

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 52 (1961)

**Heft:** 4

**Artikel:** Grundlegende Betrachtungen über das Problem der Spannungsregelung von Generatoren

**Autor:** Laible, Th.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916815>

#### 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:** 18.01.2026

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

# Grundlegende Betrachtungen über das Problem der Spannungsregelung von Generatoren

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 19. Januar 1961 in Bern,  
von Th. Laible, Zürich

621.313.12.072.2

Nach einigen allgemeinen Gesichtspunkten wird ein Überblick über die wichtigsten Erregerschaltungen gegeben. Im Hauptteil wird das Regelungstechnische Verhalten der Regelungseinrichtung sowie des Generators und des Netzes an Hand der Frequenzgänge erläutert. Im Schlussabschnitt werden die Anforderungen, die an eine Spannungsregelung gestellt werden und einige Möglichkeiten zur Kennzeichnung der Güte der Regelung kurz diskutiert.

Après un aperçu général du problème du réglage de la tension d'alternateurs, l'auteur décrit les montages d'excitation les plus importants, puis il explique le comportement du dispositif de réglage, de l'alternateur et du réseau, en se basant sur la réponse harmonique. Pour terminer, il indique brièvement les exigences posées à un réglage de la tension, ainsi que quelques possibilités pour caractériser la qualité du réglage.

## 1. Einleitung

### 1.1 Einige Grundbegriffe

Mit Rücksicht auf die Verbraucher soll die Spannung in einem Netz möglichst konstant sein. Das ist nur möglich, wenn schon die Klemmenspannung der Generatoren konstant gehalten wird. Dazu dient die automatische Spannungsregelung. Ideal wäre eine genau konstante Spannung, also eine astatische Regelung. Bei Parallelbetrieb mehrerer Generatoren lässt sich die richtige Verteilung der Blindlast aber am einfachsten erreichen durch eine Regelung mit Statik, bei der die Spannung bei wachsender Blindlast etwas sinkt. Bei idealer astatischer Regelung ist die Spannung gleich dem Einstellwert. Bei statischer Regelung ist der Sollwert der Spannung von der Blindleistung abhängig und deckt sich nur im Leerlauf mit dem Einstellwert.

Bei Belastungsänderungen weicht die Spannung infolge des Spannungsabfalls vorübergehend vom Sollwert ab. Belastungsänderungen stellen daher die bedeutendste Störgrösse dar.

Die wichtigsten Arten von Belastungsänderungen sind:

- Kleine Schwankungen um einen Mittelwert infolge des ständigen Zu- und Abschaltens einzelner Verbraucher im Netz.
- Grosse, mehr oder weniger periodische Schwankungen infolge einzelner Grossverbraucher wie Walzwerke und Lichtbogenöfen.
- Einmalige starke Änderungen durch gewollte oder ungewollte Schaltvorgänge im Netz.

Eine weitere, allerdings weniger wichtige Störgrösse stellen die Temperaturänderungen, besonders der Wicklungen dar, wie sie nach grösseren Belastungsänderungen auftreten (Anwärmefehler).

### 1.2 Grundschaltungen

Noch vor etwa 10 Jahren hat man ausschliesslich elektromechanische Regler verwendet, bei welchen das Messorgan entweder unmittelbar oder unter Zwischenschaltung eines ölydraulischen Verstärkers einen Widerstand verstellte, der sich im Erregungskreis des Erregers befand. Heute findet man demgegenüber eine ausserordentliche Mannigfaltigkeit von Schaltungen und Regelanordnungen. Die wichtigsten Gründe dafür sind:

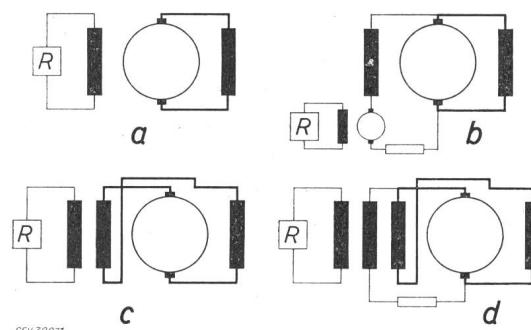
1. Infolge der immer grösseren Einheitsleistungen sind die Erregerleistungen so gestiegen, dass ihre Bewältigung durch die bewegten Kontakte der elektromechanischen Regler zu Schwierigkeiten führt.

2. Infolge von grossen Übertragungsdistanzen ist die Forderung aufgetaucht durch extrem rasche Spannungsregelung einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der dynamischen Stabilitätsgrenze zu leisten.

3. Infolge der grossen Ausdehnung der Höchstspannungsnetze sind die kapazitiven Ladeleistungen so gestiegen, dass manche Generatoren zu Zeiten schwacher Belastung im Bereich negativer Erregung betrieben werden müssen.

4. Es herrscht die Tendenz, alle bewegten Kontakte zu vermeiden, da man sich davon eine erhöhte Betriebssicherheit verspricht.

Angesichts der grossen Mannigfaltigkeit der vorgeschlagenen und ausgeführten Schaltungen kann man hier nur versuchen, einen ganz summarischen Überblick zu geben. In erster Linie kann man unterscheiden zwischen den Schaltungen, bei denen die Erregung des Polrades durch Gleichstrommaschinen erfolgt und denjenigen, die dafür Gleichrichter verwenden. In Fig. 1 sind die wichtigsten Erregerschaltungen zusammengestellt. R bedeutet dabei den Regler.



SEV 30031

Fig. 1  
Schaltungen von Erregermaschinen

a reine Fremderregung; b Nebenschluss-Erregung mit «SurvoltEUR-Dévoiteur»; c Serie-Erregung mit Fremderregung; d Serie- und Nebenschluss-Erregung mit Fremderregung; R Regler

Ier, der sowohl ein elektromechanischer Regler als auch eine der neueren Varianten z.B. ein magnetischer Verstärker oder ein Transistorregler sein kann. Die einfachste Anordnung ist die reine Fremderregung (a). Die Anordnung b mit Nebenschlussregulation hat den Vorteil, dass der Übergang auf Handregelung sehr einfach ist und keine weitere Energiequelle braucht. Anderseits ist man durch die Rücksicht auf die Selbsterregungsbedingung des Nebenschlusskreises in der Auslegung der Regeleinrichtung etwas behindert. Die Anordnung entsprechend d mit getrennter Nebenschluss- und Fremderregwicklung ist wegen der engen magnetischen Kupplung der beiden Wicklungen

gen nur scheinbar vorteilhafter. Fig. 1c und 1d stellen die entsprechenden Varianten mit zusätzlicher Serieerregung dar. Diese war noch vor wenigen Jahren im Ausland grosse Mode. Im Zusammenhang mit den sehr schnellen modernen Reglern bietet sie aber praktisch keinen Vorteil mehr. In allen Fällen kann der Erreger direkt mit dem Generator gekuppelt sein oder durch einen besondern Motor angetrieben werden. Die zweite Lösung kann bei ausgesprochen langsamlaufenden Gruppen, d. h. Flusskraftwerken vorteilhaft sein, da der schnellaufende Erreger bessere regeltechnische Eigenschaften aufweist und durch die Verringerung der Bauhöhe der Generatorgruppe eine beträchtliche Einsparung möglich ist.

