Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 61 (1970)

Heft: 3

Artikel: Der Einfluss der Läuferfrequenz auf das Drehmomentverhalten von frequenzgesteuerten Asynchronmaschinen

Autor: Naunin, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915904

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: 02.07.2025

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

Der Einfluss der Läuferfrequenz auf das Drehmomentverhalten von frequenzgesteuerten Asynchronmaschinen

Von *D. Naunin*, Berlin

417-423

62—185:621.313.33:621.316.726

1. Einleitung

Die schnelle Entwicklung der Leistungselektronik in den letzten Jahren hat es ermöglicht, dass die Asynchronmaschine mit Käfigläufer unter Verwendung von Wechselrichtern, die für einen grossen Frequenzbereich gebaut werden können, durch Frequenzänderung in ihrer Drehzahl gesteuert und geregelt werden kann. Damit ist ein wesentlicher Nachteil der Asynchronmaschine gegenüber der Gleichstrommaschine beseitigt. Bei gleicher Leistung ist die Asynchronmaschine sogar der Gleichstrommaschine überlegen, da sie wegen ihres kommutatorlosen Aufbaues ein geringeres Volumen hat, wartungsfrei ist und da ihre geringere mechanische Trägheit zu kürzeren Übergangszeiten zwischen zwei stationären Drehzahlzuständen führt. Der ebenfalls günstigere Herstellungspreis wird bei kleinen und mittleren Anlagen im Augenblick noch durch den grösseren Aufwand an elektronischen Bauelementen kompensiert. Die Erweiterung des Arbeitsbereiches der Asynchronmaschine macht es notwendig, das stationäre und dynamische Verhalten für jeden Drehzahlzustand genau zu untersuchen, um ein optimales Drehmoment- und Drehzahlverhalten im gesamten zulässigen Drehzahlbereich zu erreichen. Praktische und theoretische Untersuchungen [1...5][1]) haben gezeigt, dass das Drehmoment, das zur Kompensation eines Lastmoments oder zur Änderung der Drehzahl notwendig ist, vom Ständerstrom und von der Läuferfrequenz[2]) abhängig ist. Deshalb ist es für eine optimale Drehmomentsteuerung erforderlich, diese beiden Grössen zu Steuergrössen zu machen. Wenn die Läuferfrequenz eine Steuergrösse ist, bedeutet das, dass die Ständerfrequenz, von der die Impulse für die Wechselrichtersteuerung abgeleitet werden, nicht mehr eine vorgegebene Grösse ist, sondern sich als Summe aus der vorgegebenen Läuferfrequenz und der im jeweiligen Betriebszustand gemessenen elektrischen Winkelgeschwindigkeit des Läufers ergibt. Die technische Verwirklichung dieser Addition ist nicht einfach, da meistens ein sehr kleiner Wert zu einem grossen addiert werden muss und eine grosse Genauigkeit erforderlich ist. Zwei Verfahren werden in [1] und [2] beschrieben.

In diesem Aufsatz wird gezeigt, in welcher Weise das Drehmoment des Käfigläufermotors durch die Läuferfrequenz bestimmt wird und wie bei einer geeigneten Steuerung der Läuferfrequenz das Drehmoment-Drehzahlverhalten dem der Gleichstrom-Nebenschlussmaschine gleich gemacht werden kann. Weiterhin wird der Einfluss von Läuferfrequenzsprüngen auf das Drehmoment rechnerisch behandelt und an einem mit dem Digitalrechner berechneten Beispiel gezeigt.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

[2]) Der Begriff «Schlupffrequenz» wird hier vermieden, da der Schlupf bei Asynchronmaschinen, die mit veränderlicher Frequenz betrieben werden, eine unzweckmässige Rechengrösse ist.

2. Grundlagen

Zur Behandlung des dynamischen Verhaltens der Asynchronmaschine und damit auch des stationären Verhaltens, das als Spezialfall des dynamischen Verhaltens aufgefasst werden kann, hat sich die Zweiachsentheorie als nützlich erwiesen. (Eingehende Literaturangaben zur Zweiachsentheorie sind in [3; 4; 5] enthalten.) Die zweipolige dreiphasige Asynchronmaschine mit Käfigläufer wird dabei durch eine Maschine repräsentiert, die zwei um 90° räumlich versetzte Wicklungen in Ständer und Läufer hat und deren Ständerwicklungen mit zwei jeweils um 90° zeitlich versetzten Spannungen bzw. Strömen gespeist werden. Voraussetzung für die Anwendung der Zweiachsentheorie ist, dass der Strombelag und der in gleicher Weise definierte «Flussbelag» sinusförmig über dem Umfang im Luftspalt verteilt sind. (Dies ist bei einer Wicklung mit ausreichender Lochzahl und Sehnung annähernd erfüllt.) Die Stromverdrängung und die Hystereseverluste werden vernachlässigt. Die Linearität der Magnetisierungskennlinie ist nicht erforderlich. Bei einer Berechnung mit einem Digitalrechner kann eine nichtlineare Magnetisierungskennlinie leicht berücksichtigt werden. Die Momentanwerte von Spannung, Strom und Fluss, die jeweils zu einem Zeitpunkt für die beiden um 90° versetzten Wicklungen gelten, kann man als reale bzw. imaginäre Grösse einer zeitlich veränderlichen, komplexen Grösse, im folgenden Raumzeiger genannt, auffassen. Nach [6] setzt sich z. B. der Stromraumzeiger — in [6] als Raumvektor bezeichnet — aus den Momentanwerten der drei Wicklungsströme i_a, i_b und i_c nach folgender Matrizengleichung zusammen:

$$\boldsymbol{i} = \frac{2}{3}\,[1\ \alpha\ \alpha^2]\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\,(i_a + \alpha\, i_b + \alpha^2\, i_c) \text{ mit } \alpha = e^{j2\pi/3} \qquad (1)$$

Die Raumzeiger für die Spannungen und Flüsse werden analog gebildet. Hervorzuheben ist, dass in Gl. (1) die Frequenz der Ströme nicht in die Bildung des Raumzeigers eingeht. Die Frequenz kommt allein dadurch zum Ausdruck, dass der Zeiger in der komplexen Ebene mit einer Geschwindigkeit um den Koordinatenursprung rotiert, die mit der Kreisfrequenz des Stromes identisch ist. Dadurch werden Amplitude und Frequenz der Ströme durch die Länge und die Bewegung des Raumzeigers in klarer Weise getrennt und unterschieden. Das ist der Vorteil dieser Darstellungsart. Ein Phasenunterschied

zwischen zwei elektrischen Grössen in einer Wicklung entspricht wie bei der Zeigerdarstellung in der Wechselstromtechnik, dem Winkel zwischen den jeweils gebildeten Raumzeigern in der komplexen Ebene.

