

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

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

**Band:** 67 (1976)

**Heft:** 12

**Artikel:** Vereinfachte Betrachtung des Synchronbetriebes von Einphasenmotoren mit Reluktanzläufer

**Autor:** Hans, V.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915175>

### **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:** 16.01.2026

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

# Vereinfachte Betrachtung des Synchronbetriebes von Einphasenmotoren mit Reluktanzläufer

Von V. Hans

621.313.323.025.1

Zur Ermittlung des Betriebsverhaltens von Einphasen-Kondensatormotoren werden graphisch-analytische Berechnungsverfahren angewandt. Diese Methoden haben sich wegen ihrer guten Übersichtlichkeit und der Möglichkeit, viele Einflussgrößen und deren Zusammenhänge anschaulich zu erkennen, sehr gut bewährt und finden vor allem dort Anwendung, wo man schnelle und technisch hinreichend genaue Aussagen über ein bestimmtes Betriebsverhalten benötigt. Die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten von elektrischen Kleinmotoren führte in den vergangenen Jahren zu einem verstärkten Einsatz von Einphasen-Synchronmotoren, die einen Reluktanzläufer und eine Kondensatorhilfsphase besitzen. Zur Bestimmung des Betriebsverhaltens solcher Einphasen-Reluktanzmotoren wird ein graphisch-analytisches Berechnungsverfahren angegeben. Es geht von der Stromortskurve eines symmetrisch gespeisten Motors aus und erlaubt über die Ermittlung der symmetrischen Komponenten die Bestimmung des Synchronbetriebes beim Einphasenmotor.

Pour déterminer le comportement en service de moteurs monophasés à condensateur, on applique des procédés de calcul graphiques et analytiques, qui donnent de très bons résultats grâce à leur clarté et à la possibilité de reconnaître de nombreuses grandeurs d'influence et leurs relations entre elles. Ces procédés sont surtout appliqués quand il faut être renseigné rapidement, avec une précision technique suffisante, sur un comportement en service déterminé. Les multiples emplois possibles de petits moteurs électriques ont conduit, ces dernières années, à une utilisation encore plus fréquente de moteurs synchrones monophasés avec inducteur à réluctance et phase auxiliaire à condensateur. Pour déterminer le comportement en service de tels moteurs, l'auteur indique un procédé de calcul graphique et analytique qui, partant du diagramme circulaire du courant d'un moteur alimenté symétriquement, permet de déterminer le fonctionnement en synchronisme du moteur monophasé au moyen des composantes symétriques.

## 1. Einleitung

Der Bedarf an Kleinantrieben mit speziellen Eigenschaften führte zur Entwicklung von kleinen Einphasen-Synchronmotoren. Sie werden überall dort eingesetzt, wo eine von der Höhe der Belastung und der Netzspannung unabhängige synchrone Antriebsdrehzahl verlangt wird. Neben den Hysteresemotoren und Induktionsmotoren mit Permanentmagneten im Läufer werden aus Kostengründen bevorzugt Einphasen-Kondensatormotoren mit Reluktanzläufern verwendet. Reluktanzläufer lassen sich auf einfache Weise aus herkömmlichen Läuferblechen von Käfigläufern herstellen, indem man einzelne Zahngruppen so ausstanzt, dass entsprechend der Ständerpolzahl  $2p$  grosse Nuten entstehen, die periodisch über den Umfang verteilt Schwankungen des magnetischen Leitwerts des Läufers zur Folge haben. Die Nuten in den entstandenen Polen sowie die Pollücke werden im allgemeinen mit Aluminium ausgespritzt, so dass wie beim Asynchronläufer ein vollständiger, aber elektrisch unsymmetrischer Käfig entsteht, der den

Motor selbsttätig asynchron hochlaufen lässt (Fig. 1). Die magnetische Unsymmetrie des Läufers bewirkt wie bei der Schenkelpolmaschine ein Reaktionsmoment, so dass der Läufer synchron mit dem Ständerfeld umläuft. In Anlehnung an die bei Schenkelpolsynchronmaschinen häufig verwendete Zwei-Achsen-Theorie empfiehlt es sich auch hier, für den Läufer zwei Wechselstromsysteme einzuführen, deren Strombelagverteilung als räumlich sinusförmig angenommen wird und deren Achsen senkrecht aufeinander stehen. Für die gefundenen Ersatzstromsysteme werden zwei getrennte Wicklungen eingeführt, die in der Längs- (Index  $d$ ) und Querachse (Index  $q$ ) des Läufers wirksam sind.

