

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 62 (1971)
Heft: 23

Artikel: Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen
Autor: Riccius, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915876>

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: 14.01.2026

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

Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen

Von E. Riccius, München

621.313.32:621.3.018.46.08

Prinzip und praktische Ausführung eines elektronischen Gerätes zur unmittelbaren Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen werden beschrieben. Die stationäre Meldekennlinie eines als Prototyp gebauten Gerätes wird in einem Diagramm dargestellt, Oszillogramme zeigen sein Verhalten bei scheinbaren Drehzahlsprüngen und bei Erprobung an einer Versuchsmaschine. Abschliessend wird das hier beschriebene Gerät mit bekannten Überwachungsgeräten verglichen, die den Erregerwechselstrom erfassen.

On décrit le principe et la réalisation pratique d'un appareil électronique destiné à la surveillance directe du glissement des machines synchrones. La caractéristique stationnaire de signalisation d'un prototype d'appareil est illustrée par un diagramme; des oscillogrammes indiquent en outre son comportement à des vitesses apparemment discontinues et lors du contrôle d'une machine d'essai. L'appareil précédemment décrit est enfin comparé aux appareils de contrôle connus, enregistrant le courant alternatif d'excitation.

1. Einführung

Synchronmaschinen sind bei asynchronem Lauf bei Nennspannung im Stator und im Rotor thermisch überlastet. Außerdem schwankt bei kleinem Schlupf der Statorstrom stark mit doppelter Schlupffrequenz. Daher dürfen Synchronmaschinen nur kurzzeitig asynchron laufen, d. h. sie sind ständig diesbezüglich zu überwachen.

In vielen Fällen, vor allem bei Generatoren, genügt hierfür die übliche Überwachung des Statorstromes. Bei Motoren grosser Leistung, insbesondere für Industrieantriebe, entspricht aber diese Art der Schlupfüberwachung nicht den praktischen Anforderungen. Meist wird dann die Überwachung des Erregerstromes empfohlen: durch die Relativbewegung Polrad/Drehfeld bei asynchronem Lauf wird im Erregerkreis schlupffrequenter Wechselstrom induziert [1; 2; 3]¹⁾. Das nicht unmittelbar messende Verfahren ist bei Maschinen, die über rotierende Gleichrichter erregt sind, d. h. deren Erregerstrom nicht über Schleifringe und Bürsten fliesst, nicht anwendbar [4]. In diesem Fall sind nur Überwachungsgeräte geeignet, die unmittelbar den Schlupf messen bzw. nachbilden, z. B. ein aus dem Gerät nach [5] abzuleitendes oder das im folgenden beschriebene.

Ausser dem allgemeinen Gesichtspunkt, nach Möglichkeit unmittelbar, nämlich die Differenz zwischen Netzfrequenz f_1 und dem p -fachen der Drehzahl n zu messen, spricht für die unmittelbare Schlupfüberwachung:

- Es ist möglich, ein in allen Teilen für alle Maschinen praktisch gleiches Gerät anzugeben;
- Bei entsprechender Ausführung ist eine solche Anlage auch geeignet als Kommandogerät für automatische Schnellumschaltgeräte [6; 7].

2. Gerät zur unmittelbaren Schlupfüberwachung

2.1 Prinzip

Fig. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Messeinrichtung, die unmittelbar den Schlupf der Maschine als die zu überwachende Betriebsgrösse erfasst (ohne die zugehörige Stromversorgung).

Der Impulsformer A1 gibt die Impulsfolge F1 ab, deren Frequenz jederzeit der Frequenz des Netzes proportional sein

muss, an das die Maschine angeschlossen ist. A1 ist daher an irgendeinen Spannungswandler W der übrigen Schutz- und Überwachungseinrichtung anzuschliessen, der zwischen Maschine und Hauptschalter HS liegt. Dadurch wird zugleich erreicht, dass auch bei Netztumsschaltung in der kurzen Pause, während der die Maschine an kein Netz angeschlossen ist, die Impulsfolge F1 nicht ausbleibt.

Der Impulsformer A2 gibt die Impulsfolge F2 ab, deren Frequenz der Drehzahl der Maschine proportional sein muss. Er ist in Fig. 1 als Teilgeräte A'2 (der an der Maschine befindliche Impulsgeber) und A''2 (der nachgeschaltete Impulsformer) eingezeichnet. A'2 muss ohne weiteres nachträglich, also als berührungsloser photoelektrischer oder induktiver Geber, z. B. an der Kupplung angebaut werden können.

B1 und B2 sind die beiden Digital-Analog-Wandler, die die Frequenz der ansteuernden Impulsfolge F in die dieser Frequenz proportionale Ausgangsspannung P umsetzen. Damit die erforderliche hohe Genauigkeit der Umsetzung Frequenz f_1 in Spannung P_1 , Drehzahl n in Spannung P_2 , mit relativ einfacher innerer Schaltung erreicht werden kann, müssen B1

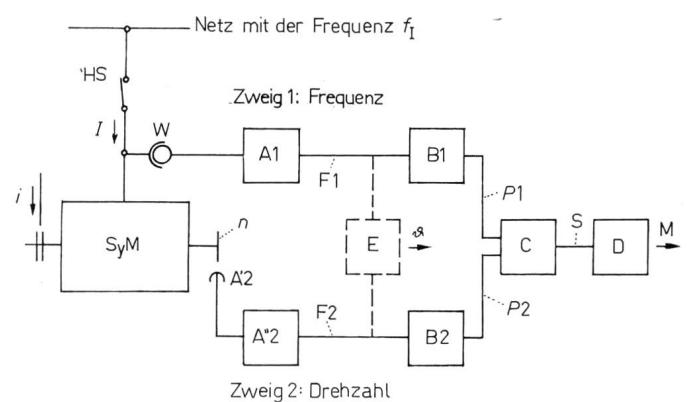


Fig. 1
Prinzipieller Aufbau einer Einrichtung, die unmittelbar den Schlupf überwacht

