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: Elektrische Ausgleichsvorgänge in Asynchronmaschinen beim Ausfall und Wiedereinschalten einer Netzzuleitung

Autor: Meyer, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915173

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: 10.12.2025

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

Elektrische Ausgleichsvorgänge in Asynchronmaschinen beim Ausfall und Wiedereinschalten einer Netzzuleitung

Von A. Meyer

621.313.33:621.3.015.3

Anhand der Raumzeigertheorie werden die elektrischen Ausgleichsvorgänge beim Ausfall einer der drei Netzzuleitungen einer Asynchronmaschine untersucht. Ebenfalls werden die transienten Statorströme und das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment für das Wiedereinschalten der Netzzuleitung analysiert. Nach der physikalischen Interpretation der transienten Vorgänge wird auf eine Methode zur direkten Messung der Raumzeiger eingegangen.

Les phénomènes transitoires consécutifs à la coupure d'une phase d'une machine asynchrone sont examinés par la méthode des vecteurs tournants. Il en est de même pour les courants et le couple électromagnétique transitoires résultant du réenclenchement de la phase coupée. Une méthode de mesure directe des grandeurs vectorielles tournantes fait suite à l'interprétation physique des phénomènes transitoires précédents.

1. Einleitung

Die Kenntnis der transienten Vorgänge, die beim Ausfall oder dem Wiederzuschalten einer der drei Netzzuleitungen einer Asynchronmaschine auftreten, ist für eine Reihe praktisch wichtiger Fälle, z. B. dem Abschmelzen einer Sicherung, von Bedeutung.

Der einphasig betriebene Drehstrommotor entwickelt im stationären Betrieb ein reduziertes elektrisches Drehmoment. So ist das einphasige Kippmoment [4] [1]) etwas kleiner als die Hälfte des Kippmomentes bei dreiphasiger Speisung, das üblicherweise mehr als 200 % des Nenndrehmomentes ausmacht. In den meisten Fällen, vor allem bei Teillast, wird also das Kippmoment nach Abtrennen eines Wicklungsstranges noch immer grösser als das Gegenmoment sein. Die Maschine wird mit unterschiedlichen Verlusten in den Wicklungen [6] weiterdrehen und ungefähr den $\sqrt{3}$fachen Strom aufnehmen, bis allenfalls der Überstrom- oder der Übertemperaturschutz anspricht. Überwiegt das Gegenmoment, so wird die Maschine abgebremst, was zu hohen Überströmen führt. Für den ersten Fall kann für die Untersuchungen die Drehzahl während den elektrischen Ausgleichsvorgängen als konstant und gleich der Drehzahl im Zeitpunkt des Schaltvorganges angenommen werden. Diese Voraussetzung ergibt deshalb vernünftige Resultate, weil der elektrische Vorgang sehr viel rascher abklingt, als sich die Drehzahl ändert.

2. Voraussetzungen

Für die Untersuchungen gelten folgende Voraussetzungen:

- Die Stator- und Rotorwicklungen der dreisträngigen Maschine sind symmetrisch aufgebaut.
- Der Sättigungszustand der Maschine ist konstant. Dies erlaubt die Superposition von Magnetfeldern. Die Induktivitäten sind damit strom- und spannungsunabhängig.
- Alle Stromkreise sind linear, d. h. die Widerstände sind von der Grösse der Spannungen und des Stromes sowie von der Frequenz unabhängig.
- Der Sternpunkt der dreisträngigen Wicklung ist isoliert. Es tritt kein Nullsystem auf.
- Die Drehzahländerung während der elektrischen Ausgleichsvorgänge ist sehr klein und wird vernachlässigt.

3. Systemgleichungen der Drehstrom-Asynchronmaschine

3.1 6-Spulenmodell

Fig. 1 veranschaulicht das 6-Spulenmodell einer symmetrisch aufgebauten Asynchronmaschine mit Sternschaltung im Stator. Die folgenden Betrachtungen für die Stranggrössen gelten ebenfalls für Maschinen mit in Dreieck geschalteten Statorwicklungen. Die Widerstände R_1, R_2 der Stator- bzw. Rotorstränge, die dreiphasigen Selbstinduktionskoeffizienten L_1, L_2 im Stator bzw. Rotor und die dreiphasige Gegeninduktivität M werden als bekannt vorausgesetzt (z. B. experimentell bestimmbar).

3.2 Systemgleichungen

Die von *Stepina* [1] und *Kovacs* [2] eingeführten Raumzeiger eignen sich besonders für die Behandlung von transienten Vorgängen und sind Grundlage der folgenden Betrachtungen. Sie sind definiert als

$$\vec{u}_1 = \frac{1}{3}\left(u_A + \vec{a}\, u_B + \vec{a}^2\, u_C\right) \tag{1}$$

$$\vec{i}_1 = \frac{1}{3}\left(i_A + \vec{a}\, i_B + \vec{a}^2\, i_C\right) \tag{2}$$

$$\vec{i}_2 = \frac{1}{3}\left(i_a + \vec{a}\, i_b + \vec{a}^2\, i_c\right) \tag{3}$$

$$\text{wobei } \vec{a} = \exp\left(j\,\frac{2\pi}{3}\right) \tag{4}$$

ist. Mit dem elektrischen Verschiebungswinkel ϑ zwischen Stator und Rotor gilt im statorbezogenen Koordinatensystem:

$$\vec{u}_1 = R_1 \cdot \vec{i}_1 + L_1 \cdot \frac{d\vec{i}_1}{dt} + M\,\frac{d}{dt}\left(\vec{i}_2\, e^{j\vartheta}\right) \tag{5}$$

und im rotorbezogenen Koordinatensystem für den kurzgeschlossenen Schleifringanker:

$$0 = R_2 \cdot \vec{i}_2 + L_2 \cdot \frac{d\vec{i}_2}{dt} + M\,\frac{d}{dt}\left(\vec{i}_1\, e^{-j\vartheta}\right) \tag{6}$$