Die grundlegenden Gleichungen für das dynamische Verhalten der Asynchronmaschine mit Käfigläufer können in Raumzeigerschreibweise wie folgt formuliert werden (Ständergrössen haben den Index 1, Läufergrössen den Index 2):

$$\boldsymbol{u}_1 = R_1\, \boldsymbol{i}_1 + \frac{\mathrm{d}\,\vec{\psi}_1}{\mathrm{d}\,t} + \mathrm{j}\,\omega\,\vec{\psi}_1 \tag{2}$$

$$0 = R_2\, \boldsymbol{i}_2 + \frac{\mathrm{d}\,\vec{\psi}_2}{\mathrm{d}\,t} + \mathrm{j}\,(\omega - \nu)\,\vec{\psi}_2 \tag{3}$$

$$\vec{\psi}_1 = \vec{\psi}_\mathrm{h} + L_{\sigma_1}\, \boldsymbol{i}_1 \tag{4}$$

$$\vec{\psi}_2 = \vec{\psi}_\mathrm{h} + L_{\sigma_2}\, \boldsymbol{i}_2 \tag{5}$$

$$\vec{\psi}_\mathrm{h} = L_\mathrm{h}\,(\boldsymbol{i}_1 + \boldsymbol{i}_2) = L_\mathrm{h}\, \boldsymbol{i}_\mu \tag{6}$$

Darin ist $\boldsymbol{u}_1$ der Ständerspannungsraumzeiger; $\boldsymbol{i}_1$ $\boldsymbol{i}_2$ und $\boldsymbol{i}_\mu$ repräsentieren die Raumzeiger der Ständer-, Läufer- und Magnetisierungsströme, $\vec{\psi}_1$, $\vec{\psi}_2$ und $\vec{\psi}_\mathrm{h}$ die der verketteten Ständer-, Läufer- und Hauptflüsse. Die Wicklungswiderstände R_1 und R_2 sowie die Gegen- und Streuinduktivitäten L_h, L_{σ_1} und L_{σ_2} sind auf die gleiche Windungszahl bezogen. Im Läufer wird dabei wie im Ständer eine dreiphasige Wicklung angenommen. ν ist die elektrische Winkelgeschwindigkeit des Läufers, die mit der Drehzahl über die Beziehung $\boldsymbol{n} = \nu/2\pi\, Z_\mathrm{p}$ zusammenhängt (Z_p = Polzahl). Da alle Raumzeigergrössen auf ein gemeinsames Koordinatensystem bezogen sein müssen, sind sie in ein mit ω in der komplexen Ebene umlaufendes System transformiert worden. Dazu werden die nach Gl. (1) gebildeten Ständerraumzeiger mit $\exp(-\mathrm{j}\,\omega\, t)$ und die Läuferraumzeiger mit $\exp[-\mathrm{j}\,(\omega - \nu)\, t]$ multipliziert.

Für das an der Welle angreifende Drehmoment gilt:

$$M_\mathrm{d} = \frac{3}{2} Z_\mathrm{p}\, \mathrm{Im}\,(\boldsymbol{i}_1\, \vec{\psi}_\mathrm{h}^*) = \frac{3}{2} Z_\mathrm{p}\, \mathrm{Im}\,(\vec{\psi}_2\, \boldsymbol{i}_2^*) \tag{7}$$

Bei den mit * bezeichneten Raumzeigern müssen die jeweils konjugiert komplexen Werte eingesetzt werden.

Für die Winkelgeschwindigkeit des Läufers gilt

$$\frac{\mathrm{d}\,\nu}{\mathrm{d}\,t} = \frac{Z_\mathrm{p}}{\Theta}\,(M_\mathrm{d} - M_\mathrm{L}) \tag{8}$$

worin Θ das Trägheitsmoment und M_L das Lastmoment ist.

Wie schon angedeutet, läuft ein Raumzeiger, der aus einer Drehstromgrösse, d.h. aus drei zeitlich um 120° versetzten Wechselstromgrössen, entsteht, mit der Kreisfrequenz dieser Drehstromgrösse um den Ursprung eines stehenden Koordinatensystems. Für eine Grösse der Ständerseite des Asynchronmotors ist das die Kreisfrequenz ω_1. Rotiert nun das Koordinatensystem selbst mit ω_1, stehen die Raumzeiger in diesem System still. Man kann sich dies deutlich machen an der Vorstellung des umlaufenden Drehfeldes einer Asynchronmaschine. Für einen Beobachter, der sich mit der Geschwindigkeit ω_1 im Luftspalt bewegt, steht das Drehfeld still. Ist deshalb $\omega = \omega_1$, spricht man von einem drehfeldbezogenen Koordinatensystem. Im folgenden soll dies immer vorausgesetzt werden. Das bedeutet, dass die Spannungs- und Stromformen, die der Asynchronmaschine zugeführt werden, immer sinusförmig über $\omega_1 t$ bzw. sinusförmig über t bei ω_1 = const. sind. Der Einfluss der vom Wechselrichter abgegebenen nichtsinusförmigen Spannungen kann hier nicht berücksichtigt werden. (Berechnungen dazu sind in [5] enthalten.)

Betrachtet man die Gl. (2) und (3) bei $\omega = \omega_1$ für stationäre Vorgänge, fallen die Differentialquotienten weg. Es bleiben nur die «Rotationsspannungen» $\mathrm{j}\omega_1\, \vec{\psi}_1$ für den Ständer und

$$\mathrm{j}\,(\omega_1 - \nu)\, \vec{\psi}_2 = \mathrm{j}\,\omega_2\, \vec{\psi}_2$$

für den Läufer (ω_2 = Läuferkreisfrequenz) und die Ohmschen Spannungsfälle rechts vom Gleichheitszeichen der Gleichungen übrig.

Gl. (2) hat damit ein der Ankerspannungsgleichung der Gleichstromnebenschlussmaschine ähnliches Aussehen. Die weitere Behandlung dieser Gleichungen wird erweisen, dass das Verhalten der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine dem der Gleichstromnebenschlussmaschine ähnlich ist, wobei die Aufgabe der das Feld bestimmenden Gleichspannung durch die — steuerbare — Läuferfrequenz übernommen wird.

