

Energetisches Stabilitätskriterium für Synchronmaschinen im transienten Betrieb

Autor(en): **Riccus, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **63 (1972)**

Heft 12

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915703>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Energetisches Stabilitätskriterium für Synchronmaschinen im transienten Betrieb¹⁾

Von E. Riccius, München

621.313.32.016.35

Der prinzipielle Unterschied zwischen einer für stationären Betrieb und einer für instationären Betrieb gültigen Stabilitätsgrenze wird dargelegt, die daraus für die Synchronmaschine resultierenden Grenzen für den Polradwinkel werden angegeben. Die Differentialgleichung für den Polradwinkel der am starren Netz mit grosser Amplitude schwingenden Synchronmaschine wird — unter Vernachlässigung der Dämpfung — aufgestellt. Diese Differentialgleichung 2. Ordnung ist nicht in allgemeiner Form lösbar, sie kann aber in eine integrierbare Gleichung umgeformt werden, deren Summanden die Komponenten der in der Schwingung enthaltenen Energie angeben. Durch Anwendung auf den Grenzwert für den Polradwinkel wird die Energiegleichung zu einer leicht auswertbaren Gleichung für die Stabilitätsgrenze. Die praktische Durchführung und der Einfluss der Dämpfung auf den Verlauf der Grenzkurven werden an Beispielen gezeigt.

La différence fondamentale des limites de stabilité entre un service stationnaire et non-stationnaire est expliquée, en indiquant les limites qui en résultent pour l'angle de la roue polaire de la machine synchrone. L'équation différentielle pour l'angle de la roue polaire de la machine synchrone, vibrant à grande amplitude sur un réseau fixe, est établie en négligeant l'amortissement. Cette équation différentielle du second ordre ne peut être résolue sous une forme générale, mais elle peut être transformée en une équation intégrable, dont les termes des sommes fournissent les composants de l'énergie contenues dans les vibrations. Par application à la valeur-limite de l'angle de la roue polaire, l'équation énergétique devient une équation facilement pondérable de la limite de stabilité. On démontre l'application pratique et l'influence de l'amortissement sur l'allure des courbes-limites à l'aide de quelques exemples.

1. Einführung

Bei elektrischen Industrieantrieben grosser Leistung, deren Drehzahl nicht einstellbar sein muss, werden netzgespeiste Synchron- und Asynchronmotoren installiert. Die Wahl der Motorart hängt von einer Reihe von Gesichtspunkten ab, z. B. von Preis und Wirkungsgrad, Blindstrombedarf, Art und Anzahl der erforderlichen Nebengeräte, stationäres Drehschwingungsverhalten und Verhalten bei Netzstörungen [1...10]²⁾. Bei diesen Antrieben bestehen sehr hohe Anforderungen an die Kontinuität des Betriebes, denen die Maschine ohne weiteres entspricht, das Netz aber nur bedingt. Daher werden für die besonders wichtigen Antriebe oft zwei voneinander möglichst unabhängige Versorgungsnetze installiert, damit der Motor bei einer Netzstörung ohne Betriebsunterbrechung auf das gerade ungestörte Netz umgeschaltet werden kann.

Das Verhalten der Asynchronmaschine wirft dann kaum noch Probleme auf, da eine Asynchronmaschine auch bei relativ grossem Schlupf wieder auf die stationär stabile Drehzahl hochläuft und bei entsprechender Ausführung der Wicklung, insbesondere der Wickelkopfabstützung, ohne Rücksicht auf Drehzahlfehler und Restfeld bzw. Restspannung umgeschaltet werden kann.

Bei Erregung über rotierende Gleichrichter ist ein Synchronmotor bezüglich Aufstellung, Anfahren und Wartung nicht komplizierter als ein Asynchronmotor, hat aber im allgemeinen günstigere Daten im stationären Betrieb und ist wegen des grösseren Luftspaltes robuster als ein Asynchronmotor. Die Netzumschaltung muss aber auf alle Fälle durch ein Schnellumschaltgerät gesteuert werden, da eine Synchronmaschine nur mit kleinem Schlupf und nicht mit beliebigem Fehlwinkel zwischen Maschinenspannung und Netzspannung zugeschaltet werden darf, sie geht sonst ausser Tritt. Das Verhalten der Synchronmaschine im instationären Betrieb, vor allem als Folge von Netzstörungen, wirft also Probleme auf, die zusätzliche Nebengeräte, nämlich das automatische Schnellumschaltgerät und ein Kommandogerät hierzu, notwendig machen.

In kritischen Fällen, also bei den besonders wichtigen Antrieben mit sehr hohen Anforderungen an die Kontinuität, muss die Eignung der Synchronmaschine als Motor unter diesem Gesichtspunkt überprüft werden. Diese Stabilitätsuntersuchung kann mit Hilfe eines Digital- oder eines Analogrechners unter Berücksichtigung der Ströme in allen Wicklungen der Maschine durchgeführt werden. Auch die Berücksichtigung irgendwie lastabhängiger Erregerspannung bereitet hierbei keine Schwierigkeiten. Diese Untersuchung ist im allgemeinen sehr umfangreich, da über die Störung nur Annahmen möglich sind und diese stark variiert werden müssen [10]. Demgegenüber haben Näherungsverfahren den Vorteil, dass sie aufgrund der — notwendigen — Abstraktion eine allgemeine Aussage ermöglichen, auch wenn sie in der Anwendbarkeit eingeschränkt sind.

Ein zur Stabilitätsuntersuchung bei Drehmomentstössen bewährtes Näherungsverfahren ist das Flächengleichheitsprinzip [11]. Es ist energetisch begründet, die zu vergleichenden Flächen Drehmoment mal Winkel sind das Mass für Lageenergie. Das Flächengleichheitsprinzip ist nur auf dynamische Lastfälle anwendbar, bei denen anfangs das Polrad genau synchron läuft, und auf solche, bei denen auf einen solchen Lastpunkt zurückgerechnet werden kann. Das im folgenden abgeleitete Näherungsverfahren gilt ohne diese Einschränkung und ist in Form übersichtlicher Grenzkurven gut für Stabilitätsuntersuchungen geeignet. Die vereinfachenden Annahmen sind dieselben wie beim Flächengleichheitsprinzip und bei Synchronmaschinen grosser Leistung berechtigt. Als Beispiel sei der Maschinensatz nach Tabelle I betrachtet: ein Motor zum Antrieb eines Leonardgenerators, der an ein starres Netz mit Nennspannung und Nennfrequenz angeschlossen sein soll.

2. Elektromagnetisches Drehmoment

Stationäre Lastfälle werden im allgemeinen nach der Drehfeldtheorie untersucht. Statt des Vektordiagrammes der räumlichen Felder wird aber meist das Zeigerdiagramm der Wechselgrössen eines Stranges aufgezeichnet. Für die Synchronmaschine ist — fast ausschliesslich — das Erzeuger-Zählpfeilsystem eingeführt, ein Motor läuft also mit $P_w < 0$, $\cos \varphi < 0$,

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. W. Scheuring zum 70. Geburtstag gewidmet.

²⁾ Siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

$M_i < 0$ und $\vartheta < 0$. Zur Veranschaulichung zeigt Fig. 1 das Zeigerdiagramm der Maschine nach Tabelle I bei Nennlast, es ist als Diagramm der komplexen Effektivwerte zu verstehen oder in p. u., d. h. in dimensionslosen, auf den Nennwert bezogenen Grössen, wenn x statt X für die Reaktanzen geschrieben wird³⁾.

Aus dem Zeigerdiagramm Fig. 1 kann für das elektromagnetisch erzeugte Drehmoment M_i im stationären Betrieb mit konstanter Erregung folgende Grössengleichung abgeleitet werden:

$$\left. \begin{aligned} M_i &= M_1 \sin \vartheta + M_2 \sin 2\vartheta \\ M_1 &= \frac{1}{2\pi n_s} m U \frac{E_p}{X_d} = \frac{P_{sN}}{2\pi n_s} \cdot \frac{U}{U_N} \cdot \frac{E_p/U_N}{x_d} \\ M_2 &= \frac{1}{2\pi n_s} m \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} = \\ &= \frac{P_{sN}}{2\pi n_s} \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Fig. 1 und Gl. (1) gelten für Schenkelpolmaschinen, bei Vollpolmaschinen ist $X_q = X_d$ bzw. $x_q = x_d$ zu setzen.