Der netzfrequente Anteil des unsymmetrischen Ständerstromsystems wird in seine symmetrischen Komponenten, das im Sinne der Läuferdrehrichtung umlaufende Mitsystem mit dem Strom  $\underline{I}_m$  und das Gegensystem mit dem Strom  $\underline{I}_g$  zerlegt. Zwischen ihnen und den Strömen in Haupt- ( $H_a$ ) und Hilfsphase ( $H_i$ ) bestehen die Zusammenhänge:

$$\underline{I}_{Ha} = \underline{I}_m + \underline{I}_g \quad (1)$$

$$\underline{I}_{Hi} = j(\underline{I}_m - \underline{I}_g) \quad (2)$$

Das mitlaufende Ständerstromsystem hat wegen des durch die Läuferunsymmetrie erzeugten inversen Feldes einen während des Hochlaufs nichtnetzfrequenten Ständerstrom mit der Frequenz  $(2s - 1)f$  zur Folge, der sich im Synchronismus dem mitlaufenden Ständerstromsystem mit Netzfrequenz überlagert. Das gegenlaufende Ständerstromsystem hat dagegen einen Strom der Frequenz  $(3 - 2s)f$  zur Folge, der bei synchroner Drehzahl die dreifache Netzfrequenz hat ( $s = \text{Schlupf}$ ).

## 2. Kreisdiagramm für den Einphasen-Reluktanzmotor

In der Praxis ist es oft erforderlich, rasch und mit einfachsten Mitteln Aussagen über bestimmte Eigenschaften eines Motors zu machen. Dabei verzichtet man bewusst auf mathematische und physikalische Vollständigkeit, wenn der zu erwartende Fehler im Ergebnis von untergeordneter Bedeutung ist. Das gilt insbesondere für die erwähnten Ströme, die sich den symmetrischen Ständerstromsystemen überlagern, und die sich bei der Drehmomentbildung im Synchronismus praktisch kaum bemerkbar machen.

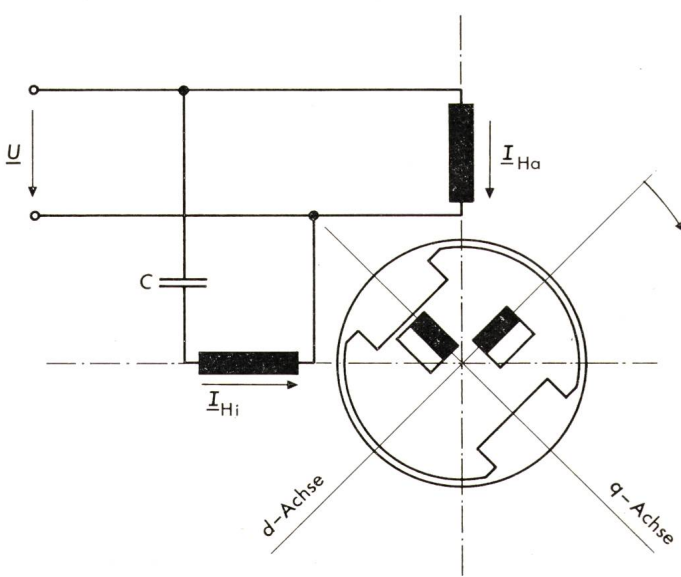


Fig. 1 Schaltung und Anordnung der Wicklungen

$U$  Netzspannung  
 $I_{Hi}$  Hilfsphasenstrom  
 $I_{Ha}$  Hauptphasenstrom  
 $C$  Kondensator



Hier hat sich nun für die Berechnung von Einphasen-Asynchronmotoren eine von *Kron* [1]<sup>1)</sup> angegebene graphisch-analytische Methode bewährt, die sich auf das Grundwellenverhalten beschränkt. Danach werden die symmetrischen Komponenten des Stromes und die von diesen Strömen hervorgerufenen Drehmomente graphisch aus dem Kreisdiagramm ermittelt. Das benötigte Kreisdiagramm ist die Ortskurve der Stromzeiger, die man als Produkt der Nennspannung mit den Admittanzen der Mit- und Gegenkomponente des Stromes erhält. Weil dieses Verfahren sehr einfach und anschaulich ist, soll es hier auch für den Synchronbetrieb des Einphasen-Reluktanzmotors angewendet werden.

Zunächst werden die Verhältnisse für das mitlaufende Stromsystem betrachtet. Im Synchronbetrieb läuft das Polrad mit gleicher Winkelgeschwindigkeit um wie der mitlaufende Ständerstrombelag. Es liegen also physikalisch die gleichen Gegebenheiten vor wie bei einem symmetrisch gespeisten Reluktanzmotor oder einer Synchronmaschine mit ausgeprägten Polen. Für diesen Fall lässt sich der Ständerstrom bekanntlich durch die Gleichung

$$\underline{I} = \underline{U} \frac{R_1}{R_1^2 + X_d X_q} - j \underline{U} \frac{X_d + X_q}{2(R_1^2 + X_d X_q)} + j \underline{U} \frac{X_d - X_q}{2(R_1^2 + X_d X_q)} e^{-j2\vartheta} \quad (3)$$