3. Das Drehmoment der stromgespeisten Asynchronmaschine

Wird eine Gleichstrommaschine im Drehzahlbereich unterhalb des Feldschwächbereichs betrieben, muss die Klemmenspannung herabgesetzt werden. Da in den meisten Fällen dann eine Ankerstromregelung eingeführt wird, ist die Maschine in diesem Drehzahlbereich genau gesehen eine stromgespeiste Maschine, da die Spannung nach Massgabe des Stromes eingestellt wird. Für die Asynchronmaschine gilt bei Werten der Ständerfrequenz unterhalb der Nennständerfrequenz das gleiche. Auch sie ist dann eine stromgespeiste Maschine. Erst im Feldschwächbereich, der in gleicher Weise wie bei der Gleichstrommaschine definiert werden kann und in dem die Ständerfrequenz und die Drehzahl grösser sind als die Nennwerte, wird sie zu einer spannungsgespeisten Maschine. Meistens liegt dann die Nennspannung an der Maschine. Hinsichtlich der Drehzahl gibt es deshalb auch bei der Asynchronmaschine zwei Bereiche, die sich in der Betriebsweise unterscheiden: den Konstantstrom- oder Stromsteuerbereich bei niedrigen Drehzahlen und den Konstantspannungs- oder Feldschwächbereich bei hohen Drehzahlen. Bei der Nenndrehzahl geht der eine in den anderen Bereich über. Im Konstantspannungsbereich ist der Ständerstrom keine Steuergrösse mehr, da der stationäre Zustand durch Spannung, Drehzahl und vorgegebene Läuferfrequenz vollständig bestimmt ist.

Die Stromregelung bzw. Spannungseinstellung im unteren Drehzahlbereich der Asynchronmaschine wird in bisher gebauten Anlagen nach drei verschiedenen Methoden durchgeführt. Im Pulsverfahren nach [1] und im Unterschwingungsverfahren nach [2] wird der Asynchronmaschine durch den Wechselrichter, der eine konstante Gleichspannung als Eingangsspannung hat, eine gepulste Spannung zugeführt, deren arithmetischer Mittelwert, auf eine halbe Periode bezogen, gleich der für den Drehzahlzustand notwendigen Spannung ist. Im Verfahren nach [7] hat der Wechselrichter eine variable Eingangsspannung.

Um die Abhängigkeit des Drehmomentes der stromgespeisten Asynchronmaschine von der Läuferfrequenz zu untersuchen, brauchen nur die Gl. (3), (5), (6) und (7) betrachtet zu werden. Aus Gl. (3) kann man für $\omega = \omega_1$ und $\boldsymbol{i}_1$ = const. die Ortskurve des Stromes $\boldsymbol{i}_2$ mit ω_2 als Parameter finden, wenn man $\vec{\psi}_2$ mit Hilfe der Gl. (5) und (6) durch einen Ausdruck

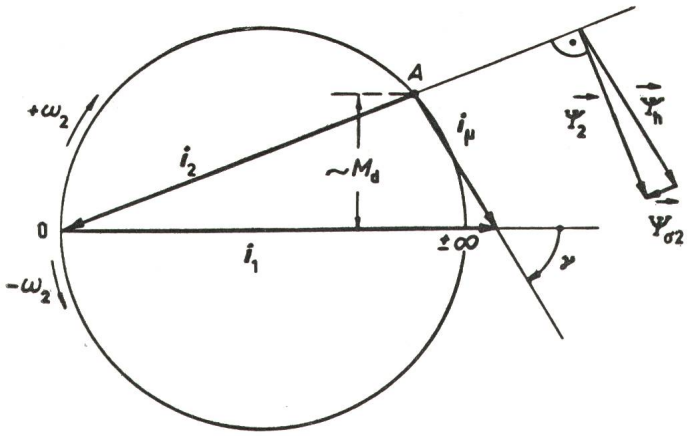

Fig. 1

Das aus den Stromraumvektoren i_1, i_2 und i_μ gebildete Stromdreieck einer Asynchronmaschine

A Arbeitspunkt; M_d Drehmoment; $+\omega_2$ Läuferkreisfrequenz (Motorbereich); $-\omega_2$ Läuferkreisfrequenz (Generatorbereich); γ Phasenwinkel zwischen Ständer- und Magnetisierungsstrom; $\vec{\Psi}_2$ Läuferflussraumzeiger; $\vec{\Psi}_h$ Hauptflussraumzeiger; $\vec{\Psi}_{\sigma 2}$ Läuferstreuflussraumzeiger

mit $\boldsymbol{i}_2$ ersetzt. Es ergibt sich unter Berücksichtigung von $L_2 = L_h + L\sigma_2$ und $T_2 = L_2/R_2$:

$$\boldsymbol{i}_2 = -\frac{L_h}{L_2}\,\boldsymbol{i}_1\,\frac{j\,\omega_2 T_2}{1 + j\omega_2 T_2} \tag{9}$$

Dies ist die Gleichung eines Kreises in der komplexen Ebene mit ω_2 als Parameter. Da die beiden Summanden im Nenner — trägt man sie in die komplexe Ebene ein — senkrecht aufeinander stehen, gilt nach *Bloch*, dass der Durchmesser des Kreises gleich der Differenz zwischen den Werten bei $\omega_2 = 0$ und $\omega_2 = \infty$ ist, d.h. der Durchmesser ist $\boldsymbol{i}_1\, L_h/L_2$.

In Fig. 1 ist die Ortskurve wiedergegeben. Durch Einzeichnen des Raumzeigers $\boldsymbol{i}_\mu = \boldsymbol{i}_1 + \boldsymbol{i}_2$ entsteht ein «Stromdreieck», dessen Gestalt bei konstantem $\boldsymbol{i}_1$ von ω_2 abhängig ist. Für

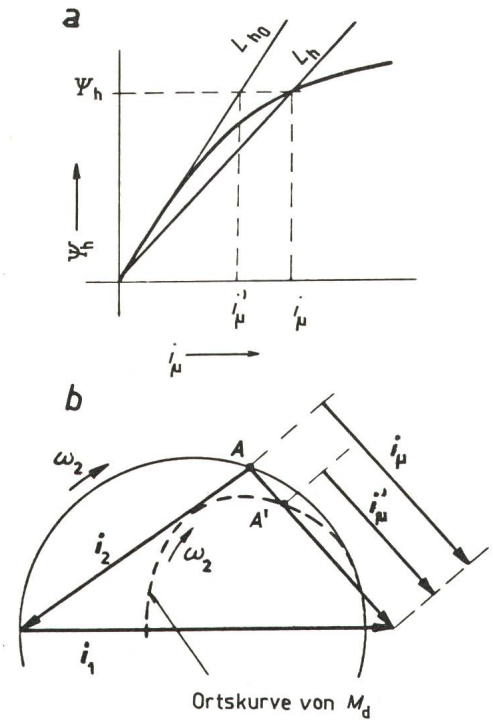

Fig. 2

Ortskurve des Drehmomentes einer Asynchronmaschine unter Berücksichtigung der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie

