Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 50 (1959)

Heft: 22

Artikel: Untersuchungen von Ward-Leonard-Regelungen mit einem Analogie-Gerät

Autor: Bühler, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057827

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: 09.08.2025

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

Untersuchungen von Ward-Leonard-Regelungen mit einem Analogie-Gerät [1])

Von *H. Bühler*, Bassersdorf

621.313.2.077.3 : 681.142.001.57

Aus den Differentialgleichungen des Ward-Leonard-Kreises lässt sich die Nachbildung auf einem Analogie-Gerät ableiten. In vereinfachter Form wird der Einfluss der Ankerrückwirkung auf das dynamische Verhalten untersucht, und es werden einige am Analogie-Gerät gemessene Ausgleichvorgänge gezeigt.

Des équations différentielles du système Ward-Léonard peuvent se dériver des imitations par un calculateur analogique. L'influence de la réaction de l'induit sera examinée par une simplification à la réponse transitoire et quelques phénomènes transitoires seront démontrés au calculateur analogique.

1. Einleitung

Die Vorteile, die ein Analogie-Gerät zur Untersuchung von Regelkreisen bietet, sind kurz zusammengefasst die folgenden:

Das statische, vor allem aber das dynamische Verhalten der Regelung kann zum voraus bestimmt werden, ohne dass z. B. die Maschinen, die die Regelstrecke darstellen, verwendet werden müssen. Die Konstanten der Regelstrecke lassen sich leicht verändern, was besonders bei Entwicklungsversuchen vorteilhaft ist. Durch das Wegfallen der meistens grossen Maschinen, die ein vorsichtiges Vorgehen bei den Versuchen erfordern, lassen sich bei Anwendung von Analogiegeräten die Versuche bedeutend rascher durchführen, was wiederum für die Entwicklung von grossem Vorteil ist. In vielen Fällen ist es zweckmässig, nur die Regelstrecke nachzubilden und den richtigen Regler anzuschliessen, der auf diese Weise vorgeprüft und eingestellt werden kann. Natürlich kann auf Versuche mit den richtigen Maschinen nicht ganz verzichtet werden.

Im Folgenden wollen wir uns auf Drehzahlregelungen mit Ward-Leonard-Kreisen beschränken, wobei vor allem gezeigt werden soll, wie das statische und dynamische Verhalten von Gleichstrommaschinen mit einem elektronischen Analogiegerät nachgebildet werden kann.

2. Der Ward-Leonard-Kreis

Fig. 1 zeigt die bekannte Schaltung eines Ward-Leonard-Kreises mit Generator und Motor. Hier sind auch die später verwendeten Bezeichnungen

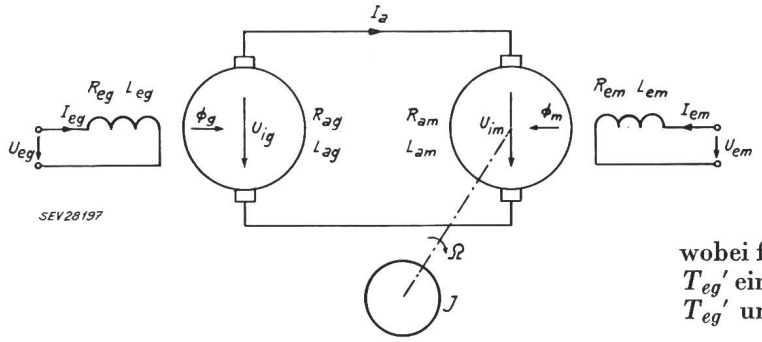


Fig. 1
Schaltung eines Ward-Leonard-Antriebes
Bezeichnungen siehe im Text

eingetragen. Es lassen sich die folgenden wesentlichen Teile unterscheiden und getrennt behandeln:

a) Generatorfeld;
b) Motorfeld;
c) Ankerkreis;
d) Bewegungsgleichung des Motors.

Um verschiedene Ward-Leonard-Antriebe besser miteinander vergleichen zu können, ist es zweckmässig, bezogene Grössen einzuführen, ähnlich wie es bei der Behandlung des nichtstationären Verhaltens bei Synchronmaschinen üblich ist (Per-unit-System). Im Falle der Ward-Leonard-Antriebe scheint als Bezugspunkt aller Grössen am zweckmässigsten: «Nennlast bei grösster Drehzahl bei ungeschwächtem Motorfeld.» Damit sind die Bezugspunkte für alle Grössen wie Erregerströme, Ankerspannung, Ankerstrom, Drehzahl usw. festgelegt.

Zur Unterscheidung der wirklichen Grössen in A, V, U./min usw., die mit grossen Buchstaben bezeichnet werden, sollen die bezogenen Grössen mit dem entsprechenden kleinen Buchstaben angeschrieben werden.

2.1 Das Generatorfeld

In Fig. 2 ist das Generatorfeld herausgezeichnet. Zwischen der Erregerspannung U_{eg}, dem Erregerstrom I_{eg} und dem Fluss Φ_g besteht die Beziehung:

$$-U_{eg} + I_{eg} R_{eg} + N_{eg} \frac{d\Phi_g}{dt} = 0 \qquad (1)$$

(Bezeichnungen siehe Fig. 2)

Wir führen nun bezogene Grössen ein, indem wir Gl. (1) durch U_{egn} dividieren, wobei zu beachten ist, dass $U_{egn} = I_{egn} R_{eg}$ ist, es folgt dann:

$$-u_{eg} + i_{eg} + T_{eg}' \frac{d\varphi_g}{dt} = 0 \qquad (2)$$

wobei für $N_{eg}\Phi_{gn}/I_{egn}R_{eg}$ eine fiktive Zeitkonstante T_{eg}' eingeführt wurde. Der Zusammenhang zwischen T_{eg}' und der gebräuchlichen Zeitkonstante T_{eg} der

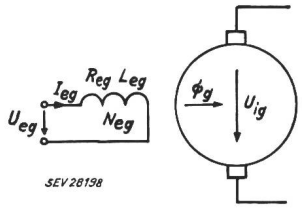


Fig. 2
Generatorfeld
Bezeichnungen siehe im Text

Erregerwicklung im ungesättigten Bereich soll später gezeigt werden.