beschreiben. Darin sind  $U$  die Ständerspannung,  $R_1$  der Ständerwiderstand,  $X_d$  und  $X_q$  die synchrone Längs- bzw. Querreaktanzen. Sie setzen sich jeweils aus der primären Streureaktanz  $X_{1\sigma}$  und der um die Feldfaktoren  $c_d$  bzw.  $c_q$  reduzierten Hauptfeldreaktanzen zusammen [2]:

$$X_d = X_{hd} + X_{1\sigma} = c_d X_h + X_{1\sigma} \quad (4)$$

$$X_q = X_{hq} + X_{1\sigma} = c_q X_h + X_{1\sigma} \quad (5)$$

Aus der Gleichung für den Ständerstrom (3) lässt sich die Impedanz des symmetrisch gespeisten Reluktanzmotors angeben. Ihr entspricht die Impedanz, die sich dem mitlaufenden Stromsystem des unsymmetrisch betriebenen Reluktanzmotors bietet.

Mit

$$e^{-j2\vartheta} = \frac{1 - j \tan \vartheta}{1 + j \tan \vartheta} \quad (6)$$

erhält man die Impedanz zu

$$\underline{Z}_m = \frac{(R_1^2 + X_d X_q)(1 + j \tan \vartheta)}{R_1(1 + j \tan \vartheta) - j(X_q + j X_d \tan \vartheta)} \quad (7)$$

Der Lastwinkel  $\vartheta$  gibt die Phasenlage zwischen der Mitkomponente  $U_m$  der Spannung und der Querachse  $q$  an. Für die weiteren Ausführungen empfiehlt es sich, einen äusseren Lastwinkel

$$\vartheta_A = \vartheta + \vartheta_R \quad (8)$$

einzuführen, der mit

$$\vartheta_R = \arctan \frac{R_1}{X_d} \quad (9)$$

den Spannungsabfall am Primärwiderstand  $R_1$  berücksichtigt.

Dann lässt sich die Impedanz des mitlaufenden Stromsystems durch den einfachen Ausdruck

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

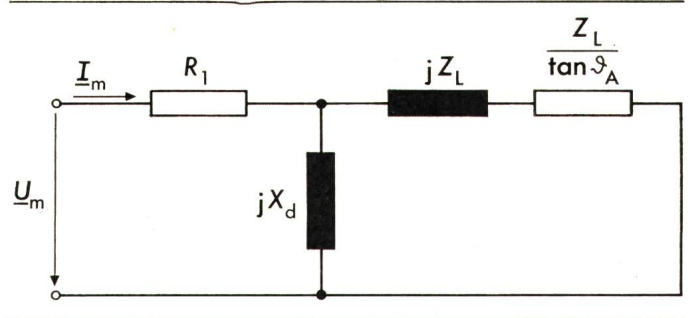


Fig. 2 Elektrisches Ersatzschaltbild für das mitlaufende Stromsystem

- $R_1$  Primärwiderstand
- $X_d$  synchrone Längsreaktanzen
- $\vartheta_A$  äusserer Lastwinkel
- $I_m$  Mitkomponente des Ständerstroms
- $U_m$  Mitkomponente der Ständerspannung
- $Z_L$  entspricht Gl. (11)

$$\underline{Z}_m = R_1 + j \frac{X_d X_q (1 + j \tan \vartheta_A)}{X_q + j X_d \tan \vartheta_A} \quad (10)$$

darstellen.

Mit der Abkürzung

$$Z_L = \frac{X_d X_q}{X_d - X_q} \quad (11)$$

erhält man nach einigen Umformungen aus Gl. (10):

$$\underline{Z}_m = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_d} + \frac{1}{\frac{Z_L}{\tan \vartheta_A} + jZ_L}} \quad (12)$$

Aus diesem Ausdruck kann man für das mitlaufende Stromsystem das elektrische Ersatzschaltbild nach Fig. 2 ableiten. Dieses Ersatzschaltbild entspricht dem einer Asynchronmaschine. Anstelle des dort auftretenden schlupfabhängigen Läuferwiderstandes tritt jedoch der lastwinkelabhängige Widerstand  $Z_L / \tan \vartheta_A$ . Aufgrund dieser Analogie lässt sich das Kreisdiagramm für das mitlaufende Stromsystem des Einphasen-Reluktanzmotors genauso bestimmen wie das entsprechende bei der Asynchronmaschine. Einzelheiten der Konstruktion werden im Anhang beschrieben [3].