SyM Synchrongenerator, liegt am Netz der Frequenz f_1 (p Polpaare, synchrone Drehzahl $n_s = f_1/p$, Drehzahl n); HS Hauptschalter; W Spannungswandler; I , i Stator-, Erregerstrom

Geräteeteile: A Impulsformer \rightarrow Impulsfolge F
B Digital-Analog-Wandler \rightarrow Proportionalspannung P
C Differenzspannungsverstärker \rightarrow Schlupfspannung S
D Grenzwertmelder \rightarrow Meldung M
E Polradwinkel φ (nur bedingt möglich)

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

und B2 gleich sein. Das erfordert, dass A1 und A2 so funktionieren, dass sie bei synchronem Lauf der Maschine Impulsfolgen F1 und F2 gleicher Frequenz abgeben. Bei synchronem Lauf ist dann die Differenz der Spannungen P1 und P2 gleich Null.

Die Schlupfüberwachung kann und soll sich auf die Erfassung kleiner Rotorfrequenzen $f_R = s f_1 = f_1 - p n$ beschränken. Daher ist die Differenz der Spannungen P1 und P2 durch den Differenzspannungsverstärker C zu verstärken.

Die bei kleinem Schlupf s der Rotorfrequenz f_R proportionale Spannung S wird im Geräteteil D mit dem Grenzwert verglichen, bei dem Störung gemeldet werden soll. Die Störmeldung M kann ein akustisches oder ein optisches Signal sein oder direkt die Auslösung des Hauptschalters bewirken.

In Fig. 1 ist ein Geräteteil E angedeutet, der den Lastwinkel ϑ angibt. Das ist nur möglich, wenn F1 und F2 aus nur einem Impuls pro Periode der Netzzspannung bzw. p Impulsen pro Umdrehung des Rotors bestehen. Auf diese Möglichkeit wird im folgenden nicht eingegangen, ein Polradwinkel-Messgerät ist in [8] beschrieben.

2.2 Ausführung

Zur praktischen Überprüfung, wie sich eine Anlage nach Fig. 1 verhält, wurde eine Versuchsausführung mit Halbleitern als nichtlineare Schaltelemente gebaut.

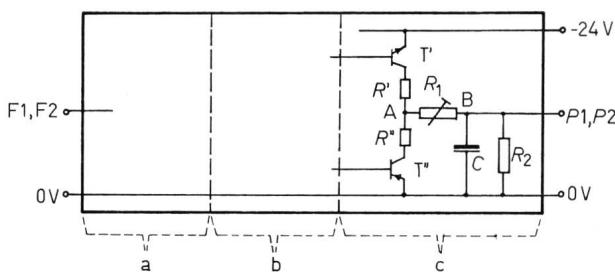


Fig. 2
Digital-Analog-Wandler B1, B2

a Impulsformer; b monostabiler Multivibrator; c Leistungsstufe T' , T'' abwechselnd stromführende Transistoren; R' , R'' (betragsgleich) Schutzwiderstände; C Glättungskondensator; R_1 Vorwiderstand; R_2 Bürde

Die Impulsformer A wurden so ausgeführt, dass die Impulsfolgen F bei synchronem Lauf der Maschine doppelte Netzfrequenz haben: A1 als Gleichrichterbrücke, der ein Kleintransformator vorgeschaltet ist, A2 als photoelektrischer Geber mit nachgeschaltetem Verstärker, auf der Kupplung wurden 2p weisse Streifen angebracht. Diese leicht mögliche Frequenzverdoppelung schliesst zwar ein Geräteteil E aus, bringt aber für die Teile B und C erhebliche Vorteile.

Für die Digital-Analog-Wandler B wurde eine Schaltung gewählt, wie sie ähnlich für Präzisions-Frequenzmesser üblich ist. Diese Geräteteile bestehen je aus einem Impulsformer, einem monostabilen Multivibrator und einer von diesem geschalteten Leistungsstufe (Fig. 2). Die beiden Transistoren T' und T'' werden vom Multivibrator mit der Frequenz $f_1 = 2 \cdot f_1$ bzw. $f_2 = 2p \cdot n$ der an kommenden Impulsfolge F1 bzw. F2 abwechselnd durchgesteuert. Den Verlauf U_{At} der Spannung am Punkt A, der sich daraus ergibt, zeigt Fig. 3.

Das Verhalten der Digital-Analog-Wandler ist durch die Schaltglieder R_1 , R_2 und C (Fig. 2) bestimmt²⁾. Die Wider-

²⁾ Die Widerstände R' und R'' sind gleich gross, sie sind klein gegen R_1 und R_2 und begrenzen nur den Strom über die beiden Transistoren bei kurzfristig gleichzeitiger Stromführung.

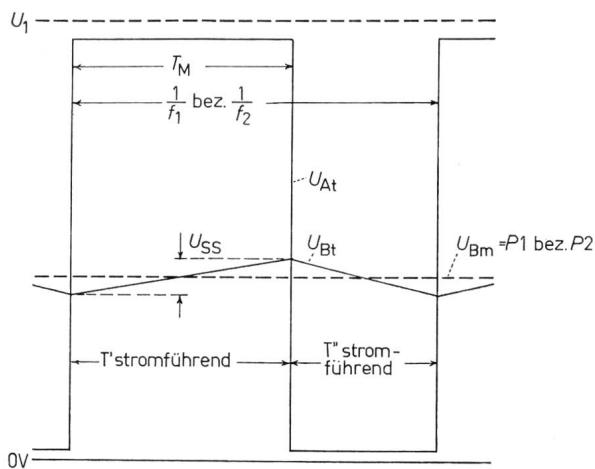


Fig. 3
Prinzipieller zeitlicher Verlauf der Spannung an den Punkten A und B in Fig. 2

