Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 49 (1958)

Heft: 22

Artikel: Steuerungen für die Bremsung von Elektromotoren mit einer Leistungswaage

Autor: Gerlach, H.-G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058547

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: 22.08.2025

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

49e année N° 22 Samedi, le 25 Octobre 1958

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

ORGANE COMMUN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS (ASE) ET DE L'UNION DES CENTRALES SUISSES D'ELECTRICITE (UCS)

Steuerungen für die Bremsung von Elektromotoren mit einer Leistungswaage

Von *H.-G. Gerlach*, Zürich

621.316.719 : 621.313.13.001.4

Eine in Ward-Leonardschaltung betriebene Gleichstromleistungswaage ist geeignet, die an eine moderne Bremsanlage zu stellenden gesteigerten Anforderungen zu erfüllen. So können in dem neu erstellten Prüffeld der Landert-Motoren-A.-G., Bülach (ZH), alle Motoren zwischen 2 und 200 kW Leistung (entsprechend 1...100 kgm Drehmoment, zweipolig, 50 Hz) ausgemessen werden. Die allgemein bekannte Drehzahlsteuerung der Leonardschaltung mit Hilfe der Generatorerregung birgt aber erhebliche Nachteile in sich. Es wird daher eine Steuerung beschrieben, welche die erwähnten Nachteile vermeiden und überdies die Anpassung an verschiedenartige Betriebsfälle bewerkstelligen soll.

Une balance de puissance à courant continu en montage Ward-Léonard permet de satisfaire aux exigences posées à une installation de freinage moderne. C'est ainsi que, sur la nouvelle plate-forme d'essais de la S. A. des moteurs Landert, à Bülach (ZH), tous les moteurs d'une puissance comprise entre 2 et 200 kW (équivalent à un couple de 1...100 mkg, bipolaire, 50 Hz) peuvent y être contrôlés. Le système classique de commande de la vitesse par montage Léonard avec excitation de la génératrice présente toutefois d'importants inconvénients. L'auteur décrit un montage qui supprime ces inconvénients et permet en outre une bonne adaptation aux différents cas de service.

1. Einleitung

Die Zweckmässigkeit von Steuerungen ist im Prüffeld mindestens ebenso wichtig wie die der Hauptstromkreise. Sie entscheidet über die Schnelligkeit und Qualität des Arbeitsablaufs. Die menschliche Funktion soll von der Tätigkeit als Regler und Rechenmaschine nach Möglichkeit entlastet werden, um für die Entgegennahme und Beurteilung von Messwerten, sowie für folgerichtige Entscheidungen in vermehrtem Masse zur Verfügung zu stehen. In diesem Zusammenhang seien besonders zwei Grundforderungen formuliert, die für Steuerungen allgemeine Bedeutung haben:

a) Stabilität

Der Begriff der Stabilität hängt eng zusammen mit zeitlicher Konstanz und Reproduzierbarkeit. Er kennzeichnet die innere Sicherheit einer Anordnung. Ausgehend von der Annahme, dass kleinere Schwankungen im Bereich eines gewissen Pegels unvermeidlich sind, kann man die allgemeine Feststellung machen, dass eine Steuerung relativ um so sicherer arbeitet, je kleiner ihr Verstärkungsgrad, d. h. je grösser die Steuerleistung ist. Ausgesprochen instabile Regelbereiche, z. B. eine gewöhnliche Nebenschlussregelung im linearen Bereich der Charakteristik, lassen sich tatsächlich durch die erwähnte energetische Betrachtungsweise interpretieren.

b) Eindeutigkeit

In einem System von an sich unabhängigen physikalischen Grössen, die aber durch gemeinsame Vorgänge verbunden sind, seien zahlreiche Beeinflussungsmöglichkeiten gegeben. Die Steuermittel sollten nun so gewählt sein, dass eine eindeutige Zuordnung zwischen jeweils einer einzigen veränderlichen Grösse und ihrem einzigen Steuerglied besteht. Abweichungen vom besagten Eindeutigkeitsprinzip kommen sowohl in der Weise vor, dass eine Variable auf mehrere Einstellungen gleichzeitig reagiert, als auch so, dass ein einziges Stellglied gleichzeitig mehrere an sich unabhängige Grössen wesentlich beeinflusst. Beide Formen von Nichteindeutigkeit geben zu den Fragestellungen Anlass, wie sie nachfolgend erörtert werden sollen.

2. Steuerung der Bremskraft

Die Bremskraftregelung wird erst durch die Einführung des Rückarbeitsprinzips mit Hilfe zweier Gleichstrommaschinen problematisch. Die einfacheren Verfahren unterliegen auch einfachen Steuerungsbedingungen. Eine gleichmässige und eindeutige Drehmomentverstellung hat man z. B. beim Pronyschen Zaum sowohl als auch bei der Spannbandbremse. Die Einstellung ist dort solange drehzahlunabhängig, als es der Reibungskoeffizient sein kann.

2.1 Die Leonard-Drehzahlsteuerung im Bremsbetrieb

Bei den Berechnungen sollen folgende Buchstabensymbole verwendet werden:

Φ	magnetischer Polfluss der Leistungswaage
Φ_1	Polfluss des Leonhardgenerators
I	Ankerstrom
M	Drehmoment der Leistungswaage
n	Drehzahl der Leistungswaage unter Last
n_0	Drehzahl der Leistungswaage im Leerlauf
n_1	Drehzahl des Leonardgenerators
$k_1, k_2 ...$	Konstanten

Im Leerlauf der Leistungswaage gilt unter Vernachlässigung der Leerlaufverluste:

$$k_1 n_0 \Phi = k_2 n_1 \Phi_1$$

Unter den Voraussetzungen fester Drehzahl des Leonardgenerators und konstanter Erregung der Leistungswaage resultiert das normale Steuerungsgesetz des Leonardantriebs:

$$n_0 = \frac{k_2 n_1}{k_1 \Phi} \Phi_1 = k_3 \Phi_1 \qquad (1)$$

Der Belastungsstrom ergibt sich aus der Differenz der induzierten elektromotorischen Kräfte von *LW* und *M1* (Fig. 1):

$$I = k_4 (k_1 n \Phi - k_2 n_1 \Phi_1)$$
$$I = k_4 (k_1 n \Phi - k_1 n_0 \Phi)$$
$$I = k_1 k_4 \Phi (n - n_0)$$

Das Drehmoment

$$M = k_5 \Phi^2 (n - n_0) \qquad (2)$$

hängt also von einer Drehzahldifferenz ab.

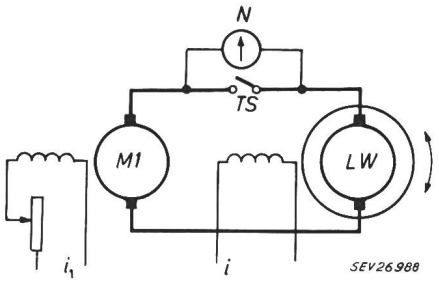

Fig. 1
Leonardschaltung, Steuerung der Drehzahl
LW Leistungswaage; *M1* Leonardgenerator; *TS* Trennschütz; *N* Nullspannungsvoltmeter; *i* Erregerstrom der Leistungswaage, konstant; i_1 Erregerstrom des Bremsgenerators, variabel

Um die Bremsung eines Prüflings einzuleiten, wird normalerweise folgendermassen vorgegangen:

Von der Seite des Prüflings her wird die Leistungswaage bei fester Erregung Φ = konst. auf die Drehzahl des Antriebsmotors gebracht. Der Gleichstromschalter ist bei diesem Manöver offen. Vor dem Einschalten muss die an den Klemmen des offenen Schalters bestehende Spannung mit Hilfe eines Voltmeters gemessen werden (Fig. 1). Erst wenn die Erregung des Leonardgenerators *M1* so eingestellt worden ist, dass das Nullvoltmeter tatsächlich die Spannung Null anzeigt, kann eingeschaltet werden. Im gleichen Moment erfüllen nämlich Φ und n die Bedingung der Gl. (1), so dass $n = n_0$ und gemäss Gl. (2) $M = 0$ zu setzen ist, welche letztere Beziehung auch bei geschlossenem Ankerkreis noch stationär Gültigkeit hat (Kurve *1* in Fig. 2). Von hier aus, nach gelungener Parallelschaltung der Gleichstrommaschinen, erfolgt die Einstellung des Drehmoments durch Veränderung von n_0.

