**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens
**Band:** 21 (1930)
**Heft:** 13

**Artikel:** Über Phasenkompensation von Asynchronmotoren
**Autor:** Binlder, E.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1058266

**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:** 22.08.2025

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

au montage d'un compteur dans une installation à 500 V. Il avait cru avoir supprimé le courant en dévissant les fusibles fixés au haut de la planchette du compteur. Mais ces coupe-circuit étaient intercalés après le compteur dans le circuit, de sorte que les fils d'arrivée au compteur étaient restés sous tension. Il en résulta que le monteur fut électrocuté lorsqu'il saisit ces fils. Un autre accident eut lieu à la suite d'un mouvement irréfléchi d'un monteur occupé à déconnecter un compteur sous tension; il en résulta des brûlures par l'arc de court-circuit, nécessitant un traitement de plusieurs semaines. La pénétration de courant-fort à tension d'éclairage dans une installation de sonnerie, par suite d'un défaut d'isolement à une lampe à tirage, occasionna un accident qui aurait facilement pu avoir des suites graves. Une jeune fille, en train de se baigner, saisit la chaînette de la sonnerie fixée près de la baignoire et fut électrisée à tel point qu'elle ne put lâcher prise jusqu'à ce que la bonne, survenue par hasard, eut enlevé les coupe-circuit de l'installation. Le passage du courant pendant plusieurs minutes avait occasionné des brûlures aux deux mains. Cet accident montre qu'il est prudent d'isoler électriquement aussi les chaînettes de sonnerie installées dans des chambres de bain, ou autres locaux similaires.

---

# Ueber Phasenkompensation von Asynchronmotoren.

Von *E. Bindler,* dipl. Ing.,
Assistent am Elektrotechnischen Institut der E.T.H. Zürich.

621.316.761.2 : 621.3.072.7

*In diesem Aufsatze wird gezeigt, wie es möglich ist, von der Impedanz der Drehstromasynchronmaschine ausgehend, Methoden für ihre Kompensation abzuleiten. Es werden darauf einige prinzipielle Schaltungen angegeben und die Theorie der einfachsten Methode entwickelt, wobei das theoretisch abgeleitete Impedanzdiagramm durch praktische Messungen nachkontrolliert wird.*

*Im speziellen wird auch die Abhängigkeit zwischen der Drehzahl der Kompensatormaschine und dem Schlupfe der Asynchronmaschine bei fremdangetriebenem, eigenerregtem Kompensator angegeben.*

*L'auteur montre comment on peut déduire de l'impédance de la asynchrone triphasée des méthodes pour compenser cette impédance. Il indique ensuite quelques schémas de principe et développe la théorie de la méthode la plus simple, puis contrôle par des mesures le diagramme d'impédance déduit théoriquement.*

*En particulier, l'auteur indique la relation qui existe entre et le glissement de la machine asynchrone et le nombre de tours de la machine compensée à auto-excitation et entraînement séparé.*

Das allgemeine Verhalten der transformatorisch wirkenden Maschinen lässt sich bekanntlich sehr gut aus ihren Stromdiagrammen übersehen. Die Darstellung dieser Diagramme erfolgt vielfach analytisch, indem man die Koordinaten des Mittelpunktes und den Radius des Stromkreises bestimmt. Anhand dieser Daten lässt sich der Stromkreis konstruieren (Ossanakreis). Es ist aber auch möglich, die Konstruktion dieses Diagrammes auf dem Umwege über die Impedanzdarstellung mit Hilfe der komplexen Ebene auszuführen. Diese Methode, die physikalisch übersichtlich ist und auch genauer scheint, wird seit vielen Jahren von Prof. Dr. K. Kuhlmann in seiner Vorlesung angewendet.

Darnach lautet der Ausdruck für die Impedanz des Asynchronmotors [1]):

$$\mathfrak{Z}_A = \frac{\mathfrak{E}_K}{\mathfrak{J}_{S1}} = r_S + j\omega_1 L_{SS\Delta} + \frac{\omega_1^2 L_{RS\Delta} L_{SR\Delta}}{\frac{r_R}{s} + j\omega_1 L_{RR\Delta}} = Z_A \varepsilon^{j\varphi} \qquad (1)$$

[1]) K. Kuhlmann, Mitteilungen der Phys. Gesellschaft Zürich 1919, No. 19.
K. Kuhlmann, Elektro-Journal 1924, Heft 4.
(Die Ableitung dieses Impedanzdiagrammes kann auch vektoriell geschehen.)