[1]) Vortrag, gehalten an der 4. Tagung der Schweizerischen Gesellschaft für Automatik vom 2. bis 5. Dezember 1958 in Zürich.

Wir stellen Gl. (2) etwas um

$$\frac{d\varphi_g}{dt} = \frac{u_{eg}}{T_{eg}'} - \frac{i_{eg}}{T_{eg}'} \qquad (3)$$

Mit einem Integrator eines elektronischen Analogiegerätes lässt sich diese Gleichung lösen; wenn an den einen Eingang die mit $1/T_{eg}'$ multiplizierte Grösse u_{eg} und an einen zweiten Eingang die mit $1/T_{eg}'$ multiplizierte Grösse $-i_{eg}$ hineingegeben wird, so erscheint am Ausgang des Integrators die Grösse $-\varphi_g$ (Fig. 3). Das negative Vorzeichen ist dadurch bedingt, dass die elektronischen Integratoren, wie auch die Verstärker (Summierglieder) bei Analogiegeräten einen Vorzeichenwechsel hervorrufen.

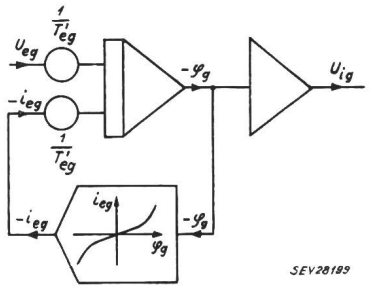


Fig. 3
Nachbildung des Generatorfeldes
Bezeichnungen siehe im Text

Nun ist aber zu beachten, dass zwischen dem Erregerstrom i_{eg} und dem Fluss φ_g eine nichtlineare Beziehung durch die Magnetisierungskurve oder Leerlaufkurve des Generators besteht. Die Leerlaufkurve in bezogenen Einheiten ist in Fig. 4 dargestellt. Um nun die Verhältnisse im Generatorfeld richtig nachzubilden, muss man aus dem Fluss φ_g mit Hilfe der inversen Magnetisierungskurve den dazugehörigen Erregerstrom i_{eg} bestimmen. Dazu muss ein nichtlineares Glied, ein sog. Funktionsgeber herbeigezogen werden, der dann, wie in Fig. 3 gezeigt, zwischen den Ausgang des Integrators und den einen Eingang gelegt werden muss. Mit dieser Anordnung kann man nun bei einem zeitlich veränderlichen Verlauf der Erregerspannung u_{eg} den Verlauf des Flusses φ_g bestimmen.

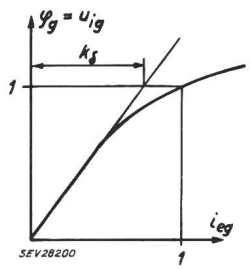


Fig. 4
Leerlaufkurve des Generators
Bezeichnungen siehe im Text

Es soll noch kurz erwähnt werden, dass die einzustellende, fiktive Zeitkonstante T_{eg}' aus der ungesättigten Zeitkonstante T_{eg} der Erregerwicklung durch Multiplikation mit dem Faktor k_δ folgt. k_δ ist dabei einfach der Anteil des Luftspaltes am Erregerstrom im Nennpunkt, entsprechend der Darstellung in Fig. 4.

Unter Annahme der meist gut zutreffenden Voraussetzung, dass die Drehzahl des Ward-Leonardgenerators konstant sei, ist die induzierte Spannung proportional dem Fluss. Bei bezogenen Einheiten wird diese Proportionalitätskonstante gleich eins, so dass gilt:

$$u_{ig} = \varphi_g \qquad (4)$$

In der Nachbildung auf dem Analogiegerät nach Fig. 3 soll noch ein Verstärker zur Vorzeichenumkehr eingeschalten werden, so dass am Ausgang dieses Verstärkers die Grösse u_{ig} erscheint.

2.2 Das Motorfeld

Das Motorfeld könnte auf die gleiche Art und Weise wie das Generatorfeld nachgebildet werden. Es sei aber vorausgesetzt, dass das Motorfeld konstant ist, wobei zur Drehzahlerhöhung eine fest einstellbare Feldschwächung vorgenommen werden kann. In diesem Fall geht das Motorfeld, wie später gezeigt wird, als einstellbare Konstante in die Nachbildung ein, und es sind zur Nachbildung keine weiteren Kreise vorzusehen.

2.3 Der Ankerkreis

Aus Fig. 5 gehen die wesentlichen Grössen im Ankerkreis hervor. Im Generator wird die Spannung U_{ig}, im Motor die Spannung U_{im} induziert. Im Ankerkreis fliesst der Strom I_a. Der Ohmsche Widerstand, bzw. die Induktivität des ganzen Ankerkreises ist mit R_a bzw. L_a bezeichnet.