U_1 Versorgungsspannung (-24 V-); U_{At} Spannung am Punkt A; U_{Bt} Spannung am Punkt B; T_M Stromführungsduer des Transistors T' , bestimmt durch die Zeit, die der Multivibrator im labilen Schaltzustand bleibt; $f_1 = 2f_1$ bzw. $f_2 = 2pn$ Frequenz der Impulsfolge F1 bzw. F2; $U_{Bm} = P1$ bzw. $P2$ Mittelwert der Spannung U_{Bt} ; U_{SS} doppelter Scheitelwert der U_{Bm} überlagerten Wechselspannung

stände R_1 und R_2 bilden einen Spannungsteiler. Der aus dem Verlauf U_{At} und der Spannungsteilung resultierende Mittelwert $U_{Bm} = P1$ bzw. $P2$ der im Punkt B messbaren Spannung ist in sehr guter Näherung der ansteuernden Frequenz f_1 bzw. f_2 proportional. Der Glättungskondensator C ist mit Rückicht auf den Differenzspannungsverstärker notwendig: U_{Bt} besteht dann nicht aus Impulsen wie U_{At} , sondern hat den in Fig. 3 aufgezeichneten Verlauf.

Der Differenzspannungsverstärker (Fig. 1, Teilgerät C) wird von der Differenz der Spannungen U_{Bt} der beiden Teilgeräte B angesteuert. Diese Differenz ist — auch bei völlig gleichen Teilgeräten B — nur bei einem bestimmten Lastwinkel jederzeit Null. Der eigentliche Verstärker muss daher über eine symmetrische RC-Schaltung, die den zeitlichen Verlauf der Differenz der Eingangsspannungen glättet, angesteuert werden (Fig. 4). Die bei kleinen Drehzahlabweichungen $n \neq n_s$ der Differenz $2f_1 - 2p \cdot n$ proportionale Spannung S ist bei $n < n_s$ negativ.

Der Grenzwertmelder D muss als Kippstufe mit grossem Eingangswiderstand ausgeführt werden, z. B. als Schmitt-Trigger. Der Grenzwert der Eingangsspannung bzw. der Differenz $2f_1 - 2p \cdot n$, bei der die Schaltung vom Ruhezustand 0 in den Meldezustand M kippt, und die tote Zone, innerhalb der beide Zustände stabil sind, sind einstellbar.

Die RC-Schaltungen der Teilgeräte B und C waren so zu bemessen, dass die Spannung S der Differenz $n_s - n = 1/2$

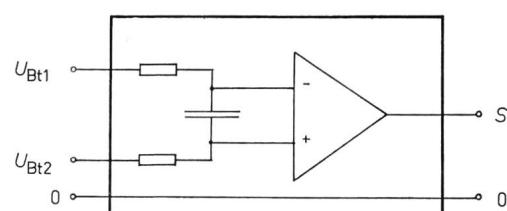


Fig. 4
Differenzspannungsverstärker C

U_{Bt1} von Teilgerät B1 abgegebene Spannung (Mittelwert P1); U_{Bt2} von Teilgerät B2 abgegebene Spannung, (Mittelwert P2); S verstärkte Differenz $P1 - P2$

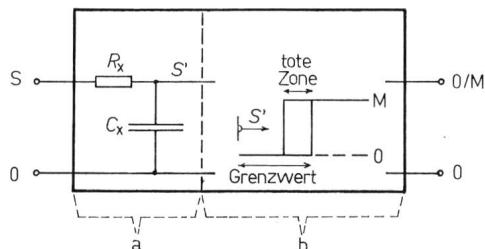


Fig. 5
Grenzwertmelder D

a Verzögerungsteil; *b* Kippstufe
 R_x Vorwiderstand; C_x Verzögerungskondensator (in Stufen schaltbar);
 0 keine Störmeldung; M Störmeldung

$(f_1 - f_2)$ schnell folgt. Die Funktion der ganzen Anlage zur Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen erfordert, dass statt der Spannung S die mit einstellbarer grösserer Zeitkonstante $T_x = R_x C_x$ folgende Spannung S' mit dem eingestellten Grenzwert verglichen wird (Fig. 5).

2.3 Kenndaten

Das als Prototyp gebaute Gerät wurde eingehenden Prüfungen und Messungen unterzogen, deren wichtigste Ergebnisse im folgenden dargelegt werden.

Die Digital-Analog-Wandler B setzen die ansteuernde Frequenz im stationären Betrieb ohne messbaren Linearitätsfehler in die proportionale Spannung P um, bei Nennfrequenz 100 Hz ist $P = -10$ V (justieren: R_1 in Fig. 2). Diese in Fig. 6 aufgezeichnete Linearität gilt bis etwa 150 Hz, dann wird die Pause zwischen aufeinanderfolgenden Zeiten T_M zu klein und der Multivibrator spricht nur mehr auf jeden zweiten Impuls an (Fig. 2 und 3). Bei Frequenzsprüngen läuft der Mittelwert P der Ausgangsspannung exponentiell auf den neuen stationären Wert, die Zeitkonstante beträgt ca. 80 ms.

Die Ausgangsspannung S des Differenzspannungsverstärkers ist im linearen Bereich etwa $-1,25 \text{ V/Hz}$ für positive Differenzen $f_1 - f_2 = 2f_1 - 2p \cdot n$, also für untersynchronen Lauf der Maschine. Fig. 7 zeigt die Kennlinie. Der Sättigungswert liegt