wobei man unter

$r_S$ Widerstand einer Statorphase
$r_R$ Widerstand einer Rotorphase
$L_{SS\Delta}$ Drehinduktivität des Stators $\cong \frac{m_S}{2} L_{SS}$; $L_{SS}$ = Induktivität einer Statorphase.
$L_{RR\Delta}$ Drehinduktivität des Rotors $\cong \frac{m_R}{2} L_{RR}$; $L_{RR}$ = Induktivität einer Rotorphase.
$L_{RS\Delta}$ gegenseitige Drehinduktivität vom Rotor auf den Stator $= \frac{m_R}{2} L_{RS}$
$L_{SR\Delta}$ gegenseitige Drehinduktivität vom Stator auf den Rotor $= \frac{m_S}{2} L_{SR}$
$\omega_1$ Kreisfrequenz des Netzes $2\pi f$.
$s$ Schlupf des Asynchronmotors $= \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$
$\omega_2$ elektr. Kreisfrequenz der Rotation
$m_S$, $m_R$ Stator- bzw. Rotorphasenzahl
$\mathfrak{E}_K$ Phasenspannung im Stator
$\mathfrak{J}_{S1}$ Statorstrom in Phase 1 des Asynchronmotors
$\mathfrak{Z}_A$ resultierende Impedanz des Asynchronmotors

versteht.

Im speziellen Falle des Drehstrom-Asynchronmotors ist

$$m_S = m_R = 3.$$

Diese Impedanz stellt einen Kreis dar, dessen Radiusvektor sich berechnet zu[2]):

$$\mathfrak{R}_A = -j \frac{\omega_1^2 L_{SR\Delta} L_{RS\Delta}}{2 L_{RR\Delta} \omega_1} = -j \frac{X_{SR\Delta} X_{RS\Delta}}{2 X_{RR\Delta}}.$$

Die nötigen Konstanten zur Darstellung des Kreises lassen sich schon durch einen Leerlaufversuch bestimmen; bei genaueren Untersuchungen ist es natürlich notwendig, mehrere Versuche auszuführen.

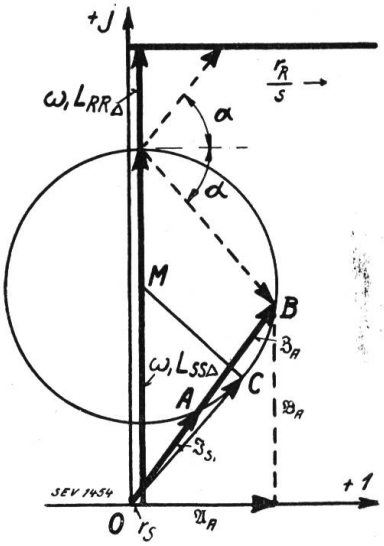


Fig. 1.
Impedanzdiagramm des Drehstromasynchronmotors.
$OA = \mathfrak{J}_{S1}$ $OB = \mathfrak{Z}_A$
$OB = \sqrt{\mathfrak{E}_K}$
Winkel $(\mathfrak{Z}_A \mathfrak{A}_A) = \varphi$.

Aus Fig. 1 ersieht man, dass es auch ohne eine weitere Inversion möglich ist, den einer Impedanz zugehörigen Strom abzulesen.

Es berechnet sich $\mathfrak{E}_{Rv}$ bei dieser Schaltung (Fig. 2) zu:

$$\mathfrak{E}_{Rv} = \mathfrak{J}_{R1} \sqrt{3}\, \varepsilon^{j30} (r_R + j s \omega_1 L_{RR\Delta}) + j s \omega_1 L_{SR\Delta} \mathfrak{J}_{S1} \sqrt{3}\, \varepsilon^{j30}. \quad (2)$$

Im speziellen Falle des normal laufenden Asynchronmotors ist

$$\mathfrak{E}_{Rv} = 0.$$

Betrachtet man die Impedanz des Asynchronmotors, so

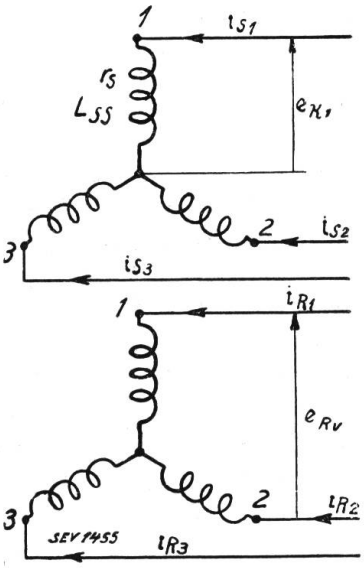


Fig. 2.
Schema des Asynchronmotors.