Zur Bestimmung der Impedanz  $\underline{Z}_g$  des gegenlaufenden Stromsystems: Der gegenlaufende Ständerstrombelag läuft mit doppelter synchroner Drehzahl gegenüber dem mit dem Polrad umlaufenden Bezugssystem um, d. h. asynchron mit dem Schlupf  $s = 2$ . Er steht dabei abwechselnd einmal der Längs- und einmal der Querachse gegenüber, so dass sich für das gegenlaufende Stromsystem näherungsweise der arithmetische Mittelwert der Reaktanzen in  $d$ - und  $q$ -Achse als resultierende Reaktanz angeben lässt. Damit erhält man die Impedanz  $\underline{Z}_g$  zu:

$$\underline{Z}_g = R_1 + j \frac{X_{dg} + X_{qg}}{2} \quad (13)$$

Die Ausdrücke für die Reaktanzen  $X_{dg}$  und  $X_{qg}$ , die sich dem gegenlaufenden Stromsystem bieten, lassen sich nach [4] oder [6] bestimmen und sind für den Schlupf  $s = 2$ :

$$X_{dg} = X_d \frac{\beta_d + j2\sigma_d}{\beta_d + j2} \quad (14)$$

$$X_{qg} = X_q \frac{\beta_q + j2\sigma_q}{\beta_q + j2} \quad (15)$$



Darin sind

$$\beta_d = \frac{R_d}{\omega L_d} \quad (16)$$

$$\beta_q = \frac{R_q}{\omega L_q} \quad (17)$$

die bezogenen Widerstände und

$$\sigma_d = 1 - \frac{M_d^2}{L_1 L_d} \quad (18)$$

$$\sigma_q = 1 - \frac{M_q^2}{L_1 L_q} \quad (19)$$

die Streuzahlen für die Längs- und Querachse. ( $L_1$  ist die totale Hauptinduktivität der Ständerwicklung,  $L_d$ ,  $L_q$  sind die synchronen Längs- bzw. Querinduktivitäten,  $M_d$ ,  $M_q$  sind die Gegeninduktivitäten zwischen einem Ständerstrang und der Läuferlängs- und -querwicklung.)

Während die Stromortskurve des mitlaufenden Stromsystems bei verschiedenen Belastungen einen eigenen Kreis mit dem Parameter  $\tan \vartheta_A$  in der komplexen Zahlenebene

beschreibt, wird das gegenlaufende Stromsystem als fester Punkt  $G$  in dieser Ebene dargestellt (Fig. 3). Seine Lage entspricht dem Punkt für den Schlupf  $s = 2$  auf der Stromortskurve für den asynchronen Betrieb.

Aus den Spannungsgleichungen für die Haupt- [Gl. (20)] und Hilfsphase [Gl. (21)]

$$\underline{I}_m \underline{Z}_m + \underline{I}_g \underline{Z}_g = \underline{U} \quad (20)$$

$$\underline{I}_m (\underline{Z}_m + \frac{1}{\ddot{u}^2} \underline{Z}_c) - \underline{I}_g (\underline{Z}_g + \frac{1}{\ddot{u}^2} \underline{Z}_c) = \frac{1}{j\ddot{u}} \underline{U} \quad (21)$$

erhält man die Ausdrücke für die Mit- und Gegenkomponenten des Stromes:

$$\underline{I}_m = \underline{U} \underline{Y}_m \frac{\ddot{u}^2 \underline{Y}_c (1 - j \frac{1}{\ddot{u}}) + \underline{Y}_g}{2 (\ddot{u}^2 \underline{Y}_c + \frac{\underline{Y}_m + \underline{Y}_g}{2})} \quad (22)$$

$$\underline{I}_g = \underline{U} \underline{Y}_g \frac{\ddot{u}^2 \underline{Y}_c (1 + j \frac{1}{\ddot{u}}) + \underline{Y}_m}{2 (\ddot{u}^2 \underline{Y}_c + \frac{\underline{Y}_m + \underline{Y}_g}{2})} \quad (23)$$

$\underline{Z}_c$  ist die Impedanz des in der Hilfsphase liegenden Kondensators.

Anstelle der Impedanzen  $\underline{Z}_m$ ,  $\underline{Z}_g$ ,  $\underline{Z}_c$  sind in Gl. (22) und Gl. (23) die entsprechenden Admittanzen  $\underline{Y}_m$ ,  $\underline{Y}_g$ ,  $\underline{Y}_c$  eingesetzt worden.

Mit

$$\ddot{u} = \frac{W_{H1} \zeta_{H1}}{W_{Ha} \zeta_{Ha}} \quad (24)$$

wurde das Übersetzungsverhältnis eingeführt, um die oft unterschiedlichen effektiven Windungszahlen  $W_{H1} \zeta_{H1}$  der Hilfswicklung durch die der Hauptwicklung  $W_{Ha} \zeta_{Ha}$  zu ersetzen. Dabei wird gleiches Kupfervolumen vorausgesetzt.

In Fig. 3 kennzeichnet der grosse Kreis  $K$  die Ortskurve des Vektors  $\underline{U} \underline{Y}_m$ , während die Strecke  $\overline{OG}$  den Vektor  $\underline{U} \underline{Y}_g$  darstellt. Der kleine Kreis  $k$  ist die Ortskurve des Zeigers  $\underline{U} (\underline{Y}_m + \underline{Y}_g)/2$ . Der «Kondensatorpol» [1] ist durch die Strecken  $\overline{OA}$ ,  $\overline{AC}$  und  $\overline{AB}$  beschrieben. Der Punkt  $P_N$  auf dem Kreis  $K$  stelle den Nennbetriebspunkt im Synchronismus dar.  $P_N'$  findet man als Schnittpunkt der Strecke  $\overline{P_N G}$  mit dem Kreis  $k$ .

