

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 37 (1946)
Heft: 23

Artikel: Ein Streifzug durch die netzseitigen Spannungen und Ströme von Mutatoren
Autor: Fässler, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061139>

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: 16.02.2026

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

bringen, um dennoch Hand zu vernünftigen Kompromissen zu bieten. In diesem Sinne ist es lebhaft zu begrüßen, dass der Bundesrat wenigstens einen Punkt des umstrittenen Gesetzesentwurfes in die Tat umgesetzt hat: durch Kreisschreiben vom 7. August 1946 hat der Chef des Post- und Eisenbahndepartementes, Bundesrat Celio, die Anhandnahme eines generellen Planes angekündigt, der unser ganzes Land umfassen müsse und die einzelnen Gebiete abgrenzen werde, die im Hinblick auf die zweckmässige Nutzbarmachung der Wasserkräfte geschlossene Einheiten bilden⁶⁾. Dieser Plan müsse im Geist der Zusammenarbeit zwischen den eidgenössischen Instanzen, den kantonalen Behörden, den Elektrizitätsunternehmungen und den Ingenieurbureaux ausgearbeitet werden. Zu seiner Ausarbeitung hat der Bundesrat beim Amt für Wasserwirtschaft die Stelle eines Vizedirektors geschaffen mit dem Auftrag, nicht nur diesen Plan aufzustellen, sondern die Verwirklichung baureifer Projekte und die übrigen Aufgaben des Amtes auf dem Gebiete der Wasserkraftnutzung zu fördern. Das Kreisschreiben stellt fest, dass die Ausführung des Programmes, nämlich der Bau und Betrieb der Werke, Sache der Elektrizitätsunternehmungen ist, welche die Verantwortung und das finanzielle Risiko auf sich nehmen müssen.

Das ist wahrhaft echte schweizerische Energiewirtschaft und es ist nur zu hoffen, dass sich alle Beteiligten ohne Voreingenommenheit an der Lösung dieser nationalen Aufgabe im Geiste der Zusammenarbeit beteiligen. Durch positive Mitarbeit an diesem Plan und seiner Ausführung werden die Kantone nicht allein ihre materiellen Interessen wahren, sondern es vermeiden, den Föderalismus «ad absurdum» zu führen und dadurch ihr Verfügungsrecht über die Wasserkräfte für die Zukunft zu gefährden.

Wir haben vorhin gesehen, wie die Wasserkraftnutzung und Elektrizitätsversorgung bei der Produktion der Elektrizität und bei ihrer Anwendung immer mehr mit der Brennstoffwirtschaft zusammenhängt. Nun gibt es bei den Bundesbehörden im

einen Departement ein Amt für Wasser- und ein solches für Elektrizitätswirtschaft und in einem andern Departement eine Handelsabteilung, die die Einfuhr der Brenn- und Treibstoffe, die den grösseren Teil des schweizerischen Bedarfs an Energie zu decken haben, behandelt. Uebrigens gibt es immer noch im KIAA eine Sektion für Elektrizität und eine solche, die sich mit den Brennstoffen befasst. Es liegt auf der Hand, dass die Energiewirtschaft unter einer derartigen Zersplitterung leiden muss. Herr Nationalrat Trüb, Direktor des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich, hatte im Jahre 1944 mit einem ersten Postulat die Schaffung eines Amtes für Brennstoffwirtschaft und eine straffe Koordination gefordert⁷⁾; sein Postulat mit nach Planwirtschaft aussehenden, administrativen Massnahmen ist aber vom Nationalrat abgelehnt worden. Dem verfolgten Grundgedanken aber ist von Herrn Bundesrat Celio zugestimmt worden und wir wollen hoffen, dass er in nicht allzu langer Zeit auf irgendeine Art verwirklicht werde.

Mit einem zweiten Postulat hat Nationalrat Trüb im März 1945 den Bundesrat ersucht, einerseits die Wasserkraftnutzung und die Elektrifikation des Haushaltes zu fördern und andererseits die Kohlenveredelung in den grossen Gaswerken zusammenzufassen⁸⁾. Dieses Postulat ist angenommen worden. Damit kommen wir an einen der offenen Punkte der Verbrauchswirtschaft, nämlich das Problem Gas und Elektrizität. Die Zeit ist mir kurz bemessen, ich beschränke mich daher auf den Wunsch, dass diese Frage, mit manchen andern, für unser Land nicht minder wichtigen Problemen der Energiewirtschaft im allgemeinen Sinne durch eine Fachkommission geprüft werde, die den, wie wir hoffen, besser koordinierten oder zusammengefassten Amtsstellen beratend zur Verfügung stehen würde. Wäre das nicht gute, schweizerische Energiewirtschaft?

