

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 13 (1922)
Heft: 10

Artikel: Die Bedeutung des Bezugssinnes im Vektordiagramm [Fortsetzung und Schluss]
Autor: Brunn, Albert von
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058314>

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: 22.02.2026

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

ist damit nichts gesagt; welche Gesichtspunkte dort in Betracht fallen, ist in den einleitenden Abschnitten dieses Aufsatzes dargestellt worden (Steilheit der Wellenstirn und Frequenz der Reflexionen).

Zum Schluss mögen noch einige Bemerkungen über den Einfluss von Leitungswiderstand und Ableitung folgen. Ihre Wirkung als Dämpfung ist einfach zu erklären. Herrscht an der Stelle x einer Leitung eine Spannung E gegen Erde, so wird im Isolationswiderstand $\frac{\rho_i}{\Delta x} = \frac{1}{\gamma \cdot \Delta x}$ elektrische Energie in Wärme umgesetzt entsprechend der Beziehung:

$$A_{ev} = \frac{E^2}{\rho_i} \Delta x = \gamma \Delta x E^2$$

Fliesst an der gleichen Stelle der Leitung der Strom J , so vernichtet der ohm'sche Widerstand $\rho \cdot \Delta x$ eine Energiemenge

$$A_{mv} = \rho \Delta x J^2$$

Auf diese Weise wird den Wellenvorgängen Energie in nicht umkehrbarer Form entzogen, bis sie verschwunden sind.

Noch eine allgemeine Bemerkung zu den vorhergehenden Untersuchungen. Es wurden dort eigentlich stillschweigend die Vorgänge untersucht, wie sie auf einer offenen, eindrähtigen, für die Entladevorgänge noch mit Gleichstrom geladenen Leitung verlaufen müssen. Bei einer betriebenen Leitung von mindestens zwei Phasen bestehen aber noch elektrische Felder zwischen den einzelnen Phasenleitern entsprechend der aufgedrückten Systemspannung und magnetische Felder entsprechend dem Belastungsstrom. Eine genauere Untersuchung erlaubt aber nachzuweisen, dass hier das sog. Superpositionsprinzip verwendbar ist, so dass z. B. bei Erdschluss einer Phase die dargestellten Wellenvorgänge sich den betriebsmässigen Erscheinungen überlagern, indem dabei die Energie ausschwingt und in der Dämpfung vernichtet wird, welche noch im Moment des Erdschlusses im elektrischen Felde zwischen betroffener Phase und Erde gebunden war.

Die Bedeutung des Bezugssinnes im Vektordiagramm.¹⁾

Von Albert von Brunn, dipl. Ing., Zürich.

(Fortsetzung und Schluss.)

Nachdem der Verfasser im ersten Teil der Arbeit (s. Bulletin 1922, No. 9) in einer Reihe von „Sätzen“ die Anwendung von Vektoren zur Darstellung elektr. Vorgänge erläutert hat, wendet er im vorliegenden Teile der Arbeit diese „Sätze“ auf verschiedene, der Praxis entnommene Beispiele an.

Dans la première partie (bulletin 1922, Nr. 9) l'auteur a établi plusieurs théorèmes sur l'utilisation du calcul vectoriel pour caractériser les phénomènes qui ont lieu dans les circuits parcourus par un courant électrique. Il les applique dans cette dernière partie à divers exemples pratiques.

Anwendungs-Beispiele.

Um dem Praktiker das Verständnis für die im letzten Heft entwickelte Methode zu erleichtern und ihm die Möglichkeit zu verschaffen, selbständig richtige Diagramme zu entwickeln, wollen wir im Folgenden für einige einfache Schaltungen die Vektordiagramme aufbauen.

1. Wir stellen uns die Aufgabe, die Spannung zu bestimmen, welche ein Generator G erzeugen muss, um durch ein System, gebildet aus einem induktiven (L), einem ohmschen (R) und einem kapazitiven (C) Widerstand, einen bestimmten Strom hindurchzutreiben. Fig. 23 stelle diesen Stromkreis dar. Der Einfachheit wegen legen wir die Bezugspfeile so, dass sie einen einheitlichen Umlaufssinn ergeben.

¹⁾ Im ersten Teil dieser Arbeit sind drei sinnstörende Fehler stehen geblieben: Auf Seite 392 müssen die beiden Gleichungen auf der 14. und 15. Linie von oben lauten:

$$J_c \cos \varphi_c = -J_2 \cos \varphi_2 \quad \text{und} \quad J_c \sin \varphi_c = -J_2 \sin \varphi_2$$

und drei Linien weiter muss es heissen: „Stromkreis J_1 “ anstatt „Stromkreis J_2 “.

Jedes Leiterelement und das zugehörige Teildiagramm bezeichnen wir mit einer Zahl. Der die Leiterelemente durchfliessende Strom erscheint entsprechend dem einheitlichen Umlaufssinn der Bezugspfeile für einen beliebigen Zeitmoment als derselbe Vektor J (Fig. 24 und 25). Dieser Strom erzeugt im induktiven Widerstand die *E. M. K.* E_L , im ohmschen Widerstand die ohmsche Gegenkraft E_r und im Kondensator die kapazitive *E. M. K.* E_c (Fig. 24). Die Generatorspannung E_g erhalten wir mit Hilfe von Satz II a, indem wir das Spannungspolygon konstruieren. E_g muss als letzte der vier Spannungen das Polygon schliessen. (Fig. 25). Um die Arbeits-

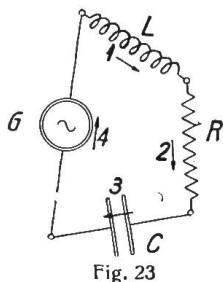


Fig. 23

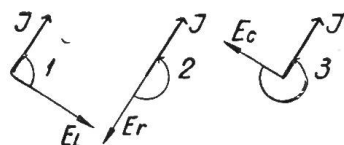


Fig. 24

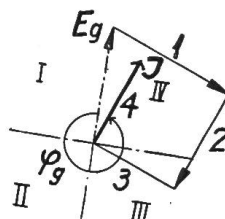


Fig. 25

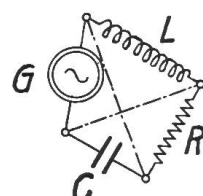


Fig. 26

weise des Generators G zu erkennen, fällen wir durch den Fusspunkt von E_g das Lot auf diese Spannung und verlängern E_g nach rückwärts. Wir erhalten so die vier Quadranten I bis IV (Fig. 25). Der Strom J liegt im IV. Quadranten, der Generator arbeitet generatorisch-kapazitiv. Er gibt also nicht nur elektrische Energie ab, sondern liefert noch, entsprechend der überwiegenden Induktivität, wattlose Leistung ins Netz. Das Raum-Zeit-Diagramm dieser Schaltung erhalten wir, indem wir die Eckpunkte des Spannungspolygons durch kleine Ringe markieren und die entsprechenden Leiterelemente dazwischen zeichnen. Die Verbindungsgerade zweier solcher Punkte stellt die Grösse und Phasenstellung der zwischen diesen Punkten herrschenden Spannung dar (Fig. 26). Dieses