Wie die Figur zeigt, lässt sich der Zähler der Gl. (22) durch den eingezeichneten Zeiger  $\underline{b}$  (Strecke  $\overline{BG}$ ) angeben; der Zeiger  $\underline{c}$  (Strecke  $\overline{CP_N}$ ) entspricht dem Zähler von Gl. (23), während der gemeinsame Nenner von Gl. (22) und Gl. (23) durch den doppelten Wert des Zeigers  $\underline{a}$  (Strecke  $\overline{AP_N'}$ ) dargestellt wird.

Die Ausdrücke für  $\underline{I}_m$  und  $\underline{I}_g$  lassen sich nun in einfacher Weise angeben:

$$\underline{I}_m = \underline{U} \underline{Y}_m \frac{\underline{b}}{2\underline{a}} \quad (25)$$

$$\underline{I}_g = \underline{U} \underline{Y}_g \frac{\underline{c}}{2\underline{a}} \quad (26)$$

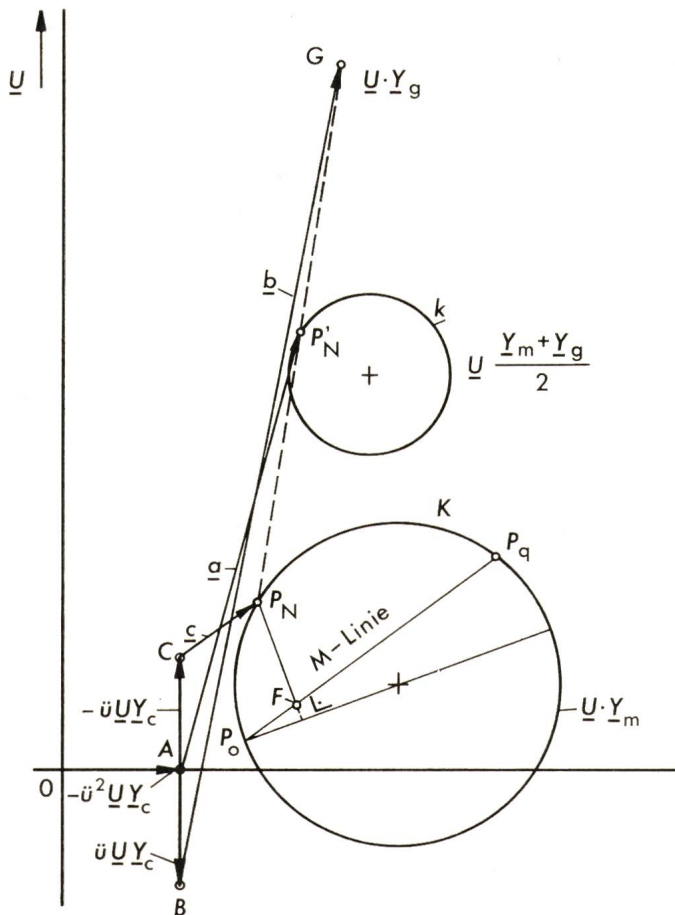


Fig. 3 Kreisdiagramm für den Einphasen-Reluktanzmotor mit Kondensatorhilfsphase

K	Ortskurve des Vektors $\underline{U} \cdot \underline{Y}_m$
k	Ortskurve des Zeigers $\underline{U} \cdot (\underline{Y}_m + \underline{Y}_g)/2$
$P_N$	Nennpunkt
G	fester Punkt des Vektors $\underline{U} \cdot \underline{Y}_g$
$\underline{a}, \underline{b}, \underline{c}$	Hilfsvektoren
$\underline{U}$	Strangspannung
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis
$\underline{Y}_c$	Kondensatoradmittanz

um ändert sich neben dem Zeiger  $\underline{c}$  auch der Zeiger  $\underline{a}$  nach Grösse und Richtung. Anders ausgedrückt kann man sagen, dass sich mit änderndem Betriebspunkt die Impedanz  $\underline{Z}_m$  des mitlaufenden Stromsystems und damit auch die Admittanz  $\underline{Y}_m$  ändert. Da die Admittanz  $\underline{Y}_m$  in den Ausdruck  $\underline{I}_g$  [Gl. (23)] mit eingeht, ist die Abhängigkeit der beiden Ströme voneinander leicht einzusehen.

Wie bei den Mit- und Gegenkomponenten des Stromes lassen sich auch die von diesen Stromkomponenten erzeugten Drehmomente und zugehörigen Leistungen mit Hilfe der Zeiger  $a$ ,  $b$  und  $c$  bestimmen.