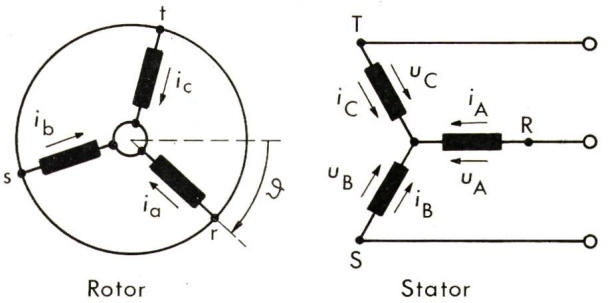

Fig. 1 Anordnung der Wicklungen im elektrischen Modell der Asynchronmaschine

u_A, u_B u_C zeitliche Momentanwerte der Strangspannungen
i_A, i_B, i_C zeitliche Momentanwerte der Strangströme
$\vartheta = \vartheta_{mech} \cdot p_p$ elektrischer Verschiebungswinkel zwischen Rotor und Stator

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

Mit dem transformierten Raumzeiger für die Rotorströme

$$\vec{i}_2' = \vec{i}_2 \, e^{j\vartheta} \tag{7}$$

und mit der von *Lorenzen* in [3] angegebenen allgemein gültigen Beziehung für das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment, sowie mit der Bewegungsgleichung, können die Systemgleichungen der Asynchronmaschine angegeben werden:

Spannungsdifferentialgleichungen

$$R_1 \cdot \vec{i}_1 + L_1 \cdot \frac{d\vec{i}_1}{dt} + M \frac{d\vec{i}_2'}{dt} = \vec{u}_1 \tag{8}$$

$$R_2 \, \vec{i}_2' + L_2 \left(\frac{d\vec{i}_2'}{dt} - j\dot{\vartheta} \vec{i}_2' \right) + M \left(\frac{d\vec{i}_1}{dt} - j\dot{\vartheta} \vec{i}_1 \right) = 0 \tag{9}$$

Elektromagnetisch entwickeltes Drehmoment

$$M_{el}(t) = -6 \, p_p \, M \cdot \mathrm{Im} \left(\vec{i}_2' \, \vec{i}_1^{\,*} \right) \tag{10}$$

Bewegungsgleichung

$$M_{el}(t) - M_g(t) - M_r - \frac{\Theta_m}{p_p} \frac{d\dot{\vartheta}}{dt} = 0 \tag{11}$$

Dabei bedeutet p_p die Polpaarzahl, M_r das Reibungsmoment, $M_g(t)$ das in der Welle übertragene Gegenmoment der Arbeitsmaschine und Θ_m die Summe aller Trägheitsmomente der Anordnung. Unter $\vec{i}_1^{\,*}$ ist die zu $\vec{i}_1$ konjugiert komplexe Grösse zu verstehen. Dieses Gleichungssystem beschreibt das transiente Verhalten der Asynchronmaschine für beliebig unsymmetrische Speisung und variable Drehzahl.

Für die weiteren Betrachtungen wird die Rotor-Winkelgeschwindigkeit als konstant vorausgesetzt:

$$\dot{\vartheta} = \Omega = \omega (1 - s) = \text{konstant} \tag{12}$$

wobei ω der Netzkreisfrequenz und s dem Schlupf entspricht.

3.3 Zerlegung der Raumzeiger in Komponenten

Die Untersuchung der transienten Vorgänge beim plötzlichen Ausfall einer Netzzuleitung und beim Wiedereinschalten derselben (Fig. 2) bedingt die Zerlegung der Raumzeiger in ihre Real- und Imaginärteile, da in den Systemgleichungen (8) und (9) weder der Statorspannungs-Raumzeiger $\vec{u}_1$ noch der Statorstrom-Raumzeiger $\vec{i}_1$ bekannt ist. Gegeben sind lediglich Beziehungen für die Komponenten der Raumzeiger. Mit

$$\vec{u}_1 = u_D + j u_Q, \quad \vec{i}_1 = i_D + j i_Q \tag{13}$$

$$\vec{i}_2' = i_d + j i_q \tag{14}$$

werden die Spannungsgleichungen (8) und (9) in Matrizenform zu

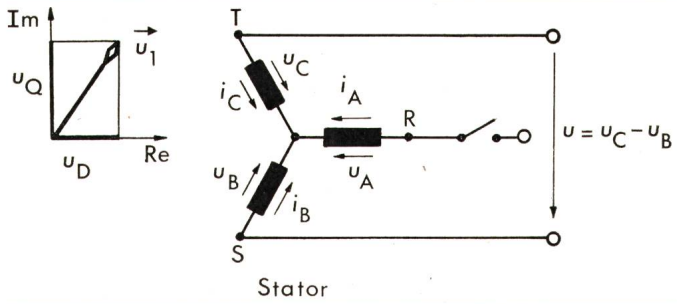

Fig. 2 Raumzeiger in der komplexen Zahlenebene
u_D Realteil des Raumzeigers $\vec{u}_1$
u_Q Imaginärteil des Raumzeigers $\vec{u}_1$

Mit der Annahme konstanter Drehzahl wird das transiente Verhalten der Asynchronmaschine durch diese 4 linearen simultanen Spannungs-Differentialgleichungen vollständig beschrieben.