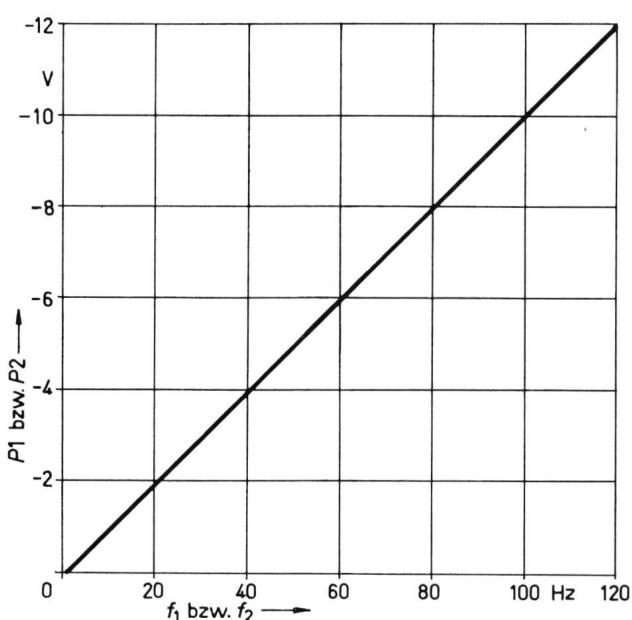


Fig. 6
Stationäre Kennlinie der Digital-Analog-Wandler

f_1 bzw. f_2 Frequenz der ansteuernden Impulsfolge; $P1$ bzw. $P2$ Mittelwert der Ausgangsspannung

bei etwa $-9,8$ V, er wird bei etwa 4 Hz der Rotorwechselströme erreicht (das ist $2f_1 - 2p \cdot n = 8$ Hz und entspricht $s = 4\%$ bei $f_1 = 50$ Hz). Das entspricht den praktischen Erfordernissen: bei so grossem Schlupf zieht eine Synchronmaschine mit Sicherheit nicht mehr in Tritt, ausser so grosse Schlupfwerte treten kurzzeitig im transienten Betrieb auf. Bei Sprüngen der Differenz $2f_1 - 2p \cdot n$, die nicht zur Übersteuerung des Differenzspannungsverstärkers führen, folgt die Ausgangsspannung S entsprechend der doppelten Verzögerung (RC -Schaltungen in den Digital-Analog-Wandlern und im Differenzspannungsverstärker) etwa einer verzögert einsetzenden Exponentialfunktion. Die Totzeit beträgt ca. 70 ms, die Zeitkonstante ca. 100 ms. Diese Zeiten sind klein gegen die mechanische Zeitkonstante grosser Antriebe, die Teilgeräte B und C entsprechen den praktischen Erfordernissen sehr gut.

Die Zeitkonstante $T_x = R_x C_x$ (Fig. 5) des Teilgerätes D kann durch Änderung des Kondensators C_x auf folgende Werte

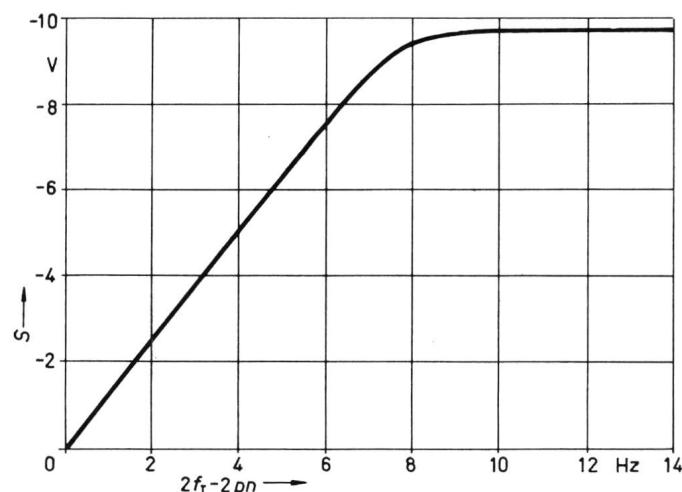


Fig. 7 Ausgangsspannung S des Differenzspannungsverstärkers bei Ansteuerung

durch die Digital-Analog-Wandler in Abhangigkeit von der Frequenzdifferenz $f_1 - f_2 = 2f_1 - 2p_n$
Bei $f_1 = 50$ Hz ist die Differenz $2f_1 - 2p_n \cdot n$ in Hz zahlengleich mit dem Schluss s in %.

eingestellt werden: $T_x = 0-0,1-0,25-0,5-1-2,5-5$ s. Statt der Ausgangsspannung S des Differenzspannungsverstärkers wird also die entsprechend T_x verzögerte Spannung S' mit dem eingestellten Grenzwert verglichen. Diese Verzögerung ist notwendig, weil eine Synchronmaschine im transientesm Betrieb, also bei kurzzeitiger Überlastung, kurzzeitig mit wesentlich grösserem Schlupf laufen kann, ohne dass der Vorgang instabil abläuft und eine Störmeldung erfolgen darf.

Synchronmaschinen laufen bei $n \neq n_s$ stark pendelnd. Obwohl die Spannung S' diese Pendelung nur — entsprechend dem für T_x eingestellten Wert — abgeschwächt wiedergibt, muss daher der eigentliche Grenzwertmelder eine tote Zone haben, damit er bei asynchronem Lauf der Maschine keinesfalls wiederholt kippt. Fig. 8 zeigt die bei konstanten Frequenzen $f_1 = 2f_1$ und $f_2 = 2p \cdot n$ aufgenommene Meldekennlinie in Abhängigkeit von der Einstellung am Grenzwert-Potentiometer und von der eingestellten toten Zone.

Praktisch genügt bei Einstellung auf grosse tote Zone (« T ») Einstellung auf $T_x = 0,5$ s oder 1 s. Das Grenzwert-Potentiometer ist dann so einzustellen, dass der z. B. nach [9] berechnete kritische Schlupf s_{kr} , bei dem die Maschine unter normalen

Bedingungen mit Sicherheit in Tritt geht, knapp im Bereich «Störmeldung» liegt.

