

Selbsterregung bei Einphasenkondensatormotoren

Autor(en): **Markus, H. von / Sergi, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **67 (1976)**

Heft 12

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915176>

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.

Selbsterregung bei Einphasenkondensatormotoren

Von H. von Markus und J. Sergl

621.313.32.025.1.077.8 : 621.3.013.62

Wird ein Einphasenkondensatormotor bei offenem Netzschalter angetrieben, so läuft er je nach Kondensatorbeschaltung im Einphasensynchronbetrieb mit kleiner Klemmenspannung oder als selbsterregte Asynchronmaschine mit hoher Klemmenspannung. Es wird die Bedingungsgleichung angegeben, die einzuhalten ist, wenn selbsterregter, asynchroner Betrieb vermieden werden soll.

Lorsqu'un moteur monophasé à condensateur est entraîné, l'interrupteur de réseau étant ouvert, il tourne en synchronisme monophasé sous faible tension aux bornes, ou en machine asynchrone auto-excitée sous haute tension aux bornes, suivant la capacité du condensateur. Les auteurs indiquent l'équation de la condition à observer, quand il s'agit d'éviter un fonctionnement asynchrone auto-excité.

Symbolliste

C	Kapazität
f_1	Frequenz der Statorspannung
H_{Fe}	magnetische Feldstärke im Eisen
I_1	Effektivwert des Statorstromes
p	Polpaarzahl
P_i	innere Leistung
R	Wirkkomponente der Maschineneingangsimpedanz
R_1	Resultierender Strangwiderstand (der Serieschaltung von Arbeits- und Hilfswicklung!)
R_z	Zusatzwiderstand
R_2'	ohmscher Widerstand des Rotorkäfigs, umgerechnet auf die Serieschaltung von Arbeits- und Hilfswicklung
s	Schlupf
U_1	resultierende Statorstrangspannung
U_C	Kondensatorspannung
U_{1r}	resultierende Remanenzspannung
$w_A \xi_A$	effektive Windungszahl der Arbeitswicklung
$w_H \xi_H$	effektive Windungszahl der Hilfswicklung
$w_1 \xi_1$	effektive Windungszahl der Serieschaltung von Arbeits- und Hilfswicklung
$X = \omega_1 L$	Blindkomponente der Maschineneingangsimpedanz
$X_D = \omega_1 L_D$	Maximalwert der Blindkomponente der Maschineneingangsimpedanz (im Punkt D)
$X_0 = \omega_1 L_0$	Minimalwert der Blindkomponente der Maschineneingangsimpedanz (im Punkt 0)
X_{H1}	resultierende Hauptfeldreaktanz
$X_{\sigma 1}$	resultierende Statorstreureaktanz
$X'_{\sigma 2}$	Streureaktanz des Rotorkäfigs, umgerechnet auf die Serieschaltung von Arbeits- und Hilfswicklung
Z	Maschineneingangsimpedanz
ϑ	Lastwinkel
Φ_r	Scheitelwert der Grundwelle des Remanenzflusses
μ_r	relative Permeabilität
ω_1	Statorkreisfrequenz
ω_m	mechanische Winkelgeschwindigkeit

1. Schaltungsaufbau und Problemstellung

Einphasenkondensatormotoren werden üblicherweise im Stator mit zwei Wicklungssträngen ausgeführt, deren magnetische Achsen senkrecht aufeinander stehen (Fig. 1). Der Rotor trägt einen Aluminiumspritzgusskäfig. Kondensatormotoren finden häufig im Hebezeugbetrieb Anwendung. Dort kann der Motor beim Lastsenken auch von der Belastung angetrieben werden. Hierbei wird bei eingelegtem Netzschalter Leistung an das Netz abgegeben. Im nachfolgenden wird untersucht, wie sich der Motor verhält, wenn er bei *offenem* Netzschalter mit der Winkelgeschwindigkeit ω_m angetrieben wird. Anlass zu dieser grundlegenden Untersuchung war eine in der Praxis ausgeführte Schaltung, bei der beim Lastsenken nach Öffnen des Netzschalters bei fehlender Klemmenspannung über ein Schütz eine mechanische Abbremsung ausgelöst werden sollte. Selbsterregung auf Spannungswerte im Bereich der Nennspannung täuschte geschlossenen Schalter vor, die mechanische Bremse wurde gelöst, die Last stürzte ab.