A' Arbeitspunkt; i'_μ Raumzeiger des Magnetisierungsstromes

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

$\omega_2 = 0$ ist $\boldsymbol{i}_1 = \boldsymbol{i}_\mu$ und $\boldsymbol{i}_2 = 0$. Mit steigendem ω_2 wird $\boldsymbol{i}_2$ grösser, bis $\boldsymbol{i}_2$ seinen Maximalwert bei $\omega_2 = \infty$ erreicht. Der obere Halskreis gilt für Motorbetrieb, der untere für Generatorbetrieb.

Nach Gl. (7) ist das Drehmoment proportional:

$$L_h\,|\boldsymbol{i}_1|\,|\boldsymbol{i}_\mu|\,\sin(\sphericalangle\,\boldsymbol{i}_1, \boldsymbol{i}_\mu) \sim |\boldsymbol{i}_1|\,|\boldsymbol{i}_\mu|\,\sin\gamma$$

Dieser Wert ist wiederum proportional dem senkrechten Abstand des Punktes A von $\boldsymbol{i}_1$ (Fig. 1). Das grösste Drehmoment tritt dann auf, wenn $\boldsymbol{i}_1$ gegenüber $-\boldsymbol{i}_2$ um 45° phasenverschoben ist. In diesem Fall ist $\omega_2 = 1/T_2$, wie aus Gl. (9) zu entnehmen ist. Diese Darstellungsweise veranschaulicht, dass das Drehmoment allein durch die beiden Steuergrössen $\boldsymbol{i}_1$ und ω_2 bestimmt wird.

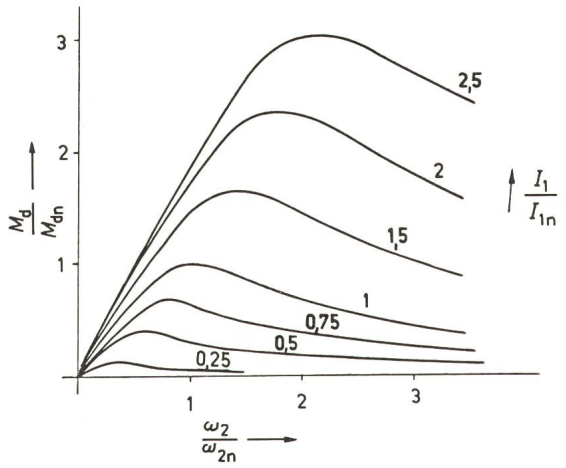

Fig. 3

Drehmoment-Läuferfrequenzkennlinien mit dem Ständerstrom als Parameter bei einer stromgespeisten Asynchronmaschine

I_1 Ständerstrom; I_{1o} Nennständerstrom; M_d Drehmoment; M_{dn} Nenndrehmoment; ω_{2n} Nennläuferkreisfrequenz

Durch die nichtlineare Magnetisierungskennlinie wird das Verhalten der Asynchronmaschine und besonders das Drehmomentverhalten stark beeinflusst. Die Darstellungsweise von Fig. 1 erlaubt es, durch Einführung eines Raumzeigers $\boldsymbol{i}_\mu'$ eine etwas abgewandelte «Ortskurve» des Drehmomentes zu ermitteln. Die Bildung von $\boldsymbol{i}_\mu'$ aus der Magnetisierungskennlinie mit der Anfangssteigung L_{h0} zeigt Fig. 2a. Das Drehmoment ist jetzt wegen $L_h\,\boldsymbol{i}_\mu = L_{h0}\,\boldsymbol{i}_\mu' \sim |\boldsymbol{i}_1|\,|\boldsymbol{i}_\mu'|\,\sin\gamma$. Trägt man für jedes $\boldsymbol{i}_\mu$ das zugehörige $\boldsymbol{i}_\mu'$ in das Stromdreieck ein, erhält man die in Fig. 2b gestrichelt gezeichnete «Ortskurve» von M_d. Der senkrechte Abstand des Punktes A' von $\boldsymbol{i}_1$ ist nun dem Drehmoment proportional. Eine geringe Ungenauigkeit in der Darstellung entsteht dadurch, dass der Kreisdurchmesser von L_h/L_2 abhängig ist. L_h/L_2 ändert sich aber auch bei stark unterschiedlichen L_h-Werten nur sehr geringfügig.

Durch die Berücksichtigung der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie wird die Parametrierung beeinflusst. Der ω_2-Wert für das maximale Drehmoment ist grösser als der bei der magnetisch linearen Maschine, wie anhand von Gl. (3) leicht nachgewiesen werden kann. Des weiteren wird durch unterschiedliche $\boldsymbol{i}_1$-Werte die Lage der ω_2-Werte auf der Ortskurve beeinflusst.

4. Drehmomentkennlinien

Berechnet man für den unteren Drehzahlbereich die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Läuferfrequenz mit den Daten eines 18,5-kW-Asynchron-(AS-)Motors, ergibt sich

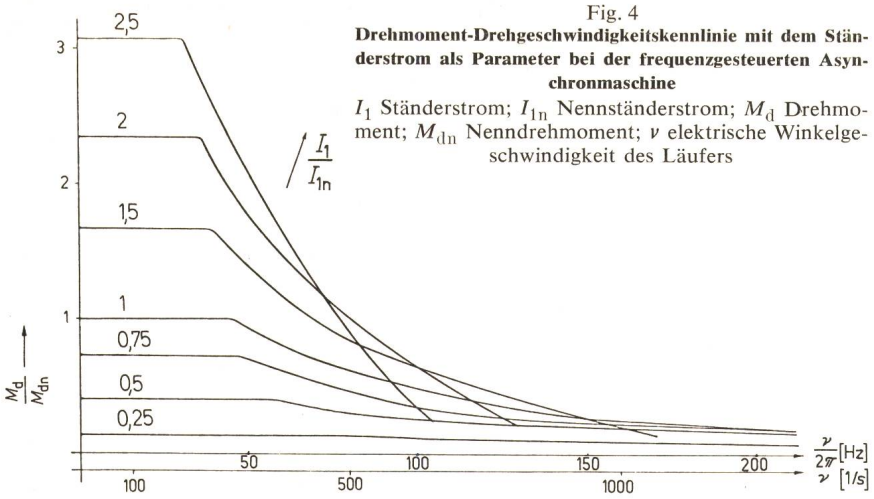

Fig. 4
Drehmoment-Drehgeschwindigkeitskennlinie mit dem Ständerstrom als Parameter bei der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine
I_1 Ständerstrom; I_{1n} Nennständerstrom; M_d Drehmoment; M_{dn} Nenndrehmoment; ν elektrische Winkelgeschwindigkeit des Läufers