Eine zweite Einstellmöglichkeit bestünde darin, bei geschlossenem Gleichstromankerkreis den Drehstrom zuzuschalten. Wenn durch eine Verriegelung sichergestellt wird, dass nur bei $i_1 = 0$ eingeschaltet werden kann, so wird der sich einstellende Gleichstrom vom Drehmoment des Prüflings abhängen, ohne dass dieser im allgemeinen hochlaufen kann. Der Hochlauf, dem also immer ein Kurzschlussversuch vorausgeht, wird erst durch das Hochfahren der Erregung i_1 ermöglicht.

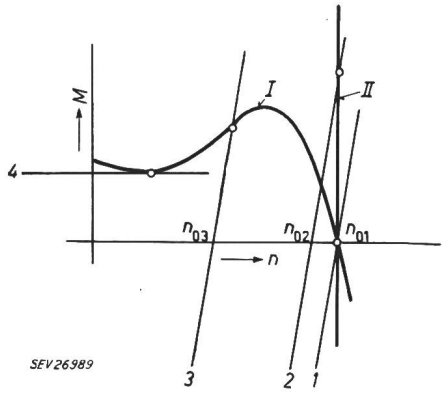

Fig. 2
Motor- und Bremskraftkennlinien
M Drehmoment; *n* Drehzahl; *I* Charakteristik eines Asynchronmotors; *II* Charakteristik eines Synchronmotors; *1, 2, 3* Kennlinien der Leistungswaage bei verschiedenen Einstellungen der Leonardregelung; *4* Drehmomentkennlinie der Leistungswaage bei Komponentensteuerung; n_{01}, n_{02}, n_{03} Leerlaufdrehzahlen der Leistungswaage bei den Einstellungen 1, 2, 3

In jedem Falle ist die aufmerksame Regelung des Erregerstromes i_1 neben anderen Einschaltmanipulationen zur Inbetriebsetzung der Waage notwendig (vgl. dazu im Gegensatz nächsten Abschnitt).

Die Drehkrafteinstellung würde vom Leerlaufpunkt weg, z. B. im Falle eines Synchronmotors, linear und eindeutig sein, falls n konstant bliebe (Kurve *2* in Fig. 2). In allen übrigen Fällen würde die Regelcharakteristik der Bremskraft durch den Prüfling selber wesentlich beeinflusst. Die Drehzahl würde sich nach Massgabe der Kennlinienteilheit beider Maschinen irgendwo zwischen der Leerlaufdrehzahl der Leistungswaage und derjenigen des Prüfmotors einstellen. Auf Grund ihrer Härte wird sich vorwiegend die Leistungswaage durchsetzen und gewissermassen von hinten her, d. h. von der Bremse her, das Drehzahlgeschehen bestimmen.

Die bemerkenswerte Tatsache, dass mit der Leonardsteuerung die Arbeitsweise des zu untersuchenden Motors von der Bremse aus bestimmt wird, führt zu entscheidenden Nachteilen. Verläuft die Statik der Leistungswaagencharakteristik genügend steil, so sind nämlich im gesamten Drehzahlbereich einer Asynchroncharakteristik — und wäre diese unter normalen Belastungsverhältnissen auch noch so deutlich unstabil, d. h. negativ gerichtet — stabile Schnittpunkte möglich (Kurve *3* in Fig. 2). Die Leistungswaage merkt nichts davon, wenn der Prüfling in den unstabilen Bereich eintritt. Es wäre also sogar denkbar, dass die Leistungsabgabe eines Motors versehentlich unterhalb des Kippmoments eingestellt würde.

Um z. B. den Wert des Kippmoments oder irgend eines anderen Extremwerts der Drehmomentkurve zu ermitteln, müssen die Drehmomentwerte längs der Kurve registriert und deren Tendenz aus-

gewertet werden. Lässt man einen kleinen Teil der Charakteristik weg, oder ist man wegen fortgeschrittener Erwärmung zur Eile gezwungen, so kann bei der Prüfung ein unvermuteter Drehmomentsattel verborgen bleiben.

2.2 *Die Komponentensteuerung*

Es muss im Interesse einer schnellen und sicheren Abwicklung des Messvorgangs die Forderung erhoben werden, dass die kritischen Punkte der Drehmomentlinie nicht erst durch punktweises Abtasten, sondern genau wie im späteren Betrieb eindrücklich und von selbst festgestellt werden können, damit über die unteren Drehzahlgebiete schnell hinweggegangen werden kann. Das heisst, wie bei den primitiveren Bremswerkzeugen soll dem Prüfer das Gefühl für betriebsgerechtes Kraftverhalten des Prüflings bewahrt werden.

Wie man sich aus Fig. 2 leicht erklären kann, lautet die Bedingung für die selbsttätige Auffindbarkeit solcher Drehmomentmaxima: Konstantes, von der Drehzahl unabhängiges Belastungsmoment (Kurve *4* in Fig. 2).

Die Auflösung von Φ nach n und M mittels der Gl. (1) und (2) ergibt:

$$\Phi_1 = \frac{k_1 \Phi}{k_2 n_1} n_0$$

$$n_0 = n - \frac{M}{k_5 \Phi^2}$$

$$\Phi_1 = \frac{k_1}{k_2 n_1} \Phi n - \frac{k_1}{k_2 k_5 n_1} \Phi_1^{-1} M \qquad (3)$$

Unter den Voraussetzungen, dass

1. Φ, n_1 = konst.
2. M = konst. bezüglich n,

kann man Gl. (3) in der einfacheren Form schreiben:

$$\Phi_1 = k_6 n - k_7 M \qquad (4)$$

Das zur Erregung Φ_1 gehörende Stellglied muss also gleichzeitig die Drehzahlfunktion des Prüfobjekts und die gewünschte Momenteinstellung nachbilden, falls erwartet wird, dass das Drehmoment unabhängig von der Drehzahl und konstant sein soll.

Der Gedanke ist naheliegend, das Feld Φ_1 des Leonardgenerators in zwei Komponenten $\Phi_n = k_6 n$ und $\Phi_f = k_7 M$ aufzuspalten, die von verschiedenen Energiequellen aus gespeist werden müssen. Die Komponente Φ_n ist automatisch, d. h. selbsttätig drehzahlgesteuert, zu bilden. Sie wird in einer Nebenschlusswicklung erzeugt. Die andere Komponente Φ_f stellt das eigentliche Steuerglied der Bremskraftregelung dar. Sie wird von einer besonderen zusätzlichen Energiequelle gespeist (Fig. 3a).

Mit Hilfe des festen Vorwiderstandes R_v kann die Neigung der Widerstandsgeraden w' (Fig. 4) mit der Anfangssteigung der magnetischen Kennlinie des Bremsgenerators *M1* zur Deckung gebracht werden. Auf diese Weise gibt es keinen bevorzugten Arbeitspunkt innerhalb des gesamten linearen Bereiches. Die selbsterregte EMK des Generators *M1* ist indifferent, d. h. die Klemmenspannung im Gleichstromkreis kann von aussen — im konkreten Fall von der fest erregten Leistungswaage aus — willkürlich geändert werden, ohne dass ein stationärer Ankerstrom fliessen würde. Praktisch wird der

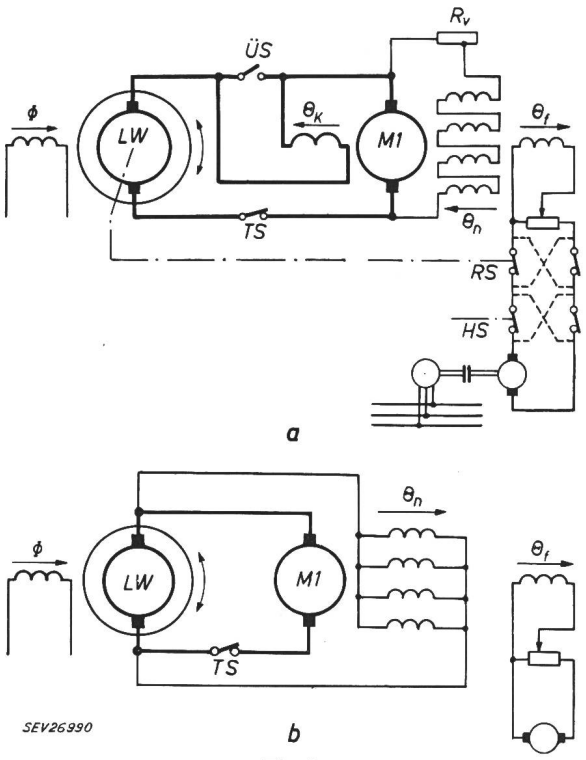

Fig. 3
Komponentenschaltung
a Bremskraftsteuerung; *b* Haltesteuerung; *ÜS* Überbrückungsschalter; *RS* Reversierschützenpaar, gesteuert durch die Drehrichtung der Leistungswaage; *HS* Handschalter; Φ Polfluss der Leistungswaage; Θ_n Nebenschlussdurchflutung des Bremsgenerators; Θ_K Kompoundwicklungsdurchflutung des Bremsgenerators; Θ_f fremd erregte Durchflutung des Bremsgenerators; R_v fester Vorwiderstand zur Nebenschlusswicklung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