Adresse des Autors:

H. Niesz, Direktor der Motor-Columbus A.-G., Baden.

⁷⁾ Bull. SEV Bd. 35(1944), Nr. 16, S. 452;
Bull. SEV Bd. 36(1945), Nr. 1, S. 19...21;
Bull. SEV Bd. 36(1945), Nr. 20, S. 683...685.

⁸⁾ Bull. SEV Bd. 36(1945), Nr. 26, S. 884...887.

⁶⁾ Bull. SEV Bd. 37(1946), Nr. 18, S. 546 u. 548.

Ein Streifzug durch die netzseitigen Spannungen und Ströme von Mutatoren

Von E. Fässler, Zürich

621.314.65

Nach einer kurzen Beschreibung der gleichspannungs- und drehstromseitigen Netzstrom-Form wird auf die ihren Verlauf kennzeichnenden Veränderlichen, den Leistungsfaktor und die Gesetzmässigkeiten ihrer Oberwellen eingegangen.

Après une brève description de la forme du courant redressé et du courant triphasé du réseau, l'auteur s'occupe des variables qui en caractérisent l'allure, du facteur de puissance et des lois régissant leurs harmoniques.

1. Einleitung

Den Schlüssel zum Verständnis der Spannungs- und Stromformen an den Klemmen des Mutators bilden drei vereinfachende Annahmen. Auf Grund derselben erhält man einen Einblick in ihren gesetzmässigen Aufbau und ist bereits in der Lage,

ihre Mittel- und Effektivwerte anzugeben. Zur eingehenden Erfassung der auftretenden Formen werden Ordnungszahl und Grösse der Oberwellen bestimmt. Abschliessend werden die einleitenden Annahmen teilweise fallen gelassen, um das Bild der Spannungs- und Stromformen noch weiter zu verfeinern.

Die erste Annahme bezieht sich auf das speisende Drehstromnetz: Es sei unendlich stark und seine Spannung sinusförmig. Eine weitere Annahme betrifft den gleichstromseitigen Verbraucher. Bei diesem lassen sich in den meisten Fällen Induktivitäten feststellen, sei es in der Form von Induktivitäten rotierender Maschinen, der Sammelschienen grösserer Anlagen, oder künstlich im Gleichstromkreis angeordneter Drosselspulen. Ihre Wirkung besteht in einer gleichzeitig für Verbraucher und Mutator vorteilhaften Glättung des Gleichstromes. Ein absolut glatter Gleichstrom bildet die zweite Annahme. Die dritte Annahme betrifft eine Eigenschaft der Mutatorgruppe selber. Im drehstromseitigen Netzstrom eines Mutators lässt sich ein stufenartiger Verlauf erkennen. Der Anstieg bzw. der Abfall von einer Stufe zur andern ist durch interne Kurzschlussvorgänge bestimmt, die beim Aufnehmen einer neuen Anode einsetzen und die Löschung der abzulösenden Anode bewirken. Die betreffenden Kurzschlussströme sind u. a. vom ohmschen Widerstand der Transformatorwicklungen und von den induktiven Widerständen seiner Streupfade bestimmt. Es sei drittens angenommen, dass im zweckmässig gebauten Mutator-Transformator der ohmsche Widerstand gegenüber dem induktiven zu vernachlässigen ist.

2. Verlauf der Gleichspannung und des drehstromseitigen Netzstromes

Gleichstromseitig ist nach der zweiten Annahme der Strom konstant. Der Aufbau der Spannung geht aus Fig. 1 a...d hervor. Fig. 1 a zeigt die Gesamtheit der um den Winkel $\frac{2\pi}{m}$ verschobenen, ideellen Phasenspannungen u (m Phasenzahl). In einfachen Fällen sind diese identisch mit den Sekundärspannungen des Mutator-Transformators (Gabelschaltung). In der Regel jedoch gehen die ideellen Phasenspannungen erst aus den Sekundärspannungen hervor, sei es als Mittelwert (Saugschaltungen), als Summenwert (Serieschaltungen) oder als Differenzwert (Grätzschaltungen). Die Frequenz dieser ideellen Phasenspannungen ist somit identisch mit derjenigen des Drehstromnetzes.