Das «Mit»-Moment ist proportional dem Quadrat der Mitkomponente des Stromes  $I_m$ :

$$M_{\text{Sm}} = M(\vartheta_{\text{A}}) \left( \frac{b}{2a} \right)^2 \quad (27)$$

$M(9_A)$  ist dabei das Drehmoment, das der Motor bei symmetrischer Speisung aufbringen würde. Es lässt sich aus dem Kreisdiagramm (Fig. 3) als Strecke  $\overline{P_{NF}}$  entnehmen. Das «Gegen»-Moment ist proportional dem Quadrat der Gegenkomponente des Stromes  $I_g$ :

$$M_{\text{Sg}} = M_{\text{S}=2} \left( \frac{c}{2a} \right)^2 \quad (28)$$

$M_{s=2}$  ist dabei ein asynchrones Drehmoment, das bei symmetrischer Speisung beim Schlupf  $s = 2$  auftreten würde. Es kann numerisch ermittelt werden oder graphisch aus dem entsprechenden Kreisdiagramm für den asynchronen Betrieb.

### 3. Ergebnisse

Als Beispiel diene ein kleiner 25-W-Motor mit dreisträngiger Ständerwicklung und einem Kondensator von  $C = 6 \mu\text{F}$  zum Betrieb am 220-V-Netz. Der Motor hatte folgende Daten:  $R_1 = 64 \Omega$ ,  $X_d = 251 \Omega$ ,  $X_q = 148 \Omega$ ,  $\beta_d = 0,31$ ,  $\beta_q = 0,537$ ,  $\sigma_d = 0,226$ ,  $\sigma_q = 0,37$ .

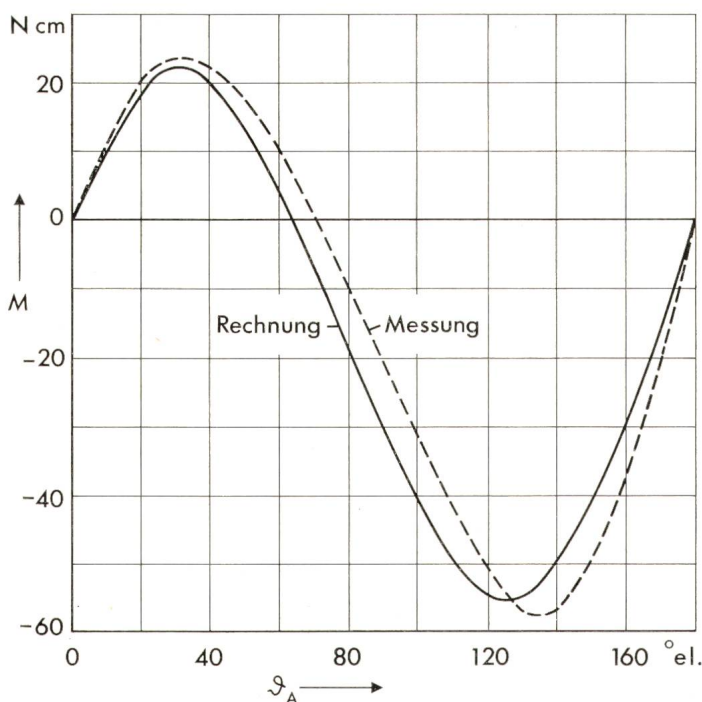
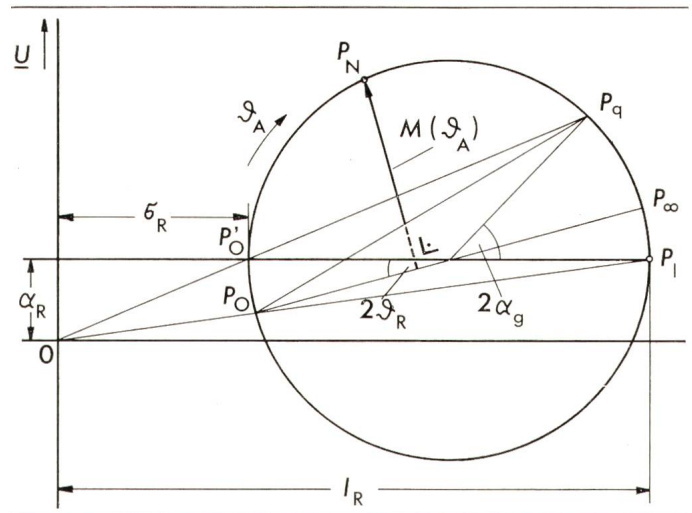


Fig. 4 Drehmoment  $M$  in Abhängigkeit vom äusseren Lastwinkel  $\vartheta_A$



**Fig. 5** Stromortskurve  $\underline{U}$ ,  $\underline{Y}_m$   
 $\alpha_R$  bezogener Ständerwiderstand  
 $\sigma_R$  bezogene Streuziffer  
 $l_R$  Einheitslänge  
 Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Die Rechen- und Messergebnisse des Drehmomentenverlaufs über dem Polradwinkel sind in Fig. 4 dargestellt. In dem praktisch interessierenden stabilen Betriebsbereich besteht zwischen Rechnung und Messung sehr gute Übereinstimmung. Die Abweichung im Kippmoment ist darauf zurückzuführen, dass die Sättigung des magnetischen Kreises nicht berücksichtigt wurde.