2. Betriebsverhalten bei offenem Netzschalter

2.1 Synchroner Betrieb

2.1.1 Remanenzspannung an den Klemmen U-W

Durch das fest am Rotor haftende Remanenzfeld, dessen Grundwelle mit der Polpaarzahl p am Bohrungsumfang verteilt ist, wird in die Arbeitswicklung und in die Hilfswicklung eine Remanenzspannung induziert. Die mit der Frequenz $f_1 = \omega_m \cdot p / 2\pi$ zwischen den Klemmen auftretende resultierende, effektive Grundwellenleerlaufspannung ist gleich

$$U_{1r} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot w_1 \xi_1 \cdot \Phi_r \quad (1)$$

Hierbei bedeutet $w_1 \xi_1$ die effektive Windungszahl der beiden Statorstränge A und H, deren magnetische Achsen einen rechten Winkel einschliessen:

$$w_1 \xi_1 = \sqrt{(w_A \xi_A)^2 + (w_H \xi_H)^2} \quad (2)$$

Unter Φ_r wird der Scheitelwert der Grundwelle des Luftspaltremanenzflusses verstanden. Die Remanenzspannung kann, abhängig von der vorangegangenen Magnetisierung, bis zu einige Prozent der Maschinen-Nennspannung betragen.

2.1.2 Klemmenspannung bei zugeschalteter Kapazität

Wird an die Klemmen U-W eine kleine Kapazität geschaltet, so arbeitet die Maschine als untererregte Einphasensynchronmaschine mit dem äusseren Leistungsfaktor Null. Hierbei ist die vorher festgestellte Remanenzspannung mit einer «Polradspannung» vergleichbar, die über die Serieschaltung von Arbeitswicklung, Hilfswicklung und Kapazität C einen Strom I_1 treibt. Arbeits- und Hilfswicklung können damit als *ein* Wicklungsstrang aufgefasst werden.

Es gilt die *Maschengleichung*

$$\underline{U}_C - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z} - \underline{U}_{1r} = 0, \quad (3)$$

die zu dem in Fig. 2a dargestellten Ersatzschaltbild führt.

Bei der Bestimmung der in Gl. (3) enthaltenen *Maschineneingangsimpedanz* $\underline{Z}_{U-W} = \underline{Z} = R + jX$ ist zu beachten, dass sich der Statorstrangwiderstand zwischen den Klemmen U-W (Fig. 1) als Summe der Strangwiderstände von Arbeits- und Hilfswicklung ergibt:

$$R_1 = R_{1A} + R_{1H} \quad (4a)$$

Auch die primären Streu- und Hauptfeldinduktivitäten der Stränge A und H dürfen algebraisch addiert werden. Einerseits bilden sich die Luftspalt- und Wickelkopffelder von zwei Wicklungssträngen, deren magnetische Achsen senkrecht aufeinander stehen, so aus, dass keine Kopplung der beiden Stränge vorliegt. Andererseits beeinflussen sich die Nutstreu- und Wickelkopffelder von zwei Strängen bei der üblichen Ausführung als ungeschichtete Einschichtwicklung gegenseitig nicht.