Während des Hochlaufens muss diese Überwachungseinrichtung — wie alle anderen Anlagen zur Schlupfüberwachung — ausser Funktion sein, sie ist einzuschalten, sobald die Maschine nach den allgemeinen Betriebsbedingungen in Tritt sein muss bzw. in Tritt gehen muss. Geht die mit s_{kr} laufende Maschine nicht in Tritt, z. B. weil sie an weniger als Nennspannung liegt oder weil die Erregung ausbleibt, so wird, entsprechend der für T_x gewählten Einstellung verzögert, Störung gemeldet. Bei dieser Einstellung am Grenzwert-Potentiometer wird also auch das betriebsmässige In-Tritt-Gehen bei Selbstanlauf eines Motors überwacht.

2.4 Praktische Erprobung

Die oben beschriebenen Versuche und Messungen wurden in verschiedenen Prüfschaltungen mit simulierter konstanter oder sich sprunghaft ändernder Frequenz $f_2 = 2p \cdot n$ durchgeführt. Ausserdem wurde die Anlage zur unmittelbaren Schlupfüberwachung im Laboratorium des Institutes für Elektrische Maschinen und Geräte der Technischen Universität München an einem Maschinensatz erprobt.

Dieser Maschinensatz bestand aus einer Drehstrom-Asynchronmaschine mit Schleifringrotor und einer mit ihr gekupelten Gleichstrommaschine. Die Asynchronmaschine wurde mit einphasig-zweisträngigem Rotor betrieben, die Gleich-

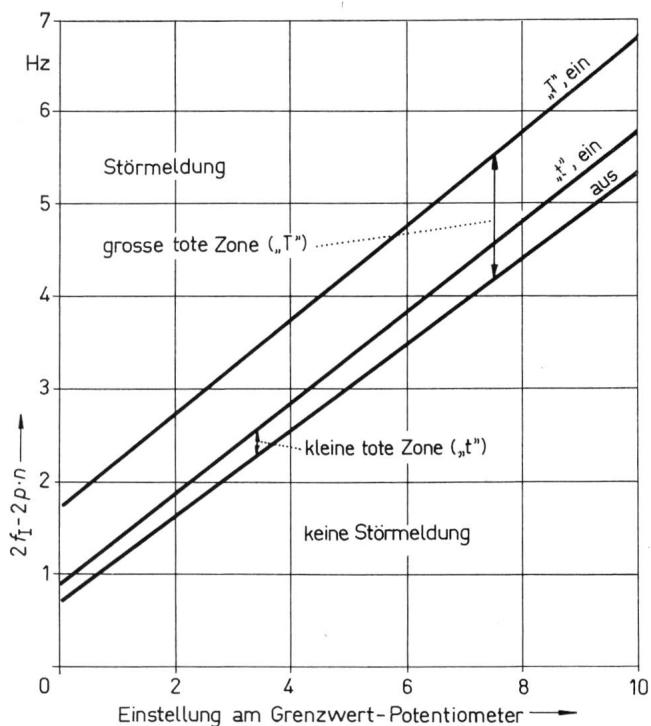


Fig. 8

Meldekennlinie des Grenzwertmelders bei konstanten Frequenzen

$2f_1$ und $2p \cdot n$

Bei $f_1 = 50$ Hz ist die Differenz $2f_1 - 2p \cdot n$ in Hz zahlenmäßig gleich mit Schlupf s in %

