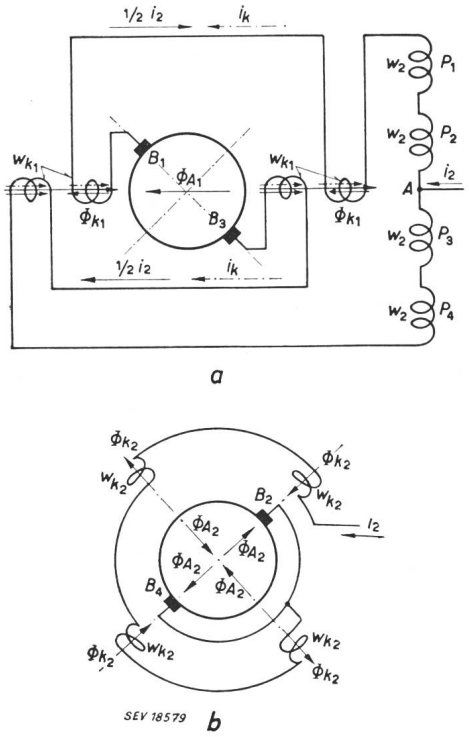

Fig. 9
Kompensationswicklungen

zu *a* Φ_{A1} Ankerquerfeld des Stromes i_k; Φ_{k1} Kompensationsfeld für das Ankerfeld Φ_{A1}; w_{k1} Kompensationswicklungen zur Erzeugung von Φ_{k1}; w_2 Erregerwicklungen der 2. Verstärkerstufe, nur schematisch gezeichnet; $P_{1...4}$ Pole 1...4

zu *b* Φ_{A2} Ankerquerfeld des Stromes i_2; Φ_{k1} Kompensationsfeld für das Ankerfeld Φ_{A2}; w_{k2} Kompensationswicklungen zur Erzeugung von Φ_{k2}

Das Ankerquerfeld Φ_{A_2} muss durch eine Kompensationswicklung w_{k_2} auf den Wendepolen kompensiert werden. Die Wicklungen w_{k_2} werden vom Belastungsstrome i_2 durchflossen.

Bei kleineren Maschinen, bei welchen auf Wendepole verzichtet werden kann, sind die Kompensationswicklungen nicht unbedingt notwendig, wohl aber die Kompensationswicklungen w_{k_1} auf den Polen P_2 und P_4.

7. Zeitkonstanten

Die magnetische Trägheit bildet ein wichtiges Kriterium für die Güte eines Verstärkers und Reglers. Die Maschine kann ihre Regleraufgaben um so besser erfüllen, je kleiner ihre magnetische Trägheit ist.

Legen wir an die Eingangsklemmen des Rototrols die konstante Gleichspannung U_1, so wächst die Ausgangsspannung u_2 nach bestimmten Gesetzen und erreicht asymptotisch ihren Grenzwert

$U_2 = v\, U_1$ (v Spannungsverstärkungsgrad).

Fig. 10 stellt das Ersatzschema des Verstärkers dar. Die beiden Verstärkerstufen *I* und *II* sind der Übersichtlichkeit halber getrennt gezeichnet.

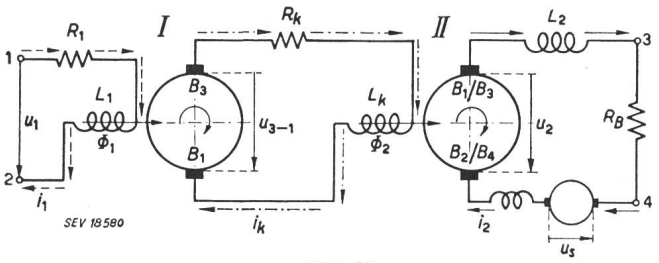

Fig. 10
Ersatzschema des Rototrols
I erste Verstärkerstufe; *II* zweite Verstärkerstufe
Beide Verstärkerstufen sind separat gezeichnet
Bezeichnungen siehe im Text

Die in Fig. 10 bezeichneten Grössen bedeuten:

Im Erregerkreis der 1. Verstärkerstufe:

u_1 Eingangsspannung
i_1 Erregerstrom
R_1 Ohmscher Widerstand des Erregerkreises
L_1 Induktivität des Erregerkreises
Φ_1 magnetisches Feld

