Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 51 (1960)

Heft: 25

Artikel: Vorgedruckte Ortskurven und einfache Darstellung der Theorie von Asynchronmaschinen

Autor: Canay, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-917096

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: 08.08.2025

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

Vorgedruckte Ortskurven und einfache Darstellung der Theorie von Asynchronmaschinen

Von *M. Canay*, Baden

621.313.33.012

In dieser Arbeit werden die Theorie der Asynchronmaschine in einer einfachen Darstellung behandelt und die vorgedruckten Ortskurven angegeben, um das Stromdiagramm der Asynchronmaschine rasch ermitteln zu können.

La théorie de la machine asynchrone est traitée dans une représentation simple. On donne des lieux de points imprimés à l'avance pour une détermination rapide du diagramme de courant de la machine asynchrone.

Die Theorie der Asynchronmaschine wurde bereits öfters von Mathematikern, Physikern und Ingenieuren behandelt und möglichst präzis aufgebaut. Hier soll nun eine einfache Darstellung dieser Theorie gegeben werden, die mit ihrer Anschaulichkeit dem besseren Verständnis dient. Die gleichzeitig erhaltenen Beziehungen ermöglichen eine schnelle Ermittlung des Stromdiagrammes auf vorgedruckten Ortskurvenscharen.

1. Voraussetzungen

Bei der Theorie der Asynchronmaschine setzt man die folgenden Bedingungen voraus:

1. Hystereseverluste treten nicht auf.
2. Das magnetische Feld ist proportional dem Magnetisierungsstrom.
3. Es treten keine Zusatzverluste und keine Stromverdrängung auf.
4. Die Wicklungen sind symmetrisch und haben keine Oberwellen.
5. Der Luftspalt ist konstant.

Für die weitere Behandlung der Theorie sei zunächst angenommen, dass die beiden Frequenzen f_1 und f_2 von Stator und Rotor, welche durch die Rotationsbewegung des Rotors miteinander verknüpft sind, von der Netzfrequenz verschieden sind. Gewiss sind die Netzfrequenz und die Statorfrequenz im normalen Betrieb dieselben. Diese Annahme sei aber im Hinblick auf Motoren, deren Rotorkreise eine Unsymmetrie aufweisen, getroffen (siehe Tabelle I, Gruppe IIb).

Um die Überlegungen von der Verschiedenheit der Frequenzen befreien zu können, bezieht man die wirklichen Grössen der Spannungen der Impedanzen U_{1w}, $Z_{1w} = R_1 + \mathrm{j}\omega_1 L_1$ und U_{2w}, $Z_{2w} = R_2 + \mathrm{j}\,\omega_2 L_2$ auf ein Bezugssystem mit der Netzfrequenz. Diese kann auch als Bezugsfrequenz bezeichnet werden, womit die Verschiedenheit der Frequenzen ausgeschaltet ist. Ohne das Ohmsche Gesetz zu verletzen, kann dies durch Multiplizieren der Spannungen und der Impedanzen mit f/f_1 bzw. f/f_2 erzielt werden. Dabei bleiben die Ströme unverändert.

$$U_1 = \frac{f}{f_1} U_{1w} \qquad U_2 = \frac{f}{f_2} U_{2w}$$

$$Z_1 = \frac{f}{f_1} Z_{1w} = \frac{f}{f_1} R_1 + \mathrm{j} X_1 \qquad X_1 = L_1 \omega$$

$$Z_2 = \frac{f}{f_2} Z_{2w} = \frac{f}{f_2} R_2 + \mathrm{j} X_2 \qquad X_2 = L_2 \omega \tag{1}$$

$$X_{12} = L_{12} \omega$$

Der Index «w» unterscheidet die wirklichen Grössen von den Rechnungsgrössen.

Nun sind die Spannungen und die Impedanzen im Bezugssystem mit der Bezugsfrequenz f ausgedrückt, X_1, X_2, X_{12} sind also mit dieser Frequenz zu definieren.

Hier soll darauf hingewiesen werden, dass die oben erwähnten Grössen keine dimensionslosen (Per-Unit) Grössen sind, obwohl sie in einem Bezugssystem definiert sind. Dieses Bezugssystem unterscheidet sich von den anderen nur durch die einheitliche Bezugsfrequenz. Deswegen haben alle physikalischen Grössen, gemäss ihrer Definition eigene Dimensionen.

Wenn man eine Maschine im normalen Betrieb untersuchen will, muss man in die Gl. (1) nur $f = f_1$ und $f_2 = s\,f$ einführen. Das Symbol s bedeutet hier den Schlupf des Rotors.

2. Stator-Rotorströme im allgemeinen Fall

Es sei angenommen, dass ein Spannungssystem mit den Frequenzen f_1 im Stator- und f_2 im Rotorkreis an die Klemmen der Asynchronmaschine angeschlossen ist, wobei die Frequenzen f_1 und f_2 durch die Bewegung des Rotors miteinander verknüpft sind (Fig. 1a). Die magnetische Gegenkupplung zwischen Stator und Rotor besteht unter den vorhin erwähnten Voraussetzungen nur aus der Induktivität L_{12}.