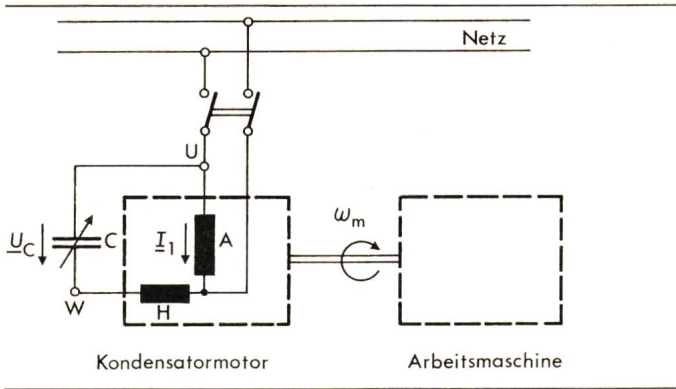


Fig. 1 Schaltung eines Kondensatormotors
A Arbeitswicklung
H Hilfswicklung

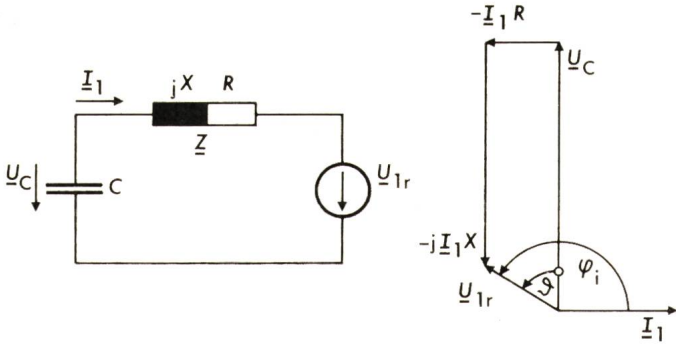


Fig. 2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm für synchronen Betrieb

$$\begin{aligned} X_{\sigma 1} &= X_{\sigma 1A} + X_{\sigma 1H} \\ X_{H1} &= X_{H1A} + X_{H1H} \end{aligned} \quad (4b)$$

Zur Bestimmung der Maschinenimpedanz zwischen den Klemmen U-W dient das bekannte, vereinfachte Ersatzschaltbild einer Einphasen-Asynchronmaschine nach Fig. 3a, das beim Schlupf $s = 0$ in das Ersatzschaltbild nach Fig. 3b übergeht.

In beiden Fällen sind die Eisen- und Reibungsverluste vernachlässigt. Mit dem Zusatzwiderstand R_z werden angenähert die stromabhängigen Zusatzverluste berücksichtigt. Unter

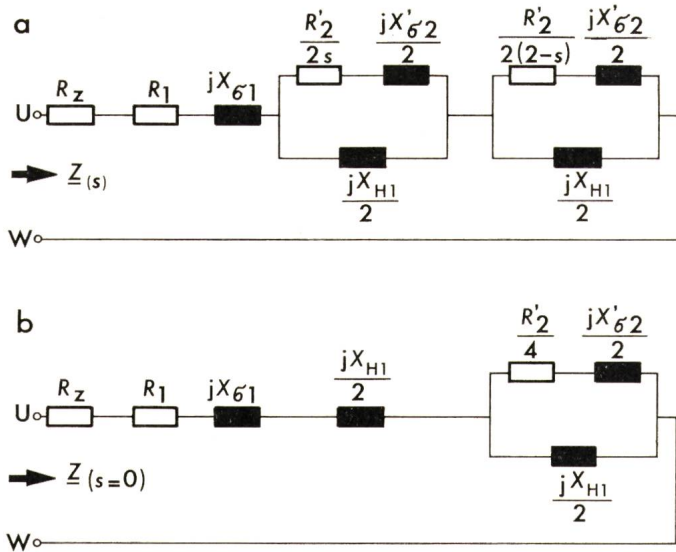


Fig. 3 Ersatzschaltung zur Bestimmung der Eingangsimpedanz
a im asynchronen Betrieb
b im synchronen Betrieb