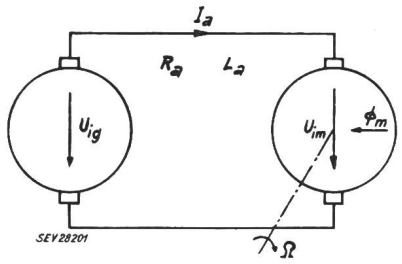


Fig. 5
Ankerkreis
Bezeichnungen siehe im Text

Da die Verhältnisse im Ankerkreis als linear angesehen werden dürfen, so soll hier die Laplace-Transformation herbeigezogen werden, wobei wir die Anfangsbedingungen zu null annehmen. Die Gleichung für den Ankerkreis lautet dann:

$$-\tilde{U}_{ig} + \tilde{I}_a (R_a + p\, L_a) + \tilde{U}_{im} = 0 \qquad (5)$$

Das ~-Zeichen über den Symbolen soll andeuten, dass es sich um Grössen im Bildbereich der Laplace-Transformation handelt. Wir führen wiederum bezogene Grössen ein, wobei zu beachten ist, dass $U_{imn} = U_{ign} - I_{an} R_a$ ist, es folgt dann:

$$-\tilde{u}_{ig} + \tilde{i}_a r_a (1 + p T_a) + \tilde{u}_{im} (1 - r_a) = 0 \qquad (6)$$

Dabei ist die Zeitkonstante:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

und der bezogene Ohmsche Widerstand des Ankerkreises:

$$r_a = \frac{I_{an} R_a}{U_{ign}}$$

Wir haben zu beachten, dass die im Motor induzierte Spannung u_{im} einerseits proportional dem Motorfluss φ_m, anderseits proportional der Drehzahl ist, d. h.:

$$u_{im} = \varphi_m \omega \qquad (7)$$

Der bezogene Motorfluss φ_m ist eine Konstante, während die bezogene Drehzahl ω veränderlich ist. Setzen wir Gl. (7) in Gl. (6) ein und lösen nach $\tilde{i}_a r_a$ auf, so folgt:

$$\tilde{i}_a r_a = [\tilde{u}_{ig} - \varphi_m (1 - r_a) \tilde{\omega}] \frac{1}{1 + p T_a} \qquad (8)$$

Es gibt bei gewissen elektronischen Analogierechnern Geräte, welche die Funktion

$$\frac{1}{1 + pT}$$

was ja zeitlich nichts anderes als eine einfache Verzögerung mit der Zeitkonstanten T ist, direkt nachbilden. Gl. (8) können wir nun im Originalbereich mit Hilfe des Analogierechengerätes nachbilden, wie Fig. 6 zeigt.

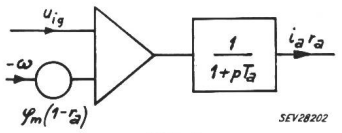


Fig. 6
Nachbildung des Ankerkreises
Bezeichnungen siehe im Text

An den einen Eingang eines Verstärkers wird die im Generator induzierte Spannung u_{ig} angelegt, während an einem zweiten Eingang die noch mit $\varphi_m (1 - r_a)$ zu multiplizierende Drehzahl mit negativem Vorzeichen einzugeben ist. Der Ausgang dieses Verstärkers wird mit einem $1/(1+pT)$-Glied verbunden, so, dass an dessen Ausgang nun $i_a r_a$, d. h. der relative Ohmsche Spannungsabfall im Ankerkreis erscheint. Zu beachten ist wiederum die Vorzeichenumkehr beim Verstärker und $1/(1+pT)$-Glied.

2.4 Die Bewegungsgleichung

Auf den Rotor des Antriebsmotors wirkt einerseits das elektrische Antriebsmoment M_a und anderseits das Belastungsmoment M_b von der anzutreibenden Maschine (Fig. 7). Wenn J das Massenträgheitsmoment aller rotierenden Massen, bezogen auf die Motorwelle ist, so lautet die Bewegungsgleichung:

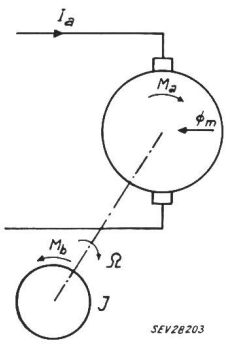


Fig. 7
Zur Ableitung der Bewegungsgleichung
Bezeichnungen siehe im Text

$$\frac{d\Omega}{dt} J = M_a - M_b \qquad (9)$$

Das Antriebsmoment des Motors ist:

$$M_a = k_m \Phi_m I_a$$

wobei k_m eine Motorkonstante ist. Führt man nun in der Bewegungsgleichung bezogene Grössen ein, wobei Antriebs- und Belastungsmoment auf das Motornennmoment $M_{an} = k_m \Phi_{mn} I_{an}$ bezogen werden sollen, so folgt:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi_m i_a}{T_m} - \frac{m_b}{T_m} = \frac{\varphi_m}{r_a T_m} i_a r_a - \frac{m_b}{T_m} \qquad (10)$$

Die mechanische Zeitkonstante, auch Anlaufzeitkonstante genannt, ist

$$T_m = \frac{J \Omega_n}{M_{an}}$$

T_m ist die Zeit, die erforderlich wäre, um die rotierenden Schwungmassen mit dem konstanten Moment M_{an} von Stillstand auf Nennwinkelgeschwindigkeit Ω_n zu beschleunigen.

Die Bewegungsgleichung lässt sich wiederum einfach nachbilden (Fig. 8). Auf den Eingang eines Integrators wird einerseits der mit $\varphi_m / r_a T_m$ multiplizierte relative Ohmsche Spannungsabfall $i_a r_a$, anderseits das Belastungsmoment $-m_b$, das mit $1/T_m$ zu multiplizieren ist, gegeben, so dass am Ausgang $-\omega$, d. h. die Drehzahl, mit negativem Vorzeichen erscheint.

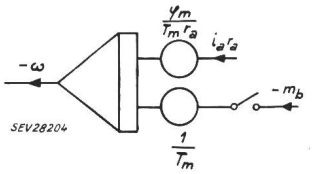


Fig. 8
Nachbildung der Bewegungsgleichung
Bezeichnungen siehe im Text

Mit einem Schalter können Laststösse nachgeahmt werden. Bei der Anordnung von Fig. 8 wurde angenommen, dass das Belastungsmoment konstant sei, was einen häufigen Fall darstellt. Ist das Belastungsmoment proportional der Drehzahl, so müsste zur Nachbildung an Stelle einer konstanten Spannung $-m_b$ eine der Drehzahl proportionale Spannung eingeführt werden.