Die formale Analogie mit den Gleichungen aus der zweiachsigen Modelltheorie [5] ist sofort ersichtlich.

Für das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment wird

$$M_{el} = 6 \, p_p \, M \, (i_Q \, i_d - i_q \, i_D) \tag{16}$$

Für die Komponenten der Raumzeiger im Stator kann mit Hilfe der Kirchhoffschen Sätze und den Raumzeigerdefinitionen (1) bis (4) geschrieben werden:

$$u_D = \frac{1}{2} u_A, \quad u_Q = \frac{1}{2\sqrt{3}} (u_B - u_C) \tag{17}$$

$$i_D = \frac{1}{2} i_A, \quad i_Q = \frac{1}{2\sqrt{3}} (i_B - i_C) \tag{18}$$

Auf einfache Weise können die Stranggrössen im Stator aus den Raumzeigerkomponenten zurückgewonnen werden:

$$u_A = 2 \, u_D, \quad u_B = -u_D + \sqrt{3} \, u_Q, \quad u_C = -u_D - \sqrt{3} \, u_Q \tag{19}$$

$$i_A = 2 \, i_D, \quad i_B = -i_D + \sqrt{3} \, i_Q, \quad i_C = -i_D - \sqrt{3} \, i_Q \tag{20}$$

4. Transiente Analyse

In diesen Untersuchungen wird die Asynchronmaschine vom stationären drei- in den stationären einphasigen Betrieb gebracht und umgekehrt. Für beide Betriebszustände kann das Gleichungssystem (15) für die komplexen Effektivwerte geschrieben werden, und es können die stationären Ströme bestimmt und auch Ersatzschaltbilder für den ein- und den dreiphasigen stationären Betrieb abgeleitet werden [5]. Damit sind besonders die Anfangsbedingungen für die transienten Vorgänge bestimmt.

$$\begin{bmatrix} u_D \\ u_Q \\ \hline 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} R_1 + L_1 \frac{d}{dt} & 0 & M \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & R_1 + L_1 \frac{d}{dt} & 0 & M \frac{d}{dt} \\ \hline M \frac{d}{dt} & \Omega M & R_2 + L_2 \frac{d}{dt} & \Omega L_2 \\ -\Omega M & M \frac{d}{dt} & -\Omega L_2 & R_2 + L_2 \frac{d}{dt} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ \hline i_d \\ i_q \end{bmatrix} = [\mathbf{Z}] \cdot \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ \hline i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{15}$$

Das transiente Verhalten der Ströme und Spannungen kann durch direkte Programmierung des Differentialgleichungssystemes (15) mit der Programmiersprache CSMP III simuliert werden. Um aber die Abhängigkeit der auftretenden Dämpfungen und Frequenzen von den Maschinenkonstanten und den Aufbau der Ströme zu erfassen, werden die Differentialgleichungen mit Hilfe der Laplace-Transformation untersucht. Der Rechenweg wird, um den Umfang des Aufsatzes in Grenzen zu halten, nur skizziert und der Interpretation mehr Platz eingeräumt.

Mit den Anfangswerten der Stromraumzeiger I_{DO}, I_{QO}, I_{dO}, I_{qO}, die Resultat der Betrachtungen der stationären Vorgänge sind, gilt für die Systemgleichungen (15) im Laplace-Bereich:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_D + L_1 I_{DO} + M \cdot I_{dO} \\ \tilde{u}_Q + L_1 I_{QO} + M \cdot I_{qO} \\ - - - - - - - - - - \\ L_2 I_{dO} + M \cdot I_{DO} \\ L_2 I_{qO} + M \cdot I_{QO} \end{bmatrix} = [\mathbf{Z}] \begin{bmatrix} \tilde{i}_D \\ \tilde{i}_Q \\ - - \\ \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \tag{21}$$

In der 3. und 4. Gleichung des Systems sind die laplacierten Rotorströme als Funktion der Statorgrössen gegeben. Durch Einsetzen in die 1. und 2. Gleichung werden die Rotorgrössen eliminiert:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_D \\ \tilde{u}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ -Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_D \\ \tilde{i}_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{01} \\ \Psi_{02} \end{bmatrix} \tag{22}$$

In diesen Beziehungen zwischen den Statorgrössen sind Z_{11} und Z_{12} Funktionen der Maschinenkonstanten und des Laplace-Operators p und Ψ_{01}, Ψ_{02} zusätzlich abhängig von den Anfangsbedingungen.