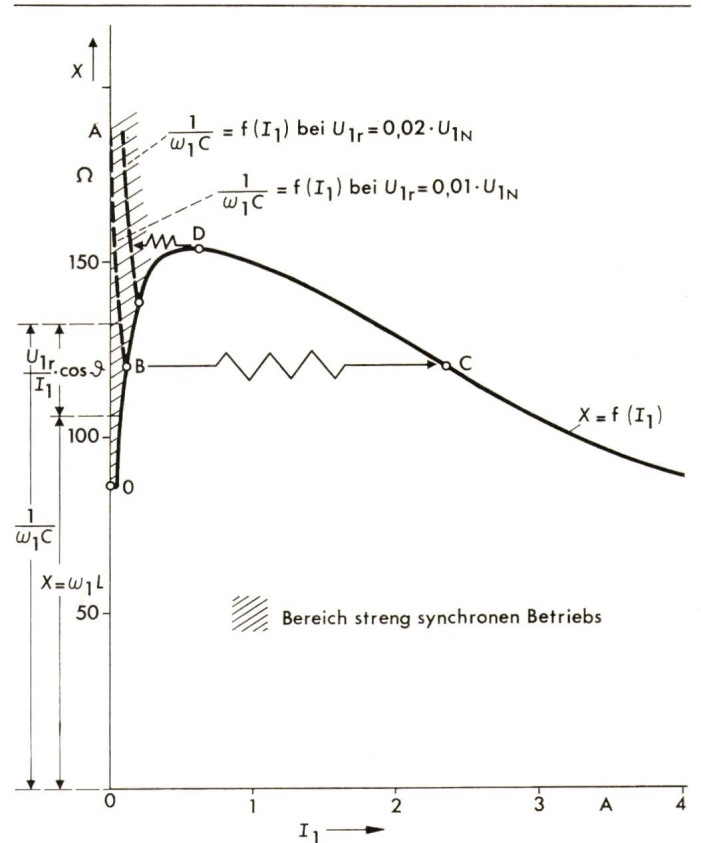


Fig. 4 Blindkomponente der Maschinenimpedanz als Funktion des Stromes

R_2' bzw. $X'_{\sigma 2}$ ist der sekundäre Rotorwiderstand bzw. die sekundäre Streureaktanz, umgerechnet auf den Statorstrom mit der effektiven Windungszahl $w_1 \xi_1$, zu verstehen.

Die Vorausberechnung der Impedanz Z aus gegebenen Schnitt- und Wicklungsdaten ist wegen der komplizierten Sättigungsabhängigkeit der Induktivitäten, vor allem der Hauptfeldinduktivität, aufwendig. An einer vierpoligen Versuchsmaschine (Nennaten 750 W, 220 V, 50 Hz) wurde bei streng synchronem Lauf die in Fig. 4 gezeigte Abhängigkeit der Blindkomponente der Maschinenimpedanz vom Statorstrom I_1 gemessen. Der Verlauf erklärt sich qualitativ aus der charakteristischen Abhängigkeit der relativen Permeabilität von Dynamoblechen von der Eisenfeldstärke.

Gl. (3) führt zu dem in Fig. 2 gezeigten Zeigerdiagramm. Mit Hilfe dieses Zeigerdiagramms lässt sich die im synchronen Betrieb umgesetzte Wirkleistung ermitteln:

$$P_i = R \cdot I_1^2 = U_{1r} \cdot I_1 \cdot |\cos \varphi_i| = U_{1r} \cdot I_1 \cdot \sin \vartheta = \frac{U_{1r}^2}{R} \cdot \sin^2 \vartheta \quad (5)$$

Diese Leistung ist maximal für einen «Lastwinkel» $\vartheta = 90^\circ$. Wird dieser Winkel überschritten, so fällt die Maschine wie eine Synchronvollpolmaschine ausser Tritt. In diesem Augenblick sind die beiden für den stabilen, stationären, synchronen Betrieb erforderlichen Bedingungen (6) nicht mehr erfüllt

$$\begin{aligned} X(I_1) &= \omega_1 \cdot L(I_1) < 1/\omega_1 C \\ I_1 &< U_{1r}/R \end{aligned} \quad (6)$$

In Fig. 5 sind sechs Zeigerdiagramme aufgezeichnet, die für die erwähnte Versuchsmaschine gültig sind. Die ersten drei Diagramme zeigen, wie sich die Spannungen ändern, wenn bei festgehaltener Drehzahl die Kapazität erhöht wird. Bei den anderen drei Diagrammen wird die Kapazität konstant gehalten.

ten und die Drehzahl erhöht. Man sieht, dass mit Vergrößerung von C bzw. $\omega_1 = \omega_m \cdot p$ der «Lastwinkel» ϑ grösser wird.