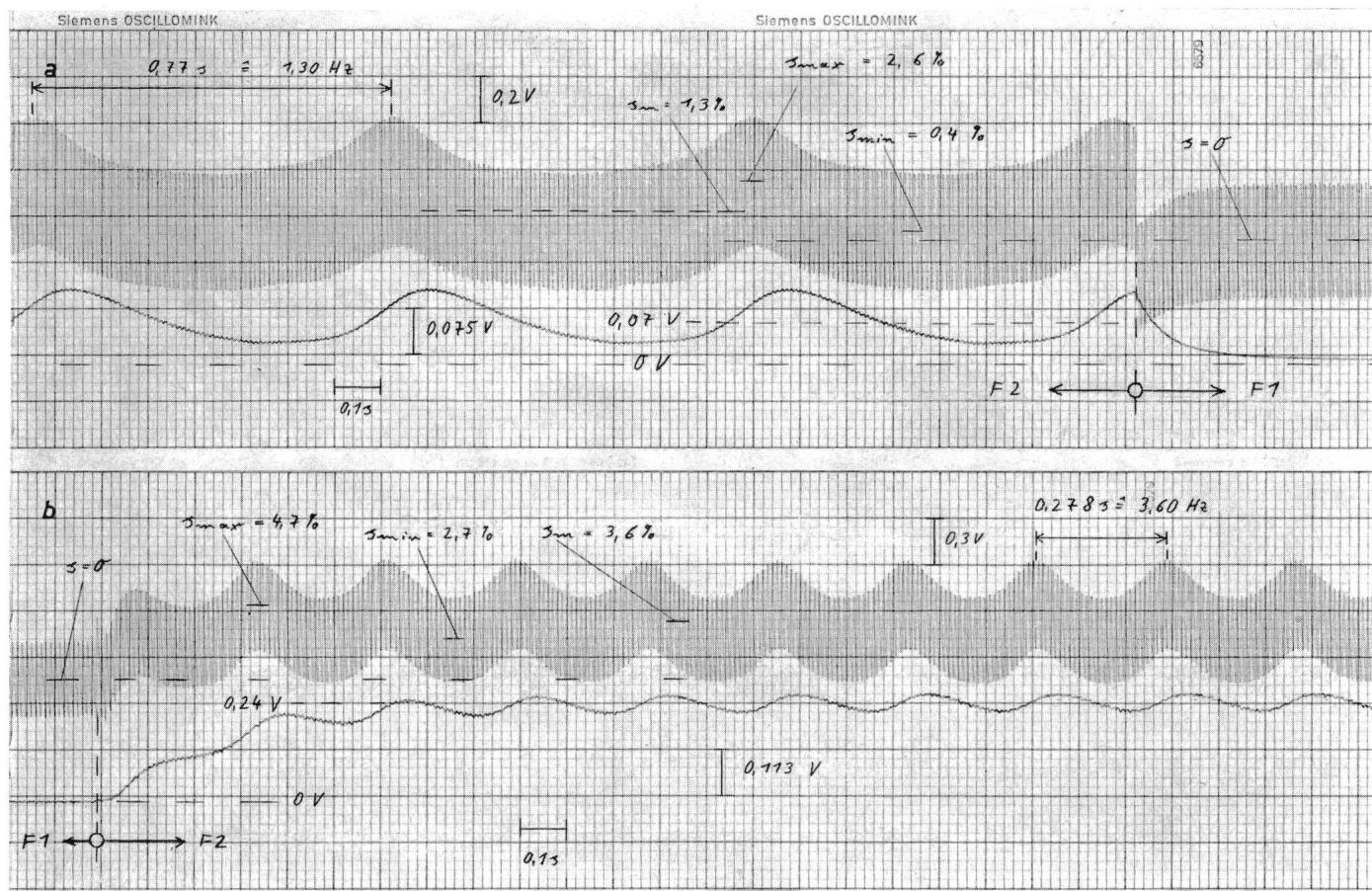


Fig. 9
Ungleichmässig schlüpfende Maschine

a mittlerer Schlupf $s_m = 1,3\%$
b mittlerer Schlupf $s_m = 3,6\%$

(bezogen auf $f_1 = 50$ Hz)

obere Kurve: vom Digital-Analog-Wandler B2 abgegebene Spannung U_{Bt2}

untere Kurve: am Glättungskondensator des Differenzspannungsverstärkers C anliegende Spannung

F1 F2 Zeitpunkt, in dem die Ansteuerung des Teilgerätes B2 von Impulsfolge F1 (Frequenz $f_1 = 2f_1 = \text{konst.}$) auf Impulsfolge F2 (Frequenz $f_2 = 2p \cdot n$ konst.) umgeschaltet wurde

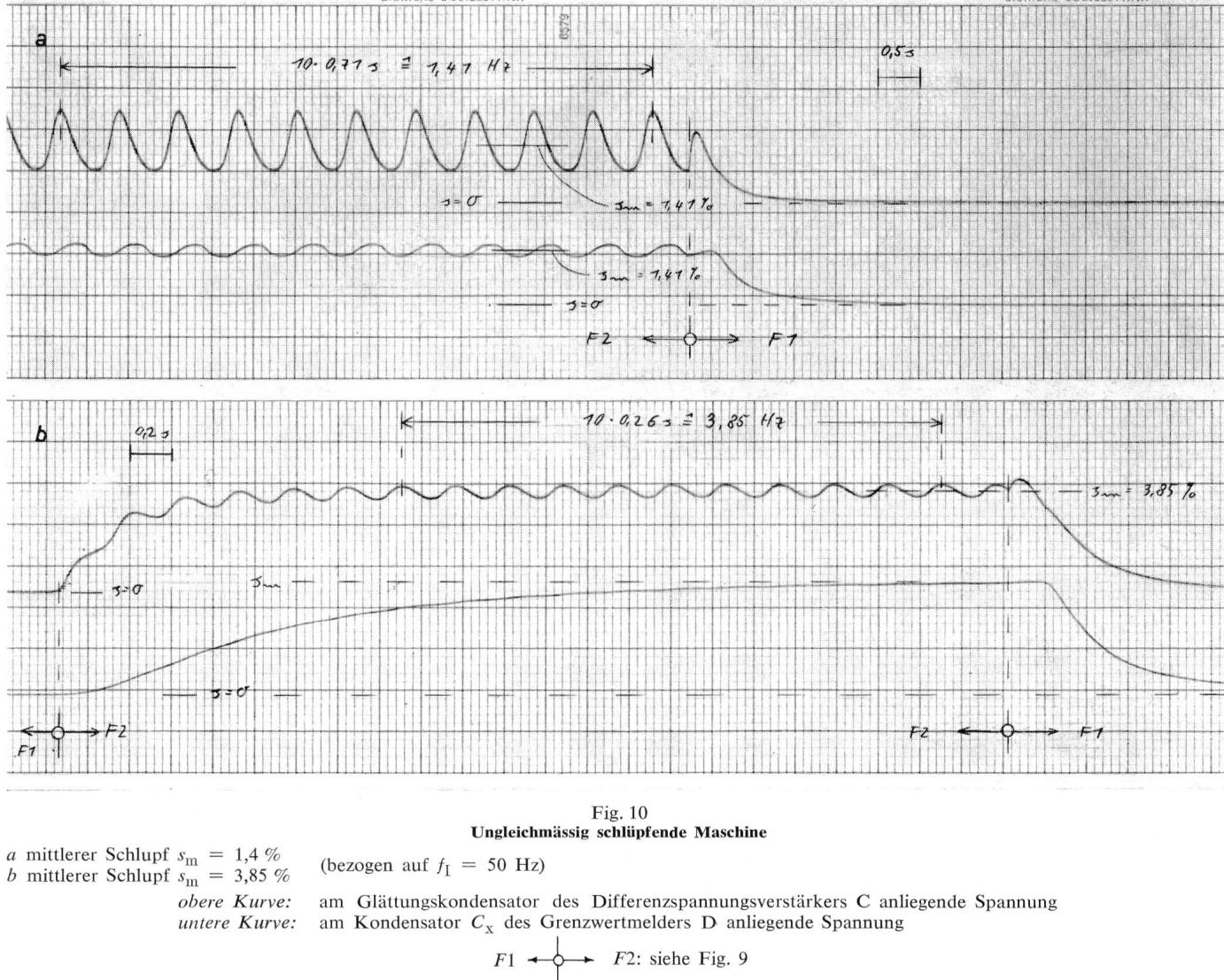


Fig. 10
Ungleichmässig schlüpfende Maschine

a mittlerer Schlupf $s_m = 1,4\%$
b mittlerer Schlupf $s_m = 3,85\%$

(bezogen auf $f_1 = 50$ Hz)

obere Kurve: am Glättungskondensator des Differenzspannungsverstärkers C anliegende Spannung
untere Kurve: am Kondensator C_x des Grenzwertmeters D anliegende Spannung