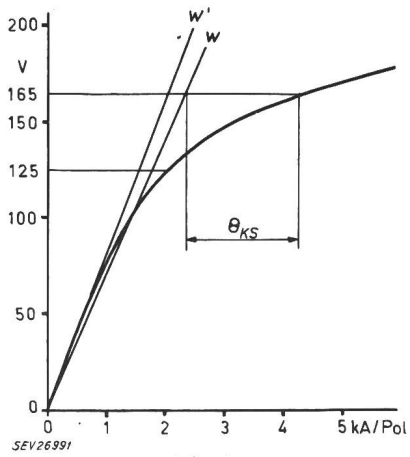

Fig. 4
Kennlinie des Bremsgenerators
w' ideelle Widerstandsgerade; w praktische Widerstandsgerade; Θ_{KS} Kompoundwicklungsdurchflutung infolge des sich bei Sättigung ohne weitere Steuerdurchflutung selbsttätig einstellenden Ankerstromes

ineare Bereich bis 125 V ausgenützt, und die Widerstandsgerade w mittelt die kleinen Abweichungen der Charakteristik aus. Trotz des Vorwiderstandes

R_v aus Konstantan wird infolge Erwärmung der Wicklungen ohnehin mit kleinen Verschiebungen der Widerstandskurve zu rechnen sein.

Damit trotzdem der Ankerstrom ohne zusätzliche Steuereinwirkung im Gebiet von 0 bis 125 V nahezu null bleibt, ist noch eine Stabilisierung notwendig. Der Ankerkreis muss gegen kleine Spannungsdifferenzen unempfindlich gemacht werden. Im Sinne der eingangs erwähnten Stabilitätsforderung wird durch die in Fig. 3a eingezeichnete, vom gesamten Ankerstrom durchflossene starke Kompoundwicklung die Steuerleistung der Fremdfeldkomponente ganz wesentlich erhöht. Die erreichte Güte der Regeleinstellung darf nach den bisher gemachten praktischen Erfahrungen als vorzüglich bezeichnet werden.

Zur Orientierung sei erwähnt, dass man im Verlaufe von Erwärmungsversuchen während Stunden nicht genötigt war, die zu Anfang gewählte Drehmomenteinstellung zu korrigieren.

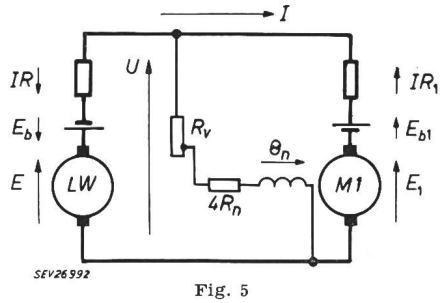

Fig. 5
Bremskreis mit Richtungspfeilen
U gemeinsame Klemmenspannung der Gleichstrommaschinen; I Ankerstrom; E, E_1 induzierte EMK der Leistungswaage bzw. des Bremsgenerators; E_b, E_{b1} Bürstenspannungsabfall der Leistungswaage bzw. des Bremsgenerators; IR, IR_1 Spannungsabfall im Ankerkreis der Leistungswaage bzw. des Bremsgenerators; $4R_n$ Widerstand der in Serie geschalteten Nebenschlusswicklung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

Die genaue Spannungsgleichung des Ankerkreises der Bremsschaltung kann mit den folgenden Bezeichnungen nach Fig. 3 und 5 aufgestellt werden:

U Spannung an der Nebenschlusswicklung des Bremsgenerators
E EMK der Leistungswaage
E_1 EMK des Bremsgenerators
E_r Remanenzspannung des Bremsgenerators
E_b Bürstenspannungsabfall der Leistungswaage
E_{b1} Bürstenspannungsabfall des Bremsgenerators
Θ_f Durchflutung der Steuerwicklung des Bremsgenerators
Θ_K Durchflutung der Kompoundwicklung des Bremsgenerators
Θ_n Durchflutung der Nebenschlusswicklung des Bremsgenerators
R_n Widerstand der Nebenschlusswicklung des Bremsgenerators pro Pol
R_v fester Vorwiderstand
R, R_1 Ersatzwiderstände für je eine Maschinenwicklung im Ankerkreis plus je ein Leitungsabschnitt
$\overset{+}{(-)}$ für den normalen Bremsbetrieb hat nur das +-Zeichen Gültigkeit (—-Zeichen siehe Abschnitt 3, Halteschaltung).

$$U = E_1 + (IR_1 + E_{b1}) \pm E_r \tag{5}$$

$$E_1 = k_2\, n_1 \left(\overset{+}{(-)}\, \Phi_n - \Phi_f\right)$$

$$\Phi_n = k_8 \frac{U}{4\,\overset{+}{(-)}1\, R_n + R_v} \tag{6}$$

$$\Phi_f = k_9\,(\Theta_f - \Theta_K) \tag{7}$$

Die Gl. (6) und (7) in (5) eingesetzt, ergeben:

$$U = \frac{(IR_1 + E_{b1}) \pm E_r - k_2\, k_9\, n_1\,(\Theta_f - \Theta_K)}{1 \underset{(+)}{-} \dfrac{k_2\, k_8\, n_1}{4\,\overset{+}{(-)}1\, R_n + R_v}} \tag{8}$$

$$U = E - (IR + E_b) \tag{9}$$

Damit wird die Spannungsgleichung:

$$(IR_1 + E_{b1}) \pm E_r - k_2\, k_9\, n_1\,(\Theta_f - \Theta_K) = \left[1 \underset{(+)}{-} \frac{k_2\, k_8\, n_1}{4\,\overset{+}{(-)}1\, R_n + R_v}\right] \cdot \left[k_1\, n\, \Phi - (IR + E_b)\right] \tag{10}$$

Unter der Bedingung der Stromlosigkeit des Bremsstromkreises sind sämtliche Spannungsabfälle sowie die Durchflutungen Θ_f und $\Theta_K = 0$.

Weil

$$E_r \ll k_1\, n\, \Phi$$

kann der Vorwiderstand R_v aus der Gleichung

$$1 - \frac{k_2\, k_8\, n_1}{4\, R_n + R_v} = 0 \tag{11}$$

ausgerechnet werden. Die Grössen der Gleichung sind feste Zahlenwerte. Es gilt daher unabhängig von der Drehzahl die Identität:

$$k_2\, k_9\, n_1\,(\Theta_f - \Theta_K) \equiv (IR_1 + E_{b1}) \pm E_r \tag{12}$$

Bei hinreichender Belastung hat auch die Ungleichung

$$\Theta_f, \Theta_K \gg \frac{(IR_1 + E_{b1}) \pm E_r}{k_2\, k_9\, n_1} \tag{13}$$

Gültigkeit, was zur vereinfachten Berechnung der fremd zu speisenden Steuerwicklung gemäss Gl. (14) führt:

$$\Theta_f = \Theta_K \tag{14}$$

2.3 Einstellung der Arbeitsbedingungen

Die Nebenschluss- und die Kompoundwicklung des Leonardgenerators *M1* bilden mit diesem einen Block; solange die Drehrichtung und Drehzahl der Umformerwelle nicht geändert werden, ist der gesamte Schaltungsblock unempfindlich gegen äussere Einflüsse (z. B. Richtung und Grösse der Klemmenspannung). Man darf also ohne weiteres zwei gleich gebaute Generatoren *M1* und *M2* in Serie oder parallel schalten, ohne dass die interne Generatorschaltung davon berührt würde. Die Serieschaltung wird praktisch ausgenützt zur Erreichung der vollen Leistung der Leistungswaage in Verbindung mit zu prüfenden zweipoligen Motoren. (Fig. 6. Die einzelnen Gleichstrommaschinen haben eine Leistung von nur 100 kW bei 1500 U./min gegenüber jener des Prüflings von 200 kW.)