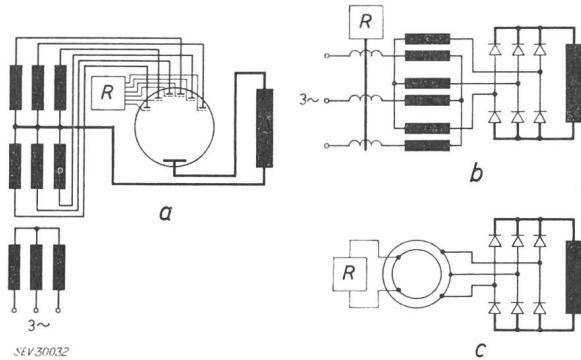


Fig. 2

#### Schaltungen für Erregung durch Gleichrichter

a Quecksilberdampfgleichrichter mit Gittersteuerung; b Dioden mit Spannungsregelung durch vormagnetisierte Drosselpulen in Reihenschaltung; c Dioden mit Speisung durch geregelten Mittelfrequenzgenerator; R Regler

Bei Gleichrichtererregung (Fig. 2) kommen Quecksilberdampfgleichrichter mit Gittersteuerung (a) oder Halbleiterdioden (b und c) in Frage, bei denen die Wechselspannung reguliert werden muss. Damit die regeltechnischen Vorteile der Gleichrichtererregung voll ausgenutzt werden können, kommen als Regler nur Röhrenregler oder Transistorregler in Betracht. Bis heute sind Wasserkraftgeneratoren mit Gleichrichtererregung selten ausgeführt worden. Das Bild kann sich aber ändern, wenn in nicht allzuferner Zukunft gesteuerte Halbleitergleichrichter der erforderlichen Leistung zu wirtschaftlich tragbaren Preisen und in betriebssicherer Ausführung erhältlich werden. Da vorläufig aber die rotierenden Erreger noch fast allein das Feld beherrschen, sollen im Folgenden in erster Linie diese in Betracht gezogen werden.

Der Regler selbst kann ein elektromagnetischer Regler sein oder ein magnetischer Verstärker (Transduktoren), ein Röhrenregler oder Transistorregler. Da die Ausgangsleistung meistens zu klein ist, wird sie durch weitere magnetische Verstärker oder durch rotierende Verstärkermaschinen verstärkt.

### 1.3 Beispiel

Fig. 3 zeigt als Beispiel eine ausgeführte Schaltung, bei der sowohl der Regler R als der nachfolgende Verstärker A aus Transduktoren besteht. Die Generatorspannung wird in V-Schaltung dreiphasig gemessen. Durch die Widerstände S und K werden für Statikkompensation und Kompoundierung passende Stromanteile eingeführt. In der Messbrücke M wird die resultierende Spannung gleichgerichtet und durch Vergleich mit der Ausgangsspannung eines nichtlinearen

Elements ein der Abweichung vom Einstellwert entsprechendes Regelsignal gebildet. In anderen Reglerausführungen erfolgt der Vergleich mit einem aus einem Stabilisator entnommenen Einstellwert. Das Regelsignal bildet zusammen mit einem oder mehreren Rückführsignalen den Eingang des eigentlichen

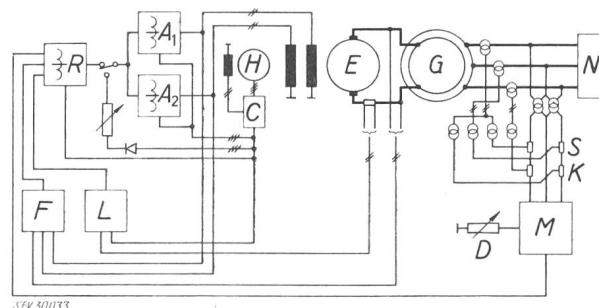


Fig. 3

#### Beispiel einer Spannungsregelung mit Transduktoren

$A_1$ ,  $A_2$  magnetische Verstärker, Endstufe; C Erregungseinrichtung des Hilfsgenerators; D Spannungseinsteller; E Erreger; F Einstellgerät für Rückführungen; G Generator; H Hilfsgenerator; K Kompoundierungseinsteller; L Feldstrombegrenzer; M Mess- und Vergleichsbrücke; N Netz; R Transduktoren-Regler; S Stabilisierungseinsteller

Reglers. Als Rückführungen dienen im Beispiel die Spannungen des Erregers E und der Verstärker  $A_1$  und  $A_2$  welche im Gerät F differenziert werden. Sie dienen zur Stabilisierung des Reglers und ermöglichen erst das sehr rasche Arbeiten ohne Neigung zum Pendeln. Außerdem ist ein weiteres Rückführsignal vorgesehen, das vom Erregerstrom abhängt. Das Netzwerk L gibt erst dann ein erhebliches Signal ab, wenn der Erregerstrom einen negativen Grenzwert überschreitet. Dieser Einfluss ist notwendig, damit der Generator bei stark negativer Erregung nicht kippt. Bei andern Reglern wird zu diesem Zweck an Stelle des Erregerstroms ein Signal verwendet, das vom Polradwinkel abhängt. Die ganze Schaltung wird von einem dreiphasigen Hilfsgenerator H mit Eigenerregung mit Strom versorgt. Derselbe Hilfsgenerator dient mit einem Gleichrichter und den Endverstärkern für die Handregelung.

## 2. Regeltechnische Betrachtung<sup>1)</sup>

### 2.1 Der Regelkreis

In Fig. 3 ist im Sinne der Regelungstechnik der geschlossene Regelkreis zu erkennen. Dieser lässt sich aufspalten in die geregelte Anlage, die hier aus dem Generator G und dem Netz N besteht. Ihre Ausgangsgröße, die Spannung U ist die Regelgröße. Die Messeinrichtung mit allen Zwischengliedern bis und mit dem Erreger bildet die Regeleinrichtung. Ihre Ausgangsgröße und gleichzeitig Eingangsgröße der geregelten Anlage, die Erregerspannung (Polradspannung)  $U_f$  ist die Stellgröße.