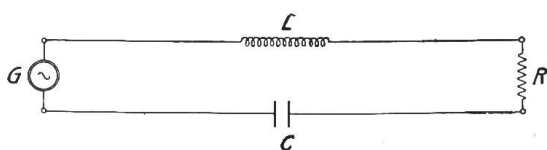


Fig. 27

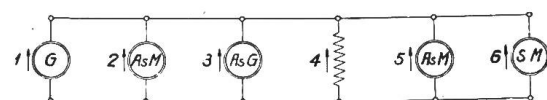


Fig. 28

Raum-Zeit-Diagramm lässt u. a. ohne weiteres erkennen, dass in unserem Beispiel die zwei Diagonalspannungen fast genau senkrecht aufeinander stehen, also um 90° phasenverschoben sind (Fig. 26). Machen wir durch verändern von L $E_L = E_c$, so liefert das Raum-Zeit-Diagramm ein Rechteck. Die Generatorspannung ist dann gleich der ohmschen Gegenkraft und dient in diesem Falle nur noch dazu, den Strom J durch den ohmschen Widerstand zu treiben. Machen wir letztern

sehr klein, so wachsen bei konstanter Generatorspannung der Strom und mit ihm E_L und E_c gewaltig an. Wir erhalten so in Fig. 27 das Raum-Zeit-Diagramm der Spannungsresonanz.

2. Im folgenden Beispiel sei der Strom zu bestimmen, den ein Drehstrom-Generator liefern muss, wenn am Netz verschiedenartige Stromverbraucher angeschlossen sind. An einer Stelle werde dem Netz durch einen Asynchron-Generator elektrische Energie zugeführt. Der Einfachheit halber zeichnen wir das System einphasig. Die eingezeichneten Zahlen stellen dar (Fig. 28):

1. Den Generator,
2. einen vollbelasteten Asynchronmotor,
3. den Asynchron-Generator,
4. einen elektrischen Heizofen,
5. einen leerlaufenden Asynchronmotor,
6. einen zur Phasenkompensation übererregten Synchronmotor.

Es erweist sich als zweckmässig, die Bezugspfeile aller Maschinen in der gleichen Richtung z. B. nach oben einzutragen (Fig. 28). Den Vektor der Generatorspannung nehmen wir willkürlich vertikal an und erhalten unter Verwendung von

Satz I und IIa die übrigen Spannungen als ebenfalls vertikale und gleich grosse Vektoren (Fig. 29). Betrachten wir nämlich den aus Generator und erstem Asynchronmotor gebildeten Stromkreis, so müssten die Spannungen dieser beiden Maschinen ein geschlossenes Polygon bilden, falls der Bezugspfeil des Asynchronmotors nach unten weisen würde, da er mit demjenigen des Generators einen einheitlichen Umlaufssinn festlegte. Das Polygon würde allerdings zu einem Zweiseit degenerieren (bestehend aus zwei gleich grossen, aufeinander liegenden und entgegengesetzt gerichteten Vektoren). Da aber der Bezugspfeil des Asynchronmotors nach oben weist,

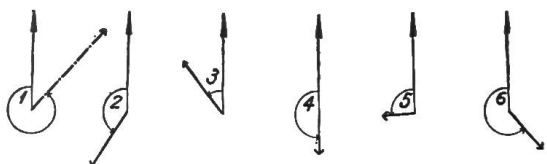


Fig. 29

so müssen wir nach Satz I den nach unten weisenden Spannungsvektor um 180° umkehren. Auf analoge Weise erhalten wir die Spannungen der übrigen Positionen (Fig. 29).

Entsprechend der Aufnahme von wattloser Energie und der motorischen Arbeitsweise des Asynchronmotors liegt sein Stromvektor im II. Quadranten (Ziffer 2). Von ihm unterscheidet sich der Asynchron-Generator nur durch die Abgabe elektrischer Energie, da auch er wattlose Leistung absorbiert (Ziffer 3). Die elektrische Heizung (Ziffer 4) nehmen wir als induktionslos an. Sie arbeitet „rein motorisch“ mit $\cos \varphi = -1$. Der leerlaufende Asynchronmotor verhält sich fast wie eine Drosselspule. Neben der wattlosen tritt die Wattkomponente nur schwach in Erscheinung (Ziffer 5).

Um den Leistungsfaktor zu heben wurde in Ziffer 6 ein übererregter Synchronmotor statt eines asynchronen ans Netz angeschlossen. Dieser Motor stellt das Gegenstück vom Asynchron-Generator dar. Er sei so reguliert, dass er elektrische Energie aufnimmt und wattlose Leistung ans Netz abgibt. Fassen wir die obere Leitung als einen einzigen Verzweigungspunkt auf, dem alle Bezugspfeile zugerichtet sind, so müssen die Stromvektoren aller sechs Ziffern nach Satz IIIa ein geschlossenes Polygon ergeben. Der Stromvektor des Generators schliesst das aus den übrigen Stromvektoren gebildete Polygon (Fig. 30).

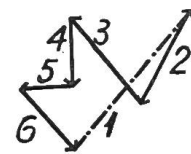


Fig. 30

3. Im folgenden Fall handelt es sich darum, zwei Transformatoren A und B (Fig. 31) parallel arbeiten zu lassen, welche primär in Stern, sekundär aber in Dreieck geschaltet sind. Die Transformatoren sind völlig gleich, aber die Dreieckschaltung ist beim einen entgegengesetzt wie beim andern. Vorsichtshalber sollen die Transformatoren sekundär nur in einem Punkt zusammengeschaltet sein, während die beiden andern sich entsprechenden Klemmen nur über Voltmeter verbunden werden (Fig. 31). Die Bezugspfeile der Primärseiten tragen wir vom Sternpunkt wegweisend ein. Wir erhalten dann die bekannten, je um 120° phasenverschobenen Drehstrom-Spannungsvektoren, welche sowohl für Transformator A wie für B dasselbe Bild (Fig. 32) ergeben. Gemäss unserer Festsetzung für magnetisch verkettete Systeme erscheinen auch die Sekundärspannungen, falls wir die Transformatorübersetzungen 1 : 1 annehmen, als die nämlichen, gleich grossen und gleich gerichteten Vektoren (Fig. 33).