Ebensogut ist es gleichgültig, in welcher Richtung die Leistungswaage durch einen Drehstromprüfling angetrieben wird. Es muss lediglich die Polarität der Fremdspannungsquelle für die Speisung des Bremssteuerfeldes Φ_f dem jeweiligen Drehsinn der Leistungswaage angepasst werden. Das geschieht durch ein Schützenpaar, welches mittels eines Bremswächters von der Leistungswaage aus gesteuert wird (Fig. 3a).

Durch einen weiteren, von Hand zu bedienenden Polaritätsumschalter kann die Bremskraft in eine Beschleunigungskraft umgekehrt werden. Dadurch gelingt es, das betriebsrichtige Verhalten von Asynchronmotoren in deren übersynchronem Bremsbereich zu untersuchen, was u. U. bei der Beurteilung übersynchroner Drehmomentsättel bei Lift- und Fördermotoren von Wichtigkeit sein kann. Ausserdem ist die negative Bremskrafterzeugung (Beschleunigungskraft) nützlich beim Ausmessen kleiner Motoren, die normalerweise für den Betrieb mit der 200-kW-Leistungswaage nicht mehr geeignet wären; es wird so praktisch möglich, eine nahezu drehzahlunabhängige Aufhebung der Waagenverluste herbeizuführen, so dass mit der 200-kW-Maschine, wie mit einer kleineren von vielleicht nur 10...20 kW, gemessen werden kann. Ebenfalls nützlich ist die negative Zusatzerregung für die Einstellung des Leerlaufpunktes.

Aus Gl. (3) erhält man nach kurzer Zwischenrechnung:

$$M = k_{10}\, \Phi\, \Theta_f \tag{15}$$

$$n = k_{11}\, \Phi^{-1}\, \Phi_n \tag{16}$$

Aus den Gl. (15) und (16) lässt sich die Bedeutung des Leistungswaagenfeldes Φ als einstellbarer Parameter ablesen. Ist z. B. Φ_n an der Proportionalitätsgrenze der Generatorcharakteristik gegeben, so muss Φ um so kleiner sein, je grösser die Drehzahl wird. Normalerweise sind nur zwei Arbeitspunkte besonders markiert: die Grenzeinstellungen für 1500 U./min und 3000 U./min. Wird hingegen die volle Leistung der Leistungswaage bei 3000 U./min

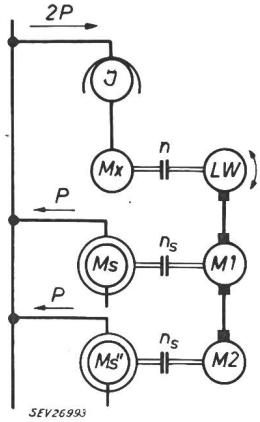

Fig. 6
Leistungsverdopplung durch Serieschaltung zweier Generatoren
LW Leistungswaage; *Mx* Prüfling; *M1*, *M2* Gleichstromgeneratoren; *Ms*, *Ms''* Synchronmaschinen, vierpolig; *J* Induktionsregler; *P* Nennleistung je Gleichstromgenerator (von den Verlusten wird abgesehen); *n* Drehzahl der Prüflingsgruppe *LW/Mx*; n_s Synchrondrehzahl der Umformergruppen *M1/Ms* und *M2/Ms''* (die Drehstrommaschinen haben eine symmetrische Rotorwicklung, werden aber mit Gleichstrom erregt)

in Anspruch genommen, so müssen, bei der vollen Normalerregung der Generatoren entsprechend 1500 U./min, zwei unter sich gleiche Leonardgeneratoren *M1* und *M2* in Serie geschaltet werden (Fig. 6). Umgekehrt kann durch Erhöhung des Feldes Φ bei gegebenem Strom ein grösseres Drehmoment M erzielt werden.

Wird bei 165 V Ankerspannung (vgl. Fig. 4, Sättigung) die maximale Leistung der Leonardgeneratoren benötigt, so können unter Beibehaltung der Schaltung die besonderen Konstanzeigenschaften der Komponentensteuerung nicht mehr in ganzem Umfang erfüllbar sein. Es tritt vielmehr im eigentlichen Leerlauf ein Minderbetrag Θ_{Ks} der Generatorerregung auf, welcher durch einen entsprechenden Ankerstrom in der Kompoundwicklung gedeckt werden muss. Der ohne Steuererregung bereits fliessende Strom stellt eine Vorbelastung dar, die aber nicht sehr stört, weil sowieso die grösstmögliche Leistung verlangt ist. Durch negative Zusatzerregung (Umpolschalter) kann übrigens der Anfangsstrom auf null zurückgeregelt werden.

3. Die übersteuerbare Halteschaltung

Die Messbedingungen beim Kurzschlussversuch mit Asynchronmotoren sind von erhöhten Anforderungen an das Bedienungspersonal begleitet. Einerseits muss die Messung mit grösster Schnelligkeit durchgeführt werden; anderseits kann sich die Anzahl der gleichzeitig zu bedienenden Stellglieder gegenüber dem Normallastversuch sogar noch vergrössern. Tabelle I gibt eine Übersicht über die Einstell- und Ablesebedingungen in verschiedenen Versuchs- und Steuerungsfällen und lässt den unbedingten Vorteil einer automatischen Halteschaltung (Fälle C und D) gegenüber der einfachen Drehzahlsteuerung erkennen. Bei der Bestimmung des Anlasswiderstandes z. B. nach dem geforderten Anzug — oder auch Strom — leistet die Halteschaltung nur ebensoviel wie der bekannte Pronysche Zaum, während die Leonardregelung (Fall B) den vergrösserten Regelaufwand erfordern würde.

Obgleich der mechanische Bremszaum nach dem Gesagten einen günstigen Eindruck hinterlässt, so kann er doch die beiden folgenden an eine ideale Festhalteeinrichtung zu knüpfenden Bedingungen nicht erfüllen:

1. Im Normalfall ist es wünschenswert, dass der Prüfling nicht blockiert wird, sondern statt dessen eine möglichst langsam schleichende Drehbewegung ausführt, so dass am Drehmoment-Anzeigegerät das mittlere Anzugsmoment abgelesen werden kann. Speziell wird in Verbindung mit den übrigen Kurzschluss-Messwerten die summarische mittlere Anzeige immer gefragt sein. Am einfachsten lässt sich die selbsttätig schleichende Drehzahl mittels eines direkten Klemmenkurzschlusses der Leistungswaage einstellen.

2. Wenn sich aus der normalen Messung erkennen lässt, dass das Anzugsmoment mit der Rotorstellung variiert, so wird eine genaue Untersuchung der minimalen und maximalen Stillstandsmomente als unerlässlich erachtet. Die Schleichdrehzahl des Rotors ist so einzustellen, dass die Anzeige und die Ablesung den Drehmomentschwankungen am besten folgen können; d. h. die schleichende Drehbewegung des Rotors ist praktisch auf null abzustoppen.