### 2.2 Darstellungsmöglichkeiten

Den Zusammenhang zwischen Ausgangsgrößen und Eingangsgrößen irgend eines Teils des Regelkreises bezeichnet man allgemein als sein Übertragungsverhal-

<sup>1)</sup> Die wichtigsten hier benützten Begriffe sind in den Leitsätzen «Nomenklatur der Regelungstechnik», Publ. Nr. 0208 des SEV, festgelegt.

ten. Zu dessen Darstellung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die wichtigsten davon sind in Fig. 4 an einem einfachen Beispiel dargestellt. In Fig. 4 a ist die Übergangsfunktion  $\gamma(t)$  oder die Stossantwort gezeichnet. Sie zeigt den zeitlichen Verlauf der Ausgangsgrösse, wenn auf den Eingang ein Stoss der Höhe 1 gegeben wird.

Die andern Darstellungen beruhen auf der Laplace-Transformation. Man benützt im Bildbereich die Übertragungsfunktion  $G(p) = pL [\gamma(t)]$ . Um diese bildlich darstellen zu können, betrachtet man speziell die Werte, die sie für rein imaginäre Werte der Variablen  $p$  annimmt. Diese spezielle Funktion  $G(j\omega)$  nennt man den Frequenzgang. In der einen Darstellung trägt man den Betrag von  $G$  und die Phase je als Funktionen von  $\omega$  auf. Da sowohl  $|G|$  als auch  $\omega$  über einen grossen Bereich variieren können, zieht man es vor, statt der Werte selbst die Logarithmen aufzutragen. Diese Darstellung nennt man das Bode-Diagramm

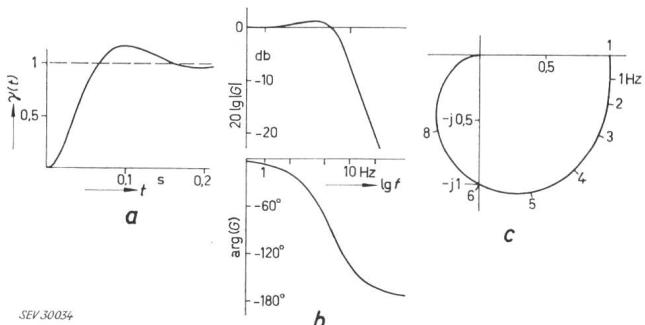


Fig. 4  
Darstellungsmöglichkeiten des Übertragungsverhaltens

- a Übergangsfunktion (Stossantwort)  $\gamma(t)$
- b Bode-Diagramm
- 20  $\lg |G(j\omega)|$  und  $\varphi = \arg[G(j\omega)]$  in Funktion von  $\lg \omega$  (bzw.  $\lg f$ )
- c Ortskurve
- Abszisse  $\operatorname{Re}[G(j\omega)]$ , Ordinate  $\operatorname{Im}[G(j\omega)]$

nach dem Amerikaner *Bode*, der vor allem die Verwendbarkeit dieser Darstellung für die Untersuchung des Verhaltens gezeigt hat. Eine weitere Darstellung, die im Folgenden hauptsächlich benützt werden soll, ist die Ortskurve (Fig. 4 c). Man trägt den Realteil und den Imaginärteil von  $G(j\omega)$  in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf und bezeichnet die Werte von  $\omega$  (oder der Frequenz  $f = \omega/2\pi$ ) an der Kurve. Diese Darstellung ermöglicht eine sehr anschauliche Deutung. Man nehme an, dass als Eingangssgrösse eine sinusförmige Spannung fester Amplitude und Phase aber variabler Frequenz angelegt ist. Zu jeder Frequenz wird die Ausgangsspannung nach Grösse und Phase, bezogen auf die Eingangsspannung, aufgetragen. In diesem Fall beschreibt die Spitze dieses Zeigers die Ortskurve.

### 2.3 Elemente des Regelkreises

Vorerst seien einige Elemente besprochen, die immer wiederkehren.

#### 2.3.1 Verzögerungsglieder

Eine ganze Anzahl von Elementen, z. B. die Messeinrichtung, die Magnetverstärker, Verstärkermaschinen weisen Verzögerungen des Ausgangssignals gegenüber dem Eingangssignal auf, die zwar vom Standpunkt der Regelungstechnik unerwünscht, aber durch

die physikalische Natur der betreffenden Apparate unvermeidlich sind. Eine solche Verzögerung kann entweder durch eine Zeitkonstante oder durch eine Totzeit dargestellt werden. Im ersten Fall fängt beim Ein treffen eines Rechteckstosses am Eingang die Ausgangsgrösse zwar sofort zu steigen an, aber nur nach einer Exponentialfunktion mit der Zeitkonstante  $T$ . Das ist immer dann der Fall wenn ein Energiespeicher aufgeladen werden muss, z. B. eine Drosselspule oder ein Kondensator. Im andern Fall kommt am Ausgang das unverzerrte Eingangssignal an, aber um die Zeit  $T_t$  verspätet. Beispiele sind gittergesteuerte Gleichrichter und magnetische Verstärker. Fig. 5 zeigt den Frequenzgang und zwar Kurve a für ein Glied mit zwei Zeitkonstanten, also z. B. die Messeinrichtung, Kurve b für ein Glied mit einer einzigen Zeitkon-

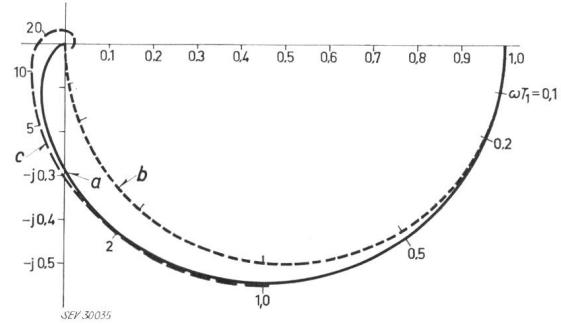


Fig. 5

Frequenzgang (Ortskurve) von Verzögerungsgliedern  
a mit zwei Zeitkonstanten; b mit einer Zeitkonstante; c mit einer Zeitkonstante und einer Totzeit

$$\left. \begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{1}{(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)} \\ G(j\omega) &= \frac{1}{1 + j\omega(T_1 + T_2)} \\ G(j\omega) &= \frac{e^{-j\omega T_2}}{1 + j\omega T_1} \end{aligned} \right\} \frac{T_2}{T_1} = 0,1$$

stanten gleich der Summe der beiden von a und Kurve c für ein Glied mit einer Zeitkonstante und einer Totzeit. Fig. 5 zeigt, dass die Unterschiede nicht sehr gross sind, solange die zweite Zeitkonstante, bzw. die Totzeit klein gegenüber der ersten Zeitkonstante sind. Ein magnetischer Verstärker z. B. würde richtig etwa durch Kurve c dargestellt. Man sieht ohne weiteres, dass man ihn mit guter Annäherung durch die Kurve a, also zwei Zeitkonstanten und mit etwas gröberer Annäherung eventuell sogar durch Kurve b mit einer einzigen Zeitkonstante ersetzen darf. Röhren- und Transistorverstärker lassen sich als Glieder mit einer Zeitkonstante auffassen, die aber meist vernachlässigbar klein ist.