2.5 Die gesamte Nachbildung des Ward-Leonard-Kreises

Die vorgängig behandelten Elemente und deren Nachbildung, nämlich Generatorfeld, Ankerkreis und Bewegungsgleichung, lassen sich nun zusammensetzen, und man erhält das in Fig. 9 gezeigte Schema für die Schaltung der Analogiemaschine.

Die Eingangsgrösse ist die Erregerspannung u_{eg} des Generators, während am Ausgang die Drehzahl ω erscheint. Als Störgrösse kann die Belastung m_b durch die anzutreibende Maschine angesehen werden.

Die Tatsache, dass die Drehzahl mit negativem Vorzeichen erscheint, ist in vielen Fällen erwünscht, überall da, wo der Istwert, d. h. das Drehzahlsignal, mit negativem Vorzeichen in den Regler eingeführt werden muss. In den andern Fällen müsste noch ein weiterer Verstärker für die Vorzeichenumkehr eingeschaltet werden.

Bei der Durchführung der Schaltung auf einem Analogie-Gerät müssen noch Maßstabfragen abgeklärt werden, da an den Potentiometern nur Konstanten ≤ 1 eingestellt werden können. Den Zeitmaßstab wird man 1 : 1 wählen, besonders wenn der

richtige Regler geprüft werden soll. Es soll hier jedoch nicht näher auf diese Fragen eingegangen werden.

2.6 *Beispiele durchgeführter Untersuchungen*

In Fig. 10 und 11 ist der Verlauf der Drehzahl ω, bzw. des Ankerstromes i_a beim Zu- und Abschalten des Nennmomentes bei einem unregulierten Ward-Leonard-Kreis dargestellt. Es wurde dabei der Einfluss verschiedener Ankerzeitkonstanten T_a und verschiedener Anlaufzeitkonstanten T_m untersucht. Zu beachten ist, dass auch bei einer unregulierten Maschine ein Überschwingen über den Endzustand auftreten kann. Dieses Überschwingen ist um so ausgeprägter, je grösser die Ankerzeitkonstante T_a im Verhältnis zur mechanischen Anlaufzeitkonstante T_m ist.

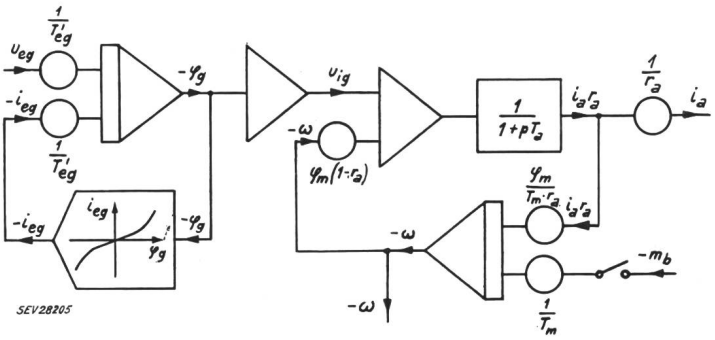


Fig. 9
Nachbildung des Ward-Leonard-Kreises
Bezeichnungen siehe im Text

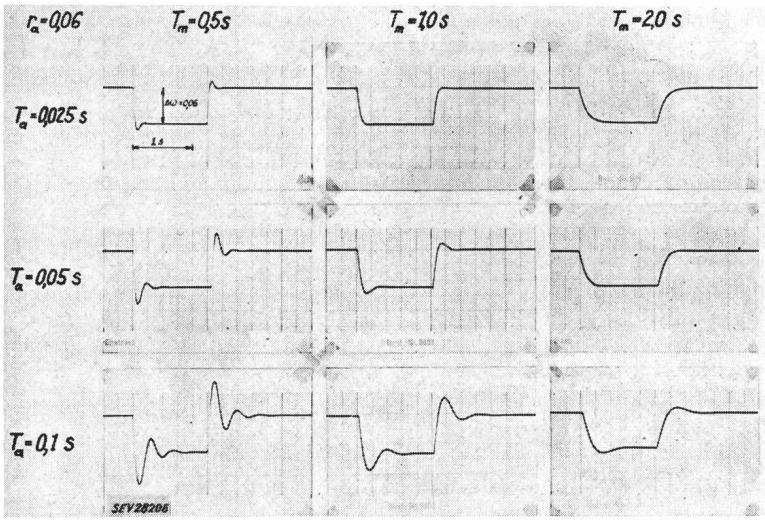


Fig. 10
Verlauf der Drehzahl ω beim Zu- und Abschalten von m_b = 1 bei einem ungeregelten Ward-Leonard-Antrieb
Bezeichnungen siehe im Text

Der zeitliche Verlauf der Ankerstromänderung unterscheidet sich nicht wesentlich von demjenigen der Drehzahl. Vor allem sind die Übergänge entsprechend der Ankerzeitkonstante T_a ausgerundet. Dies ist besonders bei T_a = 0,1 s deutlich sichtbar.

3. Die Berücksichtigung der Ankerrückwirkung

3.1 *Der Einfluss der Ankerrückwirkung*

Bis jetzt wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass der Fluss im Generator wie auch im Motor nur vom Erregerstrom abhängig ist. Dies trifft nun nicht genau zu, da auch der Ankerstrom infolge der sog. Ankerrückwirkung die Grösse des Flusses, wenn auch nur in relativ geringem Masse, beeinflusst. Bei Ward-Leonard-Kreisen darf nun aber oft dieser Einfluss nicht vernachlässigt werden.