#### 4. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, wie man mit Hilfe eines graphisch-analytischen Verfahrens das Betriebsverhalten von Einphasen-Reluktanzmotoren im Synchronismus ermitteln kann. Die Methode beschränkt sich auf die Betrachtung des netzfrequenten Grundwellenverhaltens, wobei Mess- und Rechenergebnisse gute Übereinstimmung miteinander zeigen.

## 5. Anhang

### Zur Konstruktion der Stromortskurve

Die Stromortskurve  $\underline{U} \underline{Y}_m$  dient zur Bestimmung der Ströme  $\underline{I}_m$  und  $\underline{I}_g$ . Die Konstruktion des Kreisdiagrammes (Fig. 5) wird vorzugsweise wie bei der Asynchronmaschine mit bezogenen Grössen durchgeführt. Als Bezugsgrösse und Mass für die Einheitslänge  $I_R$  dient die synchrone Längsreaktanz  $X_d$ :

$$\alpha_R = \frac{R_1}{X_d} \quad (29)$$

$$\sigma_R = \frac{X_q}{X_d} \quad (30)$$

Den Leerlaufpunkt  $P_0$ , gekennzeichnet durch  $M = 0$  und  $\tan \vartheta_A = 0$ , erhält man als Schnittpunkt der geraden  $\overline{OP_1}$  mit dem Kreis. Der Betriebspunkt  $P_q$ , ebenfalls gekennzeichnet durch  $M = 0$ , ist der Schnittpunkt der verlängerten Geraden  $\overline{OP_0'}$  mit dem Kreis. Die Strecke  $\overline{P_0 P_q}$  ist die Momentenlinie und gleichzeitig Leistungslinie, da wegen der konstanten Drehzahl im Synchronbetrieb zwischen Drehmoment und Leistung Proportionalität besteht.

Für den Fall, dass der Primärwiderstand  $R_1$  vernachlässigt wird, fällt die Mittelpunktgerade des Kreisdiagramms mit der



Abszisse zusammen. Bei Berücksichtigung von  $R_1$  wird der Kreismittelpunkt in Ordinatenrichtung verschoben. Die Mittelpunktsgerade erhält den Neigungswinkel  $2\vartheta_R$  mit

$$\vartheta_R = \arctan \frac{R_1}{X_d} \quad (31)$$

gegenüber der Abszisse. Da das Drehmoment nur im Leerlauf, d. h. im Betriebspunkt  $P_0$  gleich Null wird, erkennt man leicht, dass infolge des Primärwiderstandes der innere Polradwinkel um den Anteil  $\vartheta_R$  vergrößert wird.

Ganz entsprechende Verhältnisse gelten für den Punkt  $P_q$ .  $P_q$  ist um den Winkel  $2\alpha_q$  mit

$$\alpha_q = \arctan \frac{R_1}{X_q} \quad (32)$$

gegenüber der Waagerechten verdreht. Bei  $R_1 = 0$  wäre das Drehmoment bei dem inneren Polradwinkel  $\vartheta = 90^\circ$  (Punkt  $P_1$ ) gleich Null. Infolge des Primärwiderstandes wird das Drehmoment bereits bei einem Winkel  $\vartheta_A = \vartheta - 2\alpha_q$  gleich Null.

Ein Vergleich mit der Asynchronmaschine zeigt, dass die Längsreaktanz  $X_d$  dem Gesamtblindwiderstand  $X_1 = X_h + X_{1\sigma}$  und die Querreaktanz  $X_q$  dem ideellen Kurzschlussblindwiderstand  $X_i = X_1 - X_h^2/(X_h + X_{2\sigma})$  entspricht [5].

Entsprechend der Schlupfgeraden beim Asynchronmotor lässt sich beim Reluktanzmotor eine Lastwinkelgerade konstruieren, auf der der Tangens des äusseren Lastwinkels  $\tan \vartheta_A$  aufgetragen wird. Für Lastwinkel  $\vartheta_A > 45^\circ$ , entsprechend einem Tangens grösser als 1 trägt man in einer Senkrechten zur Lastwinkelgeraden im Punkt  $\tan \vartheta_A = 1$  den Kotangens des Lastwinkels auf. Für positive Winkel liegt Motorbetrieb, für negative Generatorbetrieb vor (Fig. 6).