#### 2.3.2 Differenzierglieder

Differenzierglieder braucht man hauptsächlich in den Rückführungen. Man verwendet *RC*-Glieder oder Differenzier-Transformatoren (Fig. 6). Wie man aus den Kurven a und b sieht, sind sie hinsichtlich ihres Frequenzganges in dem Frequenzbereich wo sie das gewünschte Verhalten aufweisen ziemlich gleichwertig. In diesem Bereich ( $\omega T_1 = 1...2$ ) eilt ihre Ausgangsspannung der Eingangsspannung vor. Sie können daher die durch Verzögerungsglieder hervorgerufene Phasenmacheilung mehr oder weniger aufheben. Darauf beruht ihre günstige Wirkung für die Stabilität des Regelkreises.

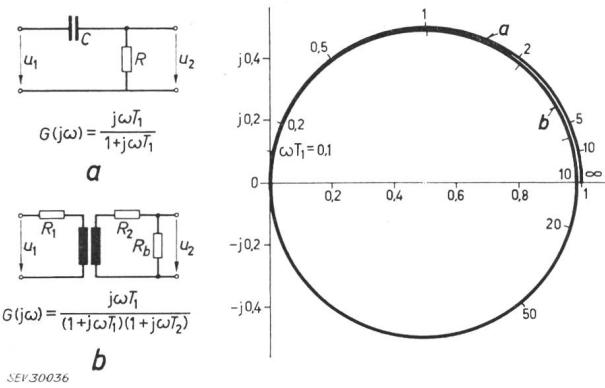


Fig. 6  
Frequenzgang von Differenziergliedern

a RC-Glied; b Differenzierttransformator mit Widerstandslast  
SEV 30036

### 2.3.3 Gleichstrommaschinen

In Fig. 7 ist der Frequenzgang eines Erregers dar gestellt und zwar bei Leerlauf (Kurve a) und Nennlast bei Belastung auf ein Polrad mit einer Zeitkonstante von 5 s (Kurve b). Wegen der Nichtlinearität der Magnetisierungskurve und der Ankerrückwirkung gelten die Kurven nur für kleine Änderungen um den Leerlauf, bzw. den Vollastpunkt. Die starke Abweichung zwischen den Kurven bei tiefen Frequenzen ist

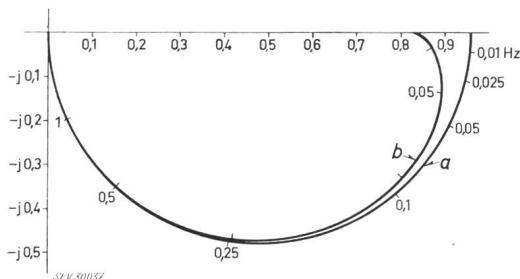


Fig. 7

Frequenzgang einer Gleichstrommaschine (Erreger)  
a im Leerlauf; b belastet auf das Polrad einer Synchronmaschine  
SEV 30037

hauptsächlich auf die Ankerrückwirkung zurückzuführen, die bei der betrachteten Maschine ziemlich gross ist. Der Einfluss des massiven Jochs ist vernachlässigt. Er bewirkt hauptsächlich eine Abflachung der Kurven im mittleren Teil, so dass sie ellipsenähnlich werden. Einstufige Verstärkermaschinen mit lamelliertem Joch und Kompensationswicklung geben einen reinen Halbkreis, entsprechen also einer einzigen Zeitkonstante.

### 2.4 Frequenzgang der gesamten Regeleinrichtung

In Fig. 8 ist das sog. Signalflussbild einer Regeleinrichtung dargestellt. Darin sind alle einzelnen Teile und ihre Verbindungen in einer Weise dargestellt, die den mathematischen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Grössen erkennen lässt<sup>2)</sup>.

Die quadratischen Blöcke mit den eingeschriebenen Werten stellen konstante Faktoren dar. Die andern Zusammenhänge sind durch die eingezeichneten (angennaherten) Frequenzgänge gekennzeichnet. Der linke äusserste Teil wäre streng genommen noch zur geregelten Anlage zu zählen denn er stellt dar, wie aus den «innern» Grössen der Synchronmaschine, bzw. des

Netzes  $\Delta u_d$ ,  $\Delta u_q$ ,  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  die messbaren Werte  $\Delta u$  (Klemmenspannung) und  $\Delta i_r$  (Blindstrom) zu bilden sind. Der Faktor  $k$  stellt je nach Vorzeichen eine Statik (+) oder Kompondierung (-) dar.  $G_m(p)$  ist der Frequenzgang der Messeinrichtung,  $G_r(p)$ ,  $G_v(p)$ ,  $G_e(p)$  und  $G_d(p)$  sind diejenigen des Reglers, des

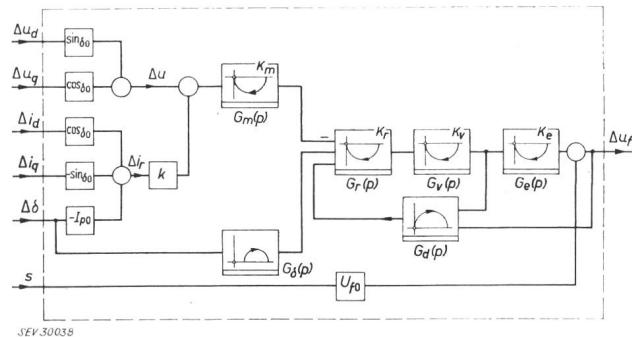


Fig. 8  
Signalflussbild einer Regeleinrichtung  
Bezeichnungen siehe im Text

Verstärkers, des Erregers und des Differenzierglieds für die Rückführung. Als Sicherung gegen Kippen ist hier beispielsweise ein Polradwinkeleinfluss angenommen, wobei ein P und ein D-Anteil vorgesehen sind. Der Beitrag  $s U_{f0}$  entspricht dem Drehzahleneinfluss auf einen direkt gekuppelten Erreger. Fig. 9a zeigt nun den entsprechenden Gesamt-frequenzgang unter Annahme einer einigermaßen optimalen Einstellung der Rückführungen. In Kurve b ist zum Vergleich der Frequenzgang ohne Rückführung eingezeichnet. Ein Vergleich von Punkten gleicher Frequenz zeigt, dass die Rückführung den Frequenzgang wesentlich verbessert. Der Betrag der Übertragungsfunktion bleibt bei Kurve a über einen beträchtlichen Frequenzbereich nahezu konstant und die Phasennacheilung ist

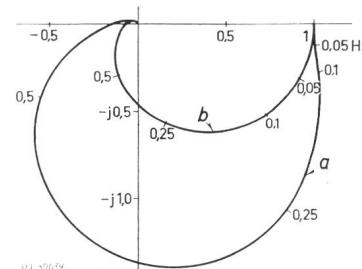


Fig. 9  
Frequenzgang der gesamten Regeleinrichtung  
a bei günstig eingestellter Rückführung; b ohne Rückführung

ganz wesentlich kleiner (vergleiche z. B. die Punkte für 0,1 Hz).