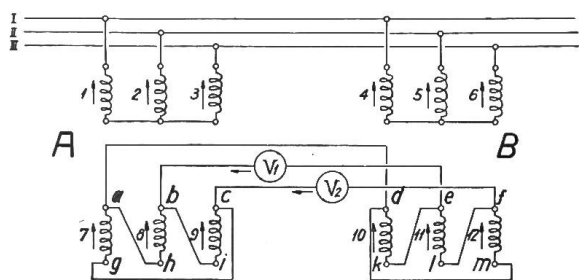


Fig. 31

sein, während die beiden andern sich entsprechenden Klemmen nur über Voltmeter verbunden werden (Fig. 31). Die Bezugspfeile der Primärseiten tragen wir vom Sternpunkt wegweisend ein. Wir erhalten dann die bekannten, je um 120° phasenverschobenen Drehstrom-Spannungsvektoren, welche sowohl für Transformator A wie für B dasselbe Bild (Fig. 32) ergeben. Gemäss unserer Festsetzung für magnetisch verkettete Systeme erscheinen auch die Sekundärspannungen, falls wir die Transformatorübersetzungen 1 : 1 annehmen, als die nämlichen, gleich grossen und gleich gerichteten Vektoren (Fig. 33).

Um einen klaren Einblick in die Spannungsverhältnisse dieser Schaltung zu gewinnen, konstruieren wir am besten das Raum-Zeit-Diagramm. Man erhält dasselbe am einfachsten, indem man die Leiterelemente im Sinne ihrer Bezugspfeile durchläuft und ein Leiterelement ans andere reiht, jedoch so, dass die Verbindungsstrecken zwischen den Endpunkten jedes Leiterelementes der Grösse und Richtung

Um einen klaren Einblick in die Spannungsverhältnisse dieser Schaltung zu gewinnen, konstruieren wir am besten das Raum-Zeit-Diagramm. Man erhält dasselbe am einfachsten, indem man die Leiterelemente im Sinne ihrer Bezugspfeile durchläuft und ein Leiterelement ans andere reiht, jedoch so, dass die Verbindungsstrecken zwischen den Endpunkten jedes Leiterelementes der Grösse und Richtung

den Spezialfall zeigt, bei welchem der ohmsche Widerstand $\sqrt{3}$ mal kleiner als jeder der beiden anderen (einander gleichen) Widerstände gemacht wurde.

Es zeigt sich, dass unter diesen Verhältnissen der Sternpunkt der drei Widerstände mit demjenigen des Generators aequipotentiell wird. Eine ungeahnte Verzerrung erfährt das System, wenn wir zwei Phasen miteinander vertauschen, oder den Generator in entgegengesetztem Sinne, aber mit derselben Spannung und Periodenzahl umlaufen lassen (Fig. 39). Die Erklärung gibt uns Satz III a. Ver-

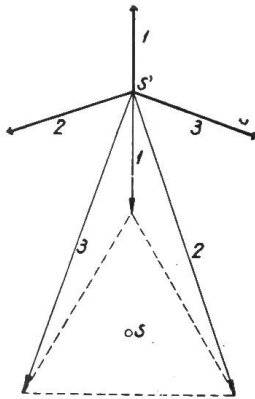


Fig. 39

tauschen wir nämlich Kondensator und Drosselspule, so müsste, falls die Spannungsverteilung dieselbe bliebe, Phase 2 den punktierten Strom 2' und Phase 3 den ebenfalls punktierten Strom 3' (Fig. 38) aufnehmen. Alle drei Ströme würden dann die Resultante (R) ergeben, was mit Satz III a unvereinbar ist. Nach einigem Probieren findet man, dass der Sternpunkt S' in der Verlängerung des Vektors der Spannung der ersten Phase liegen muss und zwar ist sein Abstand vom früheren Sternpunkt S gleich der *doppelten Phasenspannung* (Fig. 39). Während die Ströme 2 und 3 gegenüber ihrem früheren Werte um $\sqrt{7}$ fache gestiegen sind, behält Strom 1 seinen Wert bei. Eine eingehendere Untersuchung zeigt sogar, dass Strom 1 auch dann noch konstant bleibt, wenn wir den ohmschen Widerstand von Null bis ∞ variieren.

5. In den meisten praktischen Fällen ist der Einfluss der Belastungsströme auf die Spannungsverteilung nicht so ausschlaggebend wie im vorhergehenden Beispiel. Die Leerlaufspannungen erfahren bei Belastung relativ geringfügige Verzerrungen, so dass man bei der Entwicklung der Diagramme zuerst vom Leerlauf ausgehen und nach dem Einzeichnen der Belastungsströme die Spannungsabfälle als Korrekturen eintragen kann. Diese Näherungsmethode führt meistens rasch zum Ziele. Als ein Beispiel dieser Art wollen wir das Diagramm des Autotransformators entwickeln. Fig. 40 stellt einen Drehstrom-Generator dar, der über einen Autotransformator einen Asynchronmotor speisen soll. Der Einfachheit wegen wird nur *eine* Phase des (symmetrischen) Drehstromsystems herausgegriffen. Die Bezugspfeile zeichnen wir, um ein übersichtliches Bild zu erhalten, alle vom Sternpunkt wegweisend ein. Beim Autotransformator sollen die Bezugspfeile unseren Abmachungen (betreffend magnetisch-verkettete Systeme) gemäss, in der gleichen Richtung weisen, da die beiden Spulen denselben Wicklungssinn haben. Die zwei anderen Phasen ersetzen wir durch eine Sternpunktverbindung.

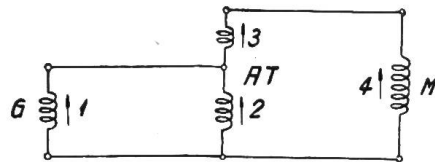


Fig. 40

Wir gehen aus von der Generatorspannung E_g , die wir willkürlich vertikal nach oben zeigend abtragen (Fig. 41). In analoger Weise wie im zweiten Beispiel erhalten wir unter Verwendung der Sätze I und II a die Autotransformator-Spannung E_2 . Die Spannung E_3 in Spule 3 muss mit letzterer genau in Phase sein und die Summenspannung des ganzen Autotransformators ist nach Satz II gleich der Vektorsumme von Spannung E_2 und E_3 . Die Motorspannung E_m erhalten wir mit Hilfe der Sätze I und II a. Wir tragen die Belastungsströme ein, indem wir mit dem Motorstrom J_m beginnen. Der Asynchronmotor arbeitet im zweiten Quadranten. Dieser Strom erscheint im Autotransformator (3), entsprechend dem entgegengesetzten Bezugspfeil um 180° verdreht. Nach dem Transformatorgesetz muss Spule 2 ausser dem Magnetisierungsstrom J_o , der E_2 um 90° voreilt, noch den Kompensationsstrom J_c aufnehmen, der dem Strom in Spule 3 genau um 180° entgegengesetzt ist und sich berechnet aus: $J_c = J_3 \cdot \frac{E_3}{E_2}$. Die Ströme J_o und J_c ergeben den resultierenden Strom J_r der Spule 2. Den Generatorstrom J_g erhalten wir unter

Verwendung der Sätze I und III als die Resultante von J_3 und dem um 180° gedrehten Stromvektor J_r . Die Umkehrung war notwendig, weil der Bezugspfeil von Spule 2 nicht dem Durchlaufssinn entspricht, den der Bezugspfeil des Generators festlegt. Der Generator arbeitet generatorisch-kapazitiv, er gibt elektrische Leistung ab und magnetisiert Motor und Autotransformator. Das genaue Diagramm erhalten wir,