[2]) Bloch, Die Ortskurven der graphischen Wechselstromtechnik.

sieht man, dass diese sich in zwei Teile, einen imaginären und einen weiteren reellen, zerlegen lässt.

$$\mathfrak{Z}_A = \mathfrak{A}_A + \mathfrak{B}_A = A_A + jB_A.$$

Die resultierende Impedanz hat demzufolge, solange $B$ verschieden von 0 ist, eine Phasenverschiebung $\varphi$ gegenüber der reellen Achse, somit auch gegenüber der Statorspannung. Daher bezieht die Maschine eine zusätzliche Blindleistung, die eine Funktion von $\varphi$ ist und deren Grösse $J_A E_A \sin\varphi$ ist. Ein Masstab für die Grösse dieser Leistung ist durch den Vektor $\mathfrak{B}_A$ gegeben. Der erstrebenswerte Zustand ist, die Blindleistung auf ein Minimum zu reduzieren. Dies ist gleichbedeutend mit folgender Relation:

$$B_A = 0 \qquad Z_A \sin\varphi = 0. \tag{3}$$

Nach genauerer Entwicklung dieser Formel lässt sich der physikalische Sinn der Kompensation erkennen und somit die möglichen Kompensationsschaltungen daraus ableiten. Die genauere Untersuchung dieser ist in Form einer Diplomaufgabe von HH. E. Bindler, M. Kieser und E. Maier im Oktober und November 1928 an der E. T. H. durchgeführt worden. Dieser Arbeit entnehme ich auch teilweise die jetzt folgenden Ableitungen und Ueberlegungen.

$$\mathfrak{Z}_A = r_A + j\omega_1 L_{SS\Delta} + \frac{\omega_1^2 L_{SR\Delta} L_{RS\Delta}}{\frac{r_R}{s} + j\omega_1 L_{RR\Delta}} =$$

$$= \left\{(r_A + j\omega_1 L_{SS\Delta})(r_R^2 + s^2\omega_1^2 L_{RR\Delta}^2) + s\omega_1^2 L_{SR\Delta} L_{RS\Delta}(r_R - j\omega_1 s L_{RR\Delta})\right\} \frac{1}{r_R^2 + s^2\omega_1^2 L_{RR\Delta}^2}$$

$$Z_A \sin\varphi = 0 = B_A.$$

$$\omega_1 L_{SS\Delta}(r_R^2 + s^2\omega_1^2 L_{RR\Delta}^2) - \omega_1 L_{RR\Delta} s^2\omega_1^2 L_{SR\Delta} L_{RS\Delta} = 0.$$

Führt man noch die durch Konstruktion der Maschine gegebene Definition $\frac{L_{SR\Delta}}{L_{SS\Delta}} = K$, so folgt nach einiger Umformung:

$$L_{RR\Delta}^2 - K L_{RS\Delta} L_{RR\Delta} + \left(\frac{r_R}{s\omega_1}\right)^2 = 0. \tag{4}$$

Diese Gleichheit und somit auch die vollständige Phasenkompensation ist erreichbar:

1. durch Variation von $L_{RR\Delta}$ ausserhalb der Asynchronmaschine, um den Wert von $L_{RS\Delta}$ und $L_{SR\Delta}$ konstant zu lassen.

Die dabei bei jedem Schlupf notwendige resultierende Induktivität des Rotors berechnet sich aus Gleichung (4) und würde bei vollständiger Kompensation sein:

$$L'_{RR\Delta} = \frac{K}{2} L_{RS\Delta} \pm \sqrt{\left(\frac{K}{2} L_{RS\Delta}\right)^2 - \left(\frac{r_R}{s\omega_1}\right)^2}$$

und die zur Rotorinduktivität Zusätzliche, die wir als Induktivität des Kompensators $L_{CC\Delta}$ bezeichnen wollen, beträgt:

$$L_{CC\Delta} = L'_{RR\Delta} - L_{RR\Delta}$$

$$L_{CC\Delta} = \frac{K}{2} L_{RS\Delta} \pm \sqrt{\left(\frac{K}{2} L_{RS\Delta}\right)^2 - \left(\frac{r_R}{s\omega_1}\right)^2} - L_{RR\Delta}. \tag{5}$$

2. Durch Variation von $L_{RR\Delta}$ in der Asynchronmaschine, was aber eine variable Induktivität $L_{RS\Delta}$ und $L_{SR\Delta}$ zur Folge hat.