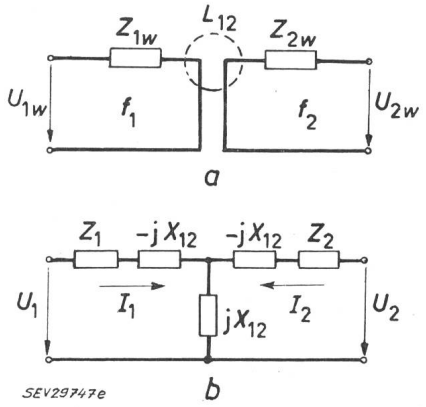

Fig. 1
Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine
a ohne einheitliche Frequenz
b mit einheitlicher Frequenz
Erklärungen siehe im Text

Die bekannten Gleichungen für den Stator- und Rotorkreis lauten im Bezugssystem mit der einheitlichen Frequenz f:

$$U_1 = Z_1 I_1 + \mathrm{j}\, X_{12} I_2$$
$$U_2 = \mathrm{j}\, X_{12} I_1 + Z_2 I_2 \tag{2}$$

Die Gl. (2) beruhen gleichzeitig auf dem Ersatzschema in Fig. 1b. Sie haben nur zwei Unbekannte I_1 und I_2 [1; 2][1]), und sind daher ohne weiteres zu lösen:

$$I_1 = \frac{U_1 - \frac{j X_{12}}{Z_2} U_2}{Z_1 \Sigma} \qquad I_2 = \frac{U_2 - \frac{j X_{12}}{Z_1} U_1}{Z_2 \Sigma} \tag{3}$$

worin Σ eine komplexe Grösse ohne Einheit bedeutet:

$$\Sigma = 1 + \frac{X_{12}^2}{Z_1 Z_2} \tag{4}$$

Führt man das natürliche Übersetzungsverhältnis für den Stator

$$\eta_{Z1} = \frac{Z_1}{j X_{12}}$$

und für den Rotor

$$\eta_{Z2} = \frac{Z_2}{j X_{12}}$$

in Gl. (3) ein, so ergibt sich daraus:

$$I_1 = \frac{U_1 - E_{21}}{Z_1 \Sigma} \qquad I_2 = \frac{U_2 - E_{12}}{Z_2 \Sigma} \tag{5}$$

Darin bedeuten:

$$E_{21} = \frac{1}{\eta_{Z2}} U_2 \qquad E_{12} = \frac{1}{\eta_{Z1}} U_1 \tag{6}$$

die elektromotorischen Kräfte, welche bei der nur einseitig gespeisten Maschine auf der anderen, ungespeisten Seite auftreten und auch gemessen werden können. Sie sind im allgemeinen frequenzabhängig, wie es aus ihren Definitionen ersichtlich ist. Zu ihrer Messung bei einer beliebigen Drehzahl benützt man die folgenden Beziehungen:

$$E_{21w} = \frac{f^2}{f_1 f_2} \cdot \frac{1}{\eta_{Z2}} U_{2w}, \quad E_{12w} = \frac{f^2}{f_1 f_2} \cdot \frac{1}{\eta_{Z1}} U_{1w} \tag{7}$$

Aus den Gl. (5) ist ersichtlich, dass man die Gesamtimpedanz des Stator- und Rotorkreises durch Multiplikation der komplexen Grösse Σ mit der Impedanz desselben Kreises erhält:

$$\vec{Z}_1 = Z_1 \Sigma, \quad \vec{Z}_2 = Z_2 \Sigma \tag{8}$$

Aus diesem Grund wird die komplexe und vom Schlupf abhängige Grösse Σ als «Gesamtimpedanzfaktor» der Asynchronmaschine bezeichnet.

Die Gl. (5) führen auf das Ersatzschema in Fig. 2, welches für beide Kreise getrennt in Betracht kommt. Das Ersatzschema eignet sich besonders für die mathematische Behandlung der Betriebsverhältnisse bei normalen Asynchronmaschinen in unsymmetrischen Schaltungen. Hiebei entfällt der zweite Teil für den Rotorkreis.

Auch für die elektrische Welle kann man das gegebene Ersatzschema sehr einfach verwenden; zur Erklärung der Leistungsübertragung im gemeinsamen Rotorkreis der beiden Motoren stösst man

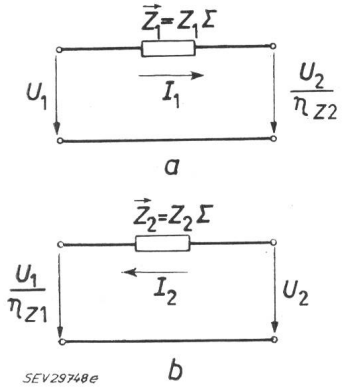

Fig. 2
Getrennte Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine
a für den Statorkreis
b für den Rotorkreis
Erklärungen siehe im Text

dabei auf keine Schwierigkeiten. In diesem Fall wird nur der zweite Teil des Ersatzschemas verwendet (Fig. 3).

Wird die Rotorspannung gleich Null, so vereinfachen sich die Gl. (5) zu:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 \Sigma} \qquad I_2 = \frac{-E_{12}}{Z_2 \Sigma} = \frac{-I_1}{\eta_{Z2}} \tag{9}$$

Damit sind alle Eigenschaften der Asynchronmaschine auf eine veränderliche Impedanz $Z_1 \Sigma$ beschränkt, die nur den Schlupf als Parameter hat.

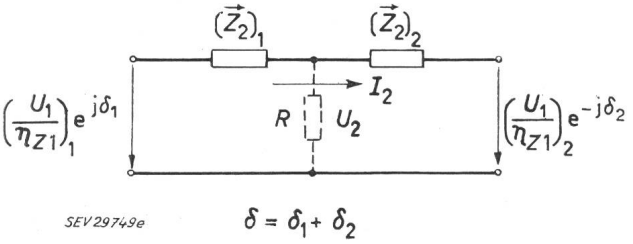

Fig. 3
Ersatzschaltbild der elektrischen Welle
Erklärungen siehe im Text

Zuletzt kann man im allgemeinen annehmen, dass das Spannungssystem unsymmetrisch ist, d.h. neben dem Mitsystem ist das Null- und Gegensystem bemerkbar. Durch das Überlagerungsprinzip können die Gl. (5) für diesen Fall in der Matrix-Darstellung wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{Vmatrix} I_{m1} \\ I_{g1} \\ I_{01} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \left(\frac{1}{Z_1 \Sigma}\right)_m & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{Z_1 \Sigma}\right)_g & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_{10}} \end{Vmatrix} \times \begin{Vmatrix} U_{m1} - E_{m21} \\ U_{g1} - E_{g21} \\ U_{01} \end{Vmatrix} \tag{10a}$$

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die Gleichungen für die Rotorströme lauten:

$$\left\| \begin{matrix} I_{m2} \\ I_{g2} \\ I_{02} \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} \left(\frac{1}{Z_2 \Sigma}\right)_m & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{Z_2 \Sigma}\right)_g & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_{20}} \end{matrix} \right\| \times \left\| \begin{matrix} U_{m2} - E_{m12} \\ U_{g2} - E_{g12} \\ U_{02} \end{matrix} \right\| \tag{10b}$$

Nun ist aber zu beachten, dass der Schlupf nicht bei allen Systemen der gleiche ist. Es soll daher ausführlich abgeklärt und gezeigt werden, wie man die Komponenten der Admittanzmatrizen für Stator- und Rotorkreise bestimmen kann.