Instationäre Lastfälle können praktisch nur auf dem Umweg über die der Synchronmaschine äquivalente Modellmaschine nach Park untersucht werden. Zwar ist auch deren Differentialgleichungssystem nichtlinear und daher in vielen Fällen nicht in allgemeiner Form, sondern nur numerisch lösbar, für einige nichtstationäre Fälle kann jedoch die allgemeine formelmässige Lösung angegeben werden. Es sind das

- ständige Pendelungen
- subtransiente Lastfälle
- und transiente Lastfälle.

Im transienten Betrieb befindet sich eine Synchronmaschine während und nach mechanisch bedingten Laststössen. Auch

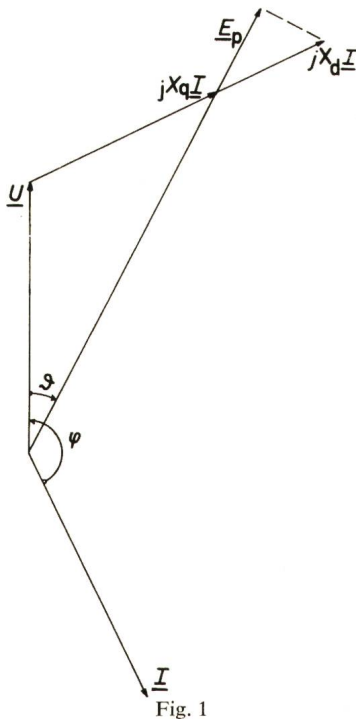


Fig. 1

Zeigerdiagramm einer Schenkelpolmaschine im Motorbetrieb (stationär)

\underline{U} Strangspannung; \underline{I} Strangstrom; \underline{E}_p Polrad-EMK (Strangwert); φ Phasenverschiebungswinkel $\angle(\underline{I}, \underline{U})$; ϑ Polradwinkel $\angle(\underline{U}, \underline{E}_p)$; x_d synchrone Reaktanz, längs; x_q synchrone Reaktanz, quer; $X_d = x_d U_N/I_N$; $X_q = x_q U_N/I_N$

(\underline{U} , \underline{I} und \underline{E}_p sind als komplexe Effektivwerte zu verstehen)

³⁾ Im Aufsatz nicht gebrachte Ableitungen siehe [11].

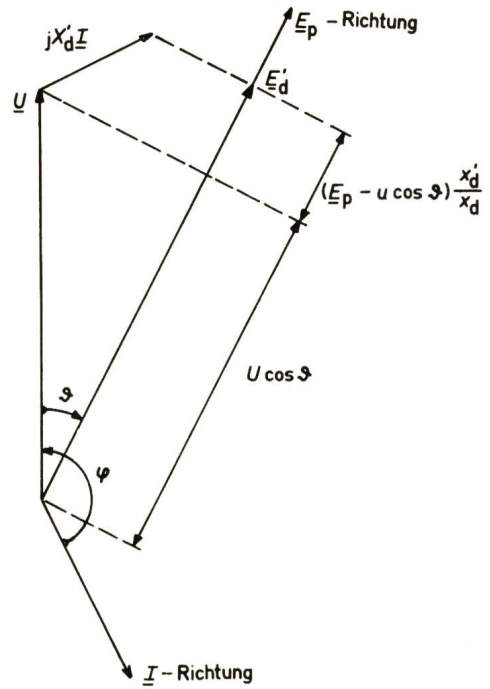


Fig. 2

Bestimmung der Hauptfeldspannung E_d' , die das Verhalten einer Synchronmaschine im transienten Betrieb charakterisiert

$$X_d' = x_d' U_N/I_N$$

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

subtransiente Vorgänge haben transiente Vorgänge zur Folge, z. B. ist das Einpendeln in den stationären Betriebspunkt nach einer Grobsynchronisation, d. h. nach Zuschalten mit Drehzahlfehler und/oder Winkelfehler, als transienter Vorgang zu behandeln.

Bei den in der Einführung beschriebenen Störungsfällen treten auch subtransiente Vorgänge auf, für den stabilen oder instabilen Ablauf ist bei Motoren aber überwiegend der transiente Betrieb ausschlaggebend, da die subtransienten Vorgänge sehr schnell abklingen⁴⁾.

Für das elektromagnetisch erzeugte Drehmoment einer Synchronmaschine im transienten Betrieb mit konstanter Erregerspannung⁵⁾ kann folgende Grössengleichung abgeleitet werden:

$$\left. \begin{aligned} M_i' &= M_1' \sin \vartheta - M_2' \sin 2\vartheta \\ M_1' &= \frac{1}{2\pi n_s} m U \frac{E_d'}{X_d'} = \frac{P_{sN}}{2\pi n_s} \cdot \frac{U}{U_N} \cdot \frac{E_d'/U_N}{x_d'} \\ M_2' &= \frac{1}{2\pi n_s} m \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_q - X_d'}{X_q X_d'} = \\ &= \frac{P_{sN}}{2\pi n_s} \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \frac{x_q - x_d'}{2x_q x_d'} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Die Spannung E_d' ist eine Ersatzgrösse, sie bezieht sich auf die vereinfachende Annahme, dass der verkettete Fluss der Erregerwicklung im transienten Betrieb konstant ist. E_d' ist für den Lastpunkt zu bestimmen, in dem die Maschine bis zum Beginn des transienten Betriebes stationär lief, siehe Fig. 2 (gezeichnet für Nennpunkt der Maschine nach Tabelle I). Fig. 2 gilt für Schenkelpolmaschinen und für Vollpolmaschinen, in Gl. (2) ist bei Vollpolmaschinen $X_q = X_d$ bzw. $x_q = x_d$ einzusetzen.

⁴⁾ Generatoren haben grössere subtransiente Zeitkonstanten bei sonst etwa gleichen Kennwerten.

⁵⁾ d. h. nicht geregelte Fremderregung.

Fig. 3 zeigt zum Vergleich im Motorbetrieb ($\vartheta < 0$) die stationäre Drehmomentkennlinie $M_i = f(\vartheta)$ und die transiente Drehmomentkennlinie $M_i' = f(\vartheta)$ der Maschine nach Tabelle I, wenn der transiente Betrieb im Nennpunkt beginnt. Im Nennpunkt ist $M_N = -70 \cdot 10^3$ Nm bei $\vartheta_N = -0,48$ rad $\triangleq -27,5^\circ$, in diesem Punkt, dem Ausgangspunkt des transienten Betriebes, ist definitionsgemäss $M_i = M_i'$.

Die Gln. (1) und (2) und die entsprechenden Fig. 1 bis 3 gelten unter der Voraussetzung, dass die Ankerkupferverluste und die Eisen- und Reibungsverluste vernachlässigt und die einzusetzenden Reaktanzen als konstant angenommen werden dürfen. Das ist bei der Maschine nach Tabelle I und ähnlichen Antrieben ohne weiteres zulässig. Gl. (2) liegt ausserdem die Annahme zugrunde, dass der verkettete Fluss der Erregerwicklung konstant ist. Die Zulässigkeit dieser Annahme ist durch Vergleich der Zeitkonstanten T_{d0}' und T_d' der Erregerwicklung mit der Dauer der Unterbrechung und des Kurzschlusses im Ankerkreis der Maschine und mit der Eigenschwingungsdauer des Maschinensatzes am Netz von Fall zu Fall zu prüfen. Durch Simulation verschiedener Arten von Netzstörungen auf einem Analogrechner konnte festgestellt werden, dass bei Störungen und Umschaltungen, die stabil ablaufen, der verkettete Fluss der Erregerwicklung bei Maschinen dieser Leistung in solchen Fällen als konstant angenommen werden darf.