Im Erregerkreis der 2. Verstärkerstufe (Kurzschlusskreis):

u_{3-1} Erregerspannung
i_k Erregerstrom
R_k Ohmscher Widerstand des Erregerkreises
L_k Induktivität des Erregerkreises
Φ_2 magnetisches Feld

Im Belastungskreis des Rototrols:

u_2 Ausgangsspannung = verstärkte Eingangsspannung
u_s induzierte Spannung der Seriewindungen w_s
i_2 Belastungsstrom
R_B totaler Ohmscher Widerstand im Belastungskreis
L_2 totale Induktivität im Belastungskreis

Wir definieren noch folgende 2 Begriffe:

$b_1 = \dfrac{R_1}{L_1}$ Dämpfungskonstante im Erregerkreis der 1. Stufe
$T_1 = {}^1/b_1$ Zeitkonstante im Erregerkreis der 1. Stufe
$b_2 = \dfrac{R_k}{L_k}$ Dämpfungskonstante im Erregerkreis der 2. Stufe
$T_2 = {}^1/b_2$ Zeitkonstante im Erregerkreis der 2. Stufe

Mit kleinen Buchstaben werden Momentanwerte, mit grossen Buchstaben konstante Werte der Ströme und Spannungen bezeichnet[1]).

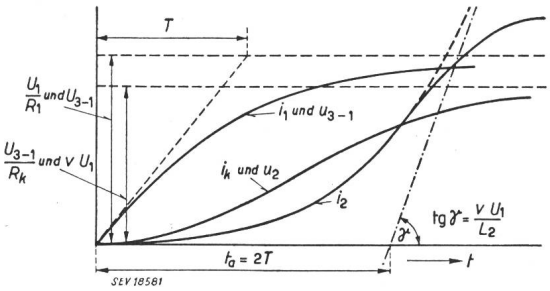

Fig. 11
Spannungs- und Stromcharakteristiken

Wir untersuchen den zeitlichen Verlauf der verschiedenen Ströme und Spannungen in der Maschine, wenn an ihren Eingangsklemmen die konstante Gleichspannung U_1 liegt.

Der Erregerstrom der 1. Verstärkerstufe i_1 entsteht nach folgender Formel:

$$i_1 = \frac{U_1}{R_1}\left(1 - e^{-b_1 t}\right) \quad \text{(siehe Fig. 11)} \qquad (38)$$

wobei $$b_1 = \frac{R_1}{L_1}$$

Unter Vernachlässigung der Sättigungserscheinungen im aktiven Eisen ist die Spannung u_{3-1} dem Strom i_1 direkt proportional. Wir können also für den Momentanwert der Bürstenspannung u_{3-1} schreiben:

$$u_{3-1} = U_{3-1}\left(1 - e^{-b_1 t}\right) \qquad (39)$$

Diese Spannung ist im Erregerkreis der 2. Verstärkerstufe wirksam.

Wir stellen die Differentialgleichung für den Strom i_k auf:

$$u_R = +\, i_k R_k \qquad u_L = +\, L_k \frac{di_k}{dt} \qquad \Sigma\, u = 0$$

Sie lautet:

$$U_{3-1}\left(1 - e^{-b_1 t}\right) = +\, L_k \frac{di_k}{dt} + R_k\, i_k \qquad (40)$$

Die Lösung dieser inhomogenen linearen Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten setzt sich zusammen aus der allgemeinen Lösung der homogenen Gleichung und einem partikulären Integral der inhomogenen Gleichung.

Ansatz für homogene Gleichung:

$$i_{k_1} = A\, e^{-b_2 t}$$

Ansatz für inhomogene Gleichung:

$$i_{k_2} = B + C\, e^{-b_1 t}$$

Führt man diese Ansätze in die Differentialgleichung ein, so erhält man folgende Lösung, wenn man die Bedingung berücksichtigt, dass der Strom i_k zur Zeit 0 den Wert null haben muss:

$$i_k = \frac{U_{3-1}}{R_k}\left(1 - \frac{b_2}{b_2 - b_1}\, e^{-b_1 t} - \frac{b_1}{b_1 - b_2}\, e^{-b_2 t}\right) \qquad (41)$$

Da sich die Formel für den Strom i_k zum Weiterrechnen infolge ihrer komplizierten Struktur nicht sehr gut eignet, gestatten wir uns eine Vereinfachung, die in der Praxis mehr oder weniger den Tatsachen entspricht und die Ergebnisse wesentlich vereinfacht.