Es sind bei der Ankerrückwirkung zwei Anteile zu berücksichtigen. In Fig. 12 ist der Verlauf des Flusses in Funktion des Ankerstromes bei konstantem Erregerstrom gezeigt. Der erste Anteil *a*, der durch die sog. Feldverzerrung unter dem Hauptpol und durch die Kommutierung bedingt ist, ist nichtlinear und von der Richtung des Ankerstromes unabhängig, wobei immer eine feldschwächende Wirkung auftritt. Es ist zu beachten, dass in Ward-Leonard-Kreisen die Richtung des Ankerstromes, z. B. beim Bremsen oder Reversieren ohne weiteres ändern kann. Der zweite Anteil, der z. B. von ungenauer Einstellung der Bürsten in der neutralen Zone herrühren kann, darf praktisch als mit dem Ankerstrom proportional angesehen werden, so dass sich der Einfluss mit der Stromrichtung ändert (Fig. 12). Je nachdem kann hier nun das Feld geschwächt oder verstärkt werden (Verlauf *b* oder *b'*). Durch genaue Bürsteneinstellung lässt sich

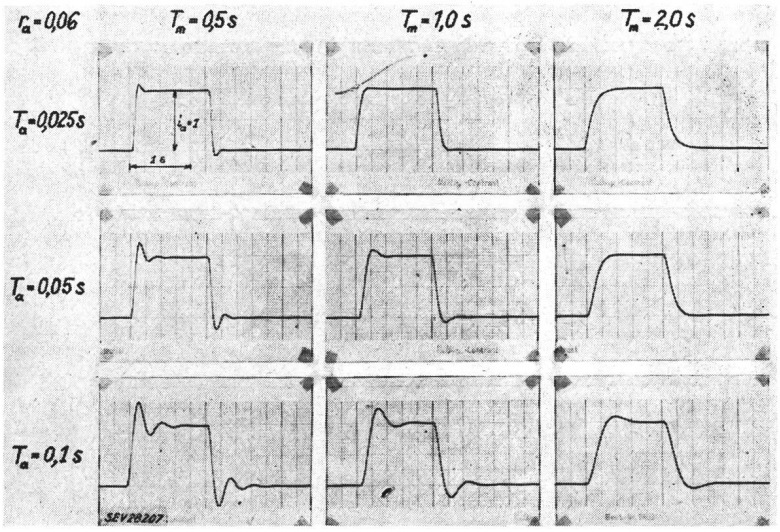


Fig. 11
Verlauf des Ankerstromes i_a beim Zu- und Abschalten von m_b = 1 bei einem ungeregelten Ward-Leonard-Antrieb
Bezeichnungen siehe im Text

dieser zweite Anteil sehr klein halten. Statisch hat eine Kompoundwicklung den gleichen Einfluss, dynamisch wäre aber noch die Kopplung mit der Erregerwicklung zu berücksichtigen.

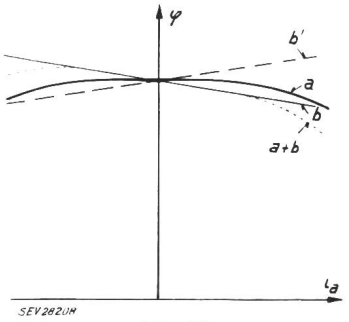
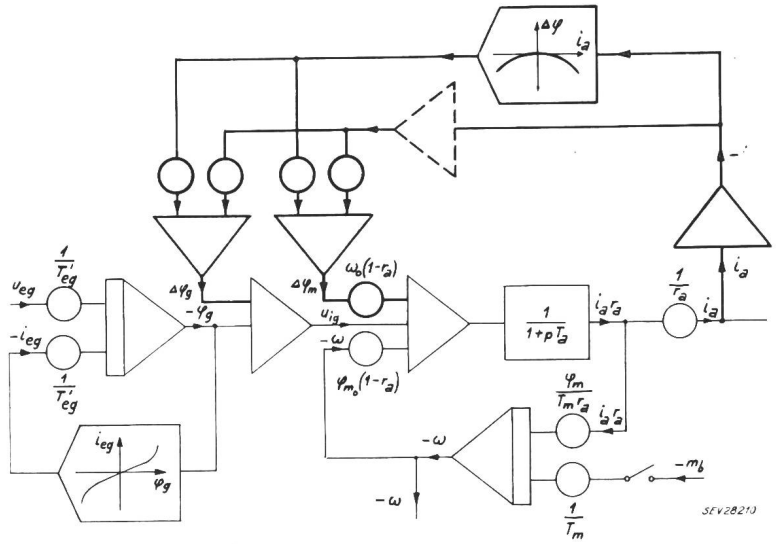


Fig. 12
Flussverlauf in Abhängigkeit vom Ankerstrom bei Berücksichtigung der Ankerrückwirkung
Bezeichnungen siehe im Text

Der nichtlineare und der lineare Anteil der Ankerrückwirkung überlagern sich, und man erhält z. B. den in Fig. 12 absichtlich etwas übertrieben gross dargestellten Verlauf $a+b$ für den Fluss.

Beim Motor hat nun eine Feldverminderung, konstante Ankerspannung vorausgesetzt, zur Folge, dass die Drehzahl bei Belastung weniger abfällt. Bei grosser Ankerrückwirkung kann es nun vorkommen, dass bei Belastung der Drehzahlanstieg grösser ist, als der Drehzahlabfall infolge des Spannungsabfalles im Anker. In einem solchen Fall steigt die Drehzahl des Motors bei Belastung an (Fig. 13).



Bei Ward-Leonard-Kreisen wird nun der Motor von einem Generator meist gleicher Grösse gespiesen. Der Generator besitzt aber auch eine Ankerrückwirkung, insbesondere diejenige durch Feldverzerrung. Das hat zur Folge, dass die Generatorspannung stärker abfällt, als dies dem Ohmschen Spannungsabfall entspricht. Dieser zusätzliche Spannungsabfall hat nun eine stabilisierende Wirkung auf den Motor, so dass die Ankerrückwirkung infolge Feldverzerrung meist keine schwerwiegenden Folgen zeigt.