3. Stabilitätsgrenze

Eine allgemeine Formulierung für die Grenze des Polradwinkels, bis zu der eine Synchronmaschine belastet werden bzw. ausschlagen darf, muss etwa lauten: Die Stabilitätsgrenze ist erreicht, wenn bei kleiner Auslenkung keine Rückführkraft zum ursprünglichen Betriebspunkt mehr auftritt. Die mathematische Formulierung für das jeweilige Stabilitätsproblem muss dieser Forderung inhaltlich entsprechen, muss aber berücksichtigen, ob der Betriebspunkt stationär stabil sein soll oder ob ein dynamischer Vorgang — unter gewissen Bedingungen — stabil ablaufen soll, d. h. asymptotisch oder in Form einer gedämpften Schwingung in einen stationär stabilen Betriebspunkt übergehen soll.

Für stationären Betrieb einer Maschine, die mit einem nicht vom Polradwinkel abhängigen Drehmoment belastet ist, gilt somit:

$$\left. \begin{array}{l} \text{stabiler Bereich} \quad \frac{dM_i}{d\vartheta} > 0 \\ \text{Grenze} \quad \frac{dM_i}{d\vartheta} = 0 \rightarrow \pm \vartheta_K \end{array} \right\} \quad (3)$$

Fig. 4 zeigt die Kennlinie $M_i = f(\vartheta)$ der Maschine nach Tabelle I bei Nennerregung; der nach dieser Definition stabile Betriebsbereich $-\vartheta_K < \vartheta < +\vartheta_K$ ist gekennzeichnet. Hängt das Gegenmoment vom Polradwinkel der Maschine ab (z. B. Netzkupplung durch Synchron-Synchron-Umformer), so verschieben sich die Stabilitätsgrenzen etwas.

Bei den hier bezüglich Stabilität zu untersuchenden dynamischen Störungsfällen darf angenommen werden, dass das Gegenmoment nicht vom Polradwinkel abhängt. Ferner darf für den schmalen Bereich um die synchrone Drehzahl, der bei stabil ablaufenden Vorgängen eingehalten wird, das Gegenmoment als nicht von der Drehzahl abhängig angenommen werden. Entsprechend der eingangs in Worten formulierten Stabilitätsbedingung darf dann eine mit konstantem Gegenmoment M_0 belastete Synchronmaschine durch eine vorüber-

gehende Störung entsprechend Fig. 5 bis zu dem Winkel ϑ_{10} ausgelenkt werden, bei dem die Rückführkraft zu Null wird:

$$\left. \begin{array}{l} \text{stabiler Bereich} \quad \frac{M_i' - M_0}{\vartheta - \vartheta_0} > 0 \\ \text{Grenze } M_i' = M_0, \quad \frac{dM_i'}{d\vartheta} < 0 \rightarrow \vartheta_{10} \end{array} \right\} \quad (4)$$

ϑ_{10} ist der zweite, stationär instabile Schnittpunkt der Geraden $M_0 = \text{const}$ mit der transienten Drehmomentkennlinie $M_i' = f(\vartheta)$. Eine vorübergehende Störung verläuft stabil, wenn das Polrad vor dem kritischen Umkehrpunkt ϑ_{10} zur Ruhe kommt und die Bewegungsrichtung umkehrt.

Der zu einem bestimmten Umkehrpunkt ϑ_1 zugehörige Umkehrpunkt ϑ_2 auf der anderen Seite von ϑ_0 ist nach dem Flächengleichheitsprinzip zu bestimmen, siehe Fig. 5:

$$\left. \begin{array}{l} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} (M_i' - M_0) d\vartheta = 0 \rightarrow \vartheta_2 \\ \text{sign}(\vartheta_2 - \vartheta_0) \neq \text{sign}(\vartheta_1 - \vartheta_0) \end{array} \right\} \quad (5)$$

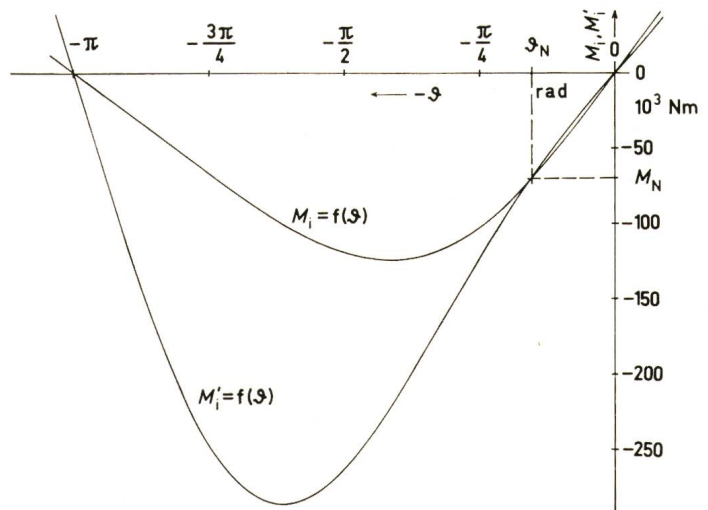


Fig. 3

Inneres Drehmoment als Funktion des Polradwinkels ϑ im Motorbereich
 M_i im stationären Betrieb, M_i' im transienten Betrieb

Nennpunkt $\vartheta_N = -0,48$ rad $\triangleq -27,5^\circ$, $M_N = -70 \cdot 10^3$ Nm
 $M_i = f(\vartheta)$ stationäre Drehmomentkennlinie; $M_i' = f(\vartheta)$ transiente Drehmomentkennlinie

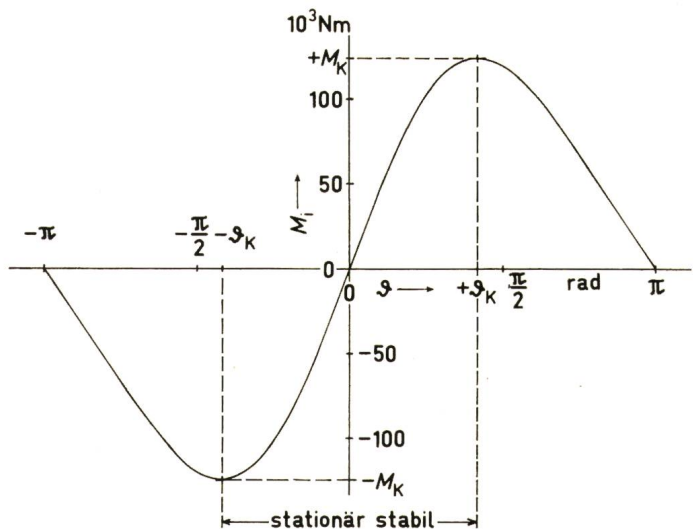


Fig. 4

Stabilitätsgrenzen im stationären Betrieb

Kipplastwinkel $\vartheta_K = \pm 1,31$ rad $\triangleq \pm 75^\circ$; $M_K = \pm 124,5 \cdot 10^3$ Nm
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

4. Bewegungsgleichung der Maschine am Netz, Ableitung der Energiegleichung

Für die an ein starres Netz angeschlossene Synchronmaschine, die mit konstantem Drehmoment M_0 belastet ist, gilt nach dem bisherigen folgende Differentialgleichung für den Polradwinkel ϑ im transienten Betrieb:

$$\frac{1}{p} J \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + M_1' = M_0 \quad (6)$$

Darin ist J das gesamte polare Massenträgheitsmoment auf der als starr angenommenen Welle, p die Polpaarzahl.