Zum Nullsystem braucht man nicht viel zu bemerken. Da ein Nullsystem kein Drehfeld erzeugt, ist die vom Stator aus gesehene Gesamtimpedanz für das Nullsystem Z_{10} grössenordnungsmässig nichts anderes als die Stator-Streuimpedanz. Dies gilt sinngemäss auch für den Rotorkreis. Bei den mehrpoligen Motoren kann zwar das Nullsystem manchmal ein Drehfeld erzeugen [3], dieses Problem sei aber hier nicht behandelt.

Die andern Komponenten der Admittanzmatrixen von Stator und Rotor lassen sich nach den Gl. (1) und (4) leicht berechnen, wenn die Frequenzen f_1 und f_2 von vornherein bekannt sind.

Bezeichnet man den normalen, für das Mitsystem definierten Schlupf mit s, so ist der Schlupf im Gegensystem des Stators $2 - s$, das heisst, wenn die Mit- und Gegensysteme am Stator der Asynchronmaschine mitwirken, treten im Rotorkreis zwei Frequenzen auf, nämlich sf für das Mitsystem, und $(2 - s) f$ für das Gegensystem. Dagegen hat man im Statorkreis nur eine Frequenz die für beide Systeme gilt. Wenn aber ein Gegensystem mit der Frequenz sf in dem Spannungssystem des Rotors bemerkbar ist (hier sei ein aktives Gegensystem gemeint, was z. B. bei den Unsymmetrieerscheinungen der Rotorwicklungen vorkommt), dann wird eine Frequenz von der Grösse $(2s - 1) f$ im Statorkreis auftreten. Um einen besseren Überblick über das Frequenzpaar f_1, f_2 für alle Systeme zu gewinnen, sei auf Tabelle I hingewiesen. In dieser ist das Frequenzpaar für alle Systeme angegeben. Mit Hilfe derselben kann man alle Glieder der Admittanzmatrixen in Gl. (10a) und (10b) berechnen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Matrixgleichungen (10a) und (10b) auf einmal nur für eine Gruppe der Tabelle aufgestellt werden dürfen. Wenn in einem Problem die beiden Gruppen *I* und *II* gleichzeitig vorkommen, muss man sie zuerst getrennt lösen und dann einander überlagern.

Frequenzpaare im Mit- und Gegensystem für Stator und Rotor

Tabelle I

Gruppe	Stator-frequenz f_1	Rotor-frequenz f_2	Bemerkungen
Ia	f	sf	Mitsystem am Stator
Ib	f	$(2-s)f$	Gegensystem am Stator
IIa	f	sf	Mitsystem am Rotor
IIb	$(2s-1)f$	sf	Gegensystem am Rotor

3. Widerstandsdiagramm der Asynchronmaschine

Es sei angenommen, dass der Rotorkreis der Asynchronmaschine kurzgeschlossen ist. Unter dieser Annahme, welche den normalen Betrieb der Maschine kennzeichnet, ist die vom Netz aus gesehene Gesamtimpedanz der Asynchronmaschine nach Abschnitt 2:

$$\vec{Z}_1 = Z_1 \Sigma$$

Die Statorimpedanz Z_1 ist konstant und unabhängig vom Schlupf s, so dass alle Eigenschaften der Asynchronmaschine bei dem Strom-Spannungsverhältnis durch den Gesamtimpedanzfaktor Σ erklärt werden können. Dieser ist auf Grund der Gl. (4):

$$\Sigma = 1 + \frac{s X_{12}^2}{(R_1 + \mathrm{j} X_1)(R_2 + \mathrm{j} s X_2)} \tag{11}$$

Der Gesamtimpedanzfaktor Σ in Funktion von s stellt in der Komplex-Ebene einen Kreis dar (Fig. 4). Das Produkt $Z_1 \Sigma$ ergibt wiederum einen Kreis,

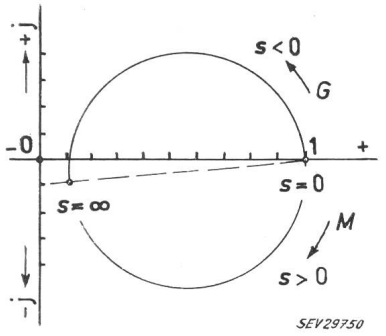

Fig. 4
Ortskurve des Gesamtimpedanzfaktors Σ
G Generator; *M* Motor
Weitere Erklärungen siehe im Text

welcher in der gleichen Ebene $|Z_1|$-mal vergrössert und um den Winkel $\varphi = \operatorname{arctg} X_1/R_1$ gedreht erscheint. Dies ist der wohlbekannte Widerstandskreis der Asynchronmaschine (Fig. 5). Der Kreis lässt sich sehr einfach aufzeichnen, da die Punkte für den Schlupf $s = \infty$ und $s = 0$ den gleichen Ohmschen Widerstand aufweisen und je einen Endpunkt des Durchmessers bilden [1]. Diese Eigenschaft lässt

