

# Vereinfachte Betrachtung des Synchronbetriebes von Einphasenmotoren mit Reluktanzläufer

Autor(en): **Hans, V.**

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-915175>

## **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.

# 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 induit à réductance 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- ( $I_a$ ) und Hilfsphase ( $I_i$ ) 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.

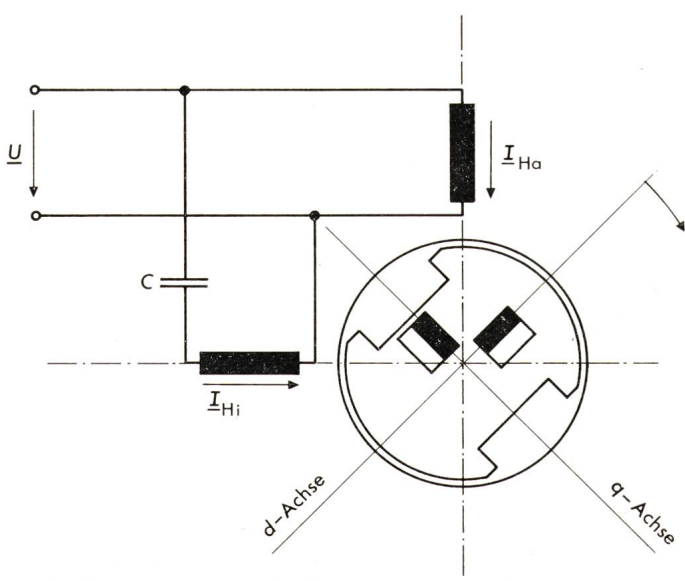


Fig. 1 Schaltung und Anordnung der Wicklungen

$U$  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. Querreaktanz. Sie setzen sich jeweils aus der primären Streureaktanz  $X_{1\sigma}$  und der um die Feldfaktoren  $c_d$  bzw.  $c_q$  reduzierten Hauptfeldreaktanz 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.

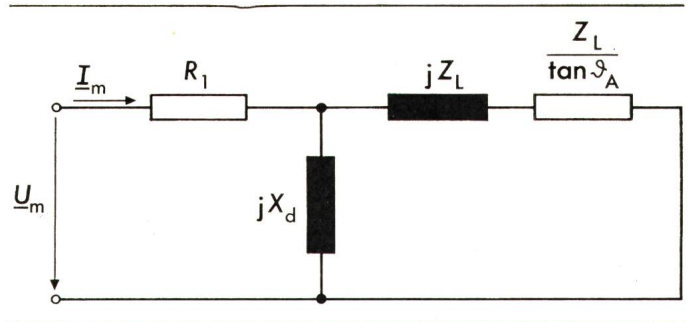


Fig. 2 Elektrisches Ersatzschaltbild für das mitlaufende Stromsystem

- $R_1$  Primärwiderstand
- $X_d$  synchrone Längsreaktanz
- $\vartheta_A$  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  $s = 2$ :

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

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





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  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}$  und  $\underline{c}$  bestimmen.

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

$$M_{S_m} = M(\vartheta_A) \left(\frac{b}{2a}\right)^2 \quad (27)$$

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

$$M_{S_g} = M_{s=2} \left(\frac{c}{2a}\right)^2 \quad (28)$$

$M_{s=2}$  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:  $R_l = 64 \Omega$ ,  $X_d = 251 \Omega$ ,  $X_q = 148 \Omega$ ,  $\beta_d = 0,31$ ,  $\beta_q = 0,537$ ,  $\sigma_d = 0,226$ ,  $\sigma_q = 0,37$ .

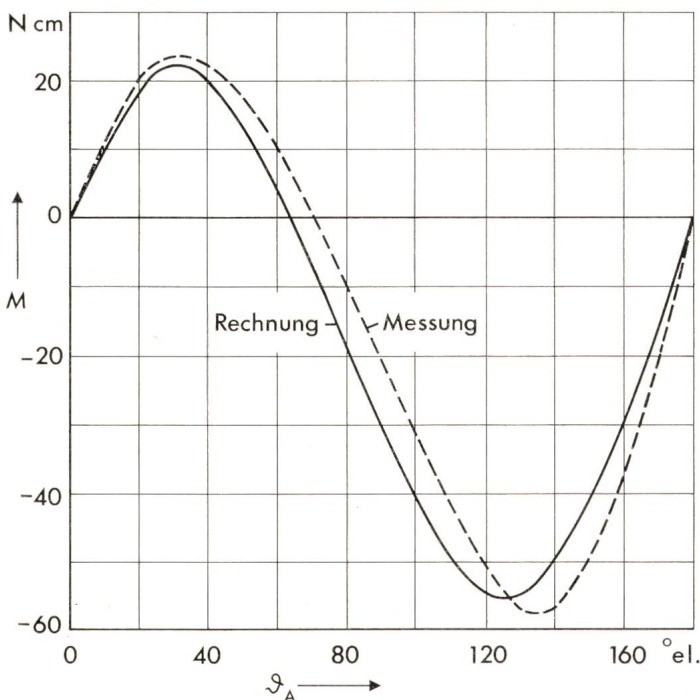


Fig. 4 Drehmoment  $M$  in Abhängigkeit vom äusseren Lastwinkel  $\vartheta_A$

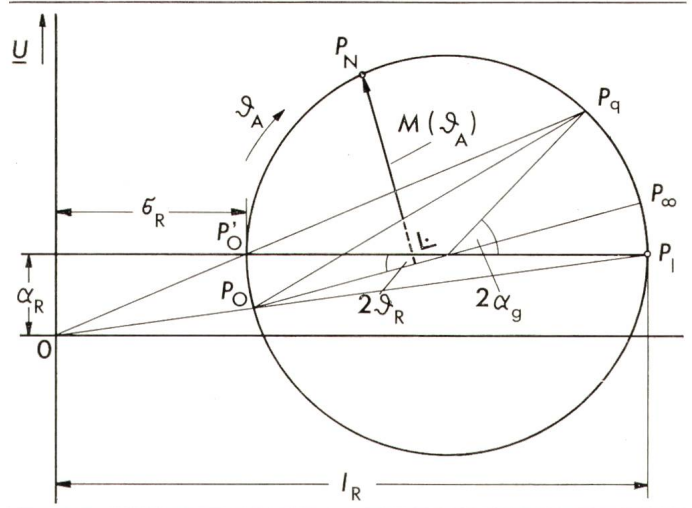


Fig. 5 Stromortskurve  $\underline{U} \cdot \underline{Y}_m$   
 $\alpha_R$  bezogener Ständerwiderstand  
 $\sigma_R$  bezogener Streuziffer  
 $I_R$  Einheitslänge  
 Weitere Bezeichnungen siehe im Text

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  $\underline{U} \cdot \underline{Y}_m$  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  $X_d$ :

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

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

Den Leerlaufpunkt  $P_0$ , gekennzeichnet durch  $M = 0$  und  $\tan \vartheta_A = 0$ , erhält man als Schnittpunkt der geraden  $\overline{OP_l}$  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  $R_l$  vernachlässigt wird, fällt die Mittelpunktgerade des Kreisdiagrammes mit der