$F1 \leftarrow \rightarrow F2$: siehe Fig. 9

strommaschine an einstellbarer, nicht zu steifer Ankerspannung. Ein solcher Maschinensatz verhält sich bei Belastung wie eine asynchron laufende, unerregte Synchronmaschine: die Asynchronmaschine läuft bei Belastung mit einer mittleren Drehzahl:

$$n_m = n_s (1 - s_m) = \frac{1}{p} f_1 (1 - s_m)$$

Dieser ist eine Drehschwingung der Frequenz $2f_1 s_m$ überlagert. Da der Rotor nur elektrisch nicht rotationssymmetrisch, magnetisch aber rotationssymmetrisch ist, entwickelt die Maschine kein Reaktionsmoment und der mittlere Schlupf s_m und die Frequenz der überlagerten Drehschwingung sind in weiten Grenzen einstellbar.

Das Oszilloskopogramm Fig. 9a zeigt den Verlauf der Spannung U_{Bt2} des Teilgerätes B2 (obere Kurve, Nullpunkt unterdrückt) und die geglättete Differenz $U_{Bt1} - U_{Bt2}$ (untere Kurve) bei Betrieb der Versuchsmaschine mit einem mittleren Schlupf $s_m = 1,3\%$, Fig. 9b im Falle $s_m = 3,6\%$. Der mittlere Verlauf der Spannung U_{Bt2} ist in beiden Fällen ein gutes Abbild des zeitlichen Verlaufs der Drehzahl (Zeitkonstante der Verzögerung ca. 80 ms, siehe 2.3 Kenndaten). Der Verlauf der geglätteten Differenz entspricht der zweiten Verzögerung durch die RC -Schaltung des Teilgerätes C. Die Unterdrückung der überlagerten Schwingung der Frequenz $2f_1 s_m$ ist für den Einsatz

der Anlage zur Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen bedeutungslos.

Das Oszilloskopogramm Fig. 10a zeigt den Verlauf der geglätteten Differenz $U_{Bt1} - U_{Bt2}$ (obere Kurve, in Fig. 5 mit S bezeichnet) und die entsprechend $T_x = 1$ s verzögerte Spannung S' , die im Teilgerät D mit dem eingestellten Grenzwert verglichen wird (untere Kurve) bei einem mittleren Schlupf $s_m = 1,41\%$. Die entsprechenden Kurven bei $s_m = 3,85\%$ zeigt Fig. 10b.

In Fig. 9 und 10 sind die Zeitpunkte markiert, in denen die Ansteuerung des Digital-Analog-Wandlers B2 von der Impulsfolge F1 auf die Impulsfolge F2 bzw. umgekehrt umgeschaltet wurde³⁾. Fig. 10b ist zu entnehmen, dass die Spannung S' am Kondensator C_x (siehe Fig. 5) bei steigender Frequenz $f_2 = 2p \cdot n$ schneller abnimmt als sie bei fallender Frequenz zunimmt (die Oszilloskopogramme wurden bei Motorbetrieb aufgenommen, also bei $f_1 = 2f_1 > f_2 = 2p \cdot n$). Das entspricht den praktischen Anforderungen bei der Überwachung von Motoren: zieht die Maschine wieder in Tritt, so soll die Spannung S' möglichst rasch wieder zu Null werden. Dieses Verhalten wurde durch eine Diode parallel zu Vorwiderstand R_x des Grenzwertmeters D erreicht, es erfordert, dass die Ausgangsspannung S des Differenzspannungsverstärkers C bei $f_1 = 2f_1 < f_2 = 2p \cdot n$

³⁾ Da die beiden Impulsfolgen zueinander asynchron sind, können dabei Schalteffekte auftreten, siehe z. B. Verlauf U_{Bt2} in Fig. 9a.

durch eine Diode parallel zum Glättungskondensator der Eingangsschaltung auf einen kleinen Wert begrenzt wird. Für Einsatz an Generatoren, die nach $n > n_s$ ausser Tritt gehen, müssen beide Dioden umgepolt werden.

Ausserdem wurde das Verhalten der Überwachungseinrichtung bei Variation der verschiedenen Versorgungsspannungen überprüft. Der Zweig 2: Drehzahl (Fig. 1) wird angesteuert, sobald an dem im Teilgerät A"2 befindlichen Lämpchen wenigstens 50 % der Nennspannung anliegen, der Zweig 1: Frequenz, sobald Teilgerät A1 mit wenigstens 35 % der Sollspannung angesteuert wird. Das Stromversorgungsgerät für die elektronischen Schaltungen ist für 220 V/50 Hz bemessen. Die Proportionalspannungen P weichen von der in Fig. 6 aufgezeichneten Kennlinie um höchstens $\pm 2\%$ ab für Spannungen am Versorgungsgerät im Bereich 175...275 V. Dabei weicht die Ausgangsspannung S des Differenzspannungsverstärkers um höchstens $\pm 3\%$ von der in Fig. 7 aufgezeichneten Kennlinie ab. Alle Werte entsprechen somit den praktischen Anforderungen mit Sicherheit.

3. Vergleich mit Geräten anderer Funktionsweise

Die in Abschnitt 2.4 beschriebene praktische Erprobung musste an einer Versuchsanlage durchgeführt werden, da derartige systematische Untersuchungen nicht an Industrieanlagen grosser Leistung (Nennleistung 500 kW und mehr) durchführbar sind. Alle Versuche zeigten, dass die hier beschriebene elektronische Anlage zur Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen sehr gut geeignet ist. Die Versuchsausführung erwies sich als jederzeit betriebs- und funktionssicher. Weitere Untersuchungen, insbesondere der Vergleich mit den Überwachungsanlagen, die den Erregerstrom als Kriterium für den Zustand «Asynchronlauf» erfassen [1; 2; 3], wurden am Analogrechner durchgeführt.