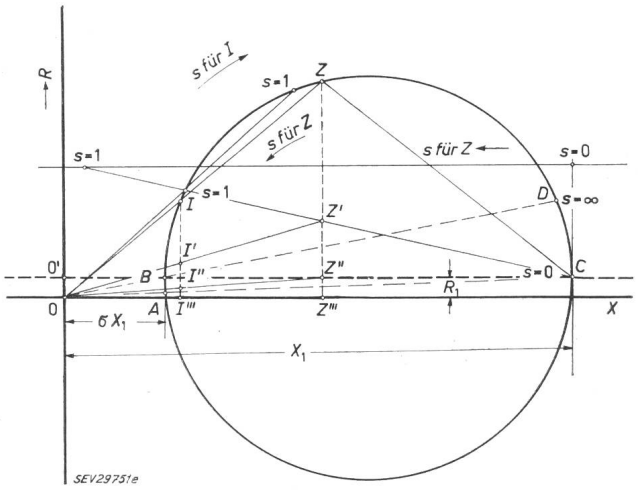

Fig. 5
Widerstands- und Strom-(Kreis)Diagramm der Asynchronmaschine
Erklärungen siehe im Text

sich leicht aus den Gl. (8) und (11) beweisen, wenn man in der betreffenden Beziehung einmal $s = 0$ und dann $s = \infty$ einsetzt und nach den einfachen Umformungen die reellen Anteile der Gesamtimpedanz miteinander vergleicht:

$$\begin{aligned} &\text{bei } s = 0: \quad (Z_1 \Sigma)_{s=0} = Z_1 = R_1 + \mathrm{j}\, X_1 \\ &\text{bei } s = \infty: (Z_1 \Sigma)_{s=\infty} = R_1 + \mathrm{j}\, \sigma X_1 \end{aligned} \tag{12}$$

wobei

$$\sigma = 1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} \tag{13}$$

Wenn man nun die Statorimpedanz Z_1 und den Streukoeffizienten σ kennt, kann man die zwei Punkte $C\,(X_1, R_1)$, $B\,(\sigma X_1, R_1)$ in ein kartessisches Koordinatensystem eintragen und den beschriebenen Kreis aufzeichnen. Der Punkt C in Fig. 5 entspricht dem Leerlaufzustand, welcher leicht gemessen werden kann. Dagegen ermittelt man den Punkt B aus dem Kurzschlussversuch, der ziemlich schwer auszuführen ist und oft falsche Resultate gibt, wenn man die Prüfspannung zu stark vermindert, um den gefährlichen Kurzschlußstrom klein zu halten. Hier spielt die Änderung des Streukoeffizienten durch die teilweise Sättigung der Zähne des Eisenkörpers eine bedeutende Rolle, die keinesfalls vernachlässigt werden darf. Deshalb ist es zu empfehlen, ausser dem Punkt C noch einen normalen Betriebspunkt auszumessen und damit den Punkt Z in Fig. 5 zu bestimmen, welcher ziemlich weit vom Punkt C liegt und deshalb mit einer genügenden Genauigkeit aufgezeichnet werden kann. Der Kreisbogen von Punkt C bis Z entspricht möglichst genau der Wirklichkeit. In diesem Fall braucht man keinen dritten Punkt zu bestimmen, da der Kreismittelpunkt bereits bekannt ist. Von diesem Versuch ausgehend kann man den Streukoeffizienten σ für den normalen Sättigungszustand der Maschine bestimmen, denn der Durchmesser des Kreises ist $(1 - \sigma)\, X_1$.

Für einen beliebigen Betrieb ergibt sich die Gesamtimpedanz aus den Gl. (8) und (11) wie folgt:

$$\vec{Z}_1 = R_1 + \frac{1}{|\eta_{Z2}|^2}\left[R_2 + \frac{1-s}{s} R_2\right] + \\ + \mathrm{j}\left[X_1 - \frac{1}{|\eta_{Z2}|^2} X_2\right] \tag{14}$$

Daraus ist ersichtlich, dass der Ohmsche Anteil der Gesamtimpedanz aus drei Summanden besteht. Diese sind der Widerstand R_1, $\frac{1}{|\eta_{Z2}|^2} R_2$ und der Widerstand $\frac{1}{|\eta_{Z2}|^2} \cdot \frac{1-s}{s} R_2$, welcher der abgegebenen oder aufgenommenen Wirkleistung entspricht. Wenn man das Produkt $\vec{Z}_1 \cdot |I_1|^2$ physikalisch betrachtet, sieht man sofort, dass der reelle Anteil dieses Produktes der Wirkleistung der Maschine entsprechen muss. Der reelle Anteil der Grösse $\vec{Z}_1 \cdot |I_1|^2$ lässt sich, wie folgt, aufschreiben:

$$\mathrm{Re}\,[\vec{Z}_1 \cdot |I_1|^2] = R_1 \cdot |I_1|^2 + R_2 \cdot |I_2|^2 + \\ + \frac{1-s}{s} R_2 \cdot |I_2|^2 \tag{15}$$

Es sei angenommen, dass der Punkt Z' in Fig. 5 die Strecke $\overline{ZZ''}$ in zwei Teile teilt und zwar so, dass $\overline{Z'Z''}/\overline{ZZ''} = s$ ist. Nach den Gl. (14) und (15) stellen die Strecken

$\overline{Z'''Z''}$ die vom Widerstand R_1 aufgenommene Wirkleitung,
$\overline{Z''Z'}$ die vom Widerstand R_2 aufgenommene Wirkleitung und
$\overline{Z'Z}$ die mechanische Leistung

dar, wenn man die ganze Wirkleistung mit einem gewissen Maßstab auf die Strecke $\overline{ZZ'''}$ geteilt annimmt. Wie von dieser Verteilung ausgehend leicht zu beweisen ist, bildet die Ortskurve des Punktes Z' eine über die Punkte für $s = 1$ und $s = 0$ gelegte Gerade, die als «mechanische Leistungsgerade des Widerstandskreises» benannt werden soll. Es kann auch gezeigt werden, dass die Strecke $\overline{ZZ''}$, die der vom Stator auf den Rotor übertragenen Leistung entspricht, gleichzeitig das Drehmoment der Asynchronmaschine darstellt. Der Durchmesser $\overline{BC}$ ist die Ortskurve des Punktes Z''. Er soll als «Drehmomentgerade des Widerstandskreises» benannt werden.