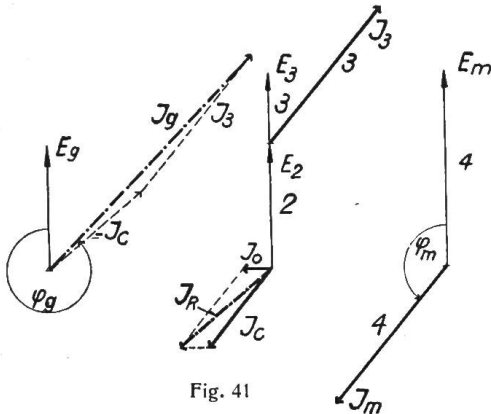


Fig. 41

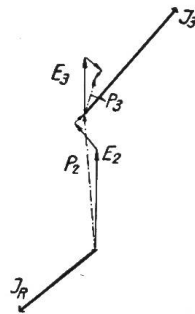


Fig. 42

indem wir an die *E.M.K.K.* E_2 und E_3 je den induktiven und ohmschen Spannungsabfall vektoriell addieren. Der induktive Spannungsabfall ist die *E.M.K.* des Streuflusses, den der das Leiterelement durchfließende Strom erzeugt und eilt letzterem immer um 90° nach. Der ohmsche Spannungsabfall ist die vom Strome erzeugte ohmsche Gegenkraft und erscheint im Vergleiche zu demselben je um 180° gedreht. Gemäss unserem Satz IV sind

dann P_2 resp. P_3 (Fig. 42) die Klemmenspannungen der beiden Transformerspulen. Die Motorspannung ist die Resultante von P_2 und P_3 .¹⁾

6. Das zweite Beispiel hat uns gezeigt, welchen günstigen Einfluss der übererregte Synchronmotor auf den Leistungsfaktor des Netzes ausübt, während der Asynchronmotor denselben, insbesondere bei schwacher Belastung, verschlechtert (Fig. 30). Leider haben die normalen Synchronmotoren ein geringes Anzugsmoment, so dass deren Verwendbarkeit eine beschränkte ist.

Um diesem Uebelstand abzuweichen, baut die Maschinenfabrik Oerlikon seit etwa drei Jahren einen Motor, der den Vorzug des Asynchronmotors auch unter Ueberlast anlaufen zu können verbindet, mit der Fähigkeit, noch unter Vollast, aber insbesondere bei geringer Belastung, verhältnismässig grosse Mengen wattloser Energie ans Netz abgeben zu können.

Zu diesem Zwecke wird der Rotor des Motors nach dem Anlassen, sobald er die normale Tourenzahl erreicht hat, mit Gleichstrom (wie ein Synchronmotor) erregt, worauf er mit einem leichten Ruck in den synchronen Lauf springt. Weil er ein synchronisierbarer Induktionsmotor ist, führt er den Namen *Synchron-Induktionsmotor*, oder kurz *S. I. Motor*.

Um das Material möglichst auszunützen, dient die Dreiphasenwicklung des Rotors zugleich als Erregerwicklung, indem der Gleichstrom in eine Phase hinein und zu den andern zwei Phasen wieder hinausfliesst. Um den Rotorstromkreis nach erreichter asynchroner Normaltourszahl des Motors nicht wieder öffnen zu müssen, wird der Anker des Erregers schon vor dem Anlassen in den Kreis einer Phase geschaltet. Sobald der Anlasser völlig kurz geschlossen ist, fließt der

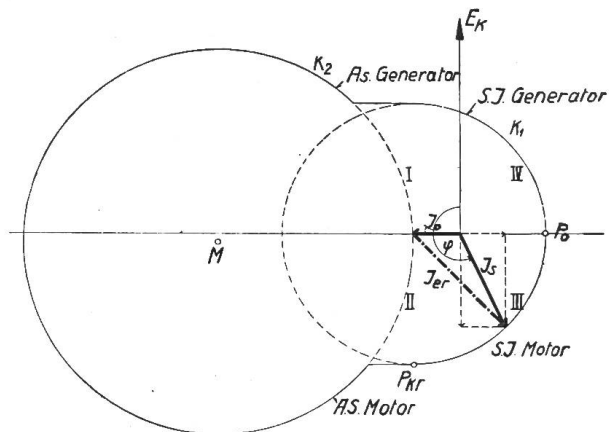


Fig. 43

¹⁾ Einen allgemeineren Fall des Autotransformators stellt der Induktionsregler dar. Die Theorie dieses interessanten Apparates, über den verhältnismässig wenig veröffentlicht wurde, beabsichtigt der Verfasser in einem besonderen Aufsatz zu entwickeln. Eine „Theorie des Induktionsreglers“ ist im „Bulletin-Oerlikon No. 5“ vom November 1921 in gedrängter Darstellung enthalten.

Gleichstrom in den Rotor, ohne den Drehstrom merklich zu stören. Hierauf, sowie auf der ausgezeichneten Dämpfung des Rotors beruht die Fähigkeit des Motors, sich auch unter Vollast in den synchronen Lauf bringen zu können. Erst im Synchronismus verschwindet der Rotordrehstrom. Um möglichst viel wattlose Leistung abgeben zu können, erhält der *S. I. Motor* normalerweise eine grosse Erregung J_{er} und eine kleine Magnetisierungskomponente J_o (Fig. 43). Der Motor arbeitet bei

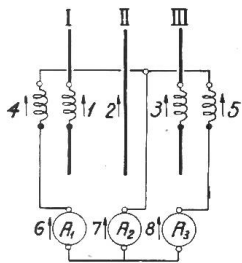


Fig. 44

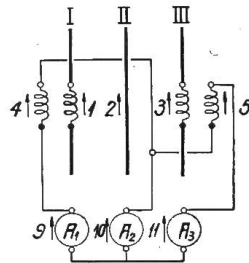


Fig. 45

Normallast mit $\cos \varphi = -0,9$ im dritten Quadranten. Bei dieser Einstellung ist seine synchrone Ueberlastbarkeit etwa 40 bis 50 Prozent über Vollast. Wird die Erregung (normalerweise) konstant gehalten, so bewegt sich bei variabler Belastung die Vektorspitze des Statorstromes J_s auf einem Kreis K_1 , um nach Erreichen des kritischen Punktes P_{kr} auf den Heylandkreis K_2 überzuspringen. In diesem Moment fällt der Motor ausser Tritt und läuft asynchron weiter. Im Leerlauf gibt der *S. I. Motor* ein Maximum an watt-

loser Energie ab P_o . Aus Fig. 43 erkennen wir, dass der *S. I. Motor* in allen vier Quadranten, also auch als Generator (*S. I. Generator*) arbeiten kann.