Fig. 3. Es sind Kurven für verschiedene Ständerströme angegeben. Wie oben angedeutet, treten die Maxima nicht bei den gleichen ω_2-Werten auf, da die nichtlineare Magnetisierungskennlinie berücksichtigt wurde.

Die Länge des Raumzeigers $\boldsymbol{i}_\mu$ in Fig. 1 ist proportional der Grösse des Hauptflusses. Sie kann bei konstantem Ständerstrom durch den vorgegebenen Läuferfrequenzwert beeinflusst werden. Diese Tatsache nutzt man im Konstantspannungsbereich aus, indem man durch eine Erhöhung der Läuferfrequenz eine Feldschwächung und damit eine höhere Drehzahl erreicht. Wie bei der Gleichstromnebenschlussmaschine wird dadurch das maximal erzielbare Drehmoment verringert, wie man auch den Fig. 1 bzw. 2 entnehmen kann. Berechnet man Kennlinien für diesen Bereich, ergeben sich die Fig. 4 und 5, die die Abhängigkeit des Drehmomentes und der zugehörigen Läuferfrequenzwerte von der Drehzahl für den 18,5-kW-AS-Motor mit dem Ständerstrom als Parameter wiedergeben. Bei geringen Drehzahlen sind die maximalen Werte für Drehmoment und Läuferfrequenz in Fig. 3 angegeben. Der Konstantspannungsbereich, in dem die Nennspannung an der Maschine anliegt, beginnt jeweils in den Knickpunkten der Kennlinien. Der Knickpunkt in der Kennlinie für den Nennstrom stellt den Nennpunkt des AS-Motors dar. Die Kennlinien von Fig. 4 verdeutlichen, dass die frequenzgesteuerte Asynchronmaschine, deren Ständerfrequenz als Summe aus der Drehzahl und der vorgegebenen Läuferfrequenz gebildet wird, das gleiche Drehmoment/Drehzahl-Verhalten hat wie die Gleichstromnebenschlussmaschine.

5. Drehmomentverlauf bei Läuferfrequenzsprüngen

Bei einer Steuerung der Läuferfrequenz ist es wichtig, ihren Einfluss auf den Drehmomentverlauf bei Übergangsvorgängen zu kennen. Da die Spannungsgleichungen (2) und (3) bei veränderlichen Frequenzen nichtlinear sind, müssen sie zur Untersuchung des Drehmomentverlaufes bei veränderlicher Läuferfrequenz linearisiert werden. Die Ergebnisse geben dann aber nur für kleine Änderungen der Steuergrösse angenähert richtige Werte. Im folgenden wird nur für die stromgespeiste Asynchronmaschine eine solche Betrachtung durchgeführt, da die Gleichungen für die spannungsgespeiste Asynchronmaschine schwierig zu lösen sind. Von den Ergebnissen für die stromgespeiste Maschine kann aber auf das Drehmomentverhalten der spannungsgespeisten Maschine geschlossen werden.

Eine Linearisierung wird dadurch vorgenommen, dass das Verhalten der Asynchronmaschine für kleine Abweichungen Δ von einem stationären Betriebspunkt untersucht wird. Man drückt alle veränderlichen Werte durch ihre stationären Werte und ihre Abweichung von diesen Werten aus. Da für die stromgespeiste Asynchronmaschine bei $\boldsymbol{i}_1 =$ const. nur die Läuferfrequenz und der Läuferstrom veränderliche Grössen sind, gilt bei Kennzeichnung der Ruhewerte durch den Index «0»:

$$\omega_2 = \omega_{20} + \Delta\,\omega_2$$

$$\boldsymbol{i}_2 = \boldsymbol{i}_{20} + \Delta\,\boldsymbol{i}_2$$

Unter der Voraussetzung, dass die Abweichungen Δ klein sind gegenüber den stationären Werten, kann man bei den Produkten zweier Veränderlicher die Ausdrücke $\Delta\Delta$ gegenüber den mit den Abweichungen multiplizierten Ruhewerten vernachlässigen. Gl. (3) kanndamit unter Berücksichtigung von Gl. (5) und (6) wie folgt geschrieben werden:

$$0 = R_2(\boldsymbol{i}_{20} + \Delta\,\boldsymbol{i}_2) + L_2\frac{\mathrm{d}(\boldsymbol{i}_{20} + \Delta\,\boldsymbol{i}_2)}{\mathrm{d}\,t} + L_h\frac{\mathrm{d}\,\boldsymbol{i}_1}{\mathrm{d}\,t} + \mathrm{j}(\omega_{20} + \Delta\omega_2)\cdot$$
$$\cdot(L_2\,\boldsymbol{i}_{20} + L_2\,\Delta\,\boldsymbol{i}_2 + L_h\,\boldsymbol{i}_1)$$

Daraus ergibt sich nach Fortfall der nur aus Ruhewerten bestehenden Grössen und der $\Delta\Delta$-Ausdrücke die Differentialgleichung für $\Delta\boldsymbol{i}_2$ bei Änderung der Läuferkreisfrequenz um $\Delta\,\omega_2$:

$$R_2\,\Delta\,\boldsymbol{i}_2 + L_2\frac{\mathrm{d}\Delta\boldsymbol{i}_2}{\mathrm{d}\,t} + \mathrm{j}\,\omega_{20}\,L_2\,\Delta\,\boldsymbol{i}_2 = -\Delta\,\omega_2\,\mathrm{j}\,(L_2\,\boldsymbol{i}_{20} + L_h\,\boldsymbol{i}_1) \quad (10)$$