4. Strom-(Kreis)-Diagramm der Asynchronmaschine

Im normalen Betrieb ist der Statorstrom der Asynchronmaschine proportional dem reziproken Wert der Gesamtimpedanz $Z_1 \Sigma$. Bekanntlich ermöglicht dieser Zusammenhang unter der Voraussetzung einer konstanten Spannung auf einfacher Weise die Bestimmung des Stromdiagrammes aus dem Widerstandsdiagramm (Fig. 5). Man trägt dabei auf den Vektoren, welche die laufenden Punkte des Widerstandsdiagrammes mit dem Ursprung verbinden, die mit $|U|$ multiplizierten reziproken Werte, $|U|/|Z_1 \Sigma|$ ab. Die somit erhaltenen Punkte liegen wiederum auf demselben Kreis [1]. Wenn also $\overline{OZ}$ mit einem gewissen Maßstab die Gesamtimpedanz $Z_1 \Sigma$ darstellt, so wird die Strecke $\overline{OI}$ in der gleichen Figur den Statorstrom für denselben Schlupf wiedergeben. Um das Widerstandsdiagramm als Stromdiagramm zu benützen, braucht man nur den Maßstab für den Strom zu kennen. Die Darstellung der Impedanz und ihre anschliessende Inversion scheint im ersten Augenblick ein Umweg zu sein gegenüber der unmittelbaren Aufzeichnung der Stromortskurve. Infolge der sehr günstigen Eigenschaft des Widerstandskreises mit den kritischen Punkten für $s = \infty$ und $s = 0$ lässt sich aber derselbe oft wesentlich einfacher zeichnen als die Stromortskurve.

Es wurde bereits bewiesen, dass sich die Strecke $\overline{ZZ'''}$ nach Ausnützung der aufgenommenen Leistung leicht unterteilen lässt. Mit Hilfe dieser Unterteilung kann die Strecke $\overline{II'''}$, welcher unter der Voraussetzung der konstanten Spannung nichts anderem als einer aufgenommenen oder gegebenenfalls einer abgegebenen Wirkleistung entspricht, genau so unterteilt werden, dass bei einem bestimmten Maßstab

$\overline{II'}$ die mechanische Leistung und
$\overline{II''}$ das Drehmoment an der Welle

darstellen. Die Ortskurve des Punktes I' ist eine über die Punkte A und D in Fig. 5 gelegte Kurve, die von der Gerade $\overline{AD}$ nur wenig abweicht. Diese Gerade ist in der Praxis bereits als Drehmoment-Gerade bekannt.

Nachdem die Beziehungen zwischen dem Strom- und Widerstandsdiagramm abgeklärt sind, kann nun ein praktisches Verfahren angegeben werden, um das Stromdiagramm möglichst schnell und genau erhalten zu können. Die bisherigen Bestimmungsmethoden eines Stromdiagrammes sind unbequem, da es nicht möglich ist, durch vorgedruckte Ortskurvenscharen die jeweilige Zeichnung des Diagrammes zu ersparen [4]. Die hier angegebene Methode lässt dies aber ohne Schwierigkeiten auch bei vorgedruckten Ortskurvenscharen zu.

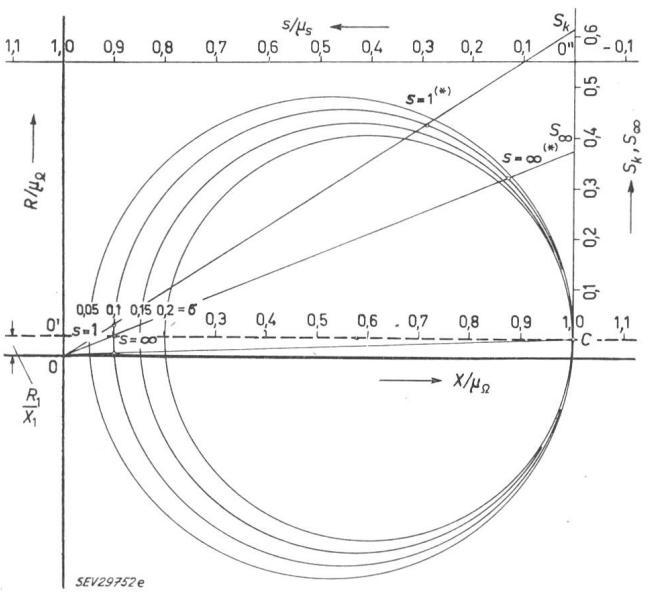

Fig. 6

Ortskurvenscharen des Widerstand- und Stromdiagrammes der Asynchronmaschine

Die mit (*) bezeichneten Punkte gelten für das Stromdiagramm
Erklärungen siehe im Text

Es sei vorläufig angenommen, dass der Ohmsche Statorwiderstand R_1 gleich null ist. Wenn man den Wert der Statorreaktanz X_1 bei der Zeichnung des Widerstandsdiagrammes als Längeneinheit annimmt, so bekommt man Ortskurven, die sich vom gemeinsamen Punkt C ausgehend nur durch die verschiedenen Streukoeffizienten unterscheiden lassen (Fig. 6). Sofern der Ohmsche Statorwiderstand R_1 wie gewöhnlich nicht gleich null ist, wird sich die Abszisse etwas verschieben und eine neue Stellung einnehmen, die von der alten $R_1 = 0$-Abszisse um R_1/X_1-Einheiten tiefer liegt. Wenn man also die Abszisse des Koordinaten-Systems nach unten verschiebt, ist der Kreis mit dem vorbestimmten Streukoeffizienten σ das gesuchte Widerstands- und zugleich Stromdiagramm der Asynchronmaschine.