7. Sehr häufig sieht man sich in der Praxis in die Lage versetzt, verschiedene Apparate in richtiger Weise miteinander verbinden zu müssen. Es handelt sich dann nicht darum ein genaues Diagramm zu entwerfen, sondern meistens genügt schon eine kleine Handskizze, um die richtige Anordnung der Verbindungen mit Sicherheit zu erkennen.

Gerade in solchen Fällen wird die hier entwickelte Methode rasch zum Ziele führen. Fig. 44 und 45 zeigen zwei Schaltungen, welche es mög-

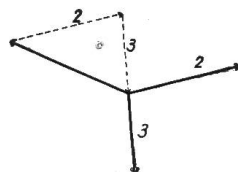


Fig. 46

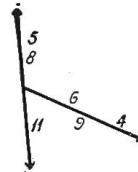


Fig. 47

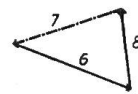


Fig. 48

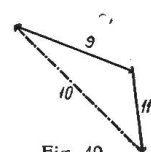


Fig. 49

lich machen sollen, mit nur zwei Stromwandlern und drei Ampèremetern die Ströme aller drei Phasen eines verketteten Drehstromsystems (ohne Nulleiter) messen zu können. Zweifelsohne kann nur eine von beiden Schaltungen die richtige sein.

Die drei Phasen I, II und III (Fig. 44 und 45) seien ungleich belastet. Ihre Ströme seien durch 1, 2 und 3 (Fig. 46) dargestellt. Nach dem Transformatorgesetz erscheinen die Kompensationsströme der Sekundärseiten der Stromwandler (4 und 5) den Primärströmen entgegengesetzt gerichtet als Vektoren 4 und 5 (Fig. 47), wobei wir die Uebersetzung der Stromwandler 1:1 annehmen. Die Bezugspfeile der Ampèremeter 6, 8 und 9 fixieren dieselbe Durchflussrichtung wie die Sekundärspulen der Stromwandler. Die Vektoren 4 und 6, 5 und 8, 4 und 9 müssen also je miteinander zusammenfallen. Nur Stromvektor 11 ist in Anbetracht dessen, dass die Bezugspfeile von 5 und 11 einander entgegenlaufen, dem Vektor 5 gegenüber um 180° gedreht. Da die Bezugspfeile der Ampèremeter alle vom Verbindungsleiter wegweisen, müssen die Stromvektoren 6, 7, 8 und 9, 10, 11 je ein geschlossenes Polygon bilden (48 und 49). Die Ströme von 7 bzw. 10 bilden die Schlusslinien. Man erkennt ohne weiteres, dass Strom 7 mit dem Strom der Phase 2 genau übereinstimmt, während Vektor 10 einen völlig verschiedenen Strom darstellt. Die Schaltung nach Fig. 44 ist also die richtige.

8. Das folgende der Praxis entnommene Beispiel zeigt, zu welchen Abnormitäten das Zusammenwirken von Lade- und Magnetisierungsströmen speziell in Hochspannungsanlagen führen kann. Ein Transformator ist hochspannungsseitig über einen Drehstromspannungswandler durch dessen Nullpunkt an Erde gelegt (Fig. 50). Im allgemeinen wird bei dieser Schaltung auch der Sternpunkt des

Transformators Erdpotential annehmen, (wenn wir von den höhern Harmonischen der Spannung absehen). Es kann aber vorkommen, dass bei bestimmter Abstimmung zwischen den Ladeströmen des Transformators und den Magnetisierungsströmen des Spannungswandlers eine eigenartige Labilität des ganzen Systems gegenüber der Erde auftritt. Eine Klemme des Transformators kann dann Erdpotential annehmen, während die zwei anderen die volle verkettete Spannung gegenüber Erde führen.

Die Kapazität jeder Phase gegen Erde stellen wir durch einen Kondensator dar, den wir uns in der Mitte (dem statischen Schwerpunkt) der Phase angeschlossen denken müssen. Das Diagramm entwickeln wir am besten in der Weise, dass wir von vornherein annehmen, der Punkt P_x (Fig. 50) besitze Erdpotential, so dass

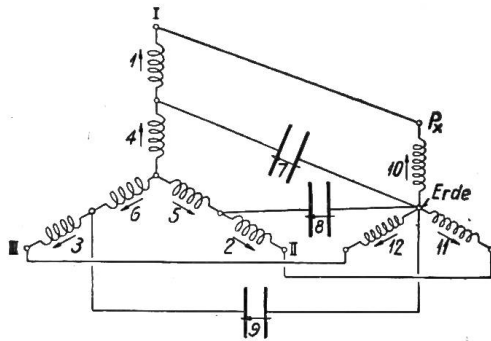


Fig. 50

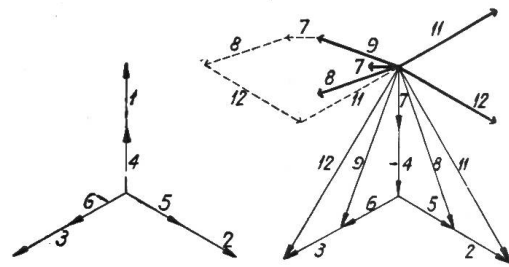


Fig. 51

wir die Spannung und damit auch den Strom in 10 (Fig. 50) gleich Null setzen müssen. Trotz dieser starken Unsymmetrie wird auch jetzt noch wie wir aus Diagramm (Fig. 51) erkennen, den Sätzen II und III a vollkommen Genüge geleistet. Unsere Annahme erweist sich also als richtig, wenn die Magnetisierungsströme 11 und 12 des Spannungswandlers auf das System „abgestimmt“ sind. Das Diagramm zeigt uns, dass die Erdung einer Klemme keinen besonderen Ladestrom hervorruft, der beim Unterbrechen der Erdung als Lichtbogen in die Erscheinung treten müsste. In dieser Hinsicht arbeitet der abgestimmte Spannungswandler in ähnlicher Weise wie die bekannte „Petersen-Drosselspule“.

9. Viele Wechselstromprobleme lassen sich nur mit Hilfe der höheren Mathematik exakt behandeln. Für den Nichtgeübten hat dies den Nachteil, dass er sich dann über das Zustandekommen der elektrischen Verhältnisse keine klare Vorstellung machen kann. Er wird es also begrüßen, wenn er sich mit Hilfe einer einfachen Methode ein approximatives Bild der elektrischen Zustände entwickeln kann.