### 2.5 Die geregelte Anlage

Wenn man sich nun der geregelten Anlage zuwendet, so zeigt Fig. 10 das Signalflussbild für den Fall einer beliebigen Belastung. Links oben sind in graphischer Form die Gleichungen der Synchronmaschine dargestellt. Aus den Eingangsgrössen  $\Delta u_f$ ,  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  und  $s$  (Schlupf) erhält man die Ausgangsgrössen  $\Delta u_d$ ,  $\Delta u_q$ . Diese zusammen mit  $s$  bilden die Eingangsgrössen des rechten Blocks, der das Netz darstellt und als Ausgangsgrössen die Stöme  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  liefert. Die 6 Funktionen  $Y_{dd}(p)$ ,  $Y_{dq}(p)$ ,  $Y_{qd}(p)$ ,  $Y_{qq}(p)$ ,  $A_d(p)$ ,  $A_q(p)$  lassen sich durch die vier Koeffizienten  $C_{pu}$ ,  $C_{pf}$ ,  $C_{qu}$ ,  $C_{qf}$  darstellen, die die Abhängigkeit von Wirk- und Blind-

<sup>2)</sup> Die Darstellung entspricht dem vorläufigen Entwurf der Unterkommission für Regelungstechnik des Fachkollegiums 3 (Graphische Symbole) des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees [siehe Dokument 3 (Secrétariat) 335].

leistung von Spannung und Frequenz kennzeichnen. Die entsprechenden Formeln sind in der Legende von Fig. 10 zusammengestellt. Ein näheres Eingehen darauf würde hier zu weit führen. Im Block links unten ist die Bewegungsgleichung der Gruppe Turbine-Generator dargestellt. Sie liefert als Ausgangsgrößen den

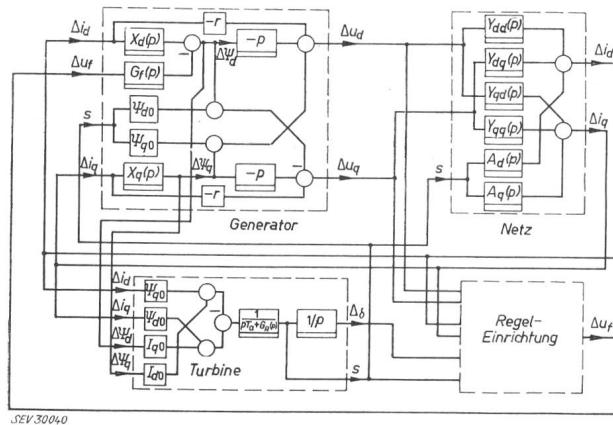


Fig. 10

#### Signalflussbild der geregelten Anlage

Generator:

$$X_d(p) = X_d' \frac{(1 + p T_d')(1 + p T_d'')}{(1 + p T_{d0})(1 + p T_{d0}'')} \text{ Reaktanzoperator der Längsachse}$$

$$X_q(p) = X_q' \frac{1 + p T_q''}{1 + p T_{q0}''} \text{ Reaktanzoperator der Querachse}$$

$$G_f(p) = \frac{X_d(p)}{1 + p T_d'} \text{ «Übertragungs»operator Rotor-Stator}$$

r Statorwiderstand

Y<sub>d0</sub>, Y<sub>q0</sub> stationäre Werte der Statorflussverkettungen

I<sub>d0</sub>, I<sub>q0</sub> stationäre Werte der Statorströme

δ<sub>0</sub> stationärer Wert des Polradwinkels

U<sub>0</sub> stationärer Wert der Klemmenspannung

U<sub>f0</sub> stationärer Wert der Polradspannung

Netz:

$$Y_{dd}(p) = \frac{1}{2U_0^2} [V_p(p) - W_p(p) \cos 2\delta_0 + W_q(p) \sin 2\delta_0] + \frac{1}{U_0} (I_{q0} \cos \delta_0 - I_{d0} \sin \delta_0)$$

$$Y_{dq}(p) = \frac{1}{2U_0^2} [V_q(p) + W_q(p) \cos 2\delta_0 + W_p(p) \sin 2\delta_0] - \frac{1}{U_0} (I_{q0} \sin \delta_0 + I_{d0} \cos \delta_0)$$

$$Y_{qd}(p) = \frac{1}{2U_0^2} [-V_q(p) + W_q(p) \cos 2\delta_0 + W_q(p) \sin 2\delta_0] - \frac{1}{U_0} (I_{q0} \sin \delta_0 + I_{d0} \cos \delta_0)$$

$$Y_{qq}(p) = \frac{1}{2U_0^2} [V_p(p) + W_p(p) \cos 2\delta_0 - W_q(p) \sin 2\delta_0] - \frac{1}{U_0} (I_{q0} \cos \delta_0 - I_{d0} \sin \delta_0)$$

$$V_p(p) = C_{pu}(p) - p C_{qf}(p); V_q(p) = C_{qu}(p) + p C_{pf}(p)$$

$$W_p(p) = C_{pu}(p) + p C_{qf}(p); W_q(p) = C_{qu}(p) - p C_{pf}(p)$$

$$A_d(p) = \frac{1}{U_0} [C_{pf}(p) \sin \delta_0 + C_{qf}(p) \cos \delta_0]$$

$$A_q(p) = \frac{1}{U_0} [C_{pf}(p) \cos \delta_0 - C_{qf}(p) \sin \delta_0]$$

$$C_{pu}(p) = L \left[ \frac{U_n}{S_n} \cdot \frac{\partial P}{\partial u} \right]; C_{pf}(p) = L \left[ \frac{f_n}{S_n} \cdot \frac{\partial P}{\partial f} \right]$$

$$C_{qu}(p) = L \left[ \frac{U_n}{S_n} \cdot \frac{\partial Q}{\partial u} \right]; C_{qf}(p) = L \left[ \frac{f_n}{S_n} \cdot \frac{\partial Q}{\partial f} \right]$$

Turbine:

T<sub>a</sub> Anlaufzeitkonstante der Gruppe

C<sub>R</sub>(p) Übertragungsfunktion der Turbinenregelung einschließlich hydraulischer Anlage

Schupf s und als dessen Integral den Polradwinkel Δδ. Der Block rechts unten enthält die Regeleinrichtung, z. B. nach Fig. 8. Wie man sieht sind die genauen Zusammenhänge sehr kompliziert und die Drehzahlregelung und Spannungsregelung hängen streng zusammen. Sehr viel einfacher wird alles,

wenn man die Spannungsregelung für reine Blindlast betrachtet. Dann werden Δδ und s gleich Null. Der Einfluss der Bewegungsgleichung verschwindet. Auch in den übrigen Blöcken ergeben sich Vereinfachungen. In Fig. 11 ist der Frequenzgang der Synchronmaschine für den Fall reiner Blindlast aufgezeichnet.