Im Leerlauf folgt die Gleichspannung dem jeweils höchsten Spannungswert nach Fig. 1 a. Sie ist demnach durch die Spannung u_{go} gegeben (Fig. 1 b). Ihr Mittelwert U_{go} sei als (unregulierte) Leerlaufspannung bezeichnet. Wird der durch den Schnittpunkt der sich ablösenden Phasenspannungen festgelegte (natürliche) Zündpunkt der Anoden um den Winkel α verschoben, so geht die Leerlaufspannung u_{go} über in die regulierte Leerlaufspannung $u_{go\alpha}$. Ihr Momentanwert folgt wiederum der ideellen Phasenspannung nach Fig. 1 a, wie die Leerlaufspannung nach Fig. 1 b, nur dass jetzt ein um den Steuerwinkel α später liegender Ausschnitt aus den Sinuskurven zu berücksichtigen ist (Fig. 1 c). Ihr Mittelwert $U_{go\alpha}$ ist gleich dem $\cos \alpha$ -fachen Wert der Leerlaufspannung U_{go} .

Wird der Mutator belastet, so geht die Gleichspannung über in die Form nach Fig. 1 d. Der Ue-

bergang von einer Phasenspannung zur andern erfolgt nicht mehr momentan, sondern unter Zwischenschaltung eines Intervalles des Winkels γ , in welchem die Gleichspannung u_g dem Mittelwert der benachbarten Phasenspannungen folgt. Der Winkel γ wird als Ueberlappung bezeichnet, da in diesem Intervall die im Mutator sich ablösenden Ano-

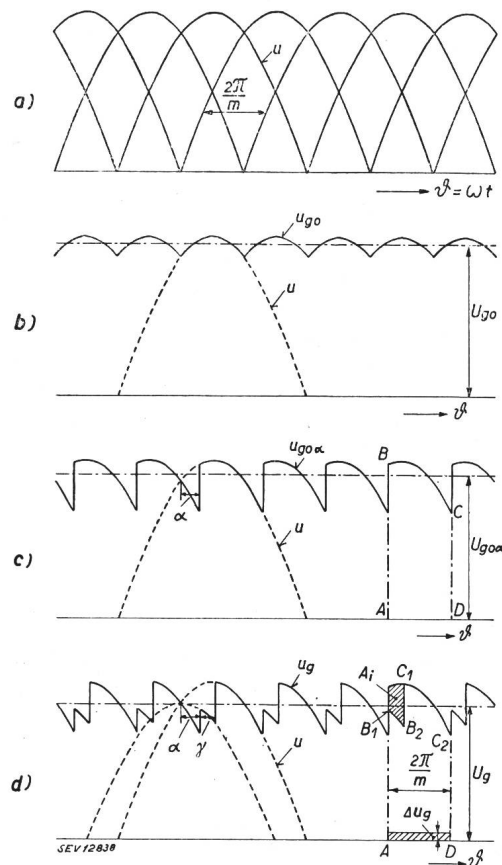


Fig. 1.

Verlauf der Gleichspannung

- a) ideelle Phasenspannung.
 - b) (unregulierte) Leerlaufgleichspannung.
 - c) regulierte Leerlaufgleichspannung.
 - d) induzierte Gleichspannung.
- α Steuerwinkel, γ Ueberlappung, m Phasenzahl
 U_{go} , U_g Spannungsmittelwerte.

denströme gleichzeitig fließen (sich überlappen). Die Spannung u_g stellt die bei Berücksichtigung der Transformatorstreuung in den Gleichstromkreis resultierend eingeführte gleichgerichtete Spannung dar und wird als induzierte Gleichspannung bezeichnet (Mittelwert U_g).

Gegenüber der Spannungsfläche $ABCD$ der Leerlaufspannung in Fig. 1 c ist die Fläche $(AB_1B_2C_1C_2D)$ der Fig. 1 d um den Flächenzipfel A_1 kleiner, welcher offenbar einen Spannungsabfall zur Folge hat. Wird dieser Zipfel in ein flächengleiches Rechteck der Basis $\frac{2\pi}{m}$ verwandelt, so gibt dessen Höhe ΔU_g direkt den zugehörigen induktiven Gleichspannungsabfall an. Es lässt sich zeigen, dass dieser dem Gleichstrom streng proportional ist.

Drehstromseitig ist nach der ersten Annahme die Spannung sinusförmig. Um den Verlauf des Netzstromes aufzuzeigen, hat man von seinen Bausteinen,

dem Anodenstrom und dem Magnetisierungsstrom, auszugehen.