4.1 Ausfall einer Netzzuleitung

Für die weiteren Betrachtungen wird Sternschaltung der Statorwicklungen vorausgesetzt; für Maschinen mit Dreieckschaltung führen analoge Betrachtungen auf qualitativ gleiche Resultate. Nach dem Ausfall der Netzzuleitung zum Strang A gilt mit den Gl. (18):

$$i_D(t) = 0, \quad \tilde{i}_D = 0 \tag{23}$$

Weiterhin ist die Maschine mit den Klemmen T–S starr mit dem Netz verbunden, also gilt für $u_Q(t)$ gemäss Gl. (17) im Ausschaltmoment:

$$\begin{aligned} u_Q(t) &= \frac{1}{2\sqrt{3}}[u_B(t) - u_C(t)] = -\frac{1}{2\sqrt{3}} u(t) = \\ &= -\frac{1}{2\sqrt{3}} \hat{U} \sin(\omega t + \lambda_{aus}) \end{aligned} \tag{24}$$

Die zweite Gleichung des Systemes (22) definiert mit Kenntnis der laplacierten Spannung $\tilde{u}_Q$ sowie $\tilde{i}_D$ den Strom $\tilde{i}_Q$ vollständig:

$$\tilde{i}_Q = \frac{P_1(p)}{Q(p)} = \frac{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{(p^2 + \omega^2)(p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0)} \tag{25}$$

Die Koeffizienten des Zählerpolynomes sind Funktionen der Maschinenkonstanten und der Anfangsbedingungen und bestimmen die Amplituden und Phasenlagen der transienten Ströme. Die Koeffizienten des Nennerpolynomes 3. Grades sind nur abhängig von den Maschinenkonstanten. Die zwei Pole

$$p_1 = j\omega, \quad p_1^* = -j\omega, \quad \sigma_1 = 0 \tag{26}$$

definieren die ungedämpfte stationäre Lösung. Die drei weiteren Pole

$$p_0 = \sigma_0, \quad p_2 = \sigma_2 + j\omega_2, \quad p_2^* = \sigma_2 - j\omega_2 \tag{27}$$

entsprechend den Nullstellen des Nennerpolynomes, charakterisieren die Frequenz und die Abklingzeitkonstante der Ausgleichsströme. Sie sind in dem zu behandelnden Fall nur noch numerisch bestimmbar; es ist kein geschlossener, allgemeiner analytischer Ausdruck im Zeitbereich für die Statorausgleichsströme herleitbar. Wird vorausgesetzt, dass die Magnetisierungsinduktivität gross ist gegenüber den Streuinduktivitäten, so gilt, nach der Cardanischen Formel für kubische Gleichungen berechnet [8], als gute Näherung (Fehler $< 1{,}5\,\%$) für die Kreisfrequenz:

$$\omega_2 \approx \Omega \tag{28}$$

und für die Dämpfungen (Fehler $< 5\,\%$):

$$\sigma_0 \approx \sigma_2 \approx -\frac{1}{3} \frac{R_1 + R_2}{L_{\sigma\,tot}} \tag{29}$$

wobei Ω die Rotor-Winkelgeschwindigkeit ist und $L_{\sigma\,tot}$ der Summe der Streuinduktivitäten von Rotor und Stator entspricht.

Die Rücktransformation des Stromes $\tilde{i}_Q$ in den Zeitbereich mit Hilfe der Partialbruchzerlegung bringt:

$$\begin{aligned} i_Q(t) = r_0 e^{\sigma_0 t} &+ 2\sqrt{r_1^2 + s_1^2} \cos\left(\omega t + \operatorname{arctg}\frac{s_1}{r_1}\right) + \\ &+ 2\sqrt{r_2^2 + s_2^2}\, e^{\sigma_2 t} \cos\left(\Omega t + \operatorname{arctg}\frac{s_2}{r_2}\right) \end{aligned} \tag{30}$$

womit mit $i_D = 0$ auch der Strangstrom $i_B(t)$ gegeben ist (20). Der Maschinenstrom setzt sich somit zusammen aus:

– der inhomogenen stationären Lösung (2. Glied von Gl. 30), die sich nach dem Charakter der Störfunktion richtet. Die Frequenz dieser Schwingung ist die Kreisfrequenz ω und die ungedämpfte Amplitude ist um ca. $\sqrt{3}$ grösser als bei dreiphasiger symmetrischer Speisung, da die Energie jetzt einphasig zugeführt wird.

– einem ersten homogenen Anteil in Form eines mit der Dämpfungskonstanten σ_0 abklingenden Gleichstromes.

– einem zweiten homogenen Anteil in Form einer mit der Dämpfungskonstanten σ_2 abklingenden Schwingung mit Rotor-Drehfrequenz Ω.

Die homogenen Lösungen sorgen dafür, dass der stationäre Zustand ausgehend von den Anfangsbedingungen stetig erreicht wird.

Die Untersuchung der noch unbekannten Spannung $\tilde{u}_D$, die der Spannung u_A über dem vom Netz abgetrennten Strang A entspricht (17), geht von der ersten Gleichung des Systemes (22) aus. Neben der stationären Spannung treten gleiche Glieder auf, wie in Gl. (30) für den Strom i_Q (t) resp. i_B (t), wobei aber, wie die Berechnung und die Messungen zeigen, die Ausgleichsspannungen nur wenige Prozente der stationären Strangspannung ausmachen.