Mit Hilfe der aus den Zeigerdiagrammen ersichtlichen Zusammenhänge kann auch der in Fig. 4 eingezeichnete Verlauf $1/\omega_1 C = f(I_1)$ gefunden werden. Für bestimmte vorgegebene Stromwerte $I_1 < U_{1r}/R$ kann bei fester Remanenzspannung mit Hilfe der Beziehung

$$\sin \vartheta = R \cdot I_1 / U_{1r} \quad (7)$$

zunächst der Lastwinkel ϑ und mit Hilfe der Gleichung

$$\frac{1}{\omega_1 \cdot C} = \frac{U_{1r}}{I_1} \cdot \cos \vartheta + X(I_1) \quad (8)$$

der zugehörige Wert von $1/\omega_1 C$ ermittelt werden.

Fig. 4 zeigt die für Remanenzspannungen $U_{1r} = 0,01 \cdot U_{1N}$ und $0,02 \cdot U_{1N}$ ermittelten Verläufe $1/\omega_1 C = f(I_1)$, die für synchronen Betrieb Gültigkeit haben. Für $U_{1r} = 0,01 \cdot U_{1N} = \text{const}$ ergibt sich die Kurve A-B, wobei mit zunehmenden Kapazitätswerten ein Durchlauf von A nach B erfolgt. Im Punkt B ist $I_1 = U_{1r}/R$ und $\vartheta = 90^\circ$. Weiterhin ist dort $1/\omega_1 C = X$. Wird die Kapazität über den im Punkt B vorliegenden Wert gesteigert, so fällt die Maschine ausser Tritt. Es erfolgt ein Übergang in den asynchronen Betrieb, d. h. in Fig. 4 ein Sprung zum Punkt C, wenn die Kreisfrequenz ω_1 konstant bleibt, was bei fester Antriebsdrehzahl vernachlässigbar kleinen Schlupf voraussetzt.