In Fig. 2 a stellen die Sinuskurven u' , u'' die Phasenspannungen sich ablösender Ventilstrecken dar, die etwa kathodenseitig miteinander verbunden seien. Nimmt die Anode 2 (Phasenspannung u'') um den Steuerwinkel α nach dem Schnittpunkt S der Phasenspannungen u' und u'' auf, so sind von die-

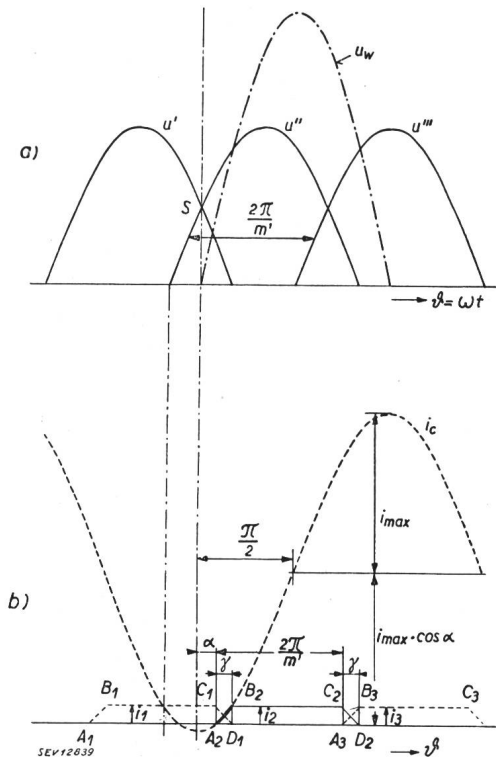


Fig. 2.

Darstellung des Anodenstromes

- a) Phasenspannung u und Wendespannung u_w .
 b) Aufbau des Anodenstromes aus Gleichstrom und Kurzschlußstrom i_c .
 α Steuerwinkel, γ Ueberlappung, m' Phasenzahl.

sem Moment an die Phasen über die Ventilstrecken kurzgeschlossen. In diesem Kurzschlusskreis erzeugt die Wendespannung $u_w = u'' - u'$ einen Kurzschlußstrom i_c , welcher den Strom der aufnehmenden Anode längs der Kurve A_2B_2 , den Strom der abzulösenden Anode längs der Kurve C_1D_1 hoch- beziehungsweise abklingen lässt (Figur 2 a und 2 b). In D_1 geht der Strom der Anode 1 durch Null und erlischt, da die Ventilwirkung Ströme in Richtung Kathode—Anode nicht zulässt.

Nach der zeitlichen Verschiebung $\frac{2\pi}{m'}$ der Phasen-

spannungen nimmt vom Punkte C_2 an der Strom der Anode 2 nach der gleichen Kurve C_2D_2 ab, wie vorher der Strom der Anode 1 (C_1D_1). Während der Ueberlappungsperiode A_2D_1 ist die Summe der Anodenströme gleich dem Gleichstrom oder einem Bruchteil desselben (Saugschaltungen), und nach der zweiten Annahme konstant, so dass C_1D_1 durch Differenzbildung unmittelbar aus A_2B_2 hervorgeht. Ebenso ist der Momentanwert des Anodenstromes von B_2 bis C_2 konstant.

Nach der dritten Annahme besteht der Kurzschlußstrom i_c aus einer der Wendespannung um

90° nachverschobenen Sinuswelle (stationäres Glied) und dem den Uebergang vermittelnden konstanten Ausgleichstrom, welcher durch die Anfangsbedingungen festgelegt ist. Der Kurzschlußstrom hat demnach den in Fig. 2 b dargestellten Verlauf. Der Amplitudenwert i_{max} ist dem Kehrwert des induktiven Widerstandes des Kommutierungskreises proportional. Die Achse der Sinuswelle ist um $i_{max} \cos \alpha$ gegenüber der Stromachse erhöht (Ausgleichsglied). Der Kurzschlußstrom fließt lediglich während der Kommutierungsperiode (Kurvenglied A_2B_2); das folgende Kurvenglied ist daher gestrichelt gezeichnet. Damit ist der Verlauf des Anodenstromes festgelegt; er verläuft gemäss der Kurve $A_2B_2C_2D_2$.

Aus den Anodenströmen leiten sich die sekundären Amperewindungen des Mutatortransformators ab. Bei der besonders durchsichtigen Schaltung mit 2schenkliger Saugdrosselspule sind sekundär pro Säule zwei Teilwicklungen mit entgegengesetzt gerichteten magnetischen Achsen angeordnet, welche zwei um 180° verschobene Anodenströme führen. Somit ergibt sich für die sekundären Amperewindungen der in Fig. 3 angegebene Verlauf.