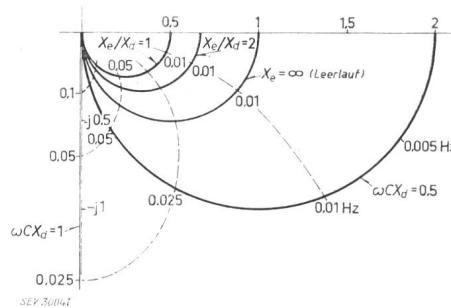


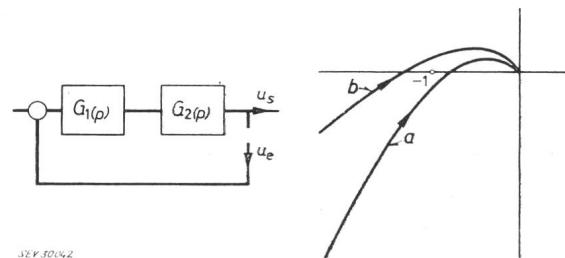
Fig. 11

Frequenzgang eines Synchrongenerators mit reiner Blindlast  
X<sub>e</sub> Belastungsreaktanz bei induktiver Belastung; C Belastungskapazität bei kapazitiver Belastung; X<sub>d</sub> Synchronreaktanz der Längsachse; ω = 2πf Kreisfrequenz

Der Halbkreis, der vom Punkt 1 ausgeht entspricht der leerlaufenden Synchronmaschine. Das Innere dieses Halbkreises stellt alle Betriebszustände mit induktiver, das Äußere alle mit kapazitiver Belastung dar. Punkte für ωC · X<sub>d</sub> > 1 liegen im dritten Quadranten. Dieses Gebiet ist für die Stabilität besonders gefährlich. Umgekehrt zeigt das Bild, dass die Bewältigung beliebiger induktiver Blindlasten regelungstechnisch kein Problem bildet.

#### 2.6 Gesamtfrequenzgang, Stabilität

In Fig. 12 ist links, der Regelkreis nochmals ganz schematisch dargestellt. Er sei z. B. an der Messtelle aufgeschnitten. Dann hat man für das Verhältnis u<sub>s</sub>/u<sub>e</sub>, d. h. Klemmenspannung des Generators zu Spannung am Eingang der Regeleinrichtung den Gesamtfrequenz-



Stabilitätskriterium von Nyquist für den Frequenzgang des offenen Regelkreises

a stabil; b instabil

G<sub>1</sub>(p) Übertragungsfunktion der Regeleinrichtung

G<sub>2</sub>(p) Übertragungsfunktion der geregelten Anlage

U<sub>s</sub> Ausgangsspannung an der Schnittstelle

U<sub>e</sub> Eingangsspannung an der Schnittstelle

gang G<sub>1</sub>(p) · G<sub>2</sub>(p). Denke man wieder u<sub>e</sub> als Wechselspannung konstanter Amplitude und variabler Frequenz und trage die zugehörige Ortskurve von u<sub>s</sub> auf. Mit steigender Frequenz kommt man schliesslich zu einer Stelle an der die Ortskurve die negative reelle Achse schneidet. Bei dieser Frequenz ist u<sub>s</sub> also in Phase mit u<sub>e</sub>. Ist die Amplitude von u<sub>s</sub> kleiner als die von u<sub>e</sub> so würde beim Schliessen des Regelkreises die Schwingung abklingen. Im andern Fall, wenn die Am-

plitude von  $u_s > u_e$  ist, würde die Schwingung angefacht. Je nachdem auf welcher Seite des Punktes -1 die Kurve vorbeigeht (rechte Seite der Figur) wird der geschlossene Regelkreis stabil oder unstabil sein. Man kann daher eine Stabilitätsbedingung etwa so formulieren: Beim Fortschreiten auf der Ortskurve in Richtung steigender Frequenz muss der Punkt -1 links von der Kurve liegen. Das ist das Stabilitätskriterium von Nyquist. Obige Überlegungen sind natürlich kein Beweis. Sie sollen nur zeigen, dass eine Bedingung solcher Art existieren muss. Es gibt auch, je nach der Darstellung von der man ausgeht eine ganze Reihe anderer Formulierungen der Stabilitätsbedingungen, auf die hier aber nicht eingetreten werden kann.

Bei allen betrachteten Frequenzgängen nehmen die Amplituden bei höheren Frequenzen stark ab. Es ist daher für die Stabilität ganz allgemein günstig wenn man erst bei höheren Frequenzen erhebliche Phasen-nacheilung erhält.

### 3. Anforderungen und Kennzahlen

#### 3.1 Allgemeine Anforderungen

Es sei hier ganz allgemein vorausgeschickt, dass es sich lohnt in jedem Fall genau zu überlegen welche Anforderungen an die Regelung zu stellen sind, denn diejenige Einrichtung, die höheren Ansprüchen genügt kostet im allgemeinen auch mehr. Aus diesem Grund stellen die elektromechanischen Regler dort wo sie genügen, d. h. bei kleinern und mittleren Anlagen ohne aussergewöhnliche Anforderungen immer noch die zweckmässigste Lösung dar.

Einige ganz allgemeine Anforderungen, die an jede Regelung gestellt werden müssen, sind genügende Betriebssicherheit und leichter Übergang auf Handbetrieb falls doch noch eine Störung vorkommt. Eine gewisse Kontroverse besteht hinsichtlich der Schnellentregung. Einerseits kann man leicht eine sehr rasche Schnellentregung ohne grossen zusätzlichen Aufwand erhalten, wenn man den ohnehin vorhandenen schnellen Regler dazu benützt. Anderseits bestehen doch gewisse Bedenken für die Schnellentregung, die unbedingt immer funktionieren muss, auf den Regler angewiesen zu sein.