Die Halteschaltung kann aus der normalen Bremsschaltung des vorigen Abschnitts entwickelt werden, indem in Gl. (10) an zwei Stellen die Vorzeichen gekehrt werden, so dass die eingeklammerten Zeichen Gültigkeit haben, und indem ausserdem der Vorwiderstand R_v und die Kompoundwicklung überbrückt werden (vgl. Fig. 3b). Die Vorzeichenumkehr kommt nach Fig. 3b dadurch zustande, dass die Nebenschlusswicklung des Bremsgenerators an-

Einstell- und Ablesebedingungen in verschiedenen Versuchs- und Steuerungsfällen Tabelle I

Fall	Versuch bei	Steuerung	Konstante Grössen	Regelkomplex		Resultatgrössen
				Stellglieder	Regelgrössen	
A	Normallast	Komponentensteuerung	Frequenz	a) Erreger Synchrongenerator oder Antriebsmotor Induktionsregler b) Steuererregung Bremsgenerator	Spannung Leistungsabgabe	a) 3 Phasenströme b) Leistungsaufnahme c) Drehzahl
B	Kurzschluss (Schleifringankermotor)	einfache Leonardsteuerung	Frequenz	a) Erreger Synchronmaschine b) Erreger Leonardgenerator c) Antriebsmotor Belastungswiderstand	Spannung Drehzahl Drehmoment	a) 3 Anlaufströme b) Leistungsaufnahme c) Sekundärspannung d) Sekundärstrom
C	Kurzschluss (Schleifringankermotor)	automatische Haltesteuerung (bzw. Zaum)	a) Frequenz b) Drehzahl	a) Erreger Synchronmaschine b) Antriebsmotor Belastungswiderstand	Spannung Drehmoment	a) 3 Anlaufströme b) Leistungsaufnahme c) Sekundärspannung d) Sekundärstrom
D	Kurzschluss (Normalmotor)	automatische Haltesteuerung (bzw. Zaum)	a) Frequenz b) Drehzahl	Erreger Synchronmaschine	Spannung (bei grossen Motoren: Kurzschlussstrom)	a) 3 Kurzschlußströme (bei grossen Motoren: reduzierte Kurzschlußspannung) b) Leistungsaufnahme c) relatives Drehmoment (bei grossen Motoren: quadratisch auf Nennspannung umrechnen)

statt vierfach in Serie viermal parallel zu schalten und gegenüber Fig. 3a mit gekreuzten Anschlüssen direkt an die Leistungswaage anzuschliessen ist. Die Spannungsgleichung des Haltestromkreises erhält damit die Form:

$$IR_1 + E_{b1} \pm E_r - k_2 k_9 n_1 \Theta_f = \\ = \left(1 + \frac{4 k_2 k_8 n_1}{R_n}\right) \left[k_1 n \Phi - (IR + E_b)\right] \quad (17)$$

Mit

$$\frac{R_v}{4 R_n} = 2$$

ist

$$q = 1 + \frac{4 k_2 k_8 n_1}{R_n} \approx 50 \quad (18)$$

Solange der Haltekreis von aussen unbeeinflusst bleibt, so dass $\Theta_f = 0$ zu setzen ist, gehorcht die Drehzahl n der Leistungswaage der Gleichung:

$$k_1 n \Phi - (IR + E_b) = \frac{1}{q} (IR_1 + E_{b1} \pm E_r) \approx 0 \quad (19)$$

$$n = \frac{IR + E_b}{k_1 \Phi} \quad (20)$$

Legt man den Anschluss der Nebenschlusswicklung direkt an die Klemmen der Leistungswaage, wodurch R dem internen Ankerkreiswiderstand der Leistungswaage gleichzusetzen ist, so nimmt mit der automatischen Einstellung $U = 0$ der gesamte Stromkreis (welcher sich ja über den Bremsgenerator und eine Leitung schliessen muss) die Eigenschaften eines direkten Klemmenkurzschlusses der Leistungswaage an.

Vergleichsweise seien die beiden Schleichdrehzahlen n_{sH} und n_{sL} der Halteschaltung und der ebenfalls unbeeinflussten Leonardsteuerung (Steuerfeld $\Phi = 0$) angegeben:

$$k_1 \Phi n_{sH} = IR + E_b \quad (21)$$

$$k_1 \Phi n_{sL} = I (R + R_1) + E_b + E_{b1} + E_r \quad (22)$$

Den wirklichen Klemmenkurzschluss kann man von aussen nicht mehr beeinflussen, wohl aber den mit Hilfe der Halteschaltung nachgeahmten. Mit der schon von der normalen Bremsung her bekannten Steuererregung Φ_f wird der automatische Haltekreis übersteuert, um den Rotor vollends anzuhalten. Aus den Gl. (17) und (19) erhält man:

$$k_1 \Phi n = IR + E_b - \frac{1}{q} k_2 k_9 n_1 \Theta_f \quad (23)$$

Infolge des Faktors q wird zum Ausgleich des inneren Spannungsabfalles der Leistungswaage eine sehr kräftige Steuererregung Θ_f nötig, welche das Einstellen der Momentschwankungsfrequenz (zwecks guter Ablesbarkeit der Augenblickswerte des Anzugsmoments) mit grosser Stabilität ermöglicht. Es wird insbesondere festgestellt, dass der labile Einfluss der Remanenzspannung E_r aus der Gleichung für die Waagedrehzahl verschwunden ist.

4. Die rekuperative Frequenzfahrschaltung

4.1 Der Energiekreislauf

Unabhängig von der Leistungswaage besteht in jedem Prüffeld ein Bedürfnis nach der Möglichkeit,

Frequenz zu fahren. Daher ist die Voraussetzung für einen zweiten Drehstrom-Gleichstrom-Umformer gegeben. Wenn Motoren bei variabler oder netzfremder Frequenz abgebremst werden müssen, so sind schon für die Frequenzerzeugung und Speisung zwei Gleichstrommaschinen nötig. Für die Rückspeisung der Bremsenergie müsste auf triviale Art eine weitere Gleichstrommaschine herangezogen werden. In der rekuperativen Frequenzfahrschaltung (Fig. 7a) kann die Leistungsrückführung jedoch galvanisch hergestellt werden, wobei eine Gleichstrommaschineneinheit eingespart wird.

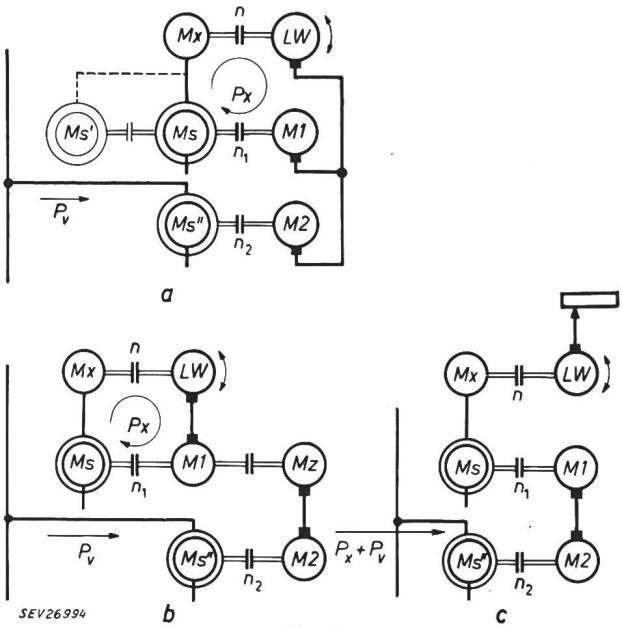

Fig. 7
Frequenzfahrschaltungen
a rekuperativ, galvanische Rückkopplung; *b* rekuperativ, mit Zusatzmaschine; *c* Leistungsvernichtung; *Ms'* Synchrongenerator, sechspolig; *Mz* zusätzliche Gleichstrommaschine auf der Welle von *M1/Ms*; P_x abgegebene Leistung des Prüfmotors; P_v Summe der in allen Maschinen der Schaltung anfallenden Verluste; n_1 Drehzahl der Gruppe *M1/Ms/(Ms')*; n_2 Drehzahl der Gruppe *M2/Ms''*

Tabelle II gibt die Leistungsbilanz der voll belasteten Frequenzfahrschaltung wieder, unter Zugrundelegung der vereinfachenden Annahme, dass die Verlustprozente der voll belasteten Maschineneinheit 10% betragen sollen und sich zu gleichen Teilen in lastabhängige und lastunabhängige Verluste (je 5%) aufteilen lassen. Die Maschinenleistung betrage mit Ausnahme der etwas kleineren Zusatzmaschine *Mz* etwa 100 kW pro Einheit, bezogen auf eine Drehzahl von 1500 U./min. Aus Tabelle II ist weiterhin ersichtlich, wie vergleichsweise die Leistungsbilanz aussehen würde, wenn statt der direkten galvanischen Rückführung die Zusatzmaschine *Mz* auf der Welle der Maschine *M1* angeschlossen würde, und auch wenn die Bremsleistung in einem Widerstand vernichtet würde.