Kenngrössen des gemessenen Schleifringläufers Tabelle I

Formelzeichen	U_1	I_n	I_0	f	p_p	s_0	R_1	R_2	L_1	L_2	M	$L_{\sigma\,tot}$
Einheit	V_{eff}	A_{eff}	A_{eff}	Hz	–	–	Ω	Ω	H	H	H	mH
Zahlwert	$500/\sqrt{3}$	82	31,8	50	3	$2{,}80 \cdot 10^{-3}$	0,0577	0,120	0,0307	0,030	0,0294	1,9

Die Projektionen des transformierten Rotorstromzeigers $\vec{i}_2'$, i_d und i_q werden mit Kenntnis aller Statorgrössen aus der 3. und 4. Gleichung des Systemes (15) direkt integriert. Auch der Rotorstromzeiger $\vec{i}_2$ ist zusammengesetzt aus einem stationären Anteil der Kreisfrequenz ω, einem abklingenden Gleichstrom und einem abklingenden Wechselstrom mit der Frequenz Ω.

Für das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment wird mit $i_D = 0$:

$$M_{el} = 6p_p\, M i_Q i_d \tag{31}$$

Der Drehmomentverlauf kann mit einem Digitalrechner bestimmt werden.

4.2 Wiedereinschalten der Netzzuleitung

Nach dem Wiedereinschalten der Netzzuleitung ist die Maschine starr mit dem Netz verbunden. Mit den laplacierten Komponenten des Raumzeigers der Statorspannungen (17) $\tilde{u}_D$ und $\tilde{u}_Q$ sind die Komponenten des Stator-Stromraumzeigers im Laplace-Bereich $\tilde{i}_D$ und $\tilde{i}_Q$ durch das Gleichungssystem (22) gegeben. Nach der Elimination je eines Stromes wird

$$\tilde{i}_D = \frac{P_2(p)}{Q(p)}, \quad \tilde{i}_Q = \frac{P_3(p)}{Q(p)} \tag{32}$$

wobei $P_2(p)$ und $P_3(p)$ wiederum Polynome 4. Grades darstellen und $Q(p)$ mit dem Nennerpolynom in Gl. (25) identisch ist. Es charakterisieren somit dieselben Pole den Ausschalt- wie den Wiedereinschaltvorgang, d. h. Dämpfungskonstanten wie Frequenzen der transienten Ausgleichsströme sind gleich. Im Zeitbereich sind die Ströme $i_D(t)$ und $i_Q(t)$ und damit mit den Gl. (20) auch die Strangströme $i_A(t)$, $i_B(t)$ und $i_C(t)$ sowie die Rotorströme wiederum zusammengesetzt aus der stationären Lösung, einem abklingenden Gleichstromglied und einer abklingenden harmonischen Schwingung.

Das Drehmoment ist gegeben durch die Beziehung (16).

4.3 Physikalische Interpretation der transienten Vorgänge

Im einphasigen Betrieb der Asynchronmaschine tritt im Gegensatz zur symmetrischen dreiphasigen Speisung neben dem mitläufigen noch ein gegenläufiges Kreisdrehfeld auf. In der Nähe des Synchronismus ist allerdings die Amplitude des Gegenfeldes, das mit (2-s) schlüpft, gering. Das Hauptfeld bleibt somit beim Übergang vom drei- auf den einphasigen Betrieb und umgekehrt annähernd konstant. Damit sind die sehr kleinen transienten Änderungen der Klemmenspannung über dem abgetrennten Strang A begründet.

Dass das Hauptfeld von den transienten Vorgängen nur am Rande berührt wird, zeigt ebenfalls die in erster Näherung geltende Abhängigkeit (29) der Dämpfungskonstanten der Ausgleichsströme von den Maschinenkonstanten. Die Ausgleichsvorgänge beschränken sich im wesentlichen auf die Streuwege.

Beim Ausschalten der Netzzuleitung des Stranges A in Fig. 2 wird der Strangstrom i_A, wie idealisierend angenommen wird, plötzlich null. Die Statorwicklungen B und C sind nicht in der Lage, den Flussanteil des Stranges A zu erhalten, da sie entgegengesetzt gleiche Ströme führen. Im Stator treten also keine Ausgleichsströme in Form von exponentiell abklingenden Gleichströmen auf. Übereinstimmend sind auch in den numerischen Berechnungen und in den Messungen mit dem Schleifen-Oszillographen die Gleichstromglieder null ($r_0 \approx 0$ in Gl. 30). In den Rotorwicklungen, die den Fluss des Stranges A aufnehmen, entstehen abklingende Gleichströme, die im Stator Wechselströme mit der Frequenz Ω entsprechend der Rotor-Winkelgeschwindigkeit erzeugen.

Beim Übergang vom einphasigen auf den dreiphasigen Betrieb durch das Wiedereinschalten der Netzzuleitung entsteht in der Wicklung A ein exponentiell abklingender Gleichstrom, dessen Amplitude von der Phasenlage der Strangspannung u_A im Schaltaugenblick abhängig ist. Dieser transiente Vorgang verursacht ebenfalls Gleichströme in den Statorwicklungen B und C, die auch zur Flusskomponente A beitragen, sowie im für kurze Zeiten als stillstehend zu betrachtenden Rotor. Diese, die wie beim Transformator als eigentliche Ausgleichsströme anzusehen sind, erzeugen im Stator wie im Rotor infolge der Fortbewegung des Ankers während der Abklingzeit Wechselströme mit der Rotor-Drehfrequenz Ω. Nachdem die Gleichströme im Stator und Rotor abgeklungen sind, ist der Ausgleichsvorgang beendet, und der Stator wie der Rotor führen die stationären Ströme.