Diese Drehmomentgleichung zur Beschreibung der dem synchronen Lauf der Maschine überlagerten Drehbewegung wird zur Energiegleichung, wenn sie über dem räumlichen Winkel integriert wird. Der räumliche Winkel ist das $1/p$ -fache des elektrisch zählenden Polradwinkels ϑ , die Energiegleichung lautet daher:

$$\frac{1}{p^2} J \int \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} d\vartheta + \frac{1}{p} \int (M_1' - M_0) d\vartheta = C \quad (7)$$

Bezogen auf stationären Betrieb des Maschinensatzes mit $\vartheta = \vartheta_0$ und $d\vartheta/dt = 0$ haben die Summanden der Gl. (7) folgende Bedeutung:

$$\frac{1}{p^2} J \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} d\vartheta = \frac{1}{2} J \left(\frac{1}{p} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \right)^2 = W_{\text{kin}} \quad (8a)$$

(W_{kin} Bewegungsenergie bezüglich $d\vartheta/dt = 0$),

$$\frac{1}{p} \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} (M_1' - M_0) d\vartheta = W_{\text{pot}} \quad (8b)$$

(W_{pot} Lageenergie bezüglich $\vartheta = \vartheta_0$)

$$C = W_{\text{kin}} + W_{\text{pot}} = W_{\text{ges}} \quad (8c)$$

(W_{ges} gesamte, in der Drehschwingung bezüglich $d\vartheta/dt = 0$, $\vartheta = \vartheta_0$ enthaltene Energie).

Die gesamte, in einer freien ungedämpften Schwingung enthaltene Energie ist konstant, sie pendelt mit doppelter Grundfrequenz der Schwingung zwischen Bewegungsenergie und Lageenergie.

In den Umkehrpunkten ϑ_1 und ϑ_2 ist:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = 0 \rightarrow W_{\text{kin}} = 0 \quad W_{\text{pot}} = W_{\text{ges}}$$

In der Gleichgewichtslage ϑ_0 ist:

$$\left| \frac{d\vartheta}{dt} \right| = \text{maximal} \rightarrow W_{\text{pot}} = 0 \quad W_{\text{kin}} = W_{\text{ges}}$$

Die Differentialgleichung (6) für ϑ als Funktion der Zeit ist nicht formelmässig lösbar, da für $M_1' = f(\vartheta)$ nach Gl. (2) ein nichtlinearer Zusammenhang gilt. Es ist aber ohne weiteres möglich, den Verlauf $W_{\text{pot}} = f(\vartheta)$ nach Gl. (8b) mit $M_1' = f(\vartheta)$ nach Gl. (2) anzugeben:

$$\begin{aligned} W_{\text{pot}} &= \frac{1}{p} \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} (M_1' - M_0) d\vartheta = \\ &= \frac{1}{p} \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} (M_1' \sin \vartheta - M_2' \sin 2\vartheta - M_0) d\vartheta \end{aligned}$$

$$W_{\text{pot}} = C_0 - \frac{M_1'}{p} \cos \vartheta + \frac{M_2'}{2p} \cos 2\vartheta - \frac{M_0}{p} \vartheta \quad (9)$$

mit

$$C_0 = \frac{M_1'}{p} \cos \vartheta_0 - \frac{M_2'}{2p} \cos 2\vartheta_0 + \frac{M_0}{p} \vartheta_0$$

Damit ist es auch möglich, für einen bekannten Wert $C = W_{\text{ges}}$ nach Gl. (8c) die Funktion $W_{\text{kin}} = f(\vartheta)$ abzuleiten und daraus nach Gl. (8a) den Verlauf $d\vartheta/dt = f(\vartheta)$ für eine am starren Netz mit grosser Amplitude schwingende Synchronmaschine unter Vernachlässigung der Dämpfung punktweise zu berechnen⁶⁾.

Zur Veranschaulichung zeigt Fig. 6 den Verlauf der Lageenergie W_{pot} als Funktion des Polradwinkels ϑ für die als Beispiel gewählte Maschine nach Tabelle I bei $\vartheta_0 = \vartheta_N$, $M_0 = M_N$ bei Nennerregung. Diese Darstellung zeigt anschaulich die energetische Bedeutung des Flächengleichheitsprinzips ($A_1 = A_2 \triangleq W_{\text{pot}1} = W_{\text{pot}2}$) und lässt erkennen, dass immer der bezüglich $\vartheta = 0$ auf der selben Seite wie ϑ_0 gelegene Umkehrpunkt der kritische Umkehrpunkt ist.

In Fig. 6 ist die Linie $W_{\text{ges}} = 70,7$ kW eingetragen. Aus den Schnitten mit der Kurve $W_{\text{pot}} = f(\vartheta)$ ist zu entnehmen, dass die Maschine in diesem Fall, unabhängig vom gesamten polaren Massenträgheitsmoment J des Maschinensatzes, im Bereich $\vartheta_1 = -140^\circ$ bis $\vartheta_2 = 82,2^\circ$ schwingt. Dieser Darstellung kann auch die nach Gl. (8c) bestimmte kinetische Energie $W_{\text{kin}} = W_{\text{ges}} - W_{\text{pot}} = f(\vartheta)$ entnommen werden (siehe Eintragung bei $\vartheta = -\pi/2$), aus der für einen bekannten Wert J der Verlauf $d\vartheta/dt = f(\vartheta)$ punktweise errechnet werden kann (Fig. 7). Diese Kurve wird im Uhrzeigersinn durchlaufen (siehe die kleinen Richtungspfeile). Der zeitliche Verlauf des Polradwinkels ϑ bzw. seiner Ableitung $d\vartheta/dt$ kann der Kurve nicht entnommen werden, auch nicht die Periodendauer T der Schwingung. Für die Anwendbarkeit der Differentialgleichung (6) auf Stabilitätsprobleme spielt die Elimination der Zeit als Parameter aber keine Rolle, es kommt vielmehr darauf an, leicht zu bestimmende Grenzkurven angeben zu können.

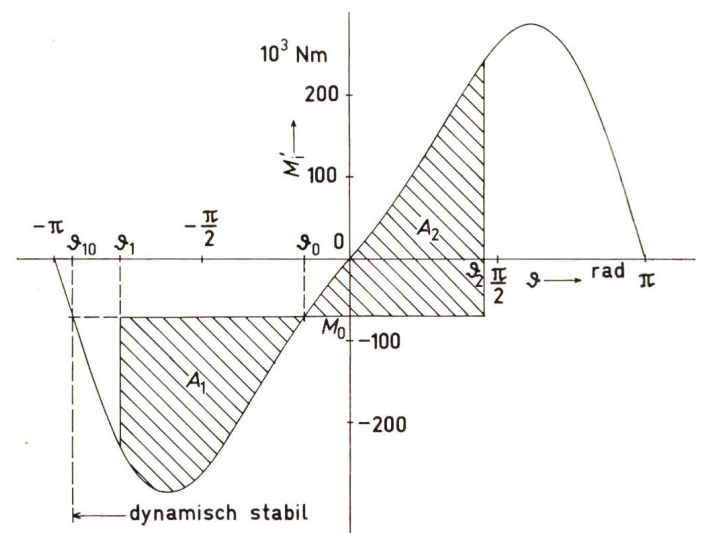


Fig. 5
Stabilitätsgrenze ϑ_{10} im transienten Betrieb, stationärer Lastwinkel ϑ_0 und zusammengehörige Umkehrpunkte ϑ_1 und ϑ_2 nach dem Flächengleichheitsprinzip $A_1 = A_2$

Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

⁶⁾ Bei kleinen Amplituden ergibt die lineare Näherung $M_1' = M_0 + (\vartheta - \vartheta_0) \frac{dM_1'}{d\vartheta} \Big|_{\vartheta_0}$ eine harmonische Schwingung.

5. Energetisches Stabilitätskriterium

Bei einer planmässigen Netzumschaltung läuft die Maschine bis zum Beginn der Umschaltung ungestört. Die Umschaltung erfolgt mit Hilfe der heute üblichen Geräte mit einer Unterbrechungszeit unter 100 ms, sie läuft daher bei Asynchron- und bei Synchronmaschinen mit Sicherheit erfolgreich ab.