Wir nehmen an, dass $b_1 = b_2 = b$ und $T_1 = T_2 = T$ sei. Die Zeitkonstanten und die Dämpfungskonstanten der beiden Verstärkerstufen werden also einander gleichgesetzt. Die Formel für i_k lautet dann:

[1]) siehe: Regeln und Leitsätze für Buchstabensymbole und Zeichen, Publ. Nr. 192 df des SEV.

$$i_k = \frac{U_{3\text{-}1}}{R_k}\left[1-(1+b\,t)\,e^{-bt}\right]$$

$$b = \frac{R_1}{L_1} = \frac{R_k}{L_k} \qquad \text{(s. Fig. 11)} \qquad (42)$$

Die Kurve $i_k = f(t)$ hat keinen reinen exponentiellen Charakter mehr. Ihre Ursprungstangente ist parallel der Abszisse. i_k nähert sich asymptotisch dem Grenzwert $U_{3\text{-}1}/R_k$.

Die Spannung u_2 ist dem Strome i_k direkt proportional, wenn man die Sättigung im aktiven Eisen nicht berücksichtigt.

$$u_2 = U_2\left[1-(1+b\,t)\,e^{-bt}\right]$$

$$U_2 = v\,U_1 \quad (v \text{ Spannungsverstärkungsgrad}). \qquad (43)$$

Diese Spannung ist im Belastungskreis der Maschine wirksam. Wir stellen die Differentialgleichung für den Belastungsstrom i_2 auf:

$$u_R = +R_B\,i_2 \qquad u_L = +L_2\frac{di_2}{dt} \qquad u_s = -u_R$$

$$\Sigma\,u = 0$$

Die Differentialgleichung lautet:

$$v\,U_1\left[1-(1+b\,t)\,e^{-bt}\right] = +L_2\frac{di_2}{dt} \qquad (44)$$

Als Spannungsabfall im Belastungskreis tritt lediglich der induktive auf, da der Ohmsche durch die Seriespannung u_s kompensiert wird. Dieser Zustand gilt natürlich nur für das ungesättigte Gebiet des aktiven Eisens.

Dieser Gleichungstyp stellt ebenfalls eine inhomogene lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten dar.

Ansatz für die homogene Gleichung: $i_2 = A$

Ansatz für die inhomogene Gleichung:

$$i_2 = B - C\,b\,e^{-bt} + D\,e^{-bt} - t\,D\,b\,e^{-bt}$$

A, B, C und D sind Konstanten.

Diese Ansätze führen zu der folgenden Lösung, wenn man den Strom i_2 im Zeitmoment 0 setzt. (Das braucht aber nicht ausdrücklich der Fall zu sein. Im ungesättigten Gebiet des aktiven Eisens ist jeder Strom i_2 im indifferenten Gleichgewicht.)

$$i_2 = \frac{v\,U_1}{L_2}\left[t+\left(\frac{2}{b}+t\right)e^{-bt}-\frac{2}{b}\right] \qquad (45)$$

(siehe Fig. 11).

Die Funktion $i_2 = f(t)$ besitzt eine zur Abszissenachse parallele Ursprungstangente. Sie hat in der Nähe des Ursprungs parabelähnlichen Charakter und nähert sich asymptotisch einer Geraden, die die Abszisse im Punkte $t_a = 2\,T$ schneidet und das Steigungsmass $\mathrm{tg}\gamma = v\,U_1/L_2$ besitzt.

Lässt man die Sättigungserscheinungen im aktiven Eisen unberücksichtigt, so wird der Strom i_2 immer grösser; seine Zunahme ist umgekehrt proportional zur Induktivität im Belastungskreis L_2 und proportional dem Spannungsverstärkungsgrad v. Die Eisensättigung setzt jedoch dem stetigen Wachsen von i_2 eine Grenze. Der Strom i_2 nähert sich asymptotisch einem Grenzwert, der von den Sättigungsverhältnissen der Maschine abhängt. In Fig. 11 ist der wirkliche Verlauf des Stromes i_2 ausgezogen dargestellt.