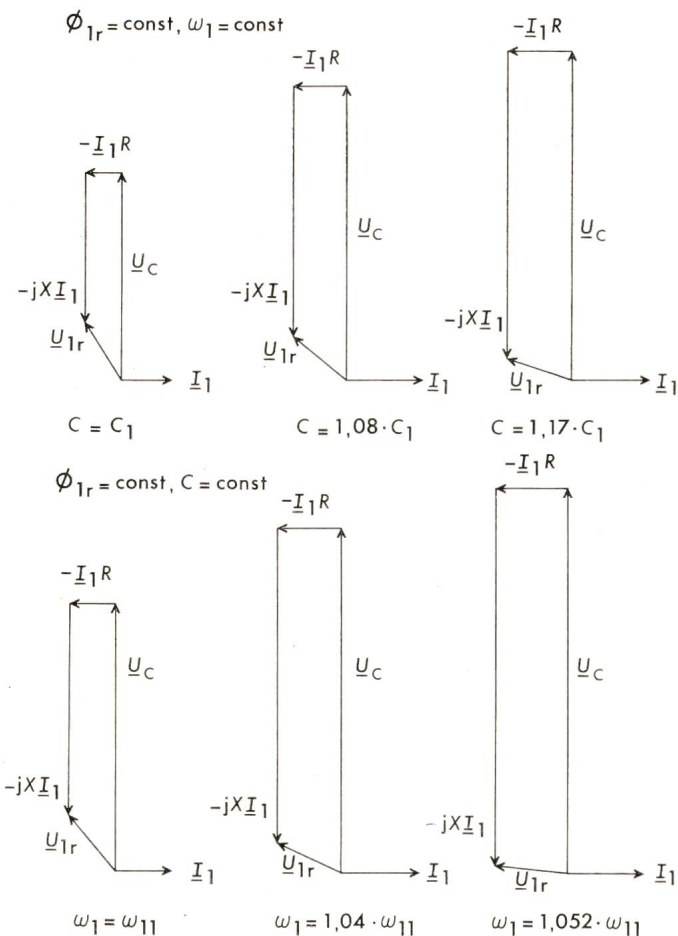


Fig. 5 Zeigerdiagramme für synchronen Betrieb

2.2 Selbsterregter, asynchroner Betrieb bei starrer Drehzahl

2.2.1 Bedingungsgleichungen für stationären Betrieb

Der selbsterregte, asynchrone Betrieb, ab dessen Eintritt die kleine Remanenzspannung vernachlässigt werden darf, ist im stationären Betrieb nur unter Einhaltung folgender, sich aus einer Blind- und Wirkleistungsbilanz ergebender Bedingungen möglich: Einmal muss die vom Kondensator abgegebene Blindleistung gleich der an den Maschinenklemmen aufgenommenen sein. Dies ist nur möglich, wenn die Blindkomponente der Maschinenimpedanz $X = \omega_1 L$ zwischen den Klemmen U-W gleich dem kapazitiven Blindwiderstand $1/\omega_1 C$ ist. Der Kondensator kann an die Maschine keine Wirkleistung abgeben. Folglich muss die Wirkkomponente der Maschinenimpedanz R zwischen den Klemmen U-W gleich Null sein. Damit lauten die Selbsterregungsbedingungen für stationären, asynchronen Betrieb:

$$\begin{aligned} X &= 1/\omega_1 C \\ R &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

2.2.2 Schlupfabhängigkeit der Maschinenimpedanz

Die Bedingung $R = 0$ ist, wie man aus Fig. 3a ersieht, nur erfüllbar, wenn der Schlupf s negativ oder grösser als 2 wird, d. h. wenn die Maschine in der einen oder anderen Richtung übersynchron läuft. Die gesamte Verlustleistung innerhalb der Maschine wird hierbei am Wellenstumpf zugeführt. Bei schlüpfender Maschine ist der Zusammenhang zwischen der Kreisfrequenz von Statorspannung bzw. Statorstrom und der mechanischen Winkelgeschwindigkeit des Rotors durch die Gleichung

$$\omega_1 = \frac{\omega_m \cdot p}{1 - s} \quad (10)$$

gegeben.

Eine Bestimmungsgleichung für die Grösse des sich stationär einstellenden Schlupfes erhält man aus der Bedingungsgleichung $R = 0$. Sie führt für den Schlupf zu einem Polynom 4. Grades, dessen Koeffizienten eine Funktion der Maschinenkonstanten $R_1, R_z, L_{H1}, L_{\sigma 1}, R_2',$ und $L_{\sigma 2}$ sowie der vorgegebenen mechanischen Winkelgeschwindigkeit ω_m und der Polpaarzahl p sind. Von den vier Nullstellen interessiert nur die erste mit negativem Schlupf. Fig. 6 zeigt die für die erwähnte Versuchsmaschine berechneten Verläufe von R und X , die sich bei einer Winkelgeschwindigkeit $\omega_m = 157$ bei ungesättigter Maschine ergeben. Die erste Nullstelle liegt bei einem Schlupf $s = -0,0037$, wobei die Blindkomponente X gegenüber dem Wert bei $s = 0$ um 2% abgesunken ist. Der Schlupf ist klein, weil die Maschine nur ihre Verluste zu decken hat, also Leerlaufbetrieb vorliegt. In erster Näherung darf also X als schlupfunabhängig angesehen werden.

2.2.3 Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Kapazität

Bei vernachlässigbarem Schlupf geht in Fig. 4, wie schon erwähnt, der stationäre, synchrone Betriebspunkt B in einem dynamischen Ausgleichsvorgang auf den stationären, asynchronen Betriebspunkt C über, sobald die Kapazität geringfügig erhöht wird. Vermindert man anschliessend die Kapazität wieder, so wandern die Ortspunkte $1/\omega_1 C = X = f(I_1)$ von Punkt C zum Punkt D. Nach Erreichen des Punktes D fällt die Maschine wieder in den synchronen Betrieb (schraffierter Bereich) zurück.