Muss wegen einer Netzstörung umgeschaltet werden, so wird die Maschine auf alle Fälle mit Drehzahlfehler und mit Winkelfehler zugeschaltet. Bei einer solchen Grobsynchronisation geht eine Synchronmaschine nicht sicher in Tritt, insbesondere, wenn das Drehmoment an der Welle nicht Null ist. Auch andere vorübergehende Störungen, z. B. ein Drehmomentimpuls oder eine vorübergehende Spannungsabsenkung, bei der nicht umgeschaltet wird, gefährden bei Synchronmaschinen die Stabilität.

Die im vorigen Abschnitt abgeleitete Energiegleichung ist auf solche Fälle, bei denen die Maschine nach der eigentlichen Störung wieder mit konstantem Drehmoment belastet ist, sich aber in einem dynamischen Betriebszustand befindet, gut als Stabilitätskriterium anwendbar. Dazu ist für die erste Phase nach der Störung der Grenzfall, also Ausschwingen bis zum kritischen Umkehrpunkt, zu betrachten. Bei stabilem Ablauf wird der kritische Umkehrpunkt nicht überschritten und die Schwingung klingt als Folge der Wirkung der Dämpferwicklung ab.

Bei einem Motor ist ϑ_{10} der kritische Umkehrpunkt, es ist zu berechnen:

a) Gleichgewichtslage ϑ_0 und kritischer Umkehrpunkt ϑ_{10} nach Gl. (2) und (4),

$$M_i'(\vartheta) = M_0 \rightarrow \vartheta_0 \text{ und } \vartheta_{10};$$

b) Lageenergie im kritischen Umkehrpunkt, das ist der grösstmögliche Wert der gesamten, in der Drehschwingung speicherbaren Energie nach Gl. (9),

$$W_{\text{ges max}} = W_{\text{pot 10}} = \frac{1}{p} \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_{10}} (M_i' - M_0) d\vartheta$$

Damit ist bekannt, welche Summe aus Lageenergie (bezüglich ϑ_0) und Bewegungsenergie (bezüglich $d\vartheta/dt = 0$) bei einem beliebigen Vorgang erreicht werden darf, damit er noch als Schwingung, d. h. stabil abläuft. Zur Anwendung in Form übersichtlicher Grenzkurven ist weiterhin zu berechnen:

c) Zulässige Bewegungsenergie als Differenz aus grösstmöglicher Gesamtenergie und Lageenergie nach Gl. (8c) und (9),

$$W_{\text{kin}} = W_{\text{pot 10}} - W_{\text{pot}}$$

umgeformt

$$W_{\text{kin}} = \frac{M_1'}{p} \cos \vartheta - \frac{M_2'}{2p} \cos 2\vartheta + \frac{M_0}{p} \vartheta - C_{10} \quad (10)$$

mit

$$C_{10} = \frac{M_1'}{p} \cos \vartheta_{10} - \frac{M_2'}{2p} \cos 2\vartheta_{10} + \frac{M_0}{p} \vartheta_{10}$$

d) Zulässige Winkelgeschwindigkeit (elektrisch) des Polrades bezüglich synchronem Lauf nach Gl. (8a) und (10),

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \pm p \sqrt{\frac{2 W_{\text{kin}}}{J}} \quad (11)$$

Nach Durchrechnung dieser weder komplizierten noch umfangreichen Rechnungen kann das energetische Stabilitätskriterium sehr einfach in Form von Grenzkurven $W_{\text{kin}} = f(\vartheta)$ oder $d\vartheta/dt = f(\vartheta)$ auf einige für Synchronmaschinen typische Stabilitätsprobleme angewandt werden.

6. Anwendungsbeispiele

Stabilitätsuntersuchungen an Synchronmaschinen bei kurzzeitigen Störungen des stationären Betriebes sind insbesondere bei den in der Einführung beschriebenen Anwendungen als Motor durchzuführen. Daher wird auch bei den folgenden Anwendungsbeispielen der Maschinensatz nach Tabelle I als Motor betrachtet.

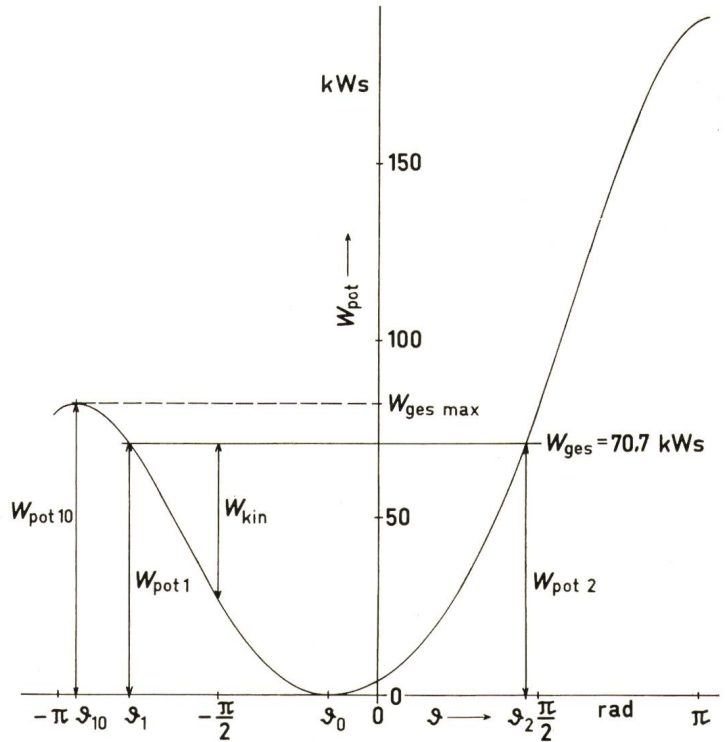


Fig. 6
Lageenergie W_{pot} in Abhängigkeit vom Polradwinkel ϑ
Bestimmung der maximalen gesamten Energie $W_{\text{ges max}} = W_{\text{pot 10}}$ der Bewegungsenergie W_{kin} und der zusammengehörigen Umkehrpunkte ϑ_1 und ϑ_2 .

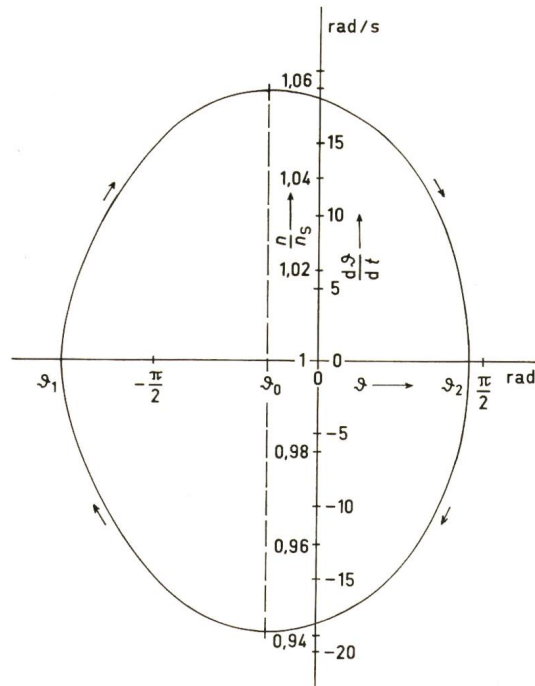


Fig. 7
Phasenkurve $\frac{d\vartheta}{dt} = f(\vartheta)$ bei $W_{\text{ges}} = 70,7 \text{ kW}$

(dabei wird der kritische Umkehrpunkt ϑ_{10} nicht erreicht)
Die Pfeile \rightarrow geben die Richtung an, in der die Kurve durchlaufen wird.
 n synchrone Drehzahl; n_s tatsächliche Drehzahl

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Tabelle I

Nennscheinleistung	$P_{sN} = 6111 \text{ kVA}$
Nennleistungsfaktor	$\cos \varphi_N = -0,9$
Nennfrequenz	$f_N = 50 \text{ Hz}$
Polzahl	$2p = 8$
(synchrone Drehzahl)	$n_s = 750 \text{ 1/min}$
Strangzahl	$m = 3$
Synchrone Reaktanz, längs	$x_d = 1,20$
Synchrone Reaktanz, quer	$x_q = 0,772$
Transiente Reaktanz, längs	$x_q' = 0,345$
Leerlaufzeitkonstante	$T_{do}' = 4,39 \text{ s}$
Kurzschlusszeitkonstante	$T_d' = 1,26 \text{ s}$
Polares Massenträgheitsmoment	$J = 6,5 \text{ kWs}^3$
Polradspannung (bei Nennlast)	$E_{pN} = 1,846 \text{ U}_N$
Hauptfeldspannung (bei Nennlast)	$E_{dN}' = 1,161 \text{ U}_N$
Konstante des Dämpfungsmomentes	$D = 2,82 \cdot 10^3 \text{ Nms/rad}$
Polradwinkel (bei Nennlast)	$\vartheta_N = -0,48 \text{ rad}$

Reaktanzen als Relativwert in p. u., der Ankerwirkwiderstand und die Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt.