Die Untersuchungen durch Simulation am Analogrechner wurden für Daten ausgeführter Antriebe⁴⁾ nach dem z. B. in [9] angegebenen Ersatzschema für die Maschine durchgeführt⁵⁾. Sie zeigten, dass die Überwachungsgeräte nach [1; 2; 3] den asynchronen Lauf der Maschine mit Sicherheit melden, wenn sie der zu überwachenden Maschine richtig angepasst sind. Es besteht eher die Gefahr, dass diese Geräte Störung melden, wenn die Maschine bei Netzstörungen um eine oder zwei doppelte Polteilungen schlüpft, der ganze Vorgang aber gerade noch stabil abläuft, oder wenn sie nach einer Störung mit

⁴⁾ Maschinen von 500 kW bis ca. 9000 kW Nennleistung zum Antrieb von Turbokompressoren ($2p = 4$), Umformern ($2p = 8$) und Kolbenkompressoren ($2p = 20$).

⁵⁾ Untersuchungen nach dem in [10] angegebenen Ersatzschema führen zu keinem — in diesem Sinne — prinzipiell anderen Ergebnis.

grosser Anfangsamplitude in eine neue Gleichgewichtslage einpendelt. Zur Unterbindung derartiger falscher Störmeldungen dürfen Geräte nach dem Funktionsprinzip «Erregerwechselstrom» nur Störmeldung geben können, wenn der Erregerwechselstrom so lange festgestellt wird, dass nur Asynchronlauf als Ursache möglich ist. Diese aus Gründen der Funktionssicherheit notwendige Verzögerung bringt keine Gefährdung der Maschine mit sich, bedeutet aber im allgemeinen, dass die Maschine abgeschaltet werden muss, weil Massnahmen wie Netzumschaltung und/oder Stosserregung nicht mehr zur Resynchronisation führen.

Im Gegensatz dazu braucht das hier beschriebene elektronische Gerät zur unmittelbaren Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen nicht auf die jeweilige Maschine eingestellt zu werden, es ist eine für praktisch alle in Frage kommenden Maschinen bzw. Anlagen gleiche Einstellung möglich. Die für diese universelle Einstellung zu wählende Verzögerung ist kleiner, als die bei den Geräten anderer Bauart zur Funktionssicherheit notwendige. Liegen spezielle Untersuchungen über die zu überwachende Maschine vor, so kann dieses Gerät, das unmittelbar die zu überwachende Grösse erfasst, sehr knapp, d. h. auf sehr schnelle Abgabe der Störmeldung eingestellt werden, ohne dass die Funktionssicherheit gefährdet ist, also in Grenzfällen vorzeitig Störung gemeldet wird.

Der Autor dankt Prof. Dr.-Ing. W. Scheuring für die Anregung zu dieser Studie und für die ihm gewährte Unterstützung.

Literatur

- [1] A. H. Hoffmann, C. Raczkowski und R. B. Squires: Relying for synchronous motor pullout protection. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 78(1959)– p. 618...624.
- [2] K. Bonfert: Verhalten und Schutz von Drehstrommotoren bei Spannungsseibrüchen und Spannungsunterbrechungen. VDE-Fachberichte 23(1964), S. 210...225.
- [3] W. Horn und H. Witte: Asynchronlaufschutz. AEG Mitt. 54(1964)3/4, S. 234...238.
- [4] A. Haböck und G. Kracke: Rotierende Gleichrichtererregung von Synchronmotoren. Siemens Z. 42(1968)11, S. 930...939.
- [5] D. Cords: Das neue Schlupffrequenz-Messgerät. BBC-Nachr. 51(1969)12, S. 684...686.
- [6] H. Leibold: Schnellumschaltgerät für Hochspannungsanlagen. Siemens Z. 35(1961)3, S. 154...159.
- [7] W. Groenewald und W. Brackmann: Automatische Schnellumschaltung mit einem neuen elektronischen Phasenvergleichsgerät. BBC-Nachr. 49(1967)12, S. 651...657.
- [8] A. Frank: Polwinkel-Messgerät aus Mitteln der BBC-Elektronik. BBC-Nachr. 44(1962)8/9, S. 361...363.
- [9] K. Bonfert: Betriebsverhalten der Synchronmaschine. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer Verlag, 1962.
- [10a] M. Canay: Ersatzschemata der Synchronmaschine zur Berechnung von Polradgrössen bei nichtstationären Vorgängen sowie asynchronem Anlauf. Teil I: Turbogeneratoren. Brown Boveri Mitt. 56(1969)2, S. 60...71.
- [10b] M. Canay: Ersatzschemata der Synchronmaschine zur Berechnung von Polradgrössen bei nichtstationären Vorgängen sowie asynchronem Anlauf. Teil II: Schenkelpolmaschinen. Brown Boveri Mitt. 57(1970)3, 135...145.

Adresse des Autors:

PD Dr.-Ing. E. Riccius, Nordendstrasse 28, D-8 München 13.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Réunions du CE 3, Symboles graphiques et de ses Sous-Comités SC 3A, Symboles graphiques pour schémas, SC 3B, Etablissement des schémas, diagrammes et tableaux, et SC 3C, Symboles graphiques utilisables sur le matériel, du 24 août au 9 septembre 1971 à Helsinki

CE 3, Symboles graphiques

Le comité plénier a siégé brièvement à la fin des réunions, le 9 septembre 1971, sous la présidence de M. E. Georgii (Suisse). Il a approuvé le procès-verbal de sa réunion tenue à Zurich le 19 no-

vembre 1970 et pris connaissance des rapports du Groupe de Travail Mixte CEI/CCI, Symboles graphiques pour équipements de télécommunications, du Sous-Comité 3A et de ses Groupes de Travail et des Sous-Comités 3B et 3C.