5. Numerische Berechnung

Untersucht wurde eine Asynchronmaschine mit den Kenngrössen der Tabelle I.

5.1 Ausfall einer Netzzuleitung

In erster Näherung betragen die Dämpfungskonstanten $\sigma_0 \approx \sigma_2 \approx -31{,}2\ s^{-1}$. Die transienten Ausgleichsvorgänge werden somit mit einer Zeitkonstante von $T \approx 32$ ms abklingen, also nach ca. 2 Perioden ohne nennenswerten Einfluss sein.

Numerisch wurden die Ausgleichsvorgänge nur für den Leerlaufbetrieb berechnet. Wie Messungen gezeigt haben, treten beim belasteten Drehstrommotor qualitativ dieselben transienten Vorgänge auf.

Die Phasenlage λ_{aus} der Klemmenspannung $u(t)$ in Gl. (24) wird aus dem Schleifenoszillogramm herausgelesen und bestimmt mit dem Gleichungssystem (15) die Anfangsbedingungen.

Fig. 3 zeigt die Zusammensetzung des numerisch ermittelten Strangstromes $i_B(t)$. Im Zeitpunkt $t = 0$ wird die Netzzuleitung zum Strang A unterbrochen. Der Klemmenstrom der nun einphasig gespeisten Maschine $i_B(t)$ steigt auf den ca. $\sqrt{3}$fachen Strom an, ohne dass dabei Stromspitzen, verursacht durch abklingende Gleichströme, auftreten. Der berechnete Stromverlauf stimmt in Betrag und Phase mit dem oszillographierten Verlauf bis auf eine Genauigkeit von weniger als 5 % überein.

Das Drehmoment (Fig. 4) wird nach dem Abklingen der Ausgleichsvorgänge zu einem stationär pulsierenden Drehmoment, wie dies aus den Betrachtungen des einphasigen stationären Betriebes bekannt ist. An der Welle wirkt, infolge der um einige Zehnerpotenzen grösseren mechanischen Zeitkonstanten, ein Drehmoment entsprechend dem linearen Mittelwert.

5.2 Wiedereinschalten der Netzzuleitung

In Fig. 5 ist der Verlauf des Strangstromes $i_A(t)$ für das Wiedereinschalten des Stranges A im Zeitpunkt $t = 0$ dargestellt. Die Ströme $i_B(t)$ und $i_C(t)$ verlaufen ähnlich. Ausgeprägt ist in diesem Fall der transiente Gleichstrom, der Stromspitzen verursacht. Die berechnete Amplitude der Stromspitze in Fig. 5 ist, verglichen mit dem entsprechenden Oszillogramm um ca. 20 % zu klein, was mit unberücksichtigten Sättigungserscheinungen zusammenhängen dürfte. Für die Phasenlage und die stationäre Amplitude beträgt die Abweichung einige Prozente. Experimentell wurden für die untersuchte Maschine im ungünstigsten Fall, wenn die Strangspannung u_A des unterbrochenen Stranges im Zeitpunkt des Wiedereinschaltens null ist, Stromspitzen bis zum 2,5fachen Wert des stationären Stromes gemessen.

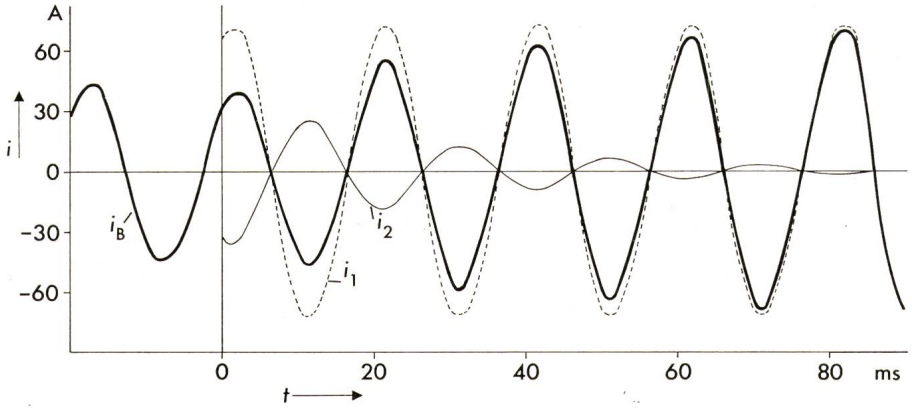

Fig. 3
Klemmenstrom $i_B(t)$ beim Ausfall einer Netzzuleitung
i_1 stationärer Wechselstrom mit Netzfrequenz
i_2 abklingender transienter Wechselstrom mit Frequenz Ω
i_B resultierender Klemmenstrom