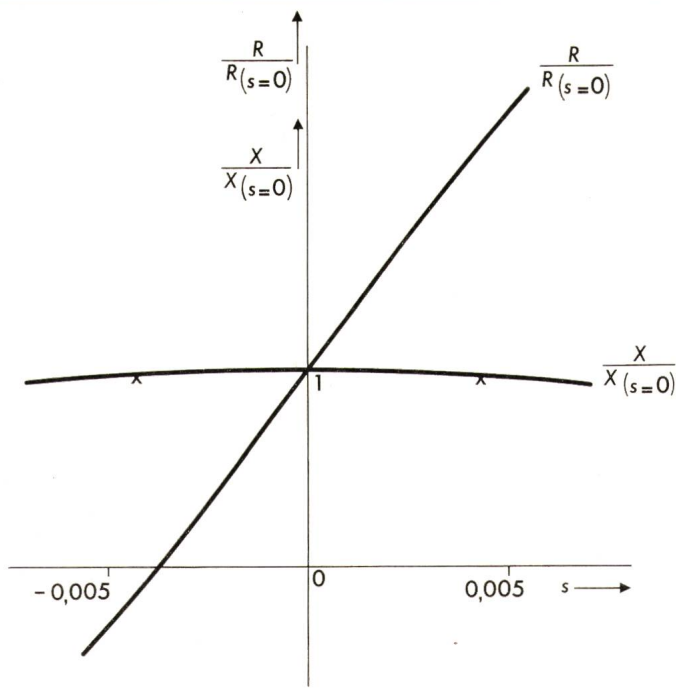


Fig. 6 Wirk- und Blindkomponente der Maschinenimpedanz als Funktion des Schlupfes
(× ... Messwerte)

Ermittelt man aus Fig. 4 den Verlauf der Spannung $X \cdot I_1 = f(I_1)$ für $I_1 > I_{1D}$, so erhält man die sich im asynchronen Betrieb stationär einstellende Maschinenspannung als Schnittpunkt zwischen dem Reaktanzspannungsverlauf $X \cdot I_1 = f(I_1)$ und dem Kondensatorspannungsverlauf $1/\omega_1 C \cdot I_1 = f(I_1)$ (Fig. 7). Es ergeben sich nur Schnittpunkte für $1/\omega_1 C \leq 1/\omega_1 X_D$. Ist $1/\omega_1 C > 1/\omega_1 X_D$, so ist keine Selbsterregung auf hohe Spannungswerte zu erwarten.

In der Praxis kommt häufig der Fall vor, dass die mit hoher Drehzahl laufende Maschine vom Netz getrennt wird. In diesem Fall kann im ersten Augenblick trotz offenen Schalters an den Klemmen U-W noch eine Spannung $U_1 > U_{1D}$ anstehen, weil sich der Maschinenfluss nicht in unendlich kurzer Zeit abbaut. Dabei wird sich bei als starr angenommener Drehzahl stets eine hohe stationäre Klemmenspannung einstellen, wenn sich in Fig. 7 ein Schnittpunkt zwischen Kondensatorspannungsgerader und Reaktanzspannungskennlinie ergibt.

2.2.4 Schlupfabhängigkeit der Klemmenspannung

Abschliessend soll noch quantitativ am Beispiel der genannten Versuchsmaschine untersucht werden, welchen Fehler die Vernachlässigung des Schlupfes im asynchronen Betrieb zur Folge hat. Nach Fig. 6 ist im Punkt D von Fig. 4 die Reaktanz X bei starrer Antriebsdrehzahl beim Nulldurchgang von R gegenüber dem Wert beim Schlupf Null um 2% abgesunken. Genauso sinkt in Fig. 7 in der Umgebung des Punktes D die Reaktanzspannung um 2%, die Kapazitätsgerade wird um 3,7% steiler. Die kleinstmögliche stabile Spannung im asynchronen Betrieb ergibt sich also bei Vernachlässigung des Schlupfes mit $\omega_m = 157$ bei einer Kapazität $C = 20,6 \mu\text{F}$ zu 92 V, bei Berücksichtigung des Schlupfes aber mit $\omega_m = 157$ bei einer Kapazität $C = 21 \mu\text{F}$ zu 90 V. Die Abweichung ist bei grösseren Motoren noch kleiner, bei kleineren kann sie