Anders dagegen verhält es sich mit der Ankerrückwirkung infolge schlechter Einstellung der Bürsten, da sich hier die Wirkung von Motor und Generator in destabilisierender Richtung unterstützen können. In solchen Fällen können ganz unangenehme Drehzahlpendelungen auftreten, die einen normalen Betrieb verunmöglichen. Durch genaue Einstellung der neutralen Zone lassen sich

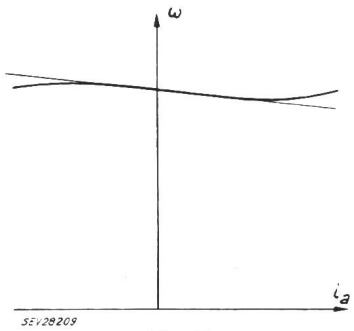


Fig. 13
Drehzahlverlauf bei einem Motor mit Ankerrückwirkung
Bezeichnungen siehe im Text

diese Pendelungen aber meistens beseitigen. Immerhin lässt sich oft feststellen, dass der Motor z. B. in Vorwärtsdrehrichtung stabiler läuft als in Rückwärtsdrehrichtung.

3.2 Nachbildung der Ankerrückwirkung

Es soll nun an Hand von Fig. 14 gezeigt werden, wie der Einfluss der Ankerrückwirkung auf der Analogierechenmaschine nachgebildet werden kann.

Ein dem Ankerstrom i_a proportionales Signal wird einem nichtlinearen Glied zugeführt, das die Verkleinerung des Flusses infolge Feldverzerrung nachbildet. Mit Hilfe von spannungsabhängigen Widerständen und Gleichrichterelementen lässt sich dieser Effekt relativ leicht erreichen. An einem Potentiometer kann die Grösse eingestellt werden. Zusammen mit einem einstellbaren linearen Anteil wird dieses ankerstromabhängige Signal beim Generator dem Verstärker zugeführt, der aus — φ_g die induzierte Spannung u_{ig} bildet. Je nach der Richtung des linearen Anteils ist unter Umständen noch

Fig. 14
Nachbildung des Ward-Leonard-Kreises mit Berücksichtigung der Ankerrückwirkung
Bezeichnungen siehe im Text

ein zusätzlicher Verstärker einzuschalten. Nun ist die Generatorspannung u_{ig}, feste Erregerspannung u_{eg} vorausgesetzt, nicht mehr konstant, sondern vom Ankerstrom abhängig.

Etwas schwieriger ist die Nachbildung der Ankerrückwirkung im Motor. Die dort induzierte Spannung ist proportional dem Fluss φ_m und der Drehzahl ω. Bisher haben wir den Fluss des Motors als konstant angesehen, bei Berücksichtigung der Ankerrückwirkung ist dies jedoch nicht mehr der Fall. In diesem Fall muss man zuerst den Fluss φ_m unter Berücksichtigung der Ankerrückwirkung bilden und diese Grösse einem Multiplikationsglied zu-

führen, welches die Multiplikation mit der Drehzahl ausführt.

Da geeignete Multiplikatoren bei elektronischen Analogiegeräten vielfach fehlen, wird man bestrebt sein, ohne einen solchen auszukommen. Beschränkt man sich auf die richtige Nachbildung in einem bestimmten Betriebspunkt, der durch den Index null gekennzeichnet werden soll, und betrachtet nur kleine Abweichungen von diesem, so kann man für das Produkt $\varphi_m\,\omega$ schreiben:

$$\begin{aligned}\varphi_m\,\omega &= (\varphi_{m0} + \Delta\varphi_m)\,(\omega_0 + \Delta\omega) = \\ &= \varphi_{m0}\,(\omega_0 + \Delta\omega) + \Delta\varphi_m \cdot \omega_0 + \Delta\varphi_m \cdot \Delta\omega \approx \\ &\approx \varphi_{m0}\,\omega + \Delta\varphi_m \cdot \omega_0 \qquad (11)\end{aligned}$$

Dabei wurde das Produkt der kleinen Grössen $\Delta\varphi_m \cdot \Delta\omega$ vernachlässigt. φ_{m0} und ω_0 sind nun wiederum im betreffenden Betriebspunkt konstant und können an Potentiometern eingestellt werden. $\Delta\varphi_m$ ist die Änderung des Flusses infolge der Ankerrückwirkung. Diese Schaltung ist in Fig. 14 dargestellt.

3.3 Beispiele durchgeführter Untersuchungen

In Fig. 15 ist der Einfluss der Ankerrückwirkung entsprechend der Schaltung in Fig. 14 gezeigt.

Für die Daten $r_a = 0{,}06$, $T_a = 0{,}05$ s und $T_m = 1{,}0$ s wurde der Einfluss verschiedener Ankerrückwirkungen infolge Feldverzerrung bei Nenndrehzahl, d. h. $\omega_0 = 1$ untersucht. Dabei ist $\Delta\varphi_{m1}$ der Betrag der Flussänderung im Motor bei Nennstrom, d. h. $i_a = 1$ und $\Delta\varphi_{g1}$ der Betrag der Flussänderung im Generator, ebenfalls bei $i_a = 1$. In beiden Fällen handelt es sich um eine Flussschwächung.