6.1 Grobsynchronisation

Um eine Synchronmaschine stossfrei mit einem Netz parallel zu schalten, muss sie im Augenblick des Zuschaltens mit genau synchroner Drehzahl laufen. Ausserdem müssen Maschinenspannung und Netzspannung gleich gross sein und genau in Phase. Diese Bedingungen, $d\vartheta/dt = 0$ und $\vartheta = 0$, können nicht immer eingehalten werden. Die Zuordnung Drehzahlfehler und Winkelfehler, die bei Vernachlässigung der Wirkung der Dämpferwicklung gerade noch zulässig ist, zeigt die in Fig. 8 aufgezeichnete Kurve *a*. Die Maschine ist vor und nach dem Zuschalten unbelastet, die Grenzkurve reicht daher von $\vartheta_{10} = -\pi$ bis $\vartheta_{20} = \pi$. Da bei $M_0 = 0$ beide Umkehrpunkte kritisch sind, ist die Grenzkurve beiderseits spitz.

Zum Vergleich zeigen die Kurvenäste *b* die Grenzkurven, wenn die Wirkung der Dämpferwicklung näherungsweise wie folgt berücksichtigt wird:

$$\frac{1}{p} J \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + D \frac{d\vartheta}{dt} + M_1' \sin \vartheta - M_2' \sin 2\vartheta = M_0 \quad (12)$$

mit

$$D = \frac{P_{sN}}{2\pi n_s} \cdot \frac{C_D}{\omega_N} \quad (13)$$

$$\frac{C_D}{\omega_N} = \frac{1}{2} \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \left(\frac{x_d' - x_d''}{x_d' x_d''} T_d' + \frac{x_q - x_q''}{x_q x_q''} T_q'' \right) \quad 7)$$

Eine Grobsynchronisation verläuft stabil d. h. erfolgreich, wenn die Anfangswerte ϑ und $d\vartheta/dt$ im Augenblick des Zuschaltens einen Punkt zwischen Grenzkurve und Abszisse beschreiben. Im Grenzfall werden die Grenzkurven in der angegebenen Richtung durchlaufen.

6.2 Kurzzeitige Abschaltung vom Netz

$$\frac{d\vartheta}{dt} = f(\vartheta)$$

Während der Unterbrechung entwickelt die Maschine kein inneres Drehmoment und Gl. (6) für den Lastwinkel als Funktion der Zeit lautet:

$$\frac{1}{p} J \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = M_0 \quad (14a)$$

7) Nach [11], Gl. (A 237)

Lief die Maschine bis zur Abschaltung stationär, so lauten die Anfangsbedingungen für die Bewegung $d\vartheta/dt = 0$ und $\vartheta = \vartheta_0$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{p M_0}{J} t \\ \text{und} \\ \vartheta &= \vartheta_0 + \frac{p M_0}{2J} t^2 \end{aligned} \right\} (14b)$$

Gl. (14b) beschreibt eine Parabel in der Ebene $d\vartheta/dt = f(\vartheta)$ mit der Zeit t als Parameter. Die Parabelachse liegt immer auf der Abszisse. Bei einem Generator ist $M_0 > 0$ und $\vartheta_0 > 0$ (es gilt nur der im 1. Quadranten gelegene Ast), bei einem Motor ist $M_0 < 0$ und $\vartheta_0 < 0$ (es gilt nur der im 3. Quadranten gelegene Ast).

Fig. 9 zeigt die Verhältnisse bei Maschine nach Tabelle I unter Nennbedingungen, *a* die Grenzkurve für die am Netz liegende Maschine, *b* den gültigen Parabelast nach Gl. (14b) für die vom Netz getrennte Maschine. Der Schnittpunkt *S* der Kurven *a* und *b* ist die Stabilitätsgrenze, er liegt bei $\vartheta_S = -119^\circ$, $d\vartheta/dt|_S = -11,75 \text{ rad/s}$. Aus Gl. (14b) kann berechnet werden, dass dieser Punkt 0,273 s nach der Abschaltung erreicht wird.

Der mit *T* bezeichnete Punkt (Fig. 9) wird von der vom Netz getrennten Maschine nach 0,260 s erreicht. Dieser Punkt liegt auf der in Fig. 7 aufgezeichneten Kurve (siehe das aus Fig. 7 übertragene Kurvenstück *c* in Fig. 9). Bei Vernachlässigung der Wirkung der Dämpferwicklung durchläuft

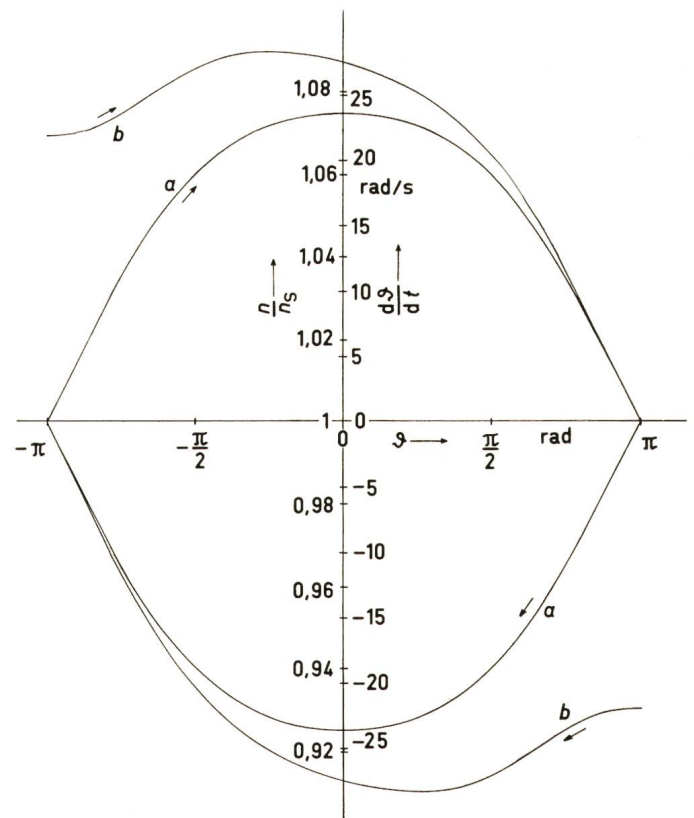


Fig. 8

Grenzkurven $\frac{d\vartheta}{dt} = f(\vartheta)$ bei Grobsynchronisation der auf Nennspannung erregten Maschine

a bei Vernachlässigung, *b* bei Berücksichtigung der Wirkung der Dämpferwicklung
Die Pfeile \rightarrow geben die Richtung an, in der die Kurven im Grenzfall durchlaufen werden.

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3 und 7

$d\vartheta/dt = f(\vartheta)$ dann die in Fig. 7 aufgezeichnete geschlossene Kurve im angegebenen Sinn; wird die Dämpfung nicht vernachlässigt, so ergibt sich eine im Uhrzeigersinn durchlaufene Schneckenkurve zum Punkt ϑ_0 auf der Abszisse.