Es sei darauf hingewiesen, dass es nicht unbedingt nötig ist, nur das Widerstandsdiagramm der Asynchronmaschine zu verwenden, wenn man den Betrieb auf den vorgedruckten Ortskurvenscharen untersuchen will. Die gegenseitige Beziehung zwischen Widerstands- und Stromdiagramm ermöglicht es, auch für das gewöhnliche Kreisdiagramm der Asynchronmaschine vorgedruckte Ortskurvenscharen anzugeben. Zu diesem Zweck sollen ausser dem Massstab μ_Z für Widerstände, auch die Maßstäbe μ_I für Strom, μ_P für Leistung und μ_M für Drehmoment bekannt sein.

Wie erwähnt, stellt die Strecke $\overline{OA}$ in Fig. 5 bei einem gewissen Maßstab den idealen Leerlaufstrom dar, welcher dem Widerstand $\overline{OC}$ entspricht. Dieser, anlässlich der Aufzeichnung des Widerstandsdiagrammes angenommene Maßstab ist:

$$\mu_Z = X_1 \quad [\Omega/\text{Längeneinheit}] \tag{16}$$

Wenn man das bekannte Verhältnis $\overline{OA} \times \overline{OC} = \overline{OM}^2 - \overline{CM}^2$ bei einem Kreis berücksichtigt, und hier nur die Grösse $\overline{OA}$ mit dem Maßstab μ_i und die anderen mit μ_Z umgerechnet ausdrückt, erhält man nach einigen Umformungen den gewünschten Maßstab für den Statorstrom:

$$\mu_i = \frac{X_1}{R_1^2 + \sigma X_1^2} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad [\text{A/Längeneinheit}] \tag{17}$$

Daraus ergibt sich der Maßstab für die Leistung:

$$\mu_P = \frac{X_1}{R_1^2 + \sigma X_1^2} \; U^2 \quad [\text{W/Längeneinheit}] \tag{18}$$

und für das Drehmoment:

$$\mu_M = \frac{\mu_P}{1000} \cdot \frac{\eta}{974} \quad [\text{kgm/Längeneinheit}] \tag{19}$$

n bedeutet die Drehzahl der Asynchronmaschine in U./min und U die verkettete Spannung.

Die Abhängigkeit der Gesamtimpedanz vom Schlupf s und dadurch auch des Statorstromes lässt sich leicht bestimmen, da die zwei Punkte für $s = 0$ und $s = \infty$ bekannt sind. Wenn noch ein Betriebspunkt mit seinem Schlupf bekannt ist, kann der Maßstab μ_s sofort ermittelt werden. In der Praxis begeht man hier oft einen Fehler, der unter Umständen bis zu 20% betragen kann. Dieser Fehler, bei der Annahme der linearen Verteilung des Schlupfes, wird von den Hystereseverlusten im Rotor verursacht und macht sich besonders bei sehr kleinem Schlupf bemerkbar. Die Mitwirkung der Hystereseverluste neben dem Ohmschen Rotorwiderstand lässt sich aber leider nicht berücksichtigen.

Wie aus den Fig. 5 und 6 ersichtlich, ist die Bestimmung der Punkte $s = \infty$ und $s = 1$ für den Statorstrom ziemlich ungenau, da die Strecke $\overline{OO'}$ bei Motoren normaler Grösse sehr klein ist. Diese Punkte braucht man aber zur Ermittlung der üblichen Moment- und Mechanische-Leistungs-Geraden.

Mit Hilfe des bereits bestimmten Streukoeffizienten σ lassen sich diese Punkte einfach ermitteln. Zu diesem Zwecke wurde das Diagramm in Fig. 6 mit einer aus Punkt C senkrecht verlaufenden Gerade mit entsprechender Unterteilung versehen. Die Strecken

$$\overline{CS}_k = (\overline{CO''} \cdot \mu_s + \overline{OO'}) \frac{1-\sigma}{\sigma} \qquad (20)$$

$$\overline{CS}_\infty = \overline{OO'} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma} \qquad (21)$$

werden auf diese Gerade aufgetragen. Die Punkte S_k und S_∞ mit dem Ursprung verbindenden Geraden schneiden den betreffenden Kreis an den Punkten für $s = 1$ und $s = \infty$ (Fig. 6 und 7). Auf den sehr einfachen geometrischen Beweis soll hier nicht eingegangen werden.

Die vorgedruckten Ortskurven sind nur bei kleinen Schlüpfen von Bedeutung, denn die bei grossen Schlüpfen entstehende Stromverdrängung verformt den Ossanna-Kreis, auf welchem alle Überlegungen beruhen, beträchtlich.

Die Anwendung von Ortskurven soll ein Beispiel veranschaulichen.

An einer Asynchronmaschine, deren Stromdiagramm gesucht sei, ist die gemessene ideale Leerlaufimpedanz:

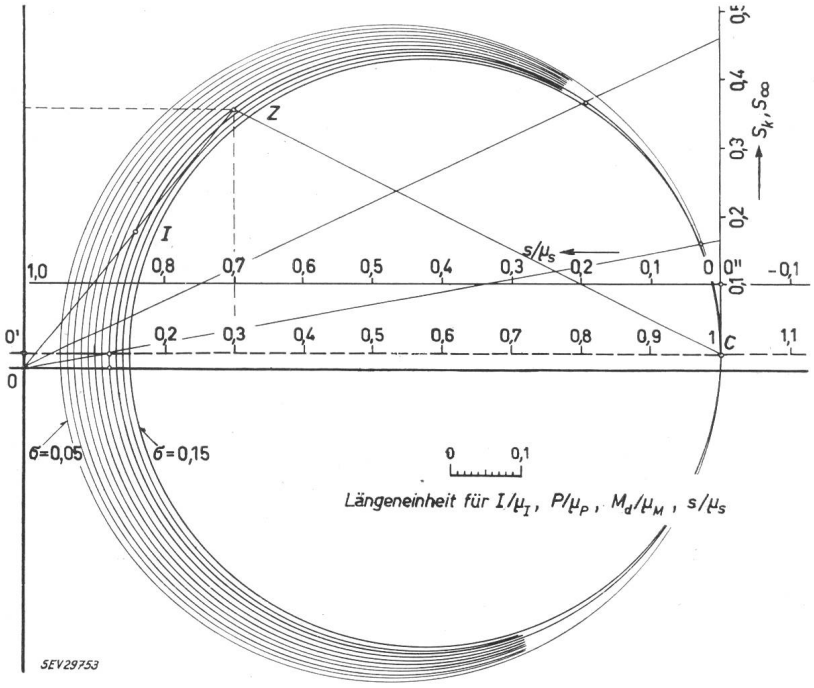

Fig. 7
Beispiel zur Verwendung des vorgedruckten Stromdiagrammes von Asynchronmaschinen
Erklärungen siehe im Text