Aus Gl. (10) lässt sich der zeitliche Verlauf von $\Delta\,\boldsymbol{i}_2$ nach einer sprunghaften Änderung der Steuergrösse um $\Delta\,\omega_2$ leicht — z.B. mit Hilfe der Laplace-Transformation — errechnen. Wenn man die in Gl. (9) ausgedrückte Abhängigkeit des

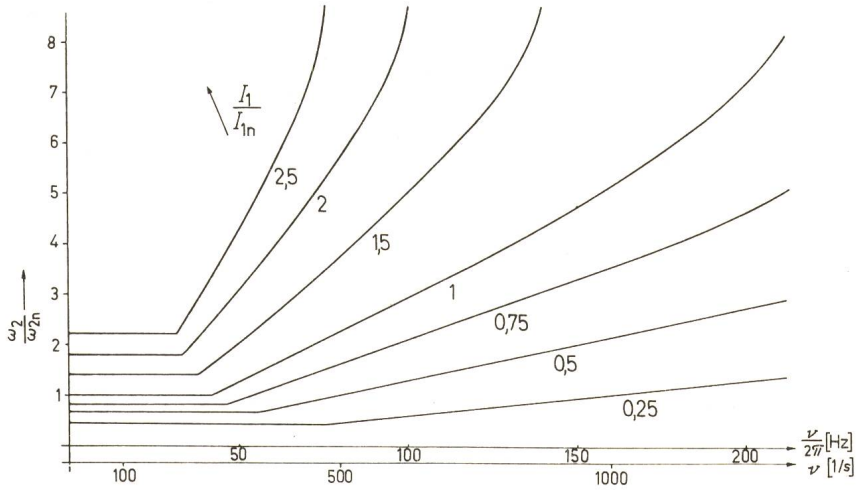

Fig. 5
Läuferfrequenz-Drehgeschwindigkeitskennlinien mit dem Ständerstrom als Parameter bei der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine
Bezeichnungen siehe Fig. 3 und 4

Stromzeigers $\boldsymbol{i}_{20}$ von $\boldsymbol{i}_1$ und ω_{20} berücksichtigt, erhält man:

$$\Delta \boldsymbol{i}_2(t) = \Delta\omega_2 T_2 \boldsymbol{i}_1 \frac{L_h}{L_2} \cdot \frac{-j}{(1 + j\omega_{20} T_2)^2} \left(1 - e^{-(1/T_2 + j\omega_{20})t}\right) \quad (11)$$

Für die Änderung des Drehmoments gilt nach Gl. (7):

$$\Delta M_d = 1{,}5\, Z_p L_h \operatorname{Im}(\boldsymbol{i}_1 \Delta \boldsymbol{i}_2^*) \quad (12)$$

Setzt man Gl. (11) in Gl. (12) unter Berücksichtigung von $L_h^2/L_2 = L_1(1-\sigma)$ ein und gibt $\boldsymbol{i}_1$ so vor, dass es auf der reellen Achse des drehfeldbezogenen Koordinatensystems liegt, verläuft die Änderung des Drehmomentes aufgrund eines $\Delta\omega_2$-Sprunges nach der Zeitfunktion:

$$\Delta M_d(t) = \Delta\omega_2 \frac{3}{2} Z_p \boldsymbol{i}_1^2 T_2 L_1 (1-\sigma) \quad (13)$$

$$\left[\frac{1-\omega_{20}^2 - T_2^2}{(1+\omega_{20}^2 T_2^2)^2}\left(1 - e^{-t/T_2}\cos\omega_{20} t\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2\omega_{20} T_2}{(1+\omega_{20}^2 T_2^2)^2} e^{+t/T_2} \sin\omega_{20} t\right] \quad (14)$$

Gl. (14) zeigt, dass sowohl die entstehenden Schwingungen als auch der Endwert, der angestrebt wird, von dem Ruhewert der Läuferfrequenz abhängt. In Übereinstimmung mit der Darstellung des Drehmoments im Stromdreieck (Fig. 1) zeigt Gl. (14), dass das Drehmoment bei positivem $\Delta\omega_2$ einem grösseren Wert zustrebt, wenn $\omega_{20} T_2 < 1$ ist, und dass es einem kleineren Wert zustrebt, wenn $\omega_{20} T_2 > 1$ ist. Wichtiger aber ist die Tatsache, dass unabhängig von den Ruhewerten bei positivem $\Delta\omega_2$ der Drehmomentanstieg bei $t = 0$ in beiden Fällen positiv bzw. bei negativem $\Delta\omega_2$ negativ ist, wie durch Bildung von $d\Delta M_d/dt$ nachzuweisen ist. Durch einen $\Delta\omega_2$-Sprung erreicht man also immer anfangs eine dem Vorzeichen von $\Delta\omega_2$ entsprechende Drehmomentänderung.

6. Spannungsverlauf bei Läuferfrequenzsprüngen

Es ist noch zu prüfen, ob durch ω_2-Sprünge nicht so hohe Ständerspannungen erforderlich sind, dass solche Steuerungsmassnahmen nicht möglich sind. Steuert man die Läuferfrequenz bei $\boldsymbol{i}_1 =$ const. und $\nu =$ const., ergibt sich unter Vernachlässigung der $\Delta\Delta$-Werte nach den Gleichungen (2), (4) und (5) für die Spannungsänderung die Gleichung:

$$\Delta \boldsymbol{u}_1 = L_h \frac{d\Delta \boldsymbol{i}_2}{dt} + j\Delta\omega_2 L_1 \boldsymbol{i}_1 + j\Delta\omega_2 L_h \boldsymbol{i}_{20} +$$

$$+ j(\omega_{20} + \nu) L_h \Delta \boldsymbol{i}_2 \quad (15)$$

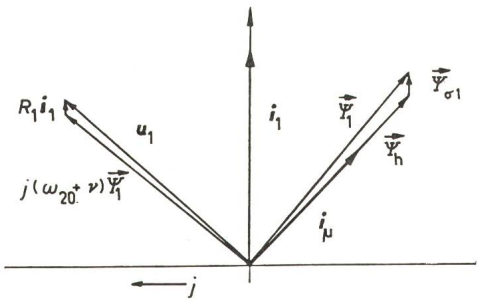

Fig. 6
Bildung des Raumzeigers u_1 bei maximaler Drehmomenterzeugung der stromgespeisten Asynchronmaschine
j imaginäre Achse des Bezugssystems; ω_{20} Ruhewert der Läuferkreisfrequenz; ν elektrische Winkelgeschwindigkeit des Läufers
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