Eine Zeitkonstante im Belastungskreis ist nicht mehr definierbar, da der Strom i_2 keinen rein exponentiellen Charakter mehr besitzt. Ein Mass für Trägheitslosigkeit des Verstärkers bildet das Steigungsmass der Asymptote der Funktion $i_2 = f(t)$. Dieses ist proportional dem Spannungsverstärkungsgrad v und umgekehrt proportional der Induktivität L_2.

8. Praktische Anwendungen

a) Regulierung der Drehzahl eines Antriebes in Ward-Leonard-Schaltung

Das Schaltschema ist aus Fig. 12 ersichtlich. Die darin verwendeten Symbole bedeuten:

M	Antriebmotor, dessen Drehzahl auf den konstanten Wert n reguliert werden soll.
G	Generator der Ward-Leonard-Gruppe
A	Antrieb des Generators und des Rototrols
R	Rototrol-Regler
TD	Tachometerdynamo
U_-	fremde Gleichspannung (konstant)
$R_{1,2,3}$	Regulierwiderstände zur Änderung der Drehzahl

Wicklungen:	*1*	Erregung des Motors
	2 und *3*	Erregung des Generators
	4 und *5*	Erregung des Rototrols
	6	Erregung des Tachometerdynamos
	7	Serieerregung des Rototrols

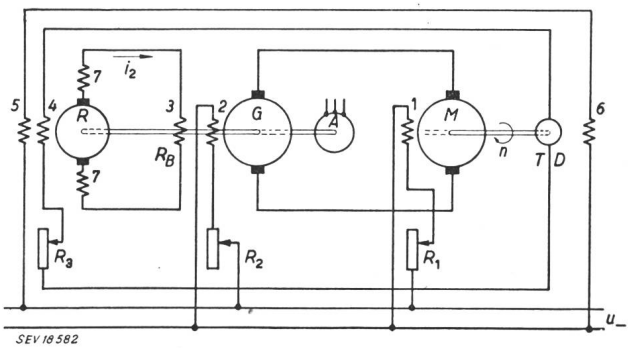

Fig. 12
Schaltschema der Drehzahlregulierung eines Ward-Leonard-Antriebes
Bezeichnungen siehe im Text

Die Erregung des Generators G soll durch den Rototrol in der Weise gesteuert werden, dass die Drehzahl des Motors M unabhängig von der Belastung den konstanten Wert n annimmt. Einen konstanten Anteil der Erregung des Generators liefert die Wicklung *2*, welche an der konstanten Gleichspannung U_- liegt. Den regulierbaren Anteil der Erregung liefert der Rototrol der Wicklung *3* des Belastungswiderstandes R_B. Der Antrieb des Generators und Rototrols soll mit konstanter Drehzahl erfolgen, da sich nur für diesen Zustand der Belastungskreis des Rototrols an der Grenze der Selbsterregung befindet.

Der Tachometerdynamo liefert eine der Drehzahl n des Motors M proportionale Spannung. Damit wird die Erregerwicklung *4* des Rototrols gespiesen. Die Ampèrewindungen dieser Wicklung sind daher proportional der Drehzahl des Motors M.

Die zweite Erregerwicklung *5* des Rototrols liegt an der konstanten Gleichspannung U_-. Seine Ampèrewindungen sind konstant. Die beiden Erregerwicklungen *4* und *5* des Rototrols werden einander magnetisch entgegengeschaltet. Läuft der Motor mit der verlangten Drehzahl n, so sollen sich die beiden Ampèrewindungen AW_4 und AW_5 gerade aufheben; den für die Erregung des Generators nötige Strom i_2 liefern die Seriewindungen *7* des Rototrols.