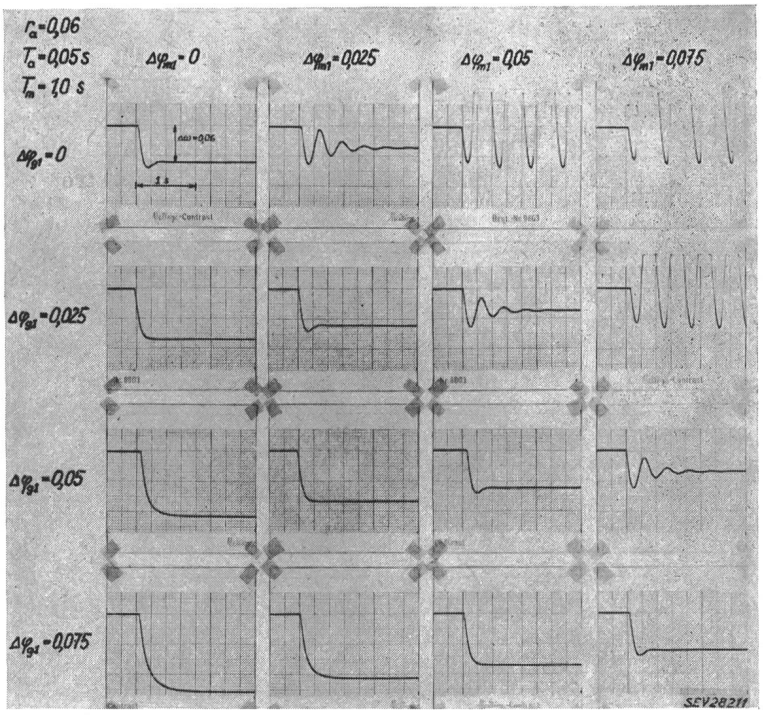


Fig. 15
Verlauf der Drehzahl ω beim Zuschalten von $m_b = 1$ bei Berücksichtigung der Ankerrückwirkung $\Delta\varphi_{m1}$ im Motor, bzw. $\Delta\varphi_{g1}$ im Generator
Bezeichnungen siehe im Text

Besitzt der Generator keine Ankerrückwirkung, d. h. $\Delta\varphi_{g1} = 0$, so wird der Drehzahlverlauf mit zunehmender Ankerrückwirkung des Motors immer schwächer gedämpft um schliesslich unstabil zu werden. Besitzt dagegen nur der Generator eine Ankerrückwirkung, so bleibt die Drehzahl stabil, wobei der statische Drehzahlabfall mit zunehmendem $\Delta\varphi_{g1}$ grösser wird. Haben sowohl Motor wie Generator die gleiche Ankerrückwirkung, so ändert sich am Übergangsverhalten praktisch nichts. Je nach dem ob die Ankerrückwirkung des Motors oder diejenige des Generators überwiegt, ergibt sich ein unstabileres oder ein stabileres Verhalten.

3.4 Bemerkungen zu der Nachbildung nach Fig. 14

Bei der Nachbildung der Ankerrückwirkung in Fig. 14 wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass sich eine Flussänderung unverzögert mit der Ankerstromänderung einstelle. In Wirklichkeit ist jedoch der Fluss, der in den Anker eintritt, auch mit der Erregerwicklung verkettet, die eine rasche Feldänderung nicht zulässt. Ein näheres Eintreten auf die dynamischen Vorgänge der Ankerrückwirkung würde jedoch an dieser Stelle zu weit führen. Es soll lediglich erwähnt werden, dass die Nachbildung in

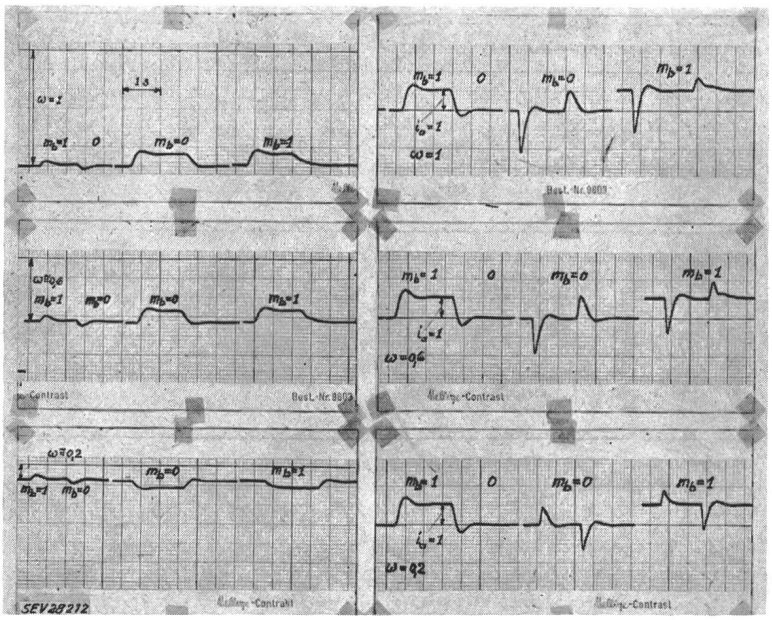


Fig. 16
Untersuchung eines geregelten Ward-Leonard-Antriebes mit Hilfe eines Analogie-Gerätes
$r_a = 0{,}06$; $T_a = 0{,}033$ s; $T_m = 1{,}9$ s
Bezeichnungen siehe im Text

Fig. 14 in Bezug auf die Stabilitätsgrenze zu ungünstig ist, d. h. dass bei Berücksichtigung der dynamischen Vorgänge der Drehzahlverlauf erst bei grösseren $\Delta\varphi_{m1}$-Werten unstabil wird. Überdies wurde der Einfluss der Feldschwächung auf das Drehmoment vernachlässigt.

4. Untersuchung von Drehzahlregelungen

4.1 Anschluss des Drehzahlreglers

Der Anschluss des richtigen Drehzahlreglers bietet meistens keine Schwierigkeiten. Der Istwert der Drehzahl wird normalerweise in Form einer Gleichspannung einer Tachometerdynamo entnommen. Bei den besprochenen Schaltungen des Analogiegerätes zur Nachbildung des Ward-Leonard-Kreises erscheint der Drehzahlwert ebenfalls als Gleichspannung. Unter Umständen muss lediglich ein Verstärker zur Anpassung der Spannung dazwischen geschaltet werden.