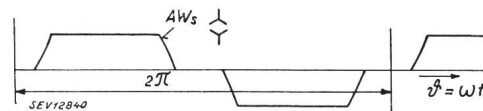


Fig. 3.

Sekundäre Amperewindungen der Schaltung mit zweiseinkliger Saugdrosselspule

Infolge des magnetischen Gleichgewichtes sind bei Schaltungen ohne besondere Ausgleichwicklung die Amperewindungen des primären Belastungsstromes gleich den sekundären Amperewindungen. Um den gesamten Primärstrom zu erhalten, ist der Magnetisierungsstrom zu addieren, welcher im wesentlichen der Spannungskurve um 90° nacheilt. Bei primärer Sternschaltung ist der Netzstrom identisch mit dem in dieser Weise erhaltenen Primärstrom (Fig. 4a), während sich der Netzstrom bei primärer Dreieckschaltung aus der Differenz zweier um 120° verschobener Primärströme ergibt (Fig. 4b). Beträgt die Brenndauer des Anodenstromes $60^\circ + \gamma$ (sekundär 6-Phasen-Stern-Schaltung) oder $180^\circ + \gamma$ (Serieschaltung von Zweiphasensystemen), so kann bei primärer Sternschaltung nur ein Teil der sekundären von den primären Amperewindungen kompensiert werden; der restliche, die Oberwellen von durch 3 teilbarer Ordnungszahl enthaltende Teil ist von einer besonderen Ausgleichwicklung zu übernehmen. Da sich hierbei primär keine neuen Stromformen ergeben, sei hier nicht weiter darauf eingegangen.

Die Fig. 4 a und 4 b stellen die wichtigsten Netzstromformen des 6-Phasen-Mutators dar. Aus ihnen leitet sich die Stromform des 12-Phasen-Mutators ab, welcher durch Parallelschaltung der zwei eben besprochenen Saugschaltungen aufgebaut ist. Die Primärströme in Fig. 4 a und 4 b sind in dem bei dieser Schaltung gültigen Grössenverhältnis und in gegenseitig richtiger Lage aufgezeichnet, so dass

deren Summe direkt den gesuchten Netzstrom ergibt (Fig. 4 c).

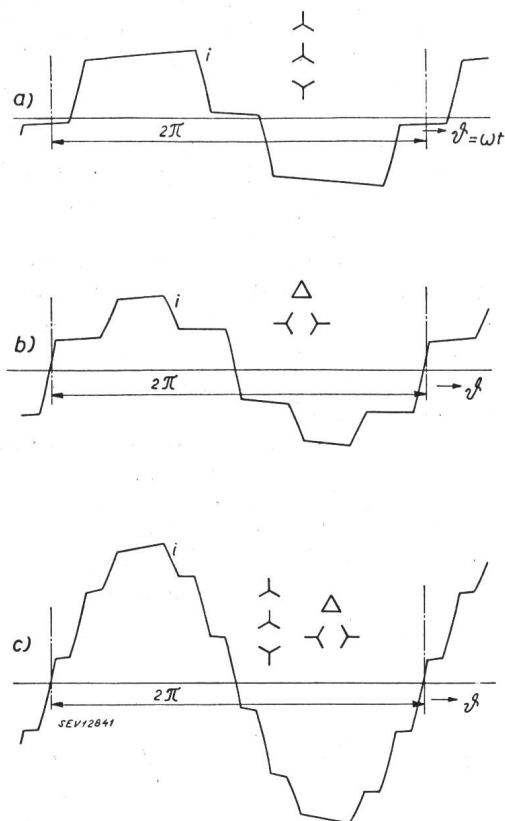


Fig. 4.

Verlauf des Netzstromes i von Schaltungen mit zwischenschaltiger Saugdrosselspule

- a) bei primärer Δ -Schaltung } 6-Phasen-Schaltungen.
 b) bei primärer Δ -Schaltung }
 c) bei primärer Δ/Δ -Schaltung (12-Phasen-Schaltung).