Durch Aenderung des Rotorwiderstandes $r'_R$ lässt sich keine Kompensation erreichen, da der aus der Gleichung (4) berechnete Wert von

$$r'_R = s\,\omega_1 \sqrt{K\,L_{RS\triangle}\,L_{RR\triangle} - L^2_{RR\triangle}}$$

immer imaginär ist.

Wollen wir einfachheitshalber von der Streuung absehen, so wird für diesen Fall

$$K\,L_{RS\triangle}\,L_{RR\triangle} = \frac{L_{SR\triangle}}{L_{SS\triangle}}\,L_{RS\triangle}\,L_{RR\triangle} = L^2_{RR\triangle}$$

sein, und die Gleichung (5) schreibt sich dann

$$L_{CC\triangle} = -\frac{L_{RR\triangle}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{L_{RR\triangle}}{2}\right)^2 - \left(\frac{r_R}{s\,\omega_1}\right)^2}$$

d. h. der Wert von $L_{CC\triangle}$ ist immer negativ.

Praktisch entspricht einer negativen Kompensatorimpedanz eine Kapazität.

Da es aber nicht auf den Wert der Impedanz, sondern auf den der Spannung ankommt, können wir statt einer negativen Impedanz eine entsprechende EMK erzeugen; d. h. wir erzeugen im Rotorkreise der Asynchronmaschine negative Spannungsabfälle, das sind EMK'K, die den Spannungsabfällen entgegengesetzt wirken (Phasenopposition).

$$\mathfrak{E} = -j\,\mathfrak{J}\,\omega\,Z.$$

Die Erzeugung einer solchen EMK ist möglich:

*a)* durch Erzeugung einer negativen Frequenz $\omega$ (praktische Ausführung des eigenerregten Kompensators),

*b)* durch Einführung einer fremden Spannung in den Rotor der Asynchronmaschine, die gegenüber der Rotorspannung eine Phasendifferenz von 180° aufweist, d. h. negativen Strom liefern würde (Methode der Fremderregung). Dies geschieht mittels einer Kollektormaschine, die starr mit dem Asynchronmotor verbunden ist, um der Frequenzänderung bei Belastung entgegen zu wirken.

Es ist natürlich auch möglich, die Wicklung dieses Kompensators in die Asynchronmaschine zu verlegen, wie dies bei den bekannten Spezialmotoren (Osnos-Heylandmotor usw.) der Fall ist.

Diese prinzipiellen physikalischen Grundlagen der Kompensation führten dazu, dass in der obenerwähnten Diplomaufgabe eine Reihe Schaltungen theoretisch und praktisch untersucht wurden. Im folgenden möchte ich einige kurz andeuten und die Theorie der theoretisch einfachsten entwickeln.

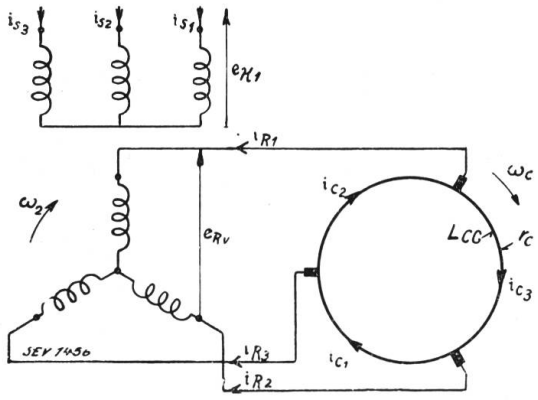


Fig. 3.
Schema des Asynchronmotors mit eigenerregtem Kompensator.
$\omega_c$ = elektrische Winkelgeschwindigkeit der Rotation.

## 1. Eigenerregter Kompensator (Fig. 3). (Scherbiuskompensator)

Die Anwendung des Induktionsgesetzes auf die Kompensatorwicklung ergibt:

$$e_{Rv} - i_{C3}\,r_C = +\frac{d}{dt}\left\{i_{C3}\,L_{C\,33} + i_{C\,2}\,L_{C\,23} + i_{C\,1}\,L_{C\,13}\right\} = e'_{Rv}, \qquad (7)$$

wobei $L_C$ die Induktivität des Kompensators ist (die Indizes bezeichnen die Phasen, auf die sich die Induktivität bezieht).