Ändert aus irgend einem Grunde die Drehzahl n des Motors M, so ändert in gleicher Weise die Tachometerdynamospannung U_{TD} und das Gleichgewicht zwischen AW_4 und AW_5 wird gestört. Die Differenz $(AW_4 - AW_5)$ induziert im Belastungskreis des Rototrols einen verstärkten Spannungsimpuls. Der Erregerstrom i_2 des Generators ändert seinen Wert und beeinflusst die Generatorspannung so, dass die Drehzahl des Motors M den vorgeschriebenen Wert wieder erreicht. Ist das der Fall, so hört die regelnde Wirkung des Rototrols wieder auf bis zur nächsten Störung. Da sich der Strom i_2 im Belastungskreis des Reglers im indifferenten Gleichgewicht befindet, muss er durch das ständige Eingreifen des Reglers auf dem für die Drehzahl n notwendigen Wert gehalten werden.

Durch Variation der Widerstände $R_{1,2 \text{ und } 3}$ kann die verlangte Drehzahl des Motors M in gewissen Grenzen verändert werden. Der Rototrol arbeitet stufenlos. Eine gewisse Schwierigkeit beim Einstellen der Selbsterregung im Belastungskreis des Reglers bildet die Tatsache, dass die magnetische Charakteristik der Maschine im aufsteigenden und absteigenden Ast nicht zusammenfallen. Die Remanenzerscheinung verhindert ein sauberes Einstellen des Zustandes der Selbsterregung. Diese praktische Schwierigkeit hat natürlich einen Einfluss auf die Präzision der Reglerwirkung.

b) Regulierung der Klemmenspannung eines Drehstrom-Generators

Das Schaltschema ist aus Fig. 13 ersichtlich. Die darin verwendeten Symbole bedeuten:

G	Drehstromgenerator	
R	Rototrol-Regler	
A	Antrieb des Rototrols	
R_1	R_2	Ohmsche Widerstände
GL_1	GL_2	Gleichrichter in Graetzschaltung
TR_1	TR_2	Transformatoren
TR_D	Dämpfungstransformator	
Wicklungen:	*1*	Erregerwicklung des Generators
	2	Erregerwicklung des Rototrols
	3	Serieerregerwicklung des Rototrols

Der Rototrol liefert die Erregung für den Generator G. Im Belastungskreis des Reglers herrscht wiederum der Zustand der beginnenden Selbsterregung. Darin fliesse der für die Erregung der Klemmenspannung U_k notwendige Strom i_2.

Im Erregerkreis des Rototrols wirken zwei Spannungen U_1 und U_2, die elektrisch einander entgegengeschaltet sind. Ihre Differenz liegt an den Klemmen der Erregerwicklung *2* des Rototrols. Die Spannung U_1 ist die herabtransformierte und gleichgerichtete Klemmenspannung U_k. Die Spannung U_2 ist konstant. Am Potentiometer R_2 wird U_1 bei gegebener Klemmenspannung U_k so eingestellt, dass sie $= -U_2$ wird. Bei gegebener

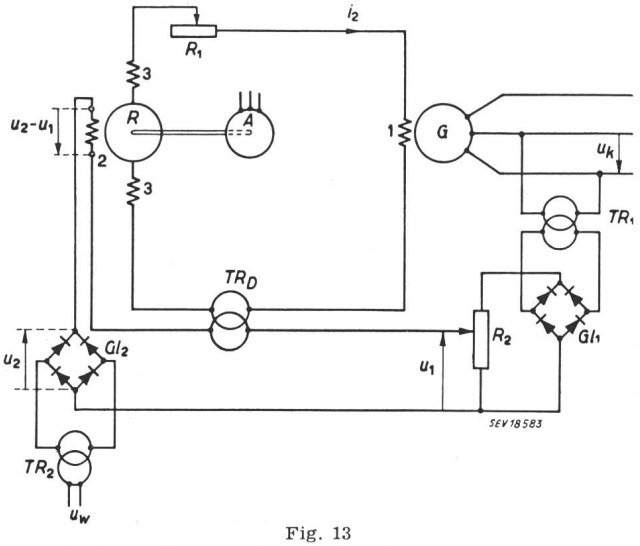

Fig. 13
Schaltschema der Regulierung der Klemmenspannung eines Drehstrom-Generators
Bezeichnungen siehe im Text

Klemmenspannung U_k liegt im Erregerkreis des Rototrols keine Spannung und der Zustand bleibt erhalten. Weicht nun die Klemmenspannung von ihrem Sollwert U_k ab, so ändert dazu proportional die Spannung U_1. Die Differenzspannung $U_2 - U_1$ induziert im Belastungskreis des Rototrols einen verstärkten Spannungsimpuls, welcher eine Änderung des Erregerstromes i_2 und damit der Klemmenspannung U_k zur Folge hat. Hat die Klemmenspannung ihren Sollwert U_k wieder erreicht, so hört die regelnde Wirkung des Rototrols auf, bis eine neue Störung eintritt.