4.2 Die unabhängige Steuerung von Frequenz und Bremskraft

Den einleitend vorangestellten Grundsätzen entsprechend sollte man von der Rekuperationsschaltung erwarten können, dass die beiden an sich voneinander unabhängigen Grössen, die Frequenz und das Bremsmoment, jede für sich allein regelbar sind. Auf der anderen Seite kann normalerweise jeder Eingriff an einer der Erregungen der drei parallel geschalteten Gleichstrommaschinen (Fig. 7a und 8a) nicht ohne Einfluss auf gleichzeitig die beiden anderen Maschinen bleiben. Darin liegt die praktische Schwierigkeit begründet, die Rekuperationsschaltung bei variabler Frequenz technisch befriedigend, d. h. schnell und sicher, zu handhaben.

Leistungsbilanz der vollbelasteten Frequenzfahrschaltung Tabelle II

Maschine	Schaltung nach Fig. 7a			Schaltung nach Fig. 7b			Schaltung nach Fig. 7c		
	Aufnahme kW	Verluste kW	Abgabe kW	Aufnahme kW	Verluste kW	Abgabe kW	Aufnahme kW	Verluste kW	Abgabe kW
M1	*100*	10	90	65,5 (90)	7,5 (9)	58 (81)	*100*	10	90
Ms	90	9	81	90 (121)	9 (11)	81 (110)	90	9	81
Mx	81	8	73	81 (110)	8 (10)	73 *(100)*	81	8	73
LW	73	7,5	65,5	73 *(100)*	7,5 (10)	65,5 (90)	73	7,5	65,5
M2	40,5	6	34,5	41,5 (50,5)	6 (6,5)	35,5 (44)	110	10	*100*
Ms''	**46,5**	6	40,5	**47,5 (57)**	6 (6,5)	41,5 (50,5)	**121**	11	110
Mz				35,5 (44)	3,5 (4)	32 (40)			

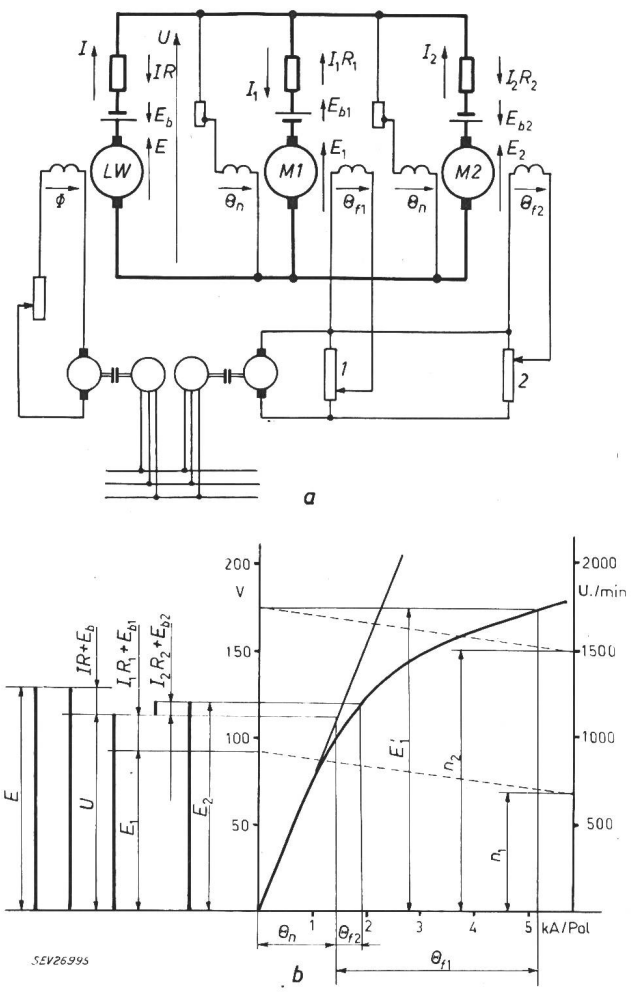

Fig. 8
Rekuperative Frequenzfahrschaltung
a Stromkreise mit Richtungspfeilen; *b* Diagramm der Spannungen; *U* gemeinsame Klemmenspannung an der Sammelschiene; I, I_1, I_2 Ankerströme der Maschinen *LW*, *M1*, *M2*; E, E_1, E_2 induzierte EMK der Maschinen *LW*, *M1*, *M2*; E_b, E_{b1}, E_{b2} Bürstenspannungsabfälle der Maschinen *LW*, *ML*, *M2*; R, R_1, R_2 Widerstände in den Ankerkreisen von *LW*, *M1*, *M2*; Θ_n Nebenschlussdurchflutung der Generatoren *M1* und *M2*; Θ_{f1}, Θ_{f2} fremd erregte Durchflutungen der Generatoren *M1* und *M2*; E_1 induzierte EMK der Maschine *M1*, bezogen auf 1500 U./min; *1* Regelung der Bremskraft; *2* Regelung der Frequenz

In Fig. 8a sind die im Normalbetrieb der Schaltung (Bremsung des Prüflings) anzuwendenden Richtungspfeile eingezeichnet, welche zum Spannungsdiagramm von Fig. 8b führen. Die verwendeten Buchstabensymbole haben folgende Bedeutung:

U	gemeinsame Klemmenspannung
E, E_1, E_2	induzierte EMK der Maschinen *LW*, *M1*, *M2*
E_b, E_{b1}, E_{b2}	Bürstenspannungsabfälle der Maschinen *LW*, *M1*, *M2*
I, I_1, I_2	Ankerströme der Maschinen *LW*, *M1*, *M2*
R, R_1, R_2	Ankerkreiswiderstände, gemessen an der Sammelschiene
n, n_1, n_2	Drehzahlen der Maschinen *LW*, *M1*, *M2*
Θ, Φ_1, Φ_2	Polflüsse der Maschinen *LW*, *M1*, *M2*
Φ_n	Nebenschlussdurchflutung der Maschinen *M1* und *M2*
Θ_{f1}, Θ_{f2}	Fremderregte Durchflutungen der Maschinen *M1* und *M2*
$s_x(I)$, s	Schlupf des Prüflings *Mx*
p_x	Polpaarzahl des Prüflings *Mx*
p_s	Polpaarzahl des Synchrongenerators *Ms*
f_s	Frequenz des Synchrongenerators *Ms*
k_1, k_2	Konstanten (vgl. Kapitel 2.1)

Mit diesen Bezeichnungen und dem Diagramm in Fig. 8b gelten die Gleichungen:

$$E - E_b - I R = U \tag{24}$$

$$E_1 + E_{b1} + I_1 R_1 = U \tag{25}$$

$$E_2 - E_{b2} - I_2 R_2 = U \tag{26}$$

$$I_1 = I + I_2 \tag{27}$$

Die Annahmen

$$E_b = E_{b1} = E_{b2} \tag{28}$$

und

$$R = R_1 = R_2 \tag{29}$$

dienen der Vereinfachung der Gleichungen und üben keine einschränkende Wirkung auf das wesentliche Verhalten der Schaltung aus; sie werden übrigens durch die tatsächlichen Verhältnisse weitgehend gerechtfertigt. Aus der Summe der Gl. (24) bis (26) resultiert damit die gemeinsame Klemmenspannung

$$3\,U = E + E_1 + E_2 - E_b \tag{30}$$

Die Gl. (24) und (25) erscheinen in der Form:

$$3\,RI + 2\,E_b = 2\,E - (E_1 + E_2) \tag{31}$$

$$3\,RI_2 + 2\,E_b = 2\,E_2 - (E + E_1) \tag{32}$$

Nach Einsetzen der Drehzahlen und Polflüsse

$$3\,I\,R + 2\,E_b = 2\,k_1\,n\Phi - k_2\,(n_1\Phi_1 + n_2\Phi_2) \tag{33}$$

$$3\,I_2 R + 2\,E_b \doteq 2\,k_2\,n_2\Phi_2 - (k_1\,n\Phi + k_2\,n_1\Phi_1) \tag{34}$$

Infolge der drehstromseitigen Verbindung zwischen *Ms* und *Mx* sind die Drehzahlen n und n_1 gekoppelt:

$$n = \frac{p_s}{p_x}\,[1 - s\,(I)]\,n_1 \tag{35}$$

Nach dieser Vorbereitung können die beiden diskriminierenden Gl. (36) und (37) aufgeschrieben werden, an Hand derer die Wirkungsweise der speziellen Frequenzfahrsteuerung erklärt werden soll.