Aus Fig. 3 folgt:

$$\left.\begin{aligned} i_{R1} &= -i_{C3}+i_{C2} \\ i_{R2} &= -i_{C1}+i_{C3} \end{aligned}\right\} \quad i_{R1}-i_{R2} = -2\,i_{C3}+(i_{C2}+i_{C1}) = -3\,i_{C3}, \text{ da } i_{C1}+i_{C2}+i_{C3} = 0 \text{ ist.}$$

Somit wird (Fig. 4) $\qquad i_{C3} = -\dfrac{i_{R1}-i_{R2}}{3}$ und

$$\mathfrak{J}_{C3} = -\frac{1}{3}(\mathfrak{J}_{R1}-\mathfrak{J}_{R2}) = -\frac{\sqrt{3}}{3}\,\mathfrak{J}_{R1}\,\varepsilon^{j30}. \tag{8}$$

Der Wert der Spannung $e'_{Rv}$ lässt sich sehr einfach auswerten bei folgender Annahme: Man denkt sich die Kompensatorwicklung aus zwei Teilwicklungen zusammengesetzt, von deren eine feststeht und die andere mit der Winkelgeschwin-

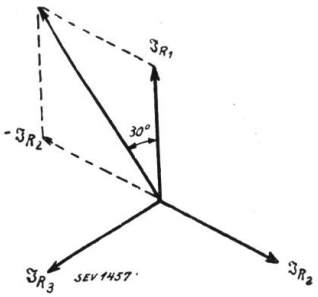


Fig. 4.
Zusammenhang zwischen Rotorströmen beim Asynchronmotor.

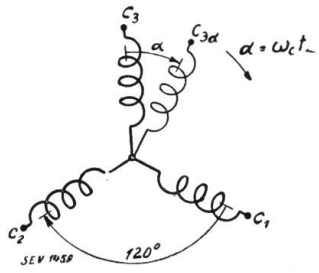


Fig. 5.
Symbolische Darstellung der Rotorwicklung des Kompensators.

digkeit $\alpha = \omega_C t$ rotiert; dann lässt sich die in der stillstehenden Wicklung von der rotierenden Spule induzierte EMK folgendermassen berechnen: Es ist (Fig. 5)

$$L_{C33\alpha} = L_{C33\max}\cos\alpha = L_{CC}\,\frac{\varepsilon^{j\alpha}+\varepsilon^{-j\alpha}}{2}$$

$$L_{C13\alpha} = L_{C13\max}\cos(240+\alpha) = L_{CC}\,\frac{\varepsilon^{j(\alpha+240)}+\varepsilon^{-j(\alpha+240)}}{2}$$

$$L_{C23\alpha} = L_{C23\max}\cos(120+\alpha) = L_{CC}\,\frac{\varepsilon^{j(\alpha+120)}+\varepsilon^{-j(\alpha+120)}}{2}$$

$$L_{C33\max} = L_{C23\max} = L_{C13\max} = L_{CC}.$$

$$i_{C3} = \bar{\mathfrak{J}}_{C3}\,\varepsilon^{js\omega_1 t} \qquad i_{C2} = \bar{\mathfrak{J}}_{C3}\,\varepsilon^{j(s\omega_1 t-240)} \qquad i_{C1} = \bar{\mathfrak{J}}_{C3}\,\varepsilon^{j(s\omega_1 t-120)},$$

worin $\bar{\mathfrak{J}}_{C3}$ den Maximalwert von $i_{C3}$ bedeutet.

Werden die obigen Werte in die Gleichung (7) eingesetzt, so ergibt sich die Spannung $e'_{Rv}$ zu:

$$e'_{Rv} = +\frac{d}{dt}\left\{\bar{\mathfrak{J}}_{C3}\frac{L_{CC}}{2}\,\varepsilon^{js\omega_1 t}\left(\varepsilon^{j\alpha}+\varepsilon^{-j\alpha}+\varepsilon^{j(\alpha-120)}+\varepsilon^{-j(\alpha+360)}+\varepsilon^{j(\alpha+120)}+\varepsilon^{-j(\alpha+360)}\right)\right\} =$$