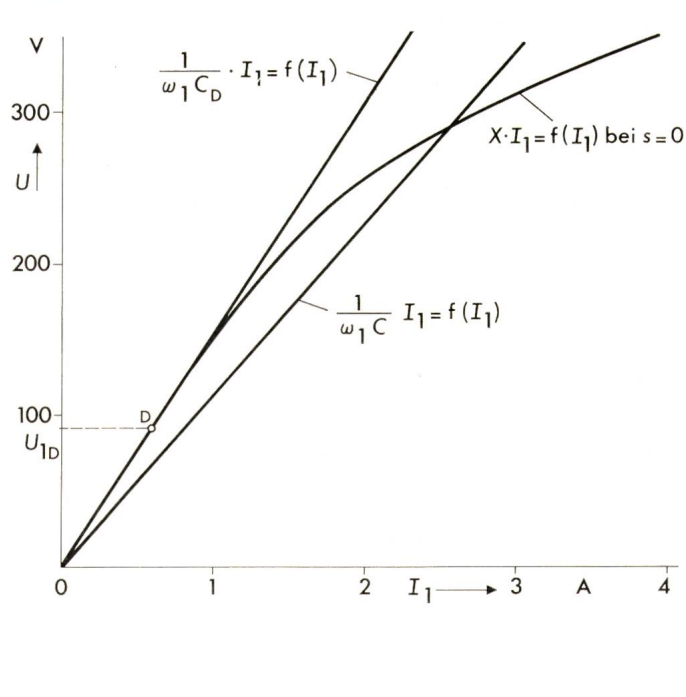


Fig. 7 Stromabhängiger Verlauf von Kondensator- und Maschinenspannung

mehrere Prozent betragen. Bei einem 40-W-Motor wurde beispielsweise eine Abweichung von 6,5% ermittelt.

3. Schlussfolgerung

Soll selbsterregter, asynchroner Betrieb vermieden werden, so ist dies auf jeden Fall gewährleistet, wenn an die Maschinenklemmen eine Kapazität geschaltet ist, die der Bedingung

$$C < 1/\omega_1 X_D$$

mit $\omega_1 = \omega_m \cdot p$ und $X_D = \omega_1 \cdot L_D$ genügt.

Ist $C > 1/\omega_1 X_D$, so kann Selbsterregung eintreten, muss aber nicht. Soll z. B. Selbsterregung ausgehend von einer sehr kleinen Remanenzspannung (Punkt B in Fig. 4 liegt fast auf der Ordinate) erfolgen, so muss $C > 1/\omega_1 X_0$ sein, damit Selbsterregung eintritt. Ist die Ausgangsspannung jedoch grösser als $U_{1D} = X_D \cdot I_{1D}$, so stellt sich bei $C > 1/\omega_1 X_D$ und vernachlässigbarem Schlupf stets eine hohe Klemmenspannung ein. Die erforderliche Vorausberechnung der Reaktanz $X_D = \omega_1 L_D$ aus den Konstanten des Ersatzschaltbildes nach Fig. 3b ist einfach, weil bei der nach den bekannten Beziehungen durchzuführenden Berechnung der Hauptfeldreaktanz und der Streufeldreaktanz die magnetischen Spannungsabfälle im Eisen vernachlässigt werden dürfen. Die Berechnung der Reaktanz $X_0 = \omega_1 L_0$ ist aufwendiger, weil bei der Ermittlung der Hauptfeldreaktanz die kleine relative Permeabilität von Dynamo-blechen bei kleineren Eisenfeldstärken die Berücksichtigung der magnetischen Spannungsabfälle im Eisen erforderlich macht.

Adressen der Autoren

Dr. Ing. Josef Sergl, Wissenschaftlicher Rat, und Dipl. Ing. Hugo von Markus, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl und Laboratorium für Elektrische Maschinen und Geräte, Technische Universität München, Arcisstrasse 21, D-8 München 2.