3. Die massgebenden Veränderlichen

Nach Beschreibung des Aufbaues der Gleichspannung und des Netzstromes sei die Abhängigkeit dieser Formen von den Daten der Gruppe und den Betriebsbedingungen betrachtet. Im besonderen interessiert die für den Verlauf charakteristische Steuerwinkel und die Ueberlappung. Zu deren Bestimmung werden an Hand der Fig. 1 d die Mittelwerte U_g und der Abfall ΔU_g der induzierten Gleichspannung ermittelt. Um hierfür von der Phasenzahl unabhängige Beziehungen zu erhalten, werden die abgeleiteten Gleichungen durch die Leerlaufspannung U_{go} dividiert. Statt des Verhältnisses $\frac{\Delta U_g}{U_{go}}$ sei der Ausdruck $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ eingeführt, wo I_g den Gleichstrom, I_{gn} den Nennleichstrom bedeuten.

Für $I_g = I_{gn}$ ist $\frac{\Delta U_g}{U_{go}} = \Delta_i$, d. h. Δ_i stellt den auf die Leerlaufspannung bezogenen induktiven Gleichspannungsabfall bei Nennstrom dar. Die Gleichungen in α und γ lauten:

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) &= \frac{U_g}{U_{go}}; \\ \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sin\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) &= \Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}} \end{aligned} \quad (1)$$

und sind im Nomogramm der Fig. 5 dargestellt. Die Punkte $\frac{U_g}{U_{go}}$ und $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ auf den geradlinigen Trägern bestimmen eine Gerade, die auf dem linken Hyperbelast die Ueberlappung γ , auf dem rechten den Winkel «doppelter Steuerwinkel + Ueberlappung ($2\alpha + \gamma$)» festlegt¹⁾. Steuerwinkel und Ueberlappung sind demnach von drei Grössen abhängig, dem Verhältnis der Gleichspannung zur Leerlaufgleich-

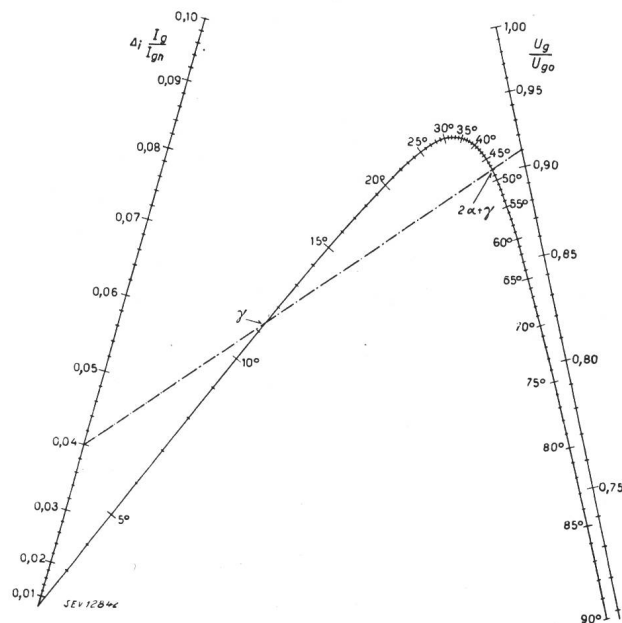


Fig. 5.

Nomogramm zur Bestimmung der Ueberlappung γ und des Steuerwinkels α in Abhängigkeit der induzierten Gleichspannung U_g und des induktiven Gleichspannungsabfalles $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$.
 U_g, U_{go} Mittelwerte der induzierten Gleichspannung bzw. der Leerlaufgleichspannung.
 Δ_i induktiver Gleichspannungsabfall bei Nennstrom.
 I_g, I_{gn} Gleichstrom bzw. Nennleichstrom.

spannung, dem Verhältnis des Gleichstromes zum Nennleichstrom und dem induktiven Gleichspannungsabfall bei Nennstrom. Von diesen drei Grössen ändern sich die zwei ersten entsprechend den Betriebsbedingungen, während die dritte durch die Daten der Anlage gegeben und im wesentlichen als feste Grösse anzusehen ist. Da in der Regel bei Herunterregulierung der Gleichspannung durch Gittersteuerung eine Verkleinerung des Gleichstromes eintritt, entspricht hierbei einer Vergrösserung des Steuerwinkels eine Verkleinerung der Ueberlappung (Fig. 5). Bei gleichen Betriebsbedingungen ergibt eine Vergrösserung des Gleichspannungsabfalls bei Nennstrom eine Vergrösserung der Ueberlappung. Der induktive Gleichspannungsabfall bei Nennstrom seinerseits entsteht durch den stets vorhandenen, wesentlich induktiven Widerstand des beim Wechsel der Anoden sich ausbildenden Kommutierungskreises. Beispielsweise bewirkt eine Vergrösserung dieses Widerstandes eine Verkleinerung des Kurzschlußstromes, eine Vergrösserung der dem Nennstrom entsprechenden Ueberlappung (Fig. 2 b) und damit eine Vergrösserung des induktiven Gleich-