$R_1 = 0{,}75\ \Omega$/Phase; $X_1 = 34\ \ \Omega$/Phase; $s = 0$ (Punkt C in Fig. 7)

R_1 ist der rein Ohmsche Widerstand des Statorkreises. Man macht noch einen Belastungsversuch und misst die folgenden Grössen:

$R = 12{,}75\ \Omega$/Phase; $X = 10{,}2\ \ \Omega$/Phase; $s = 0{,}08$ (Betriebspunkt Z bei 380 V).

Der Maßstab für den Widerstand ist also:

$$\mu_Z = 34\ \Omega/\text{Längeneinheit}$$

Die wirkliche Abszisse liegt für diese Asynchronmaschine mit $0{,}75/34 = 0{,}022$ Längeneinheiten unterhalb der im vorgedruckten Diagramm gestrichelten Achse (Fig. 7).

Man betrachtet zuerst alle Ortskurven als Widerstandsdiagramme mit verschiedenen σ, und zeichnet darauf den Betriebspunkt Z auf. Daraus ergibt sich die Ortskurve der Asynchronmaschine, die man auch als Widerstands- und Stromdiagramm verwenden kann, zu $\sigma = \approx 0{,}12$. Die anderen Massstäbe ergeben sich aus den Gl. (17), (18) und (19) wie folgt:

Für den Strom

$$\mu_i = \frac{34}{0{,}75^2 + 0{,}12 \cdot 34^2} \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} = 64{,}25\ \text{A/Längeneinheit}$$

Für die Leistung

$$\mu_P = \sqrt{3} \cdot 64{,}25 \cdot 380 = 42{,}2\ \text{kW/Längeneinheit}$$

Für das Drehmoment ($n_{syn.} = 1000$ U./min)

$$\mu_m = \frac{42\,200}{1000 \cdot 974}\ 1000 = 43{,}3\ \text{kgm/Längeneinheit}$$

Die Gerade $\overline{CZ}$ schneidet die Schlupf-Gerade bei 0,2. Der Maßstab für den Schlupf ist daher:

$$\mu_s = \frac{0{,}08}{0{,}2} = 0{,}4$$

Zur Ermittlung der kritischen Punkte ($s = 1$ und $s = \infty$) für den Statorstrom ergeben sich:

$$\overline{CS}_k = (0{,}1 \cdot 0{,}4 + 0{,}022) \frac{1-0{,}12}{0{,}12} = 0{,}455\ \text{Längeneinheit}$$

$$\overline{CS}_\infty = 0{,}022 \frac{1-0{,}12}{0{,}12} = 0{,}162\ \text{Längeneinheit}$$

Zur Bestimmung des Schlupfes für einen Betriebspunkt auf dem Diagramm kann entweder die hier angegebene Schlupfbestimmung, eine der Abszisse parallele Gerade, oder eine gewöhnliche Schlupf-Gerade verwendet werden. Da sich die zweite Methode aber für ein vorgedrucktes Diagramm nicht eignet, wird die erste Methode empfohlen.

In der oben beschriebenen Weise wurde dieses Verfahren bei zwei Motoren angewendet. Der Betriebspunkt bei 3/4-Last wurde aus einer Messung ermittelt und darauf die anderen Betriebspunkte bei 1/2- und 1/1-Last auf den vorgedruckten Ortskurven bestimmt. Der Vergleich zwischen den gezeichneten und gemessenen Werten ergibt eine gute Übereinstimmung, wobei der Fehler max. 10% beträgt, welcher auf die Hystereseverluste, die Teilsättigung der Zähne und die Stromverdrängung zurückzuführen ist (Tabelle II).

Vergleich zwischen zeichnerisch ermittelten und gemessenen Werten

Tabelle II

Schlupf %	Strom A	Impedanz Ω	Aufgenommene Leistung kW	Mechanische Leistung kW	cos φ %	Streukoeffizient σ [1])
Motor I: 500 V, 350 A, cos φ = 0,9, 258 kW, 990 U./min						
0,85	272 (270)	1,07 (1,07)	201 (201)	192 (193)	85 (86)	0,061 (0,058)
0,58	204 (195)	1,43 (1,48)	150 (140)	137 (131)	80 (81)	—
1,14	365 (351)	0,83 (0,82)	279 (270)	266 (257)	88 (89)	—
Motor II: 500 V, 84 A, cos φ = 0,84, 55 kW, 735 U./min						
1,62	65 (65)	4,4 (4,4)	45 (45)	40 (41)	79 (79)	0,085 (0,09)
1,16	52 (51)	5,5 (5,5)	32 (31)	27 (28)	71 (70)	—
2,00	78 (83)	3,7 (3,4)	56 (60)	50 (54)	82 (91)	—

Die eingeklammerten Zahlen sind gemessene Werte.

[1]) Mittels Kurzschlussmessung bestimmt.