Der Dämpfungstransformator TR_D verhindert bei grossen Spannungsschwankungen ein unstabiles Verhalten des Rototrols.

c) Regulierung der Beschleunigung grosser rotierender Massen

Das Schaltschema ist aus Fig. 14 ersichtlich. Die darin verwendeten Symbole bedeuten:

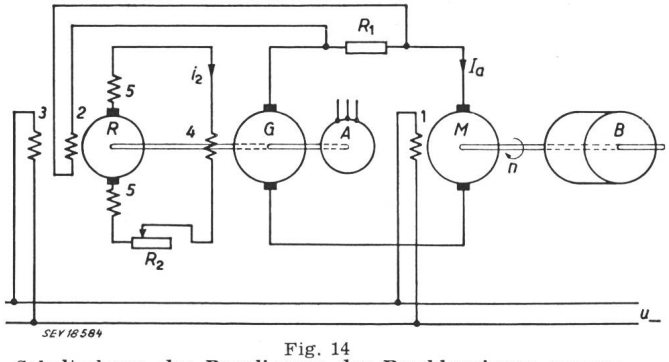

Fig. 14
Schaltschema der Regulierung der Beschleunigung grosser rotierender Massen
Bezeichnungen siehe im Text

B zu beschleunigende Masse mit grossem Schwungmoment
M Antriebsmotor von B
G Generator
R Rototrol-Regler
A Antrieb von Generator und Rototrol
R_1 R_2 Omsche Widerstände

Wicklungen: *1* Erregerwicklung des Motors
2; *3* Erregerwicklungen des Rototrols
4 Erregerwicklung des Generators
5 Serieerregerwicklungen des Rototrols
U_- konstante Gleichspannung

Die Masse B mit grossem Schwungmoment GD^2 soll von einem Gleichstrommotor M in Ward-Leonard-Schaltung möglichst rasch angetrieben werden.

Nach dem Drallsatz beträgt das Antriebsdrehmoment M_a des Motors:

$$M_a = k\, GD^2\, b$$

wobei k Konstante
b Rotationsbeschleunigung
GD^2 Schwungmoment der anzutreibenden Masse

Seine Grösse richtet sich einerseits nach der maximal möglichen Beanspruchung der Übertragungsorgane, anderseits nach dem zulässigen Ankerstrom I_a des Motors. Eine konstante Beschleunigung b erfordert ein konstantes Antriebsdrehmoment M_a und, da der Motor fremd erregt ist, auch einen konstanten Ankerstrom I_a.

Die Aufgabe des Rototrols ist es, den Ankerstrom I_a des Antriebsmotors möglichst konstant zu halten, damit dieser immer maximal ausgenützt ist.

Die Erregung des Generators G wird vom Rototrol gespiesen. Im Belastungskreis des Reglers fliesse der zur Erzeugung des Ankerstromes I_a notwendige Erregerstrom i_2.

Am Widerstand R_1 wird eine dem Strome I_a proportionale Spannung erzeugt. Mit dieser Spannung wird die Erregerwicklung *2* des Rototrols gespiesen. Dieser Wicklung *2* ist eine zweite Wicklung *3* entgegengeschaltet, welche von einem konstanten Strom durchflossen wird. Fliesst im Ankerkreis der notwendige Strom I_a, so kompensieren sich die Ampèrewindungen der Wicklungen *2* und *3* und im Belastungskreis des Reglers wird keine Spannung induziert. Der Ankerstrom I_a bleibt konstant. Ändert sich infolge der Drehzahländerung der Wert des Stromes I_a, so ändern sich die Ampèrewindungen der Wicklung *2* und im Belastungskreis des Reglers wird eine Spannung induziert, die eine Änderung der Ankerspannung des Generators G zur Folge hat, bis der Motorstrom I_a seinen Sollwert wieder erreicht hat. Dann hört die regelnde Wirkung des Rototrols wieder auf.