¹⁾ siehe die Ableitung dieses Diagrammes im Anhang, Abschnitt a.

spannungsabfalles bei Nennstrom (Fig. 1 d). Dadurch wird der induktive Gleichspannungsabfall bei Nennstrom ausser von der Frequenz im wesentlichen von der Schaltung und Kurzschlußspannung, aber auch von der Anordnung und Mischung der Transformatorwicklungen abhängig²⁾.

Zur Darstellung des Effektivwertes des Netzstromes sowie seiner Oberwellen empfiehlt sich die Einführung des ideellen Netzstromes. Das ist derjenige Netzstrom, der bei gleichstromseitig abgegebenem Nennstrom drehstromseitig fliessen würde, wenn man sich den Kommutierungskreis widerstandsfrei (streuungsloser Transformator) und den Magnetisierungsstrom wegdenkt. Die Effektivwerte seiner Grund- und Oberwellen werden als Bezugswerte verwendet. So sei das Verhältnis des Effektivwertes des Magnetisierungsstromes zum Effektivwert seiner Grundwelle durch μ bezeichnet.

4. Der Leistungsfaktor

Von den zwei zum Effektivwert des drehstromseitigen Netzstromes führenden Wegen lohnt sich der steilere, über den Leistungsfaktor führende, um gleichzeitig mit diesem Begriff bekannt zu werden.

Gemäss der grundlegenden Arbeit von S. Fryze³⁾ lässt sich bei primär gegebener Phasenspannung der Netzstrom in zwei Teilströme, den Wirk- und Blindstrom, zerlegen. Der Effektivwert des Wirkstromes ergibt mit dem Effektivwert der Spannung multipliziert die Wirkleistung, während das Produkt des Spannungs- und Stromeffektivwertes die Scheinleistung darstellt. Der als Leistungsfaktor definierte Quotient aus Wirkleistung und Scheinleistung ist demnach durch das Verhältnis der Effektivwerte des Wirkstromes und des totalen Netzstromes bestimmt.

Bei Annahme einer sinusförmigen (primären) Phasenspannung wird der Wirkstrom durch die Wirkkomponente der Grundwelle dargestellt. Die Blindkomponente der Grundwelle und die Oberwellen des Netzstromes stellen zusammen den Blindstrom dar, da die Spannung weder mit der (um 90° verschobenen) Blindkomponente, noch mit den (frequenzfremden) Oberwellen einen Beitrag an die Wirkleistung geben kann³⁾. Der damit für die Bestimmung des Leistungsfaktors angedeutete Rechnungsgang wird im Anhang (Abschnitt b) näher erläutert.

Zur Darstellung des Leistungsfaktors werde aus der im Anhang erhaltenen Gleichung (II) und den zwei Gleichungen (1) der Winkel $(\alpha + \frac{\gamma}{2})$ eliminiert. Dies führt auf das Gleichungspaar

$$\begin{aligned} \left(\frac{U_g}{U_{g0}}\right)^2 &= \frac{s + \lambda^2 \mp \sqrt{\lambda^4 - r\lambda^2 + s^2}}{N_1}; \\ \left(\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}\right)^2 &= \frac{s - \lambda^2 \pm \sqrt{\lambda^4 - r\lambda^2 + s^2}}{N_2} \end{aligned} \quad (2)$$

²⁾ vgl. Uhlmann, E.: Zum Gleichspannungsabfall in Mutatoranlagen. Bull. SEV Bd. 31 (1940), Nr. 16, S. 358...361.

³⁾ Fryze, S.: Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung. Elektrotechn. Z. Bd. 53 (1932), Nr. 25, S. 596...599; Nr. 26, S. 625...627, u. Nr. 29, S. 700...702.