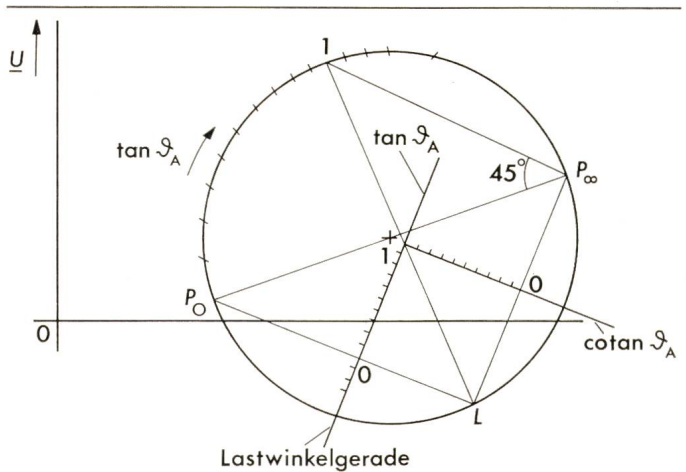


Fig. 6 Zur Konstruktion der Lastwinkelgeraden

$\vartheta_A$  äusserer Polradwinkel

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

#### Literatur

- [1] M. Kronl: Berechnung von Einphasen-Kondensator-Motoren. Bull. SEV 25(1934)6, S. 143...147.
- [2] H. Jordan und M. Weis: Synchronmaschinen. II: Schenkelpolmaschine Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1971.
- [3] J. Brinkmann: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem Motor mit verbesserter Ausnutzung des Reaktionsprinzips. Dissertation der Technischen Hochschule Carolo Wilhelmina, Braunschweig, 1965.
- [4] T. Laible: Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb mit Anwendungsbeispielen und unter Berücksichtigung der modernen amerikanischen Literatur. Berlin, Springer-Verlag, 1952.
- [5] W. Nürnberg: Die Asynchronmaschine, 2. Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 1963.
- [6] V. Hans: Über das Betriebsverhalten von Einphasen-Reluktanzmotoren kleiner Leistung. Dissertation der Universität Trier-Kaiserslautern, 1974.

#### Adresse des Autors

Dr.-Ing. V. Hans, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Elektrotechnik, Pfaffenbergstrasse 95, D-6750 Kaiserslautern.

## Literatur – Bibliographie

621.316.3

SEV-Nr. A 489

**VEM-Handbuch Elektroenergieanlagen.** Grundlagen und Anlageteile. Berlin, VEB-Verlag Technik, 1975; 8°, 492 S., 369 Fig., 128 Tab. Preis: gb. Ostmark 65.-.

Das unter der Leitung von Prof. V. Pfeiler entstandene Handbuch ist in erster Linie als Arbeitsmittel für den in der Praxis stehenden Ingenieur gedacht. Es enthält die für den Planer und den Benützer der Anlagen wichtigen Angaben über Wirkungsweise und Ausführungsformen, wogegen die theoretischen Grundlagen nur ausnahmsweise dargelegt werden.

Unter Elektroenergieanlagen werden im Handbuch ausschliesslich Drehstromanlagen verstanden. Das ganze Gebiet ist in sechs Hauptkapitel unterteilt. In der *Grundlagentechnik* werden die bei der Projektierung zu erfüllenden Anforderungen behandelt und die wesentlichen Bestandteile der Projekte kurz beschrieben. Rund die Hälfte des Buches ist der *Gerätetechnik* gewidmet, wo insbesondere die Hochspannungs-Schaltgeräte sehr ausführlich dargestellt werden. Auch die Niederspannungs-Schaltgeräte werden eingehend besprochen, wogegen das Unter-

kapitel der elektrischen Maschinen und Transformatoren («Geräte mit Magnetkreis») nicht über die Darstellung der Hauptcharakteristiken hinausgeht. Ausführlicher sind wiederum die Kapitel über *Mess-, Automatisierungs- und Relaischutztechnik*, über *Kabel und Freileitungen* sowie insbesondere über die *Leistungselektronik*. Ein kurzes Kapitel ist ferner den *Isolatoren* und *Armaturen* gewidmet.

Das Handbuch ist stofflich systematisch aufgebaut, sauber dargestellt und enthält in konzentrierter Form eine Fülle von Informationen über ein breites Fachgebiet. Es dürfte sich sehr gut als Nachschlagewerk für den Praktiker eignen. Es behandelt ausschliesslich erprobte und verbreitete technische Lösungen. So fehlen denn die neuen Techniken – z. B. gekapselte Schaltanlagen in SF<sub>6</sub> – weitgehend. Als einseitig empfindet man ferner die starke Ausrichtung auf die Gegebenheiten der Deutschen Demokratischen Republik, die sich in der Bezugnahme auf Vorschriften, der Auswahl der Bilder und Beispiele sowie in gewissen Bewertungen von technischen Lösungsmöglichkeiten äussert. Auch das recht umfangreiche Literaturverzeichnis bezieht sich vorwiegend auf Schriften aus der DDR. Eb