Ein Beispiel dieser Art ist die elektrische Fernleitung. Wir wollen uns hier lediglich darauf beschränken, das Leerlaufdiagramm zu konstruieren, obwohl es natürlich mit unserer Methode möglich ist, jeden Belastungszustand darzustellen. Der Einfachheit wegen vernachlässigen wir die sog. Ableitung und erhalten in Fig. 52 das schematische Bild der Fernleitung, worin die stetig verteilten Widerstände und Kapazitäten der wirklichen Leitung als Einzelwiderstände und -kapazitäten dargestellt sind. Die Bezugspfeile tragen wir am zweckmässigsten so ins Schema ein, wie es in Fig. 52 geschehen ist. Wir beginnen vorteilhafterweise mit der Endspannung der Leitung, also der Spannung im Punkte E und tragen diese willkürlich als Vektor 1 im Diagramm Fig. 53 ein. Diese Spannung besitzt im Kondensator 1 einen ihr um 90° nachteilenden Strom 1, der auch den ohmschen (2) und induktiven Widerstand (3) durchfließt. Dieser Strom erzeugt die ohmsche Gegenkraft 2 und die induktive $E.M.K.$ 3, welche beide sich gemäss Satz II mit Spannung 1 zum Spannungsvektor 4 zusammensetzen. Diese Spannung 4 erzeugt ihrerseits im Kondensator 4 den Strom 4,

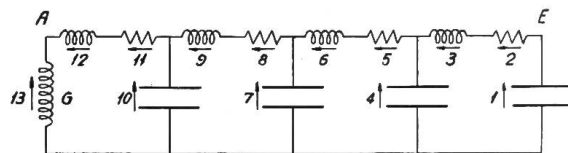


Fig. 52

der in Uebereinstimmung mit Satz III zusammen mit Strom 3 den Strom 5 und 6 liefert. Durch fortgesetztes Zusammensetzen aller Ströme und Spannungen erhalten wir schliesslich die Generatorspannung 13 und den Generatorstrom 13, der entsprechend der entgegengesetzten Richtung von Bezugspfeil 13 zu demjenigen von 12, dem Strome von 11 und 12 gegenüber um 180° gedreht im Diagramm erscheint (Fig. 53). Der Generator G (13) arbeitet generatorisch-induktiv, er gibt elektrische

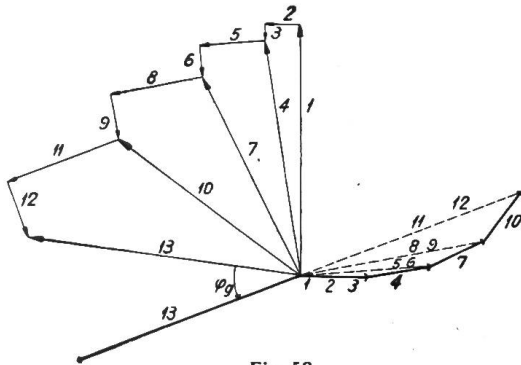


Fig. 53

Leistung zur Deckung der Verluste ab und nimmt wattlose Leistung auf. Im Diagramm fällt uns vor allem die grosse Phasenverschiebung von beinahe 90° zwischen Anfangs- und Endspannung auf, sowie die Tatsache, dass die Spannung der Leitung mit wachsender Entfernung vom Generator zuerst fällt, um dann gegen das Ende der Leitung wieder anzusteigen (Ferranti-Effekt). Das hier entwickelte Beispiel stellt einen extremen, in der Praxis kaum mehr vorkommenden Fall dar. Es soll lediglich dazu dienen, die etwas paradox erscheinenden Phänomene der langen Leitungen anschaulich darzustellen.¹⁾

10. Zum Schlusse wollen wir noch zeigen, in welcher Weise man mit dieser Methode auch rückwärts, vom Diagramm auf das Schema schliessen kann. Dieser Weg wird mit Vorteil da eingeschlagen, wo es sich darum handelt, eine Schaltung zu erfinden, die eine gewünschte elektrische Arbeitsweise mittels zu bestimmender Maschinen und Apparate ermöglichen soll. Als Beispiel wählen wir die Einphasen-Nutzbremmung. Wir wollen versuchen eine Schaltung zu entwickeln, die mit den einfachsten Mitteln (also ohne besondere Hilfsmaschinen, wie Phasenumformern usw.) arbeiten soll. Wir denken uns in Fig. 54 die Zentrale G , welcher vom Lokomotiv-Transformator T elektrische Leistung zugeführt wird. Auf die Niederspannungsseite des Transformators arbeitet der Einphasenmotor als Generator. Damit dieser Motor auch bei den verschiedensten Tourenzahlen eine Spannung von netzgleicher Frequenz erzeugt, muss er auf irgend eine Weise vom Netz her im Felde F erregt werden. Um aber die vektorielle Stellung der Erregerspannung bestimmen zu können, müssen wir zuerst die Lage der Ankerrotations- $E.M.K.$ festlegen. Zu diesem Zwecke gehen wir aus von der Zentralenspannung des Einphasengenerators G , die wir willkürlich vertikal nach oben annehmen (Fig. 55). Nach unseren bekannten Sätzen erhalten wir sodann die Spannungen 2 und 3, die wir aus Gründen der Einfachheit gleich gross annehmen. Soll jetzt die Lokomotive elektrische Energie ans Netz liefern, so muss Spule 2 des Transformators generatorisch arbeiten. Da es uns vor allem darum zu tun ist, Energie abzugeben, selbst wenn wir dabei das Netz wattlos belasten, so begnügen wir uns, wenn die Primärseite des Transformators (2) generatorisch-induktiv arbeitet. Wir erhalten so den Strom 2 und 3 (Fig. 55) und unter Anwendung des Transformatorgesetzes die Ströme 3, 4 und 5. In 4 denken wir uns die Reaktanz des ganzen Sekundärkreises konzentriert. Der Sekundärstrom erzeugt in ihr die induktive $E.M.K.$ 4 (Fig. 55), welche mit Spannung 3 und der Rotations- $E.M.K.$ des Rotors ein geschlossenes Polygon ergeben muss. Aus dieser Bedingung erhalten wir die Lage und Grösse der Rotations- $E.M.K.$ 5 als Schlusslinie des Spannungspolygons 4, 3 und 5 (Fig. 55). Unseren Festsetzungen über rotierende Systeme gemäss muss der Feldstrom ein mit 5 genau in Phase liegender

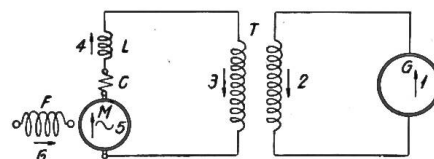


Fig. 54

¹⁾ Lesern, welche sich eingehender mit dem Fernleitungsproblem befassen wollen, sei der Sonderabdruck aus der Schweiz. Techniker Zeitung: „Ueber eine moderne und praktische Berechnungsmethode sehr langer Hochspannungsfernleitungen mit Potentialregelung durch Synchronmotoren“ zum Studium empfohlen. Erhältlich beim Verfasser: Ernst Schönholzer, Brauerstr. 62, Winterthur.