$$3\,IR + 2\,E_b = \\ = 2\,k_1\left(\frac{p_s}{p_x}\,\Phi\right)(1 - s)\,n_1 - k_2\,(n_1\Phi_1 + n_2\Phi_2) \tag{36}$$

$$3\,I_2\,R + 2\,E_b = \\ = 2\,k_2\,n_2\Phi_2 - n_1\left[k_1\left(\frac{p_s}{p_x}\,\Phi\right)(1 - s) + k_2\Phi_1\right] \tag{37}$$

Die Aussage der beiden Gleichungen lässt sich, nochmals zusammengefasst durch Differenzbildung, vorteilhaft ergänzen:

$$\frac{f_s}{50} = \frac{\frac{k_2}{k_1}\Phi_2 + r\,(I - I_2)}{\frac{p_s}{p_x}\Phi\,(1 - s)} \tag{38}$$

$$\text{mit } \frac{R}{k_1 n_2} = r; \quad n_2 = 1500 \text{ U./min}; \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{f_s}{50}$$

Die Gleichungen (36) bis (38) geben zu den folgenden Feststellungen Anlass:

1. Setzt man statt Φ in Gl. (36) $\Phi + \Delta\Phi$, so resultiert unter der vorläufigen Annahme, dass n_1, n_2, Φ_1, Φ_2 konstant seien, ein veränderter Bremsstrom $I + \Delta I$. Unter der zweifellos richtigen weiteren Annahme, dass $\Delta I_2 \geqq 0$ sein muss, wenn $\Delta I > 0$ war, ist nach Gl. (37):

$$\Delta\,(n_1\Phi) = \Delta n_1\,\Phi + n_1\,\Delta\Phi \leqq 0$$

$$\frac{\Delta n_1}{n_1} \leqq -\frac{\Delta\Phi}{\Phi}$$

was bedeutet, dass gleichzeitig die Frequenz absinkt, wenn Φ gesteigert wird.

2. Eine Verminderung von Φ_1 bewirkt unter ähnlichen Umständen wie oben eine lastabhängige Frequenzerhöhung. Wenn $\Phi_1 - \Delta\Phi_1$, nach Gl. (36), $I + \Delta I$ ergibt, so folgt aus Gl. (37) wegen $\Delta I_2 \ll \Delta I$:

$$\frac{\Delta n_1}{n_1} \approx -\frac{\Delta\Phi_1}{\Phi_1}$$

3. Mit den Voraussetzungen

$$I_2\,R \ll k_2\,n_1\Phi_1 \text{ bzw. } I_2\,R \ll k_2\,n_2\Phi_2$$

$$\Delta I_2\,R \ll k_2\,\Delta n_1\Phi_1 \text{ bzw. } \Delta I_2\,R \ll k_2\,n_2\,\Delta\Phi_2$$

$$(\Phi = \text{konstant})$$

ruft die Änderung von Φ_2, $\Delta\Phi_2$, nach Gl. (37) und (38) eine nahezu proportionale Änderung von n_1 hervor. Setzt man in Gl. (36) n_1 proportional Φ_2 ein, so kann unter der vorläufigen Annahme:

$$I, \Phi, \Phi_1, n_2 = \text{konstant}$$

der Bremsstrom I eben wegen

$$3\,I\,R + 2\,E_b = \text{Konstante} \cdot n_1$$

nicht konstant sein; er muss gleichzeitig mit der Frequenz anwachsen.

4. Im Hinblick auf die wichtigste Forderung der Frequenzfahrsteuerungsmechanik (stabile Frequenz bei variabler Last) ist aus Gl. (38) eindeutig abzulesen, dass bei konstantem Leistungswaagenfeld Φ und veränderlicher Last $I + \Delta I$ die Frequenz nur dann konstant sein kann, wenn die Generatorerregung Φ_2 mit dem fiktiven Strom $(I - I_2)$ kompoundiert wird. Insofern die Kompoundierungsbedingung nur erfüllt wird, hat Φ_1 hingegen keinen Einfluss auf die Frequenzhaltung; denn es tritt in Gl. (38) gar nicht auf. Φ_1 bildet also die natürliche Stellgrösse zur Beeinflussung des Bremsstromes.

5. Wie von vorneherein aus Gl. (38) abzulesen ist, sollte die Frequenz f_s durch die Generatorerregung Φ_2 gesteuert werden. Die Konstanz des Bremsstromes während der Frequenzregelung kann durch eine leichte Drehzahlkompoundierung der Motorerregung Φ_1 erfolgen [vgl. Gl. (37)].

Die Feststellungen 4. und 5. führen auf die in Fig. 8a dargestellte Schaltung. Diese deckt sich weitgehend mit der normalen Bremskraftsteuerung. Es sind gegenüber dem normalen Bremsbetrieb keinerlei Mehraufwendungen erforderlich.

Die beiden Gleichstromgeneratoren *M1* und *M2* erhalten die von der Bremskraftregelung her bekannte Nebenschlusserregungskomponente. Die getrennt steuerbaren Fremderregungen müssen hier im Gegensatz zum normalen Bremsbetrieb das Nebenschlussfeld unterstützen. Des weiteren sind die Kompoundwicklungen wie beim Halteversuch kurzgeschlossen. Der wesentliche Unterschied gegenüber der Bremssteuerung besteht darin, dass die Frequenzfahrsteuerung im Krümmungsgebiet der Sättigungscharakteristik arbeitet, während die Bremssteuerung vornehmlich für den proportionalen Bereich entworfen wurde.

Die Funktion der Schaltung von Fig. 8a kann mit Hilfe von Fig. 8b näher erläutert werden. Die Leerlaufkennlinie hat für die Gleichstrommaschinen *M1* und *M2* nur Gültigkeit bei Nenndrehzahl. Nach Massgabe der Klemmenspannung U erhalten die Maschinen *M1* und *M2* eine Nebenschluss-Grunderregung Θ_n — entsprechend der Anfangssteigung ihrer Kennlinie. Daneben werden noch die separaten Fremderregungen Θ_{f1} und Θ_{f2} aufgebracht. Im Anker von *M1* würde eine EMK der Grösse E_1' erzeugt werden, wenn *M1* die gleiche Umlaufgeschwindigkeit hätte wie *M2*. Der Quotient E_1/E_1' ist indessen identisch mit der relativen Frequenz $f_s/50$ des Drehstromgenerators *Ms*.

Es liegt ebensosehr im Interesse der Regeleigenschaften für das Bremsmoment, wie es für die Stabilität des Motors *M1* — besonders im Anlauf — von Wichtigkeit ist, dass *M1* zunächst eine möglichst hohe zusätzliche Fremderregung Θ_{f1} erhält. Damit wird *M1* im praktischen Frequenzfahrbereich so hoch gesättigt, dass das Feld Φ_1 schon fast als konstant anzusehen ist; es reagiert jedenfalls auf beide Erregungskomponenten verhältnismässig schwach. Eine Veränderung von Φ_2 bringt also in erster Linie eine Frequenzänderung hervor. Durch den schwachen Einfluss, den Φ_2 über die Klemmenspannung U und die Nebenschlusskomponente Θ_n auf Φ_1 auszuüben vermag, kann nach Gl. (36) die Tendenz, den Bremsstrom I konstant zu halten, realisiert werden, was weiter vorn mit Drehzahlkompoundierung des Feldes Φ_1 bezeichnet wurde.

Umgekehrt wird die Beeinflussung des Bremsstromes mit Hilfe der Steuererregung Θ_{f1} eingeleitet. Auf dem Kopplungswege über die Nebenschlusswicklung von *M2* folgt Φ_2 der einleitenden Veränderung von Φ_1 nach, wodurch einerseits gemäss Gl. (36) der Steuereffekt verstärkt, und anderseits, nach Gl. (38), die Konstanthaltung der Frequenz ermöglicht wird. Die schon erwähnte Kompoundierung des Feldes Φ_2 mit dem Differenzstrom $(I - I_2)$, nach Gl. (38), ist nun wie folgt zu verstehen:

Indem der Strom I durch Absenken der Klemmenspannung U angeregt wird, folgt Φ_2 nach Massgabe seiner Nebenschlusskomponente nach, so dass insgesamt $-\Delta\Phi_2 + r\,(\Delta I - \Delta I_2)$ gegen null strebt. Die Differenz des Verluststromes

$$\Delta I_2 = \left(\frac{\partial\,I_2}{\partial\,I}\right)\Delta\,I + \left(\frac{\partial\,I_2}{\partial\,n_1}\right)\Delta\,n_1$$

spielt in Verbindung mit $\Delta\Phi_2$ bei der Stabilisierung der Frequenz eine Rolle. Wenn nach der Kennlinie von Fig. 8b damit gerechnet werden muss, dass mit fortschreitender Sättigung — d. h. mit steigender Frequenz — die Selbstkompoundierung von Φ_2 immer weniger wirksam wird, so wird dieser Um-

stand dadurch ausgeglichen, dass die partiellen Differentialquotienten des Verluststromes, vor allem $\partial I_2/\partial n_1$, mit steigender Frequenz anwachsen. Die empirische Erprobung der Schaltung ergab eine sehr beachtliche Konstanz der Frequenz über den ganzen Bereich von 20...50 Hz, so dass es tatsächlich gelingt, mit zwei getrennten Schiebewiderständen die Frequenz und das Bremsmoment am Prüfling voneinander unabhängig einzustellen.