#### 3.2 Regelgüte im stationären Betrieb

Für die Güte der Spannungshaltung im stationären Betrieb sind einerseits der Anwärmefehler, anderseits die stets vorhandenen kleinen Belastungsschwankungen massgebend. Über die Schwankungen der Wirkleistung hat man dank der Arbeiten der Studienkommission des SEV für die Regelung grosser Netzverbände [1]<sup>1)</sup> und der EdF [2] brauchbare Unterlagen. Für die Blindleistung, die hinsichtlich der Spannungsregelung wichtiger wäre, fehlen sie leider vorläufig noch. Immerhin kann man annehmen, dass das Frequenzspektrum der Blindleistungsschwankungen ähnlich aussieht, wie das der Wirkleistungsschwankungen, da ja beide durch die gleichen Zu- und Abschaltungen von Verbrauchern verursacht werden. Unter dieser Voraussetzung wurden folgende Werte für das Verhältnis mittlere quadratische Abweichung der Spannung zu mittlere quadratische Abweichung der Blindleistung gefunden [3]:

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Elektromechanischer Regler . . . . .	0,15
Transduktortorregler mit Verstärkerkaskade . .	0,095
Quecksilberdampfgleichrichter mit Röhrenregler	0,04

#### 3.3 Regelgüte bei grossen Schwankungen

Bei grossen Schwankungen wie sie hauptsächlich durch Lichtbogenöfen und Walzwerke verursacht werden liegen die Perioden der wichtigsten Komponenten im Bereich 1 bis mehrere Sekunden. Das sind vom Standpunkt der Spannungsregelung aus gesehen bereits sehr hohe Frequenzen und nur sehr schnelle Regler, vor allem unter Verwendung von Gleichrichtern können eine wirksame Verbesserung der Spannungshaltung bringen. [4]. Auf den ungünstigen Einfluss der Lichtbogenöfen auf die Stabilität der Drehzahlregelung soll hier nicht eingegangen werden.

#### 3.4 Regelgüte bei einmaligen grossen Störungen

##### 3.4.1 Arten der Störungen

Die wichtigsten Störungen solcher Art sind:

1. Ausfall grosser Verbraucher im Netz.
2. Ausfall eines parallel arbeitenden Kraftwerkes.
3. Kurzschlüsse im Netz.
4. Zuschalten langer Leitungen oder Kabel.
5. Ausfall der Last am Ende einer langen Leitung.

Die Störungen unter Ziff. 1 und 2 sind in erster Linie mit Wirklaständerungen verbunden und stellen daher keine besonderen Anforderungen an die Spannungsregelung.

Bei Kurzschläüssen ist es in erster Linie wichtig den Polradfluss möglichst rasch zu erhöhen um das Ausstossen zu verhindern. Der kritische Punkt für die Stabilität wird meistens 0,4...0,5 s nach Eintritt des Fehlers erreicht.

Bei Ziff. 4. tritt eine grosse Blindlaständerung mit sehr kleiner oder sogar negativer Erregung im Endzustand auf.

Die Störung nach Ziff. 5. ist noch schwieriger zu bewältigen, da die kapazitive Belastung durch die Leitung in Verbindung mit einer Drehzahlerhöhung infolge des Wirklastverlustes auftritt.

##### 3.4.2 Güteziffern

Als Mass der Güte einer Regelung im Hinblick auf die Bewältigung solcher Störungen wurden eine ganze Anzahl verschiedener Kennziffern vorgeschlagen. Die

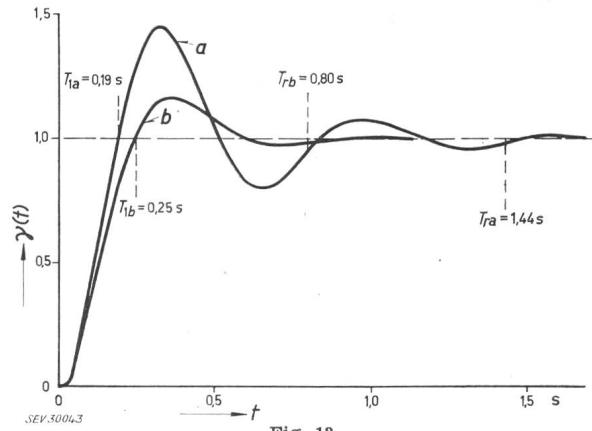


Fig. 13  
Regelzeit und Anregelzeit für zwei Übergangsfunktionen mit verschiedener Dämpfung

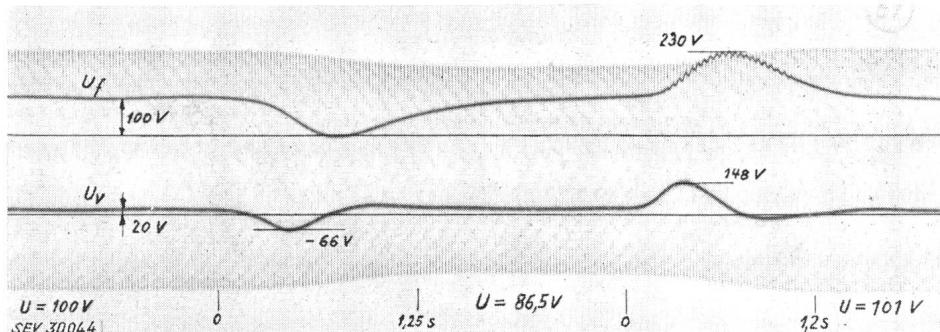
$T_r$  Regelzeit (settling time);  $T_1$  Anregelzeit (reponse time)

erste Kategorie besteht aus bestimmten Zeiten. Fig. 13 zeigt die Regelzeit  $T_r$  (nach Publ. Nr. 0208.1960 des SEV, Ziff. 343.1 und ASA-Vorschlag) und die Anregelzeit  $T_1$  (in Deutschland und den USA gebräuchlich) am Beispiel von zwei verschiedenen stark gedämpften Übergangsfunktionen. Die Regelzeit stellt diejenige Zeit dar, in der der Regelsvorgang bis auf einen festzulegenden kleinen Rest (meist 2 oder 5 %) endgültig den Endwert erreicht hat. Die Anregelzeit gibt hingegen die Zeit bis zum erstmaligen Durchgang durch den

zogen auf den Nennwert der Polradspannung bildet die gesuchte Kennziffer. Sie hat die Dimension  $s^{-1}$ . Die verschiedenen Vorschläge unterscheiden sich durch die Größe des Eingangssignals  $\Delta u$ . Es sind 10 % [7], 100 % [8] und zuletzt 20 % [9] vorgeschlagen worden. Der letzte Wert scheint am Besten zu sein. Ein letzter Vorschlag [10], der ebenfalls Erwähnung verdient möchte den Anstieg nicht auf die Nennspannung, sondern auf die Differenz Deckenspannung minus Nennspannung des Erregers beziehen.