Vektor 6 sein. Er entwickelt im Feld die *E.M.K.* 6, welche ihm um 90° nachheilt. Um das Feld in passender Weise erregen zu können, müssen wir seine Klemmen an zwei Punkte anschliessen, deren Spannung mit Vektor 6 genau zusammenfällt. Wir wählen beispielsweise die Anzapfung Z des Transformators und die Verbindungsstelle von L und C (Fig. 56) als Anschlusspunkte für die Erregung. Schaltung Fig. 56 und Diagramm Fig. 55 stimmen jetzt vollständig miteinander überein. Dennoch wären wir mit dieser Schaltung nicht imstande eine nennenswerte Leistung ans

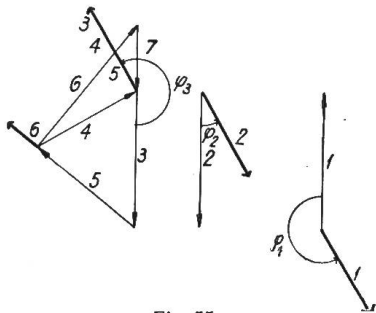


Fig. 55

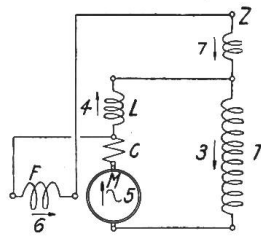


Fig. 56

Netz abzugeben. Denn schon bei sehr kleiner Tourenzahl des Motors würde neben dem normalen Wechselstrom ein mit grosser Heftigkeit anwachsender selbsterregter Gleichstrom den Rotor- und Feldstromkreis durchfliessen. Der Vorgang ist genau derselbe wie bei einer normalen, kurzgeschlossenen Hauptstromdynamo. Denken wir uns, dass aus irgend einer Ursache ein Stromstoss das Feld *F*

z. B. in der Richtung des Bezugspfeiles durchfliesse, so muss unseren Festsetzungen über den Sinn der Bezugspfeile gemäss bei positiver Rotationsrichtung des Ankers (die wir in unserem Beispiel angenommen haben) eine *E.M.K.* in Richtung des Rotorpfeiles entstehen. Diese *E.M.K.* unterstützt den Stromstoss des Feldes, weil die Bezugspfeile gleichen Durchlaufssinn haben, so dass eine gegenseitige Steigerung zwischen Feld und Anker (Selbsterregung) eintreten muss. Der nächstliegende Gedanke, die Selbsterregung zu unterdrücken, ist der, das Feld über einen Transformator zu speisen, um dem Gleichstrom den Weg abzuschneiden. Führt man den Versuch mit dieser Schaltung aus, so entsteht neben dem netzfrequenzgleichen normalen noch ein sehr starker niederfrequenter Wechselstrom, der ausser dem Rotor auch die Zuleitungskabel und Transformatorenschichten in Schwingungen versetzt. Die Erzeugung dieses Wechselstromes kann man sich folgendermassen vorstellen: Denken wir uns das Feld von einem Stromstoss durchsetzt, so wird im Anker eine zusätzliche *E.M.K.* erzeugt, die im Stromkreis des letzteren einen anwachsenden Strom hervorruft. Dieser sich verändernde Strom transformiert sich wie ein Wechselstrom und unterstützt auf der andern Seite des Transformators den Feldstromstoss. Es tritt also auch hier eine gegenseitige Steigerung ein. Während aber bei Schaltung ohne Transformator nach Erreichen des Kurzschlussstromwertes die Erregung stationär bleibt, wird bei Zwischenschaltung des Transformators infolge der Feldsättigung ein Punkt erreicht werden, wo die Zunahme des Rotor-Gleichstroms zu gering ist, um auf der Feldseite des Transformators noch so viel Spannung induzieren zu können, um den Feldstrom aufrecht zu erhalten. Die Folge ist eine Abnahme dieses letzteren und hiermit auch ein Sinken des Rotorstromes. Der fallende Ankerstrom induziert jetzt eine *E.M.K.*, welche das Abnehmen des Feldstromes noch beschleunigt. Der Ankerstrom fällt so rasch auf Null herab, dass die von ihm im Feldkreis induzierte *E.M.K.* einen Feldstrom entgegengesetzter Richtung hervorbringt, der einen ebenso rasch anwachsenden, aber in negativer Richtung fliessenden Rotorstrom erzeugt. Nun wiederholt sich in negativer Richtung dasselbe Spiel wie vorher in der positiven, so dass ein dauerndes Schwingen entsteht. Der Versuch, ohmsche Widerstände zur Dämpfung einzubauen, bleibt erfolglos, da der kritische Widerstand des Systems bei normaler Tourenzahl viel zu hoch liegt. Baut man hohe Widerstände ein, so wird der $\cos \varphi$ sehr schlecht und es wird so viel Energie von den Widerständen aufgenommen, dass von einer *Nutzbremmung* keine Rede mehr sein kann. Das einzige Mittel, welches hier helfen könnte, wäre der Einbau genügend grosser und dabei leichter Kapazitäten, doch existieren solche leider nicht.

Die obigen Entwicklungen haben uns gezeigt, dass eine *Nutzbremsschaltung*

nur dann keine Selbsterregung aufweist, wenn die Verbindung zwischen Feld und Anker eine solche ist, dass ein Stromstoss, der den Anker im Sinne des Bezugspfeiles durchläuft, sich im Systeme so fortpflanzt, dass er das Feld, gegen dessen Bezugspfeil durchsetzt, wodurch er sich selber vernichtet.

Hierzu muss noch bemerkt werden, dass sich ein Stromstoss durch einen Transformator in der Weise fortpflanzt, dass er mit dem Bezugspfeile der Sekundärseite läuft, wenn er auf der Primärseite gegen den Bezugspfeil gerichtet ist und umgekehrt.

(Eine Ausnahme von dieser Regel bilden diejenigen Schaltungen, die mit mehreren Motoren, von denen einer den andern erregt, arbeiten, falls der erste Motor im Felde direkt an den Haupttransformator angeschlossen ist. Sobald die Resultante aller Arbeitsströme mit wachsender Tourenzahl der Motoren anfängt kapazitiv zu arbeiten, ist sie imstande, wenigstens mit einer Komponente, das Feld des ersten Motors zu erregen, wodurch sich das System selbst erregt, was sich durch Schwingungen der Motoranker oder wenigstens durch Aufnahme hoher Ströme bemerkbar macht.)¹⁾

Eine der praktischsten Schaltungen, die in ihrer Einfachheit und Betriebssicherheit kaum mehr übertroffen werden dürfte, ist diejenige von Dr. H. Behn-Eschenburg, Generaldirektor der Maschinenfabrik Oerlikon. Bei dieser Schaltung wird das Feld direkt an eine Anzapfung des Haupttransformators gelegt (Fig. 57). Dadurch erhält die Ankerrotations-*E.M.K.* allerdings eine etwas zu kleine Phasennäheilung (von 90°) gegenüber der Transformer *E.M.K.* (Fig. 58), wodurch der Einbau einer grösseren Reaktanz erforderlich wird, doch hat dies andernteils den Vorteil, dass das ganze System ausserordentlich robust und gegen Spannungsschüsse unempfindlich wird. Unangenehmer ist der niedere Leistungsfaktor, wodurch einestheils die Motor-Wattleistung beschränkt und andernteils das Netz stark wattlos belastet wird. Doch steht bahntechnisch die Frage der Einfachheit und Betriebssicherheit so im Vordergrund, dass die übrigen Bedenken dagegen zurücktreten. Eine Selbsterregung ist bei dieser Schaltung ausgeschlossen. Denn nehmen wir an, ein Stromstoss durchfliesse den Rotor im Sinne seines Bezugspfeiles, so wird er die Spule 3 ebenfalls positiv durchsetzen. Nach dem Vorhergesagten transformiert sich dieser Stoss so, dass in 7 ein sekundärer Stoss erfolgt, der sowohl 7 wie auch 6 im negativen Sinne durchsetzt. Der Stoss wird sich also selbst vernichten.²⁾