Zusammenfassung

Die Theorie der Asynchronmaschine kann in einfacher Darstellung mit grosser Anschaulichkeit behandelt werden. Es wird gezeigt, dass alle Eigenschaften der Asynchronmaschine im Gesamtimpedanzfaktor Σ enthalten sind, welcher für den Stator- und Rotorkreis gilt. Dabei wird eine einfache Bestimmung für die richtige Drehmomentkurve des Stromdiagrammes angegeben, obwohl die Abweichung von einer Drehmoment-Geraden nicht so gross ist. Das Stromdiagramm der Asynchronmaschine kann mittels vorgedruckten Ortskurven rasch ermittelt werden. Die praktische Anwendung solcher Kurven wird in einem Beispiel gezeigt.

Literatur

[1] *Nürnberg, W.:* Die Asynchronmaschine. Ihre Theorie und Berechnung unter besonderer Berücksichtigung der Keilstab- und Doppelkäfigläufer. Berlin: Springer 1952.

[2] *Hütte.* Des Ingenieurs Taschenbuch. Hg. v. Akademischen Verein Hütte, e. V. in Berlin. 28. Aufl., Bd. IV A. Berlin: Ernst 1957. 1. Abschn., II, F; S. 278...303: Asynchronmaschinen.

[3] *Jordan, H.* und *F. Lax:* Vorausberechnung des Nullsystems unsymmetrischer Schaltungen von Drehstrom-Asynchronmaschinen. ETZ-A Bd. 75(1954), Nr. 20, S. 696...699.

[4] *Fraunberger, F.:* Das Widerstandsdiagramm der Asynchronmaschine. ETZ-A Bd. 78(1957), Nr. 17, S. 611...613.

Adresse des Autors:

M. Canay, Doz. Ing., Stockmattstrasse 72, Baden (AG).

Fahrbare Gleichspannungsgeneratoren für Kabelprüfungen

Von *K. Antolic*, Zürich

621.311.6.024-182.3 : 621.315.2.001.4

Die Prüfung verlegter Hochspannungskabel mittels Gleichspannung, die von den Energieversorgungs-Unternehmen immer häufiger gefordert wird, verlangt ortsveränderliche Gleichspannungs-Generatoren begrenzter Abmessungen, rascher Bereitstellung und einfacher Bedienung. Ausgehend von den verschiedenen Möglichkeiten der Gleichspannungsgewinnung wird ein mit einem Isolierkern-Transformator ausgerüsteter, fahrbarer Generatortyp, über den bereits mehrjährige Betriebserfahrungen vorliegen, beschrieben.

Le contrôle, à l'aide d'une tension continue, de câbles à haute tension installés est de plus en plus souvent exigé par les entreprises de distribution d'énergie électrique. Pour cela, il faut disposer d'une génératrice transportable, d'un faible encombrement, rapidement prête à fonctionner et d'un service simple. Après avoir indiqué les différentes possibilités d'obtenir une tension continue, l'auteur décrit un type de génératrice sur chariot, équipée d'un transformateur à noyau isolant, qui est déjà utilisée avec succès depuis plusieurs années.

Einleitung

Im Gegensatz zu den auf Stück- und Typenprüfungen beschränkten Spannungsprüfungen an Hochspannungskabeln mittels Wechsel- und Stoßspannungen, ermöglicht die Verwendung von Gleichspannung die Ausdehnung der Spannungsprüfung auf die gesamte Fertigungslänge, ja sogar auf die verlegten Teillängen von Kabeln, was von den Elektrizitätswerken in zunehmendem Masse gefordert wird. Gleichspannungsprüfeinrichtungen für Hochspannungskabel werden somit nicht nur in stationärer, für die Prüf- und Versuchsfelder der Kabelfabriken bestimmter, sondern auch in ortsveränderlicher, der Prüfung der verlegten Kabel dienender Ausführung benötigt. Die Abmessungen solcher Generatoren müssen in den für die Bahn- und Schiffsverfrachtung, sowie den Strassentransport geeigneten Grenzen gehalten werden, wobei anzustreben ist, dass auch diese ortsveränderlichen Prüfanlagen nach Herstellen der notwendigen Anschlüsse sofort betriebsbereit sind, ohne erst aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden zu müssen. Eine Ausnahme bilden lediglich die für Flugverfrachtung bestimmten Gleichspannungsanlagen.

Diese Anforderungen führten zur Entwicklung von Gleichspannungsprüfeinrichtungen raumsparender Bauart, die in fester Verbindung mit einem als Kraftfahrzeuganhänger gebauten Wagen Messungen am jeweiligen Verlegungsort gestatten, aber auch in dieser oder in ortsfester Ausführung in Prüflokalen Verwendung finden. Eine der möglichen Lösungen der gestellten Aufgabe wird im folgenden beschrieben, eine Lösung, deren Zweckmässigkeit durch eine mehr als fünf Jahre währende Betriebserfahrung bestätigt wurde. Es handelt sich um Aggregate für Dauerbetriebsspannungen von 500 und 750 kV.

Erzeugung der Gleichspannung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um hohe Gleichspannungen zu erzeugen. Sieht man von der elektrostatischen Erzeugung, die hier nicht in Frage kommt, ab, so unterscheiden sich die einzelnen Generatorschaltungen, denen die Gleichrichtung erregender Wechselspannungen gemeinsam ist, in der Art und Weise, wie die Spannung im Generator hochgetrieben wird, ob dies vorwiegend transformatorisch, also mit Hilfe von magnetischen Wechselfeldern, oder vorwiegend elektrisch, durch Umladen von Kondensatoren erfolgt. Fig. 1 zeigt zwei grundsätzlich unterschiedliche Schaltungen:

a) Die transformatorische Kaskadenschaltung mit Mehrfacherregung und Spannungsverdopplung (Zweiweggleichrichtung);

b) die Greinacher-Schaltung mit Einfacherregung und Spannungsvervielfachung.

Bei a) werden die zu einer Stufe gehörigen beiden Spannungsverdopplungs-Kondensatoren C_1 und C_2 abwechselnd geladen und im wesentlichen nur in den angeschlossenen Prüfling teilentladen, bei der Greinacherschaltung hingegen tritt eine innere Umladung hinzu, indem die Ladung von C_2