$$= +\frac{3}{2}\bar{\mathfrak{J}}_{C3}\,L_{CC}\,\frac{d}{dt}\left\{\varepsilon^{js\omega_1 t}\,\varepsilon^{-j\alpha}\right\}, \quad \text{da} \quad \varepsilon^{j\alpha}+\varepsilon^{j(\alpha-120)}+\varepsilon^{j(\alpha+120)} = 0 \text{ ist.}$$

$$e'_{Rv} = +\frac{3}{2}\,\bar{\mathfrak{J}}_{C3}\,L_{CC}\,\varepsilon^{j(s\omega_1 t-\alpha)}\,j\left(s\omega_1-\frac{d\alpha}{dt}\right). \qquad \alpha = \omega_C t. \qquad \frac{d\alpha}{dt} = \omega_C.$$

$$e'_{Rv} = +\,i'_{C3}\,L_{CC\,\Delta}\,j(\omega_1-\omega_2-\omega_C) \text{ am Kollektor gemessen,}$$

wobei wir definieren $\frac{3}{2} L_{CC} = L_{CC\Delta}$ gleich Drehinduktivität der Kompensatorwicklung und $i'_{C3}$ einen Strom, dessen Effektivwert gleich demjenigen von $i_{C3}$, dessen Frequenz aber um $\omega_C$ von derjenigen von $i_{C3}$ verschieden ist.

Es schreibt sich somit der Effektivwert der Spannung zu:

$$\mathfrak{E}'_{Rv} = +j\mathfrak{J}_{C3} L_{CC\Delta}(s\omega_1 - \omega_C).$$

$$\mathfrak{E}_{Rv} = +\mathfrak{J}_{C3}[r_C + j(s\omega_1 - \omega_C) L_{CC\Delta}] \text{ mit Gleichung (8) kombiniert}$$

$$\mathfrak{E}_{Rv} = -\mathfrak{J}_{R1} \frac{\sqrt{3}}{3} \varepsilon^{j30} [r_C + j(s\omega_1 - \omega_C) L_{CC\Delta}] \text{ an den Bürsten gemessen.} \tag{9}$$

$$\mathfrak{E}_{Rv} = \mathfrak{J}_{R1} \sqrt{3}\, \varepsilon^{j30} (r_R + js\omega_1 L_{RR\Delta}) + \mathfrak{J}_{S1} \sqrt{3}\, \varepsilon^{j30} js\omega_1 L_{SR\Delta}. \tag{2}$$

Aus: (2) = (9) folgt

$$\mathfrak{J}_{S1} = -\mathfrak{J}_{R1} \frac{\left(r_R + \frac{r_C}{3}\right) + j\left\{s\omega_1 L_{RR\Delta} + \frac{1}{3}(s\omega_1 - \omega_C) L_{CC\Delta}\right\}}{js\omega_1 L_{SR\Delta}}.$$

Wird dieser Ausdruck in Gleichung (1) eingesetzt, so ergibt sich die Impedanz des auf diese Art kompensierten Motors zu:

$$\mathfrak{Z}'_A = r_S + j\omega L_{SS\Delta} + \frac{\omega_1^2 L_{SR\Delta} L_{RS\Delta}}{\dfrac{r_R + \frac{1}{3}(r_C - j\omega_C L_{CC\Delta})}{s} + j\omega_1\left(L_{RR\Delta} + \frac{1}{3} L_{CC\Delta}\right)} \tag{10}$$

Der geometrische Ort der Impedanz des Motors und somit auch des Stromes ist ein Kreis, dessen Konstruktion keine weiteren Schwierigkeiten bietet.

Für den Spezialfall des mit dem Asynchronmotor starr gekuppelten Kompensators folgt:

$\omega_R = \frac{\pi\, n_R}{30}$ = mech. Kreisfrequenz der Rotation des Kompensators,

$\omega_C = \omega_R\, p_C$;

$\omega_2 = \frac{\pi\, n_2}{30} p_A$, worin $p_A$ = Polpaarzahl des Asynchronmotors und
$p_C$ = Polpaarzahl des Kompensators bedeutet.