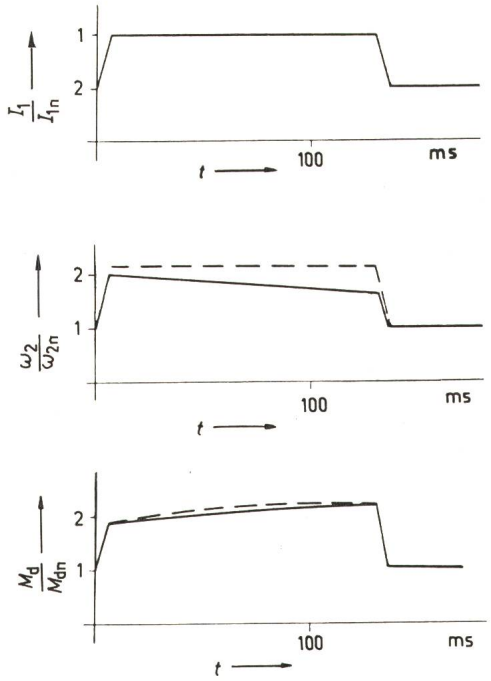

Fig. 7
Erzeugung eines positiven Drehmomentenstosses bei einer stromgespeisten Asynchronmaschine für zwei verschiedene Steuerfunktionen der Läuferfrequenz bei gleich vorgegebenem Ständerstromverlauf
t Zeit
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Setzt man Gl. (11) in Gl. (15) ein, erhält man unter Berücksichtigung von $\sigma = 1 - L_h^2/(L_1 L_2)$ nach einiger Rechnung:

$$\Delta \boldsymbol{u}_1(t) = \Delta\omega_2 j \sigma L_1 \boldsymbol{i}_1 +$$

$$+ \Delta\omega_2 L_1 (1-\sigma) \boldsymbol{i}_1 \frac{j + \nu T_2}{(1 + j\omega_{20} T_2)^2}\left[1 - e^{-\left(\frac{1}{T_2} + j\omega_{20}\right)t}\right] \quad (16)$$

Der Verlauf und der stationäre Endwert sind nach Gl. (16) von ω_2 und ν abhängig. Um festzustellen, ob die Ständerspannung bei einem positiven $\Delta\omega_2$-Sprung einem grösseren oder einem kleineren Wert zustrebt, muss man den Ausdruck

$$\frac{j + \nu T_2}{(1 + j\omega_{20} T_2)^2} =$$

$$= \frac{2\omega_{20} T_2 + \nu T_2 (1 - \omega_{20}^2 T_2^2) + j(1 - \omega_{20}^2 T_2^2 - 2\omega_{20} T_2 \nu T_2)}{(1 + \omega_{20}^2 T_2^2)^2}$$

betrachten, der $\Delta \boldsymbol{u}_1 = \Delta \boldsymbol{u}_{\alpha 1} + j\Delta \boldsymbol{u}_{\beta 1}$ wegen $\sigma \ll 1$ bestimmt. Da bis auf sehr kleine ν-Werte $\nu \gg \omega_{20}$ ist, wird $\Delta \boldsymbol{u}_{\beta 1}$ einem negativen Wert zustreben. Das Vorzeichen von $\Delta \boldsymbol{u}_{\alpha 1}$ ist im wesentlichen vom Faktor $(1 - \omega_{20}^2 T_2^2)$ abhängig. Fig. 6 zeigt die Lage von $\boldsymbol{u}_1$ im drehfeldbezogenen Koordinatensystem im Zustand $\omega_{20} T_2 = 1$ qualitativ für ein mittleres ν im Konstantstrombereich. Für diesen Fall ist das stationäre $\Delta \boldsymbol{u}_{\beta 1}$ negativ, und für die stationären Werte gilt: $\Delta \boldsymbol{u}_{\alpha 1} \ll \Delta \boldsymbol{u}_{\beta 1}$. Die Ständerspannung $\boldsymbol{u}_1$ wird demnach kleiner werden. Dies trifft auch auf andere Ausgangszustände zu, wie eine entsprechende Betrachtung von $\boldsymbol{u}_1$ und $\Delta \boldsymbol{u}_1$ ergibt.

Dieses Ergebnis ist nicht nur für den Konstantstrombereich bedeutend, sondern auch für den Konstantspannungsbereich. Damit wird gezeigt, dass durch Läuferfrequenzerhöhung ein zeitweise höheres Drehmoment, das z. B. zur Beschleunigung gebraucht wird, erreicht werden kann. Es ist nicht eine Spannungserhöhung notwendig, wie man hätte vermuten können. Die Energie zur Drehmomentsteigerung wird der gespeicherten magnetischen Energie entzogen.

7. Erzeugung eines positiven Drehmomentenstosses

Bei der Untersuchung einer optimalen Steuerung der Asynchronmaschine sind die vorangegangenen Überlegungen immer eine Vorstufe zu der Frage, wie optimale Steuerfunktionen zum Erreichen eines vorgegebenen Zieles aussehen müssen. Will man z.B. eine Asynchronmaschine, die mit ihrem Nennmoment belastet ist, innerhalb des unteren Drehzahlbereichs vorübergehend beschleunigen, muss ein positiver Drehmomentenstoss erzeugt werden. Nach den vorhergehenden Ausführungen muss dazu die Läuferfrequenz erhöht werden. Die Drehmomenterhöhung wird verstärkt, wenn man gleichzeitig einen grösseren Ständerstrom vorgibt. Fig. 7 zeigt die enstehenden Zeitfunktionen für diesen Fall. Sie wurden nicht nach den bereits angegebenen mit Vernachlässigungen behafteten Gleichungen berechnet, sondern mit dem vollständigen Gleichungssystem auf einem Digitalrechner. Dadurch war es möglich, zeitlich nicht konstante Steuerfunktionen vorzugeben und auch die — in der Praxis nicht existierenden — Strom- und Frequenzsprünge zeitlich etwas aufzulösen. Die Zeitverläufe nach Fig. 7 bestätigen die Berechnungen der vorhergehenden Abschnitte und zeigen, dass durch Erhöhung der Läuferfrequenz über den Wert hinaus, der bei zweifachem Nennstrom notwendig ist (Fig. 1), ein Drehmomentenstoss ohne überlagerte Drehmomentpendelungen möglich ist. Die dargestellten Steuerfunktionen sind die günstigsten aus mehreren Berechnungen. Damit ist angedeutet, dass die Läuferfrequenz, die das stationäre Drehmomentverhalten massgeblich beeinflusst, auch für das dynamische Verhalten der Asynchronmaschine (wie in [5] ausgeführt) die entscheidende Steuergrösse ist.