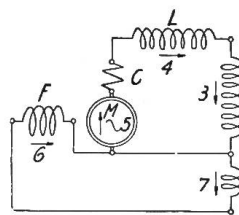


Fig. 57

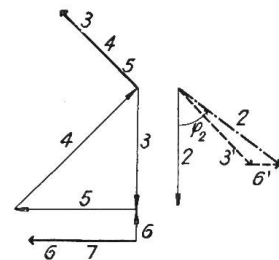


Fig. 58

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, diese Schaltung in bezug auf den Leistungsfaktor zu verbessern. Doch entstand die Verbesserung des $\cos \varphi$ und die Verkleinerung der zusätzlichen Reaktanz meistens auf Kosten der Einfachheit und Betriebssicherheit, zweier Qualitäten, die bahntechnisch ausschlaggebend sind.

Eine Steigerung des Leistungsfaktors erreicht man nach dem Vorschlag Prof. Kuhlmanns in sehr einfacher Weise, indem man an dieselbe Transformatorstufe anstatt eines, zwei Motoren in Serie anschliesst und die Reaktanzen entsprechend umschaltet. Während der innere $\cos \varphi$ zwischen Rotorstrom und Transformator *E.M.K.* um ca. 30% steigt, nimmt der Netz- $\cos \varphi$ nur um ca. 10% zu. Die innere Phasenverschiebung zwischen Rotorstrom und *E.M.K.* dagegen fällt um ca. 35%, so dass

¹⁾ Eine besondere Art der Selbsterregung kann durch die Wendepole hervorgerufen werden. Sie tritt hauptsächlich dann auf, wenn ein Motor den andern erregt. Doch würde es zu weit führen, hier auch auf diese Erscheinung näher einzugehen.

²⁾ Siehe auch den Sonderabdruck dieses Bulletins, Heft No. 10 vom Jahrgang 1918: „Anlage zur Nutzbremse von Fahrzeugen mit Kommutatormotoren für Einphasenwechselstrom“, von Dr. H. Behn-Eschenburg.

mit dieser Schaltung (gleiche Motorenstrombelastung vorausgesetzt) nur noch etwa 65% der früheren Leistung abgebremst werden können.

Einen sehr guten Leistungsfaktor erhält man nach einer der Maschinenfabrik Oerlikon und dem Verfasser patentierten Schaltung, bei der die Anker zweier Motoren in Serie geschaltet sind. Das Feld des ersten Motors liegt ebenfalls am Transformator, während das zweite Feld durch den ersten Motor gespeist wird. (Schweiz. Patent No. 92041 und D. R. P. No. 349 605). Neben dem sehr günstigen Leistungsfaktor ($\cos \varphi = 0,93$ wurde gemessen) besitzt diese Schaltung die Nachteile der Unsymmetrie und der Selbsterregung (bei hohen Geschwindigkeiten), weil die Motoren wattlose Leistung in das Feld des ersten Motors abgeben. Ausserdem können mit dieser Schaltung im besten Falle nur 70% der Leistung nach Schaltung Fig. 57 abgegeben werden.

Eine weitere von der Maschinenfabrik Oerlikon, Herrn Ing. H. Hegetschweiler und dem Verfasser zum Patent angemeldete Schaltung, soll es ermöglichen, bei gegebenem Strom möglichst viel Leistung abzubremsen, oder auch bei gegebener Bremsleistung die Motoren möglichst wenig zu erwärmen. Fig. 59 stellt die Schaltung

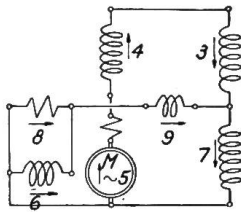


Fig. 59

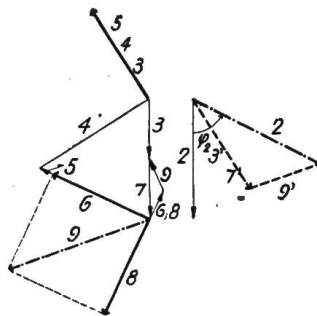


Fig. 60

und Fig. 60 das zugehörige Diagramm dar. Der Unterschied gegenüber Schaltung Fig. 57 ist nur der, dass dem Feld ein ohmscher Widerstand parallel und eine Drosselspule in Serie geschaltet ist, wodurch Spannungsvektor 5 gehoben wird. Als ohmscher Widerstand werden die bei der Talfahrt unbenutzten Wendeshunts verwendet. Das Mehrgewicht der zweiten Drosselspule wird aufgehoben durch die ca. 25% betragende Gewichtverminderung der ersten Reaktanzspule. Mit dieser Schaltung

können (bei gleichem Motorenstrom) ca. 20–25% mehr Leistung abgebremst werden als nach Schema Fig. 57. Doch gelangen von diesem Betrag nur ca. 75% ins Netz. Der Rest wird auf der Lokomotive verzehrt. Dieser Verlust spielt energetisch keine sehr grosse Rolle, da die Nutzbremmung hauptsächlich dazu dient, die enormen, bei der Talfahrt frei werdenden Energien auf eine bequeme Art zu entfernen, so dass keine besonderen, Platz beanspruchenden Bremswiderstände mitgeführt werden müssen. Der $\cos \varphi$ der letzten Schaltung ist ca. 25% schlechter als derjenige nach Fig. 57. Bilden wir aber das Verhältnis:

$$\frac{\text{der Lokomotive zugeführte wattlose Energie}}{\text{total abgebremste Energie}},$$

welches allein massgebend ist, so beträgt dieser Unterschied nur noch 6% gegenüber der anderen Schaltung.

Wird in dieser Schaltung nach Vorschlag von Ing. H. Hegetschweiler der Strom des Rotors zur Erregung eines zweiten Motors benutzt, so tritt eine ausserordentliche Steigerung des gesamten Leistungsfaktors ein, doch ist das System dann nicht mehr stabil, und hat den Nachteil, dass die Motoren ungleich belastet werden.

Es mag noch als Vorzug der Schaltung nach Fig. 59 hervorgehoben werden, dass bei Verwendung von zwei Motoren die Felder der beiden Motoren in Serie geschaltet und direkt an den Stufenschalter angeschlossen werden können, wodurch sich besondere Hüpfen erübrigen.