$\frac{\omega_R}{\omega_2} = \left(\frac{n_R}{n_2}\right) \frac{1}{p_A}$ $\quad n_R = n_2$, waraus folgt:

$$\omega_C = \omega_2 \frac{p_C}{p_A} = \omega_1 (1 - s) \frac{p_C}{p_A}.$$

Wenn $p_C = p_A$ ist, was praktischen Ausführungen entspricht, so wird die Impedanz (Fig. 6):

$$\mathfrak{Z}''_A = r_S + j\omega L_{SS\Delta} + \frac{\omega_1^2 L_{SR\Delta} L_{RS\Delta}}{\dfrac{r_R + \frac{1}{3}(r_C - j\omega_1 L_{CC\Delta})}{s} + j\omega_1\left(L_{RR\Delta} + \frac{2}{3} L_{CC\Delta}\right)}$$

Der Radiusvektor dieses Kreises ist gleich

$$\mathfrak{R} = \frac{\omega_1 L_{SR\triangle} L_{RS\triangle}}{2\left(L_{RR\triangle} + \frac{2}{3} L_{CC\triangle}\right)\cos\psi} \varepsilon^{-i\left(\frac{\pi}{2}+\psi\right)}$$

wobei $\operatorname{tg}\psi = -\frac{\omega_1 L_{CC\triangle}}{3r_R + r_C}$ ist.

Um eine konstante Kompensation $\cos\varphi = 1$ mit Hilfe eines eigenerregten Kompensators zu erreichen, muss dessen Tourenzahl in Funktion der Belastung variiert werden. Setzt man in der Gleichung (10)

$$Z'_A \sin\varphi = 0,$$

so berechnet sich die jeweilige Umdrehungszahl des Kompensators aus folgender Relation

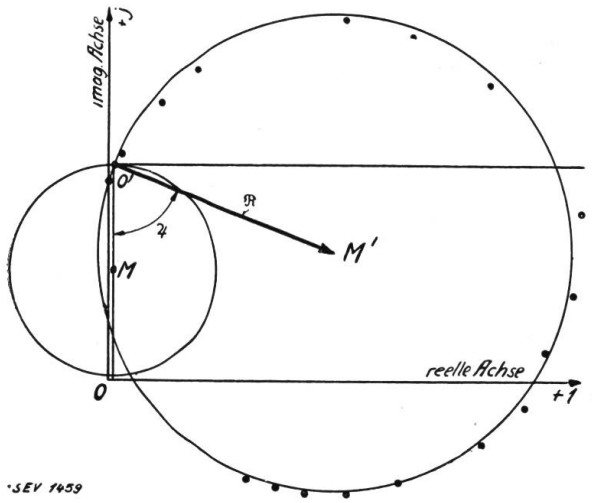


Fig. 6.
Darstellung von $\mathfrak{Z}'_A$ und $\mathfrak{Z}_A$.
grosser Kreis = geometrischer Ort für $\mathfrak{Z}'_A$
kleiner Kreis = geometrischer Ort für $\mathfrak{Z}_A$
. = durch Versuch ermittelte Punkte.

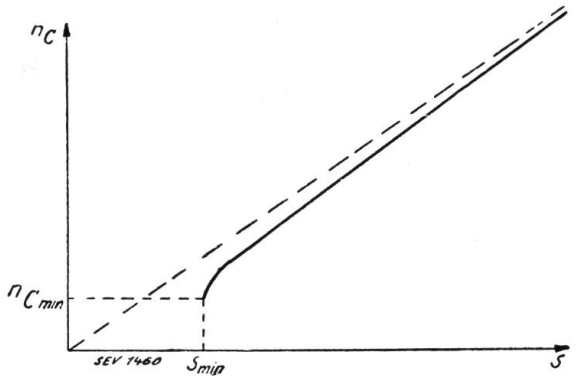


Fig. 7.
Prinzipieller Verlauf von $n_c = f(s)$ bei konstanter Kompensation ($\cos\varphi = 1$).

$$n_R = \frac{90}{\pi\, p_C} \frac{s\omega_1}{L_{CC\triangle}} \left\{ L_{RR\triangle} + \frac{1}{3} L_{CC\triangle} - \frac{K}{2} L_{RS\triangle} + \sqrt{\left(\frac{K L_{RS\triangle}}{2}\right)^2 - \left(\frac{\varrho}{s\omega_1}\right)^2} \right\}$$

worin $\varrho = r_R + \frac{1}{3} r_C$ bedeutet.

Es ist selbstverständlich, dass die Umdrehungszahl nicht eine komplexe Grösse werden kann. Das hat zur Folge, dass der Ausdruck unter der Wurzel im Grenzfalle 0 wird. Es folgt daraus für den Schlupf (Fig. 7):

$$\underline{s_{min} = \frac{2\varrho}{K\omega_1 L_{RS\triangle}}}$$

Da $K$, $\omega_1$, $L_{RS\triangle}$ und $r_R$ konstante Grössen der Asynchronmaschine sind, so ist es nötig, um schon bei geringem Schlupfe eine annehmbare Kompensation zu erreichen, den Widerstand der Kompensatorwicklung $r_C$ auf ein Minimum zu reduzieren.