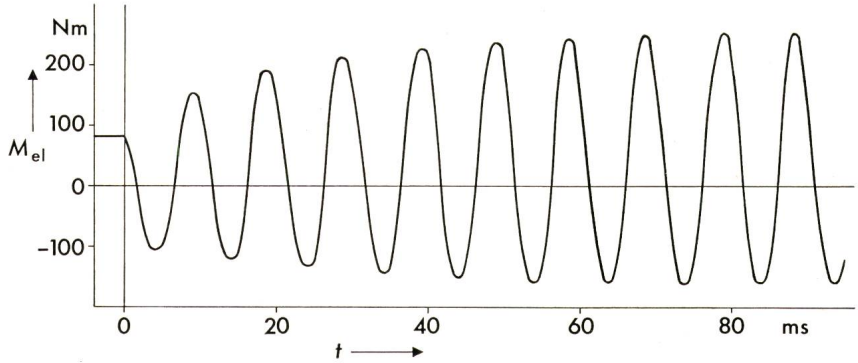

Fig. 4
Elektrisches Drehmoment $M_{el}(t)$ beim Ausfall einer Netzzuleitung

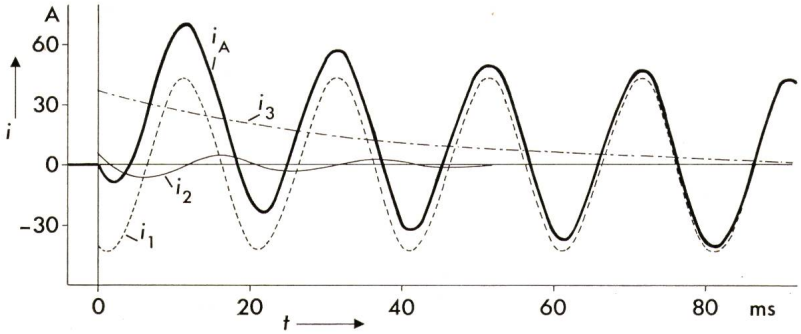

Fig. 5
Strangstrom $i_A(t)$ beim Wiedereinschalten der Netzzuleitung
i_1 stationärer Wechselstrom mit Netzfrequenz
i_2 abklingender transienter Wechselstrom mit Frequenz Ω
i_3 abklingender transienter Gleichstrom
i_A resultierender Strangstrom

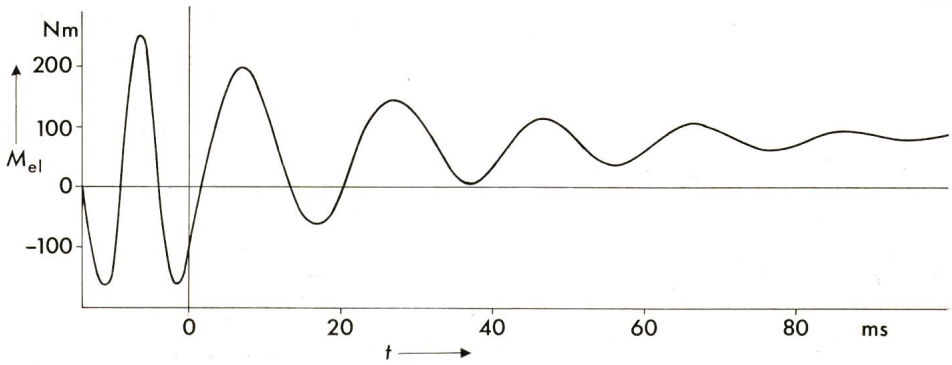

Fig. 6
Elektrisches Drehmoment $M_{el}(t)$ beim Wiedereinschalten der Netzzuleitung

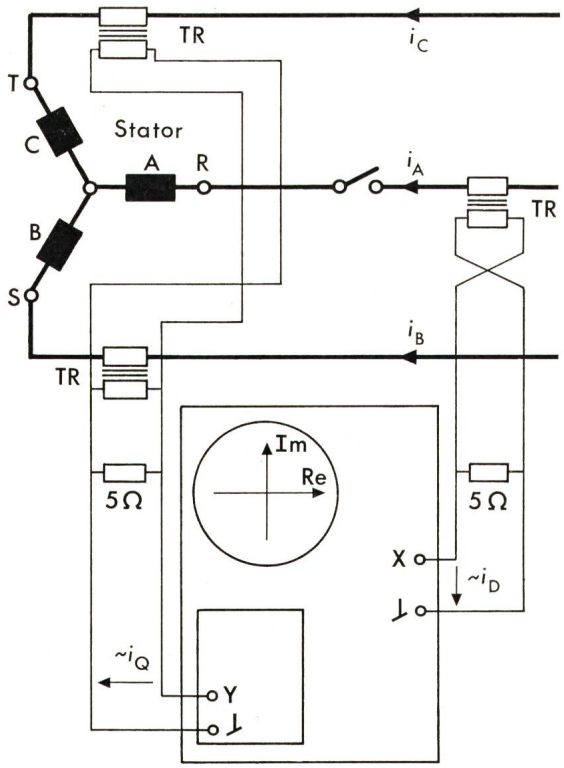

Fig. 7 Meßschaltung für den Stator-Stromraumzeiger $\vec{i}_1$

$i_D = \frac{1}{2}\, i_A$ reelle Komponente

$i_Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}\, (i_B - i_C)$ imaginäre Komponente

TR Transfo-Shunts 1000 : 1. Allenfalls durch Widerstands-Shunts im herausgeführten Sternpunkt ersetzbar