Der Frequenzfahrbereich wird durch die folgenden Grenzen eingeschränkt:

1. Die nebenschlusserregte Maschine *M2* führt, wenn eine (noch so kleine) zusätzliche Fremderregung angewendet wird, keine kleinere Spannung, als es dem Krümmungsbeginn der Kennlinie entspricht; anderseits kann das Feld Φ_1 einen gewissen Sättigungswert nicht überschreiten. Daraus ergibt sich die untere Bereichsgrenze zu ungefähr $n_{1min} = 600$ U./min und $f_{smin} = 20$ Hz.

2. Das Feld der Maschine *M2* kann sich, solange Feldschwächung nicht in Betracht gezogen wird, höchstens dem Wert von Φ_1 bis auf Gleichheit nähern; demgemäss ist $n_{1max} = 1500$ U./min und $f_{smax} = 50$ Hz als obere Bereichsgrenze anzusehen.

Ersetzt man die vierpolige Maschine *Ms* durch die in Fig. 7a gestrichelt eingezeichnete sechspolige Maschine *Ms'*, die übrigens dem Prüffeld ohnehin zur Erzeugung von Kombinationsfrequenzen zur Verfügung steht, so erhält man einen zweiten Frequenzbereich von 30...75 Hz.

3. Unter Verzicht auf die günstigen Regeleigenschaften kann der normale Variabilitätsbereich der Frequenz u. U. auf 15...60 Hz statt 20...50 Hz ausgedehnt werden. Es wird dazu am unteren Rand die Veränderung des Parameters Φ und am oberen Rand die Schwächung des Feldes Φ_1 erforderlich.

Die einwandfreie Funktion der Schaltung in der beschriebenen Art ist wesentlich an zwei Bedingungen geknüpft:

1. Die Prüflingsgruppe *LW/Mx* laufe leer mit niedrigster Frequenz. Dementsprechend sind die Regelwiderstände für Frequenz und Bremsmoment in den Endstellungen anzutreffen ($\Theta_{f1} = \max.$, $\Theta_{f2} = 0$). Mit $I = 0$, $s = 0$ sowie $E_b \ll E, E_1, E_2$ und $E \approx E_1 \approx E_2$ muss das Leistungswaagenfeld als konstanter Parameter nach Gl. (36) die folgende Bestimmungsgleichung erfüllen:

$$\left(\frac{p_s}{p_x}\Phi\right)\frac{f_{smin}}{50} \approx \frac{k_2}{k_1}\Phi_{nmin} \tag{39}$$

An der oberen Grenze lässt sich schreiben:

$$\frac{p_s}{p_x}\Phi \approx \frac{k_2}{k_1}\Phi_{2max} \tag{40}$$

Es gibt also eine einzige Einstellung $(p_s/p_x)\,\Phi$, wenn die Schaltung im gesamten Frequenzbereich

$$f_{smax} : f_{smin} = \Phi_{2max} : \Phi_{nmin} \tag{41}$$

betriebsbereit sein soll. Anderseits kann nach Gl. (39) durch Verstärkung von Φ die untere Stabilitätsgrenze erweitert werden. Die Einstellung von Φ muss vor allen Dingen der Polzahl des Prüflings gerecht werden, so dass immer $\Phi\,(p_s/p_x)$ Gl. (40) erfüllt.

2. Die Drehrichtung des Prüflings muss drehstromseitig mit derjenigen der Leistungswaage übereinstimmen.

5. Zusammenfassung

Der Gleichstrom-Arbeitskreis einer Leistungswaage wird mit elementaren Mitteln, d. h. mit den Erregerwicklungen der beteiligten Gleichstrommaschinen allein, in der Weise beherrscht, dass durch die Wahl der Erregungsschaltung eine Anpassung an verschiedene Betriebsverhältnisse der zu prüfenden Elektromotoren erreicht wird. Eine übersichtliche Druckknopfsteuerung bietet dem Prüfer die Bedienungsvarianten «Fahren», «Bremsen», «Halten» und «Ausschalten».

In der Position «Fahren» wird die einfache Leonard-Drehzahlsteuerung gewählt, welche zum Antrieb von Generatoren und von Motoren im Gegenstrom-Bremsbereich benötigt wird. Mit dem Druckknopf «Bremsen» wird die Komponentensteuerung oder bei variabler Frequenz die unabhängige Frequenzfahrsteuerung erhalten, beide zur Aufbringung einer echten Belastung. Die Stellung «Halten» dient dem Kurzschluss- oder Anzugsversuch.

Adresse des Autors:
Heinz-Günter Gerlach, dipl. Ingenieur, Berninastrasse 123, Zürich 57.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Zur Geschichte des Elektromotors

Eine Hörfolge über seine Erfindung

621.313.13(091)

Am 8. Juni 1958 hat das Studio Zürich unter dem Titel «Kraft aus Elektrizität» eine Radiosendung ausgestrahlt, mit der auf die auch für den Fachmann etwas verfängliche Frage geantwortet wird, von wem, wie und wann der Elektromotor erfunden wurde.

Ein Sprecher erzählte die Geschichte von der Erfindung des Motors in Form von Gesprächen mit bekannten und auch weniger bekannten Männern der Technik. Die 70 Jahre, die der Zeitraum der Geschichte umfasst, rollten in ernsten und heiteren Episoden vor dem Hörer ab. So war es kein trockener Bericht, sondern ein Griff ins Leben mit all seinen Irrungen, Leidenschaften und Triumphen. — Die Erzählung beginnt mit Johann Christian Oersteds zufälliger Entdeckung der Kraftwirkung, die der stromdurchflossene Leiter auf eine Magnetnadel ausübt (1820). Dominique François Arago, kurz nachher zufällig in Genf, äussert seine Bedenken, wird aber mit André-Marie Ampère bald zum eifrigsten Verkünder und Erforscher des merkwürdigen Phänomens. Michael Faraday, anfänglich Buchbinder, dann der berühmteste Experimentator seiner Zeit, bestätigt Oersteds Erkenntnis von der *drehenden* Wirkung des «elektrischen Konflikts» und baut 1821 seinen Rotationsapparat, den Urtyp des Elektromotors. Aber mit der Sensation, die der eben erfundene Elektromagnet auslöst, beginnt ein 30jähriger Irrweg in der Entwicklung des Elektromotors. Man glaubt, die riesige und als kostenlos betrachtete Kraft der Anziehung und Abstossung von Magneten zur Erzeugung von Bewegung ausnützen zu können. Der amerikanische Hufschmied Thomas Davenport erzählt von seiner aufsehenerregenden Erfindung des Magnetmotors (1833), an der er zugrunde geht; sein Pendant in St. Petersburg, der Physiker Hermann Jacobi (1834), von seiner etwa gleichzeitigen und fast gleichen Erfindung, deren Unbrauchbarkeit er aber schliesslich einsieht.

Inzwischen hatte man die Notwendigkeit erkannt, die galvanische Batterie als Stromquelle durch die maschinelle Erzeugung elektrischen Stromes zu ersetzen. Das gelingt Faraday in 10jähriger Forschungsarbeit, indem er den Vorgang in seinem Rotationsapparat umkehrt und durch Bewegung Strom erzeugt (1831). Es sind die Italiener Salvatore dal Negro und Pixii, die darnach die ersten Dynamomaschinen bauen. Werner von Siemens schildert, wie er, einen Gedanken des Engländers Wilde fortführend, zu seinem dynamoelektrischen Prinzip kommt (1866), und Oskar von Miller, wie er an der Münchner Ausstellung von 1882 Marcel Dep-