8. Zusammenfassung

Es wird nachgewiesen, dass das Drehmomentverhalten der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine, bei der die Läuferfrequenz eine Steuergrösse ist, dem der Gleichstromnebenschlussmaschine ähnlich ist. Gleichungen und Kennlinien für das Drehmoment in Abhängigkeit von der Läuferfrequenz werden für den Stromsteuerbereich und den Feldschwächbereich der Asynchronmaschine abgeleitet. Weiterhin wird der Drehmomentverlauf nach einer sprungartigen Änderung der Läuferfrequenz berechnet und in einem Beispiel die Erzeugung eines Drehmomentenstosses durch eine geeignete Läuferfrequenzsteuerfunktion gezeigt.

Literatur

[1] *K. Heumann* und *K.-G. Jordan:* Das Verhalten des Käfigläufermotors bei veränderlicher Speisefrequenz und Stromregelung. AEG Mitt. 54(1964)1/2, S. 107...116.

[2] *A. Schönung* und *H. Stemmler:* Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren. Brown Boveri Mitt. 51(1964)8/9, S. 555...577.

[3] *D. Naunin:* Die Darstellung des dynamischen Verhaltens der stromgespeisten Asynchronmaschine durch ein komplexes VZ1-Glied. Wiss. Berichte AEG-Telefunken 42(1969)1, S. 48...52.

[4] *D. Naunin:* Die Darstellung des dynamischen Verhaltens der spannungsgespeisten Asynchronmaschine durch ein komplexes VZ2-Glied. Wiss. Berichte AEG-Telefunken 42(1969)1, S. 53...57.

[5] *D. Naunin:* Ein Beitrag zum dynamischen Verhalten der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine. Diss. Technische Universität, Berlin, 1968.

[6] *K. Kovacs* und *I. Racz:* Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Budapest, Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959.

[7] *R. Heck* und *M. Meyer:* Die asynchrone Umrichtermaschine, ein kontaktloser, drehzahlregelbarer Umkehrantrieb. Siemens Z. 37(1963)4, S. 287...290.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *D. Naunin,* II. Institut für allgemeine Elektrotechnik der Technischen Universität Berlin, Einsteinufer 19, D–1 Berlin 10.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

34. Haupttagung vom 1. bis 13. November 1969 in Teheran

Conseil

Der Conseil hielt seine Sitzung am 10. November 1969 unter dem Vorsitz des Präsidenten der CEI, Pierre Ailleret, ab. Vertreten waren 25 von 41 Nationalkomitees sowie die ISO durch ihren Präsidenten, F. Sünter, und ihren Generalsekretär, O. Sturen. Das CES hatte K. Abegg, Prof. Dr. W. Druey und H. Marti delegiert.

Über den Jahresbericht, der den Nationalkomitees anfangs des Jahres gedruckt unterbreitet worden war, referierte der neue Generalsekretär, C. J. Stanford. Er erwähnte das CEI-Bulletin, das sich gut eingelebt hat und vorzügliche Dienste leistet, und dankte den Verfassern von Beiträgen, unter denen auch H. Lütolf, Sektionssekretär des CES, figuriert. — Sorge bereitete das Wachsen der Zahl der Mitglieder von Arbeitsgruppen der Comités d'Etudes, deren Wirkungsgrad dadurch nicht verbessert wird. Ein vollständiges Verzeichnis der Arbeitsgruppen ist erstmals anfangs 1969 herausgegeben worden. — Es ist beabsichtigt, für umfangreiche Publikationen der CEI das Subskriptionsverfahren einzuführen, das allenfalls zu einer Verbilligung des Stückpreises führen wird.

Die Réunion générale 1970 wird vom 18. bis 30. Mai in Washington abgehalten. Dr. C. C. Chambers (USA) gab bekannt, dass als Tagungsort das neue Hilton-Hotel vorgesehen ist, wo auch die Delegierten untergebracht werden können. — Für 1971 liegt noch keine endgültige Einladung vor; immerhin gab J. P. J. Smoes (Belgien) bekannt, dass wahrscheinlich das belgische Nationalkomitee nach Brüssel einladen wird. — Für 1972 besteht ebenfalls noch keine Einladung; dagegen teilte der Generalsekretär mit, dass sich bereits mehrere Nationalkomitees für die Tagungen der CEI in den Jahren ab 1973 interessieren.

Über die Betriebsrechnung 1968 und das Budget pro 1970 lagen schriftliche Berichte des Trésorier, J. O. Knowles, vor. Dieser referierte kurz und begründete das Ansteigen der Jahresbeiträge von durchschnittlich 11 % pro Jahr einleuchtend. Es läuft parallel mit der Ausdehnung der Aufgaben der CEI auf neue Gebiete einerseits, mit dem zunehmenden Tempo der technischen Entwicklung, namentlich im Nachrichtenwesen und der Elektronik, anderseits. Das Bureau Central und das Comité d'Action treffen die nötigen Massnahmen, um Leerlauf zu vermeiden und die Sekretariatsarbeit zu rationalisieren. Nach diesen Erklärungen und längerer Aussprache wurden die Rechnung 1968 und das Budget 1970 ohne Gegenstimme bei einigen Enthaltungen genehmigt. Für 1970 beläuft sich der Beitrag des CES, der durch den SEV aufgebracht wird, auf rund 40 000 Franken. In der Diskussion, in der neben skeptischen auch einige positive Äusserungen zur Geltung kamen, wurde angeregt, der Präsident möge ein Memorandum erstellen, in dem beispielsweise die Zunahme des Welthandels, der Nationalprodukte, der umlaufenden Geldmenge, mit den Beiträgen an die CEI verglichen werden, damit man die Relationen nicht aus dem Auge verliert, die unbestreitbar zwischen diesen Grössen bestehen. Ferner könnte der Trésorier eine Schätzung der Ausgaben für die nächsten 4...5 Jahre vorlegen. Ganz im Sinne der Anliegen des CES wurde von der französischen Delegation erklärt, der Conseil habe den Comités d'Etudes deutlich verständlich zu machen, dass sich die CEI auf jene Normung konzentrieren müsse, welche zum Ziel habe, die technischen Handelshindernisse zu beseitigen. Es dürfen weder «Lehrbücher» noch technologische Exkurse herausgegeben werden.