X x-Input, horizontale Ablenkung

Y y-Input, vertikale Ablenkung

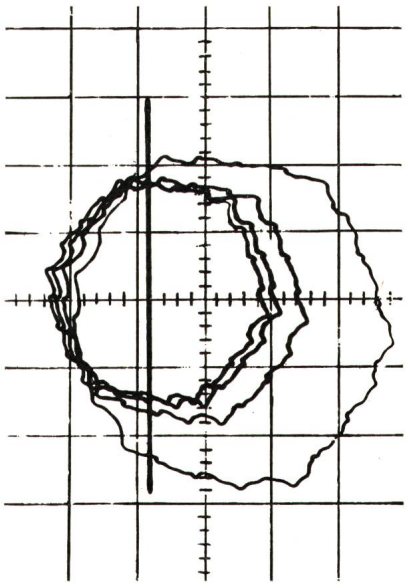

Fig. 8 Stator-Stromraumzeiger $\vec{i}_1$ für das Wiedereinschalten der Netzzuleitung

Maßstab:	34,4 A/Einheit
Nullpunkt:	0,8 Einheiten nach links verschoben
Schaltpunkt:	vertikal: 2,0; horizontal: −0,8 Einheiten
Umlaufrichtung:	Gegenuhrzeigersinn

Fig. 6 zeigt schliesslich, wie das Drehmoment vom stationären einphasigen, mit doppelter Frequenz pulsierenden Drehmoment über eine netzfrequente Schwingung zum konstanten asynchronen Drehmoment bei dreiphasiger Speisung wird.

6. Messung der Raumzeigerortskurven

Die Ortskurven der Raumzeiger der Ströme und Spannungen im Stator sind direkt messbar, wie am Beispiel des Stromraumzeigers gezeigt werden soll.

Wird gemäss der Schaltung in Fig. 7 auf den x-Kanal eines Kathodenstrahloszillographen i_A gegeben und auf den y-Kanal $(i_B - i_C)$, und werden die Faktoren $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ der Gl. (18) mit den Verstärkern berücksichtigt, so folgt der Kathodenstrahl der Raumzeigerortskurve $\vec{i}_1$. Fig. 8 zeigt die Ortskurve für den Wiedereinschaltvorgang. Zuerst folgt $\vec{i}_1(t)$ der imaginären Achse entsprechend dem stationären einphasigen Betrieb mit $i_D = 0$. Dann sind, nach dem Zuschalten der Netzzuleitung, ca. 4 Umläufe des transienten Vorganges aufgenommen. Die Kurven sind stark oberwellenhaltig, was auf eine ungünstige Nutung des Rotors zurückzuführen ist. Gut ist ersichtlich, dass der transiente Gleichstrom sich vor allem in der reellen Achse auswirkt, in der man sich ja mit $i_A = 2i_D$ den unterbrochenen Strang vorstellen kann. Die anderen Strangströme werden von diesem Ausgleichsvorgang ebenfalls betroffen, da die Stränge B und C «nicht in der imaginären Achse liegen». Mathematisch sagen die Gl. (20) dasselbe aus.

7. Schlussfolgerung

Die hergeleiteten Stromgleichungen ergeben, wie Vergleiche der numerisch durchgerechneten mit den oszillographierten Schaltvorgängen zeigen, ein gutes Bild der auftretenden elektrischen Ausgleichsvorgänge beim Aus- und Wiedereinschalten einer Netzzuleitung der Asynchronmaschine.

Die Voraussetzung konstanter Drehzahl führt auf eine lineare Lösung des Problemes. Die mathematisch aufwendige Berücksichtigung einer von der Zeit abhängigen Drehzahl würde für die transienten Statorströme eine von der Zeit abhängige Frequenz ergeben. Auf Grund von Experimenten kann aber festgestellt werden, dass diese Zeitabhängigkeit der Frequenz gering ist.

Literatur

[1] *J. Stepina:* Raumzeiger als Grundlage der Theorie elektrischer Maschinen. ETZ-A 88(1967)23, S. 584...588.

[2] *K. P. Kovacs* und *I. Racz:* Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Band II. Budapest, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959.

[3] *H. W. Lorenzen:* Das dynamische Betriebsverhalten von Asynchronmaschinen bei kleinen Abweichungen vom stationären Zustand. Brown Boveri Mitt. 56(1969)11/12, S. 548...569.

[4] *W. Schuisky:* Induktionsmaschinen. Wien, Springer-Verlag, 1957.

[5] *D. O'Kelly* and *S. Simmons:* Introduction to generalized electrical machine theory. London a. o., McGraw-Hill, 1968.

[6] *P.-G. Sperling:* Betrieb eines Drehstrommotores bei Ausfall einer Phase. Siemens Z. 43(1969)2, S. 106...112.

[7] *M. R. Spiegel:* Theory and problems of Laplace transforms. New York, Schaum-Publishing Co., 1965.

[8] *I. N. Bronstein* und *K. A. Semendjajew:* Taschenbuch der Mathematik. 10. Auflage, Frankfurt/Zürich, Verlag Harri Deutsch, 1971.

Adresse der Autoren

Dipl. El.-Ing. ETH *Armin Meyer,* Assistent am Institut für Elektrische Maschinen (Prof. A. Dutoit) an der ETHZ.
Seit Januar 1976: BBC AG Brown Boveri & Cie., Abt. TAW, 5401 Baden.