Der Ausgang der Drehzahlregeleinrichtung speist in Wirklichkeit die Erregerwicklung des Ward-Leonard-Generators. Diese Erregerwicklung stellt eine induktive Belastung für den Reglerausgang dar. Besteht z. B. die Endstufe des Reglers aus einem gesteuerten Thyratrongleichrichter, so ist für ein richtiges Funktionieren dieses Gleichrichters die induktive Belastung von wesentlicher Bedeutung. In einem solchen Fall ist es erforderlich, den Reglerausgang auf eine geeignete Induktivität zu schalten. Dabei genügt es, wenn die Zeitkonstante dieser Induktivität in der Grössenordnung der wirklichen liegt. Für den Regelvorgang massgebend ist die im Analogiegerät eingestellte Zeitkonstante T_{eg}.

4.2 Beispiel einer untersuchten Regelung

In Fig. 16 sind schliesslich einige Oszillogramme zusammengestellt, die bei der Untersuchung einer einfachen Drehzahlregelung zusammen mit der Nachbildung des Ward-Leonard-Kreises aufgenommen wurden. Links ist der Verlauf der Drehzahl (Ausschlag nach unten, entsprechend dem negativen Istwert) und rechts der Verlauf des Ankerstromes i_a aufgetragen. Auf dem gleichen Streifen ist von links nach rechts das Zu- und Abschalten der Nennlast $m_b = 1$ (Laststoss), eine plötzliche Verstellung des Sollwertes (Sollwertstoss) bei unbelasteter Maschine $m_b = 0$ und ein Sollwertstoss bei belastetem Motor $m_b = 1$ dargestellt. Das langsamere Ansteigen der Drehzahl beim Beschleunigen beim Sollwertstoss mit $m_b = 1$ ist auf die Ankerstrombegrenzung im Drehzahlregler zurückzuführen. Die Untersuchung wurde für 3 verschiedene Drehzahlwerte durchgeführt.

Adresse des Autors:
H. Bühler, Girhaldenstrasse, Bassersdorf (ZH).

Beispiele von Regelkreisen, welche nicht lineare Elemente enthalten [1])

Von *R. Schraivogel*, Ebikon

621-53 : 530.182

Anhand eines Beispiels aus der Praxis der Antriebsteuerung werden nicht lineare Probleme behandelt. Das Auftreten mehrerer Nichtlinearitäten im Regelkreis führt zu besonderen theoretischen Schwierigkeiten, die aber im Interesse praktischer Vorteile überwunden werden müssen.

Se basant sur un exemple tiré de la technique de la commande d'entraînements, l'auteur traite ici des problèmes non-linéaires. L'apparition de plusieurs non-linéarités dans le circuit de réglage conduit à des difficultés théoriques spéciales, mais qu'il est bon de surmonter dans le but d'en tirer des avantages pratiques.

Seit einigen Jahren ist die Regelungstechnik auf einen Stand gekommen, da man die linearen Regelprobleme als erforscht betrachten kann. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt deshalb jetzt bei den nicht linearen Vorgängen, deren Schwierigkeiten man allmählich überwindet oder deren Vorteile man zu schätzen lernt. Die Vielfalt der Betrachtungen über nicht lineare Regelkreise entspricht der Ausgedehnheit dieses Gebietes. In Anbetracht der Tatsache, dass die Mehrzahl der Forschungen sich auf Regelkreise mit einer oder höchstens zwei Nichtlinearitäten beschränkt und auf Differentialgleichungen zweiter oder zur Not dritter Ordnung, ist es gut hervorzuheben, dass diese Einschränkungen sehr oft einfach nicht zulässig sind. Weiter scheint es so zu sein, dass nicht lineare Probleme dort auftauchen, wo die Projektierung der Anlage in erster Linie auf Fragen der betriebsmässigen und wirtschaftlichen Verwirklichung ausgerichtet ist und der Regeltechniker sich dem zu fügen hat.

Das Beispiel, mit dem man diese Gedanken illustrieren kann, bezieht sich auf eine Presse für die Herstellung von Aluminiumprofilen. In Fig. 1 ist die Anordnung prinzipiell dargestellt. Ein Rezipient enthält vorgewärmtes Aluminium, welches mittels eines Kolbens unter hydraulischer Kraft F durch die Matrizenöffnung gepresst wird. Das austretende Profil kann eine Geschwindigkeit bis 1 m/s haben,

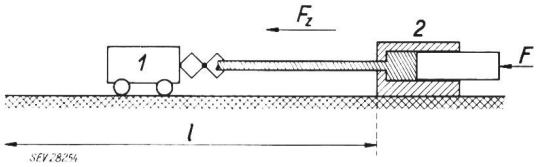


Fig. 1
Prinzipielle Darstellung der Regelaufgabe für die Führung von Aluminiumprofilen

1 Ziehwagen; *2* Presse; *F* hydraulischer Pressedruck; F_z Zugkraft 30...1200 kg, Profilgeschwindigkeit $\leqq$ 1 m/s; *l* Auslaufweg 50 m

je nach Querschnitt und Legierung. Der Auslaufweg ist 50 m lang. Zu dieser Presse wurde eine sog. Spitzenführung konstruiert, mit der Aufgabe, das Profil nicht nur gerade über die Auslaufbahn zu führen, wie es sonst von Arbeitern gemacht wurde, sondern

[1]) Vortrag, gehalten an der 4. Tagung der Schweizerischen Gesellschaft für Automatik vom 2. bis 5. Dezember 1959 in Zürich.