Diese Art Regulierung kommt häufig vor bei Walzwerk-Antrieben. Die Walzen sollen möglichst rasch auf eine bestimmte Drehzahl gebracht oder bis zum Stillstand abgebremst werden. Der grosse Vorteil des Rototrol-Reglers bei diesem Vorgang ist das stufenlose Arbeiten. Es tritt keine sprunghafte Änderung des Motorstromes I_a auf, die den Übertragungsorganen des Drehmomentes schaden könnte. Mit grosser Präzision hält der Rototrol den Maschinenstrom I_a unabhängig der Drehzahl konstant.

Diese Beispiele mögen zeigen, auf welch mannigfaltige Art und Weise der Rototrol-Verstärker-Regler in der Praxis für Regulierzwecke gebraucht werden kann.

Literatur

[1] *Carleton, James T.:* The Transient Behavior of the 2-Stage Rototrol Main Exciter Voltage Regulating System as Determined by Electrical Analogy. Electr. Engng. Bd. 68 (1949), S. 59...63.

[2] *Erbe, J. R.:* Electric Control. Iron Age Bd. 163(1949), Jan.

[3] *Fisher, M. H.:* Industrial Applications of Rotating Regulators. Power Generation Bd. -(1949), April/Juni.

[4] *Hélot, Jacques:* Rototrol. Bull. Soc. franç. Electr". 6. Serie Bd. 9(1949), Nr. 94, S. 328...342.

[5] *Baker, R. R.:* Pulp and Paper Industry Electrical Developments. Electr. Engng. Bd. 67(1948).

[6] *Lynn, C.* und *C. E. Valentine:* Rototrol Provides Generator Excitation. Westinghouse Engr. Bd. 8(1948), Nr. 2, S. 34...36.

[7] *Kimball, A. W.:* Two-Stage Rototrol for Low-Energy Regulating Systems. Electr. Engng. Bd. 66(1947), S. 1507...1511.

[8] *Liwschitz, M. M.:* The Multistage Rototrol. Electr. Engng. Bd. 66(1947), S. 564...568.

[9] *Harris, W. R.:* Industrial Application of Rototrol Regulators. Electr. Engng. Trans. Bd. 65(1946), März, S. 118...123.

Adresse des Autors:
F. Tschappu, Dipl. El.-Ing., Schönbühl 8, Zug.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Anwendung von Widerständen mit negativem Temperaturkoeffizienten

621.316.86

[Nach *R. Kretzmann:* Anwendungsmöglichkeiten von NTC-Widerständen. Funk-Techn. Bd. 6(1951), Nr. 15, S. 419...421.]

Widerstände mit negativen Temperaturkoeffizienten (im folgenden NTC-Widerstände) unterscheiden sich von den üblichen Widerständen durch einen grossen negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandswertes (— 3...4,5 % pro °C bei 20 °C). Steigt die Temperatur eines solchen Widerstandes infolge Anstieg der Umgebungstemperatur oder auch durch Wärmeentwicklung im Widerstand selbst, so sinkt dessen Widerstand erheblich. Solche Widerstände können zu verschiedenen Zwecken verwendet werden.

Temperaturmessung

Wird der Ohmsche Widerstandswert eines NTC-Widerstandes mit einer derart geringen Stromstärke gemessen, dass im Widerstand selbst keine nennenswerte Erwärmung erfolgt und somit der Widerstandswert ausschliesslich von der Umgebungstemperatur abhängt, so kann der NTC-Widerstand als Widerstandsthermometer benützt werden. Die Empfindlichkeit solcher Widerstandsthermometer ist bei Zimmertemperatur 8...12mal so hoch als diejenige der üblichen Widerstandsthermometer; bei niedrigeren Temperaturen

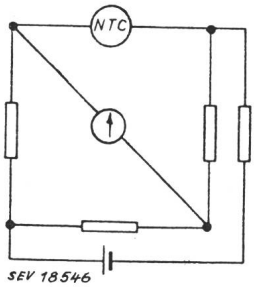

Fig. 1
Brückenschaltung mit NTC-Widerstand für Temperaturmessung