**2. Eigenerregter Kompensator, dessen Stator kurzgeschlossen ist** (Fig. 8).

Folge dieser Anordnung sind grössere Verluste, d. h. schlechterer Wirkungsgrad jedoch bei bedeutend besserer Kompensation.

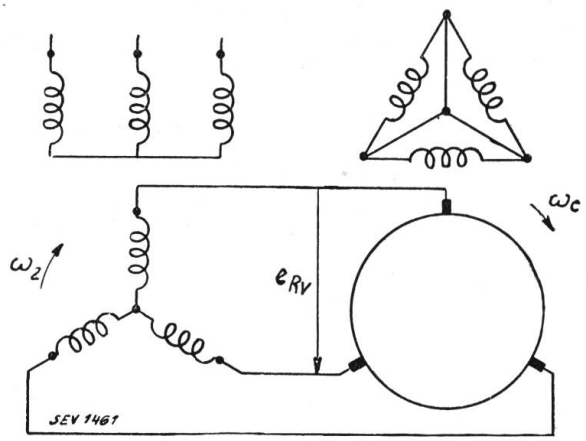


Fig. 8.
Schema des eigenerregten Kompensators mit kurzgeschlossenem Stator.

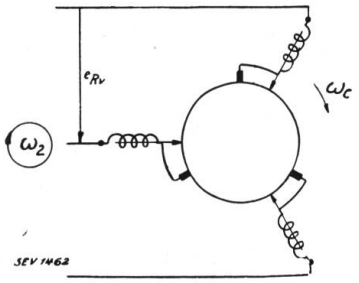


Fig. 9.
Schema des eigenerregten Kompensators mit Statorerregung.

**3. Kompensation variabel, in Funktion der Bürstenstellung** (Fig. 9).

Aehnliche Verhältnisse wie bei Anordnung 2.

**4. Uebergang zum fremderregten Kompensator** (Fig. 10).

Diese Anordnung bildet den Uebergang zum fremderregten Kompensator. Sie unterscheidet sich von der unter 3 angegebenen nur dadurch, dass die Statorwicklung im umgekehrten Sinne durchflossen ist. Folglich erzeugt diese im Rotorkreise eine negative Spannung. Die Kompensation ist nur dann erreichbar, wenn der Rotor umgekehrt zum Drehsinn des Feldes rotiert wird.

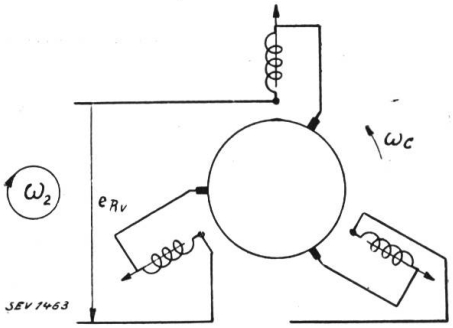


Fig. 10.
Schema des eigenerregten Kompensators mit Statorerregung (Uebergangsschaltung).

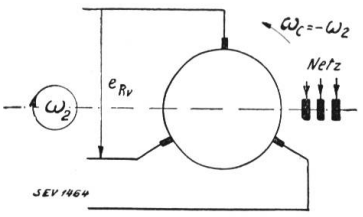


Fig. 11.
Schema des fremderregten Kompensators.

**5. Fremderregter Kompensator** (Fig. 11).

Die Kompensation wird hier mit negativer Spannung erreicht. Bedingung bei dieser Anordnung ist, dass $\omega_C = -\omega_2$ ist, d. h. der Kompensator muss starr mit der Asynchronmaschine gekuppelt werden.

Bei entsprechender Wahl der Fremdspannung, kann man die Kompensation schon bei Leerlauf vollkommen gestalten. Diese Methode erlaubt eine konstante Kompensation, die jedoch mit Variation der Umdrehungszahl des Asynchronmotors verbunden ist.

Eine weitere Möglichkeit besteht in einer

**6. Kombination der Schaltungen 4 und 5.**

Diese Schaltung gibt im Rahmen dieser Arbeit zu keinen weiteren Bemerkungen Anlass.