6.3 Kurzzeitige Abschaltung vom Netz

$$W_{kin} = f(\vartheta)$$

Die bei Ziff. 6.2 und Fig. 9 gewählte Darstellung $d\vartheta/dt = f(\vartheta)$ ist anschaulich, weil dabei nur vertraute Begriffe verwendet werden. Zum Vergleich soll der selbe Fall im folgenden in der Darstellung $W_{kin} = f(\vartheta)$ behandelt werden.

Nach Gl. (8a) gilt für die kinetische Energie bezüglich $d\vartheta/dt = 0$:

$$W_{kin} = \frac{1}{2} J \left(\frac{1}{p} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \right)^2$$

Setzt man für $d\vartheta/dt$ nach Gl. (14b) ein, so erhält man für die vom Netz getrennte, mit M_0 belastete Maschine:

$$W_{kin} = \frac{1}{p} M_0 (\vartheta - \vartheta_0) \quad (15)$$

Das ist die Gleichung einer Geraden durch den Punkt ϑ_0 auf der Abszisse, von der bei einem Generator der im 1. Quadranten gelegene Teil durchlaufen wird, bei einem Motor der im 2. Quadranten gelegene. Die Gleichung entspricht den Verhältnissen beim freien Fall: der Verlust an Lageenergie bezüglich $\vartheta = \vartheta_0$ tritt als Gewinn an Bewegungsenergie bezüglich $d\vartheta/dt = 0$ auf.

Fig. 10 veranschaulicht diese Betrachtungsweise am Beispiel der Maschine nach Tabelle I bei Nennbedingungen, sie zeigt *a* die Grenzkurve $W_{kin} = f(\vartheta)$ für die am Netz liegende Maschine und *b* die Gerade nach Gl. (15) für die vom Netz getrennte Maschine. Der Schnittpunkt *S* der Kurven *a* und *b* gibt wieder die Stabilitätsgrenze für die kurzzeitige Unterbrechung bei Vernachlässigung der Wirkung der Dämpferwicklung an, er liegt bei $\vartheta_S = -119^\circ$ bzw. $W_{kin S} = 28,0$ kW. Diese Angabe gilt unabhängig vom gesamten polaren Massenträgheitsmoment J auf der Welle.

In Fig. 10 ist auch die gegen Kurve *a* um $2\pi/3$ nach links verschobene Kurve *c* eingezeichnet. Diese Grenzkurve gilt für die Wiedereinschaltung, wenn das zweite Netz gegen das erste um 120° in der Phase nacheilt. In diesem Fall liegt der Schnittpunkt *T* der Kurven *b* und *c* bei $\vartheta_T = -210^\circ$, $W_{kin T} = 55,7$ kW. Zwischen der Zeit t_S , in der die Stabilitätsgrenze *S* erreicht wird, und der Zeit t_T , in der die vom Netz getrennte Maschine die Stabilitätsgrenze *T* erreicht, gilt nach Gl. (14b) und (8a):

$$t_T/t_S = \sqrt{W_{kin T}/W_{kin S}}$$

das ist in diesem Falle $t_T/t_S = 1,41$, also $t_T = 0,385$ s statt $t_S = 0,273$ s. Diese Erweiterung des stabilen Bereichs für Netzumschaltung zur Sicherung der Stabilität bei Netzstörungen erfordert eine entsprechende Steuerung und einen Mehraufwand an Schaltern, der nur in Sonderfällen vertretbar ist.

Die hier gewählte Darstellung $W_{kin} = f(\vartheta)$ zeichnet sich durch geringeren Arbeitsaufwand zur Bestimmung der effektiven Stabilitätsgrenze aus, sie ist in vielen Fällen die übersichtlichere Methode. Zum Beispiel wird man bei der praktischen Untersuchung, welchen Einfluss eine Phasendifferenz zwischen Netz und Reservenetz (um Phasenwinkel $\Delta\varphi$ nacheilend) auf die Netzumschaltung hat, nicht Kurve *a* um $\Delta\varphi$

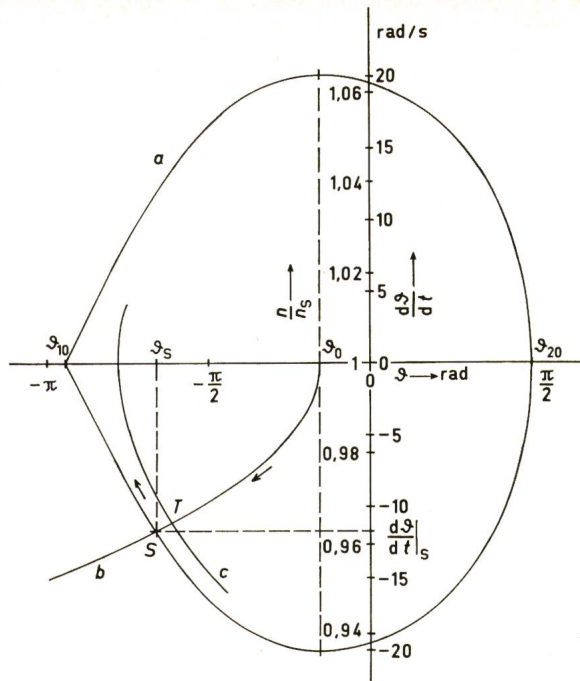


Fig. 9

Kurzzeitige Abschaltung bei Nennlast, $\frac{d\vartheta}{dt} = f(\vartheta)$

a Grenzkurve für Maschine am Netz, *b* $\frac{d\vartheta}{dt} = f(\vartheta)$ der vom Netz getrennten Maschine, *c* Phasenkurve bei $\vartheta_1 = -140^\circ$ (siehe Fig. 7)
S Schnittpunkt *b* mit *a*, Grenzfall
T Schnittpunkt *b* mit *c*, unkritisch
 Die Pfeile geben die Richtung an, in der die Kurven durchlaufen werden
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3 und 7

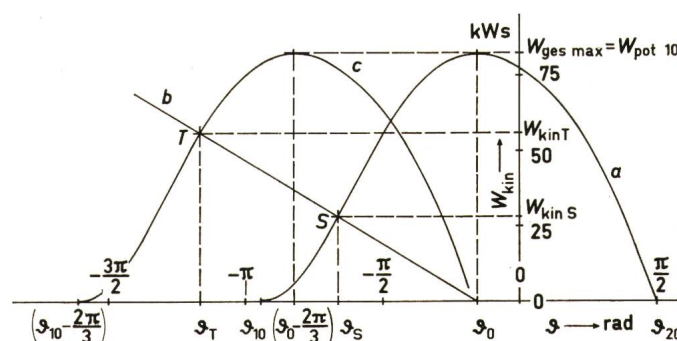


Fig. 10

Kurzzeitige Abschaltung bei Nennlast, $W_{kin} = f(\vartheta)$

a Grenzkurve für Maschine am Netz;
b $W_{kin} = f(\vartheta)$ der vom Netz getrennten Maschine;
c Grenzkurve für Zuschalten auf ein um Phasenwinkel $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{3}$ nacheilendes Netz
S Schnittpunkt *b* mit *a*
T Schnittpunkt *b* mit *c*
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

nach links, sondern die Gerade *b* um $\Delta\varphi$ nach rechts verschieben. So kann in diesem Falle leicht nachgewiesen werden, dass bei $\Delta\varphi = 4\pi/3$ (zweimalige zyklische Vertauschung der Anschlüsse) immer noch ein Fehlwinkel von ca. $\pm 40^\circ$ zwischen Maschinenspannung und Netzspannung im Augenblick des Zuschaltens zulässig ist, bei $\Delta\varphi = 2\pi$ (Maschine im freien Lauf um eine doppelte Polteilung geschlüpft) eine Resynchronisation bei dieser Neigung der Geraden *b* ($\hat{=}$ Lastmoment M_0) aber nicht mehr möglich ist.