Fig. 14  
Spannungsänderung bei einer plötzlichen Verstellung des Einstellwertes («Nervosité»)

Sollwertverstellung ca. -10 %, +10 %  
 $U$  Generatorklemmenspannung (auf Sekundärseite des Spannungswandlers);  $U_f$  Erregerspannung = Polradspannung;  $U_v$  Spannung am Verstärkerausgang



Endwert. Die Figur zeigt aber, dass die Regelzeit  $T_r$  das bessere Mass für die Regelgüte ist, denn Kurve b ist trotz der grösseren Anregelzeit eindeutig die bessere Übergangsfunktion. Allerdings hat die Anregelzeit den Vorzug einfacher aus dem Oszillogramm ablesbar zu sein. Ein weiteres Zeitmass, das in Frankreich vorgeschlagen wurde ist die «Nervosité» [5]. Ohne diesen Namen wurde es früher auch schon gebraucht (Fig. 14). Man versteht darunter die Zeit in der der Regler eine plötzliche Änderung des Einstellwertes (z. B. um  $\pm 10\%$ ) ausregelt. Der Vorzug dieses Masses ist die sehr leichte Messung ohne jeden störenden Eingriff in die Anlage. Dem steht der Nachteil gegenüber, dass aus einem kleinen Wert der «Nervosité» nicht unbedingt auf gutes Verhalten des Reglers gegenüber grossen Störungen geschlossen werden kann.

Ein anderes Mass, das in erster Linie einen Anhaltspunkt für die Stabilitätsverbessernde Wirkung der Spannungsregelung geben soll ist die System-Erre-

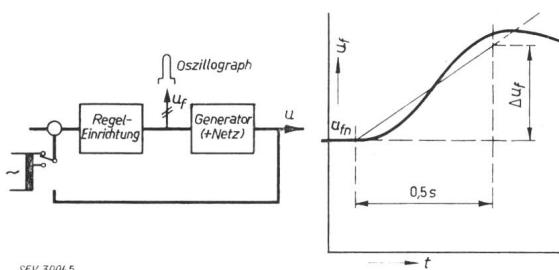


Fig. 15  
System-Erregungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{2 \Delta U_f}{U_{fn}}$$

gungsgeschwindigkeit (Fig. 15). Es lehnt sich an die in verschiedenen Vorschriften [6] enthaltene Messung der Nennerregungsgeschwindigkeit eines Erregers an. Statt am Erreger allein führt man aber die Messung an dem vor dem Reglereingang aufgeschnittenen ganzen Regelkreis aus. Dort wird eine plötzliche Spannungsänderung um  $\Delta u$  vorgenommen. Es wird der Verlauf der Polradspannung  $U_f$  aufgezeichnet und der mittlere Anstieg über 0,5 s bestimmt. Dieser Wert, be-

## Literatur

- [1] Gaden, D.: Essai d'un procédé pour caractériser la clientèle d'un réseau selon la variabilité de sa consommation. Son application à l'établissement de prévisions sur la tenue de la fréquence. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 2, S. 45...56.
- [2] Gaden, D.: Rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent. Résultats des essais effectués à ce sujet sur le réseau de Lausanne par la Commission d'Etudes de l'ASE pour le Réglage des Grands Réseaux. Bull. SEV Bd. 49(1958), Nr. 10, S. 439...448.
- [3] Gaden, D.: Fluctuations de la puissance transmise par une interconnexion. Compte rendu des essais effectués à ce sujet par la Commission d'Etudes de l'ASE pour le Réglage des Grands Réseaux. Bull. SEV Bd. 50(1959), Nr. 25, S. 1217...1226.
- [4] Juillard, E.: Sur l'écart quadratique moyen des fluctuations de puissance d'un réseau. Communication de la Commission d'Etudes de l'ASE pour le Réglage des Grands Réseaux. Bull. SEV Bd. 51(1960), Nr. 22, S. 1149...1152.
- [5] Chevallier, A., M. Holleville und P. Passérieux: Etude et pré-détermination des fluctuations de puissance sur une liaison d'interconnexion de deux réseaux. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Sér., Bd. 4(1954), Nr. 43, S. 401...418.
- [6] Cahen, F. und A. Dejou: Le contrôle automatique de la marche en parallèle de très vastes ensembles d'interconnexion. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Sér., Bd. 8(1958), Nr. 92, S. 463...478.
- [7] Bühler, H.: Methoden zur Erregung von Synchronmaschinen. 3. Teil. Neue Technik Bd. 1(1959), Nr. 3, S. 41...62.
- [8] Hosemann, G.: Grandes machines synchrones à excitation par redresseurs, pour variations brusques de charge n'impliquant que de faibles chutes dynamiques de tension. Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), 18. Session 1960, Rapp. 124.
- [9] Discussion de la Communication de J. Fournier: Le réglage de la tension d'un alternateur hydraulique de 36 000 kVA par amplificateurs magnétiques. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Sér., Bd. 7 (1957), Nr. 78, S. 347...355.
- [10] ASA-C42, 1941: (American Standard): Definitions of Electrical Terms, Ziff. 10.95.450.  
AIEE-Test Code for Direct-Current Machines. Nr. 501(1957), Ziff. 23.7.5.  
VDE 0530/3.59: Regeln für elektrische Maschinen. § 6b.
- [11] Dandeno, P. L. und K. R. McClymont: Excitation System Response: A Utility View-Point Trans. AIEE Bd. 75(1956), Part 3, Power App. & Syst., Nr. 28(Febr. 1957), S. 1497...1501.
- [12] Belfils, G., A. Wust und L. Carpentier: Rapport du Comité d'Etudes des Générateurs (Nr. 17). Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), 17. Session 1958, Bd. 2, Rapp. 108, Annexe I, S. 11...13.
- [13] Belfils, G. und A. Wust: Rapport du Comité d'Etudes des Générateurs (Nr. 17). Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), 15. Session 1954, Bd. 2, Rapp. 148, S. 2...4.
- [14] Laurent, P. und L. Carpentier: Rapport sur les Travaux du Comité d'Etudes des Alternateurs (Nr. 17). Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), 18. Session 1960, Rapp. 143, S. 2.
- [15] Laurent, P.: Remarques sur le critère de rapidité de réponse d'un système d'excitation. Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), 18. Session 1960, Rapp. 143, Annexe I, S. 12...16.

## Adresse des Autors:

Th. Laible, dipl. Ingenieur, Chef des Studienbüros der Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.