Fig. 11 zeigt den Einfluss der Dämpfung nach Gl. (12) und (13). Kurve *a* ist die Grenzkurve in diesem Falle bei Vernachlässigung der Wirkung der Dämpferwicklung, sie ist identisch mit Kurve *a* in Fig. 10. Kurve *b* zeigt die Grenzkurve bei Be-

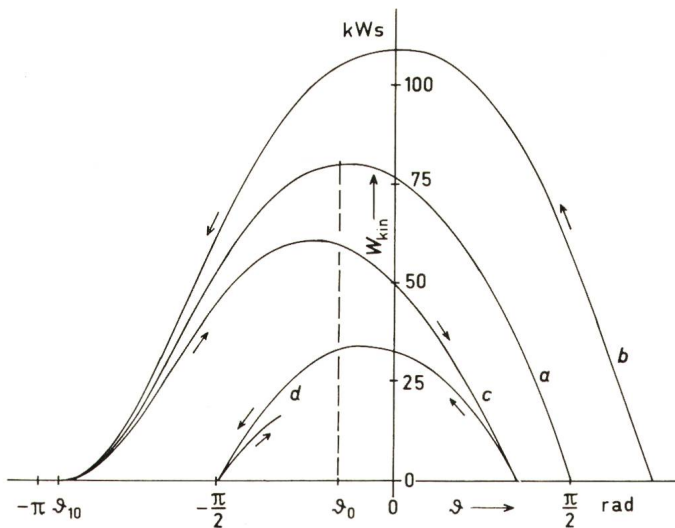


Fig. 11

Einfluss der Dämpfung $W_{kin} = f(\theta)$

a Grenzkurve bei Vernachlässigung der Wirkung der Dämpferwicklung;
 b Grenzkurve bei Berücksichtigung der Dämpfung;
 c und d weiterer Verlauf $W_{kin} = f(\theta)$ infolge Dämpfung
 Die Pfeile geben die Richtung an, in der die Teilkurven durchlaufen werden.

Bezeichnungen siehe Fig. 6

rücksichtigung der Dämpfung, sie gilt für $d\theta/dt < 0$, also Bewegung zum kritischen Umkehrpunkt θ_{10} . Der Gewinn wird um so kleiner, je näher bei θ_{10} zugeschaltet wird, d. h. der Schnittpunkt T in Fig. 10 enthält dort mehr Sicherheit als der Schnittpunkt S . Kurve c gilt für $d\theta/dt > 0$, also Bewegung aus dem kritischen Umkehrpunkt heraus. Der weitere Verlauf ist durch die Kurvenstücke d angedeutet.

7. Zusammenfassung

Bei Industrieantrieben grosser Leistung sind Synchron- und Asynchronmaschinen gebräuchlich. Dabei hat die Synchronmaschine im allgemeinen günstigere Daten im stationären Betrieb, wirft aber im instationären Betrieb eher Probleme auf als die Asynchronmaschine. Im Prinzip die selben Probleme bei Laststössen aller Art treten bei Synchrongeneratoren auf.

Diese bei Synchronmaschinen notwendige Stabilitätsuntersuchung für instationären Betrieb kann als exakte Rechnung durchgeführt werden, wenn der Ablauf der einleitenden Störung bekannt ist. Da dies bei sporadisch auftretenden Störungen nicht der Fall ist, werden oft Näherungsverfahren angewandt. Auch das hier angegebene, energetisch begründete Stabilitätskriterium ist in der auch ohne Rechenmaschine einfach anwendbaren Form ein Näherungsverfahren.

Das im Abschnitt 5 beschriebene Stabilitätskriterium gilt:

- a) bei Vernachlässigung der Wirkung der Dämpferwicklung,
- b) bei Vernachlässigung des Ausgleichs-Gleichstromes in der Statorwicklung,
- c) unter der Annahme eines starren Netzes.

Die Wirkung der Dämpferwicklung kann näherungsweise als schlupfabhängiges Dämpfungsmoment nach Gl. (12) und (13) berücksichtigt werden (siehe die mit Hilfe eines Analogrechners bestimmten Grenzkurven in Fig. 8 und Fig. 11). Der rasch abklingende Ausgleichs-Gleichstrom in der Statorwicklung hat zur Folge, dass der Rotor in einem rasch abklingenden stehenden Feld rotiert und in dieser kurzen Zeit stark gebremst wird. Dieser Effekt kann integral als überschlägig berechnete Drehzahlstufe (zu niedrigerer Drehzahl) berücksichtigt werden. Ist die Maschine nicht an ein starres Netz angeschlossen, so kann das ohne weiteres berücksichtigt werden, wenn es nur um die Kurzschlussimpedanz des Netzes geht, das Mehrmaschinenproblem erfordert immer den Einsatz eines grösseren Rechenautomaten.

Alle Diagramme betreffen den durch seine Daten in Tabelle I beschriebenen Maschinensatz, sind also untereinander vergleichbar. Das Verfahren wurde auf 7 weitere ausgeführte Anlagen mit 4-, 8- und 20poligen Synchronmotoren zum Antrieb von Turbokompressoren, Umformern und Kolbenkompressoren mit Leistungen von 500 kW bis etwa 9 MW angewandt. Andererseits wurden exakte Rechnungen durch Simulation der Maschinensätze auf dem Analogrechner durchgeführt. Der Vergleich zeigte, dass das Näherungsverfahren bei diesen Maschinen die effektive Stabilitätsgrenze mit ausreichender aber nicht zu grosser Sicherheitsreserve liefert. Das ist erst recht bei Generatoren zu erwarten (negative Drehzahlstufe als Folge des Ausgleichs-Gleichstromes in der Ständerwicklung), die aber im allgemeinen im Verband mit einem nicht starren Netz untersucht werden müssen.

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

Literatur

- [1] *H. Leibold*: Schnellumschaltgerät für Hochspannungsanlagen. Siemens Z. 35(1961)3, S. 154...159.
- [2] *W. Groenewald* und *W. Brackmann*: Automatische Schnellumschaltung mit einem neuen elektronischen Phasenvergleichsgerät. BBC Nachrichten 49(1967)12, S. 651...657.
- [3] *A. Haböck* und *G. Kracke*: Rotierende Gleichrichtererrregung von Synchronmotoren. Siemens Z. 42(1968)11, S. 930...939.
- [4] *A. H. Hoffmann*, *C. Raczkowski* und *R. B. Squires*: Relaying for synchronous motor pullout protection, Trans. AIEE PAS 78(1959)8, p. 618...624.
- [5] *W. Horn* und *H. Witte*: Asynchronlaufschutz. AEG Mitt. 54(1964)3/4, S. 234...238.
- [6] *E. Riccius*: Schlupfüberwachung von Synchronmaschinen. Bull. SEV 62(1971)23, S. 1122...1127.
- [7] *H. Fischer*, *R. Penseler* und *D. Rumpel*: Einsteuerung der Polradstellung bei Synchron-Kompressormotoren unter Last. ETZ-A 85(1964)3, S. 65...71.
- [8] *H. Fischer* und *A. Käppner*: Synchron-Kompressorantriebe mit extrem niedrigen Rückwirkungen auf das Netz. Siemens Z. 35(1961)5, S. 456...458.
- [9] *M. Canay*: Komplexe Leistungs- bzw. Drehmomentziffern zur Behandlung der Pendelungen von Synchron- und Asynchronmaschinen. Bull. SEV 57(1966)26, S. 1220...1224.
- [10] *K. Bonfert*: Verhalten und Schutz von Drehstrommotoren bei Spannungseinbrüchen und Spannungsunterbrechungen. VDE Fachberichte 23(1964), S. 210...225.
- [11] *K. Bonfert*: Betriebsverhalten der Synchronmaschine. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1962.

Adresse des Autors:

PD Dr.-Ing. *E. Riccius*, Institut für Elektrische Maschinen und Geräte der TU München, Theresienstr. 90, D-8 München 2.