worin

$$r = \frac{(1 - \cos^2 \gamma) B}{A^2}; \quad s = \frac{1 - \cos^2 \gamma}{2 A}; \quad N_1 = \frac{2(1 \mp \cos \gamma)}{A}$$

sowie die Werte A und B (s. Anhang) Funktionen der Ueberlappung γ und des Produktes $\Delta_i \mu$ darstellen (Δ_i Gleichspannungsabfall bei Nennstrom, μ Verhältnis des Magnetisierungsstromes zur Grundwelle des ideellen Netzstromes). Dieses Gleichungspaar gestattet bei festgehaltenem Produkt $\Delta_i \mu$ die Darstellung des Leistungsfaktors λ in Abhängigkeit

von $\frac{U_g}{U_{g0}}$ und $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ (Fig. 6). Da diese Veränderungen als Mass der Spannung bzw. des Stromes aufgefasst werden können, lässt sich an Hand der Fig. 6 der Einfluss von Regulierungsvorgängen auf den Leistungsfaktor anschaulich verfolgen. In der Regel

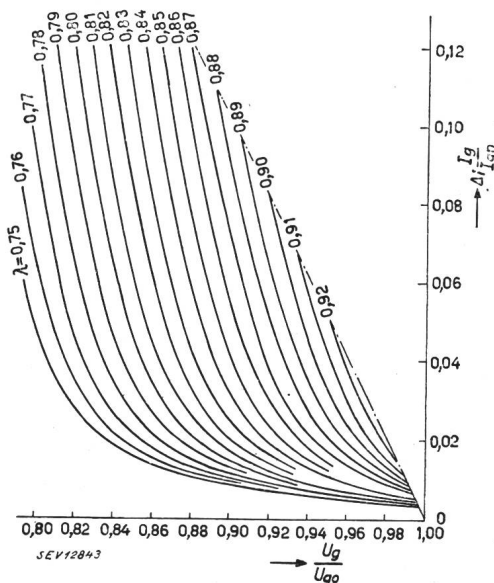


Fig. 6.

Leistungsfaktor λ in Abhängigkeit der induzierten Gleichspannung $\frac{U_g}{U_{g0}}$ und des induktiven Gleichspannungsabfalles $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ für konstantes Produkt $\Delta_i \mu = 0,0025$.

Δ_i induktiver Gleichspannungsabfall bei Nennstrom.
 μ Verhältnis des Magnetisierungsstromes zur Grundwelle des ideellen Netzstromes.

tritt bei Senkung der Spannung eine Verkleinerung des Stromes ein, womit gleichzeitig auch der Leistungsfaktor abnimmt. Dass bei sinkender Spannung und steigendem Strom der Leistungsfaktor im Gegensatz hierzu steigt oder in geringerem Masse sinkt, ist auf die Verbesserung der Stromform zurückzuführen.

Im Sonderfall des unregulierten Betriebes ist der Steuerwinkel $\alpha = 0$. Dann ergibt sich aus der im Anhang bestimmten Formel des Leistungsfaktors als erste Gleichung

$$\frac{\mu}{\left(\frac{I_g}{I_{gn}}\right)} = -t + \sqrt{\frac{u^2}{\lambda^2} - v} \quad (3')$$

$$\text{mit } t = \frac{\gamma - \sin \gamma \cos \gamma}{2(1 - \cos \gamma)}, \quad u = \frac{1 + \cos \gamma}{2},$$

$$v = \frac{4g_1 - (\gamma - \sin \gamma \cos \gamma)^2}{[2(1 - \cos \gamma)]^2}$$

und $g_1 = b_1 - a_1 \cos \gamma$, worin a_1 und b_1 Funktionen von γ sind (Anhang).

Die zweite Gleichung leitet sich aus der zweiten Gleichung (1) ab

$$\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}} = \frac{1 - \cos \gamma}{2} \quad (3'')$$

Gemäss diesem Gleichungspaar lässt sich der Leistungsfaktor in Abhängigkeit von $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ und $\frac{1}{\mu} \frac{I_g}{I_{gn}}$ darstellen (Fig. 7). Diese Koordinaten sind bei festem Gleichspannungsabfall bei Nennstrom, Nenngleichstrom und Magnetisierungsstrom (Ver-

immer mehr dem Grundwelleneffektivwert bzw. der Leistungsfaktor dem \cos der Phasenverschiebung zwischen Netzspannung und Netzstrom-Grundwelle. Bereits beim 24-Phasen-Mutator ist die Abweichung hiervon nur unbedeutend.

5. Die Oberwellen der Gleichspannung

Wie Fig. 1 d zeigt, weist die induzierte Gleichspannung eine periodische Schwingung auf, deren Frequenz durch das Produkt der Phasenzahl m und der Frequenz des Drehstromnetzes gegeben ist. Nachdem deren Verlauf durch die ideellen Phasenspannungen, den Steuerwinkel und die Ueberlappung festgelegt ist, sei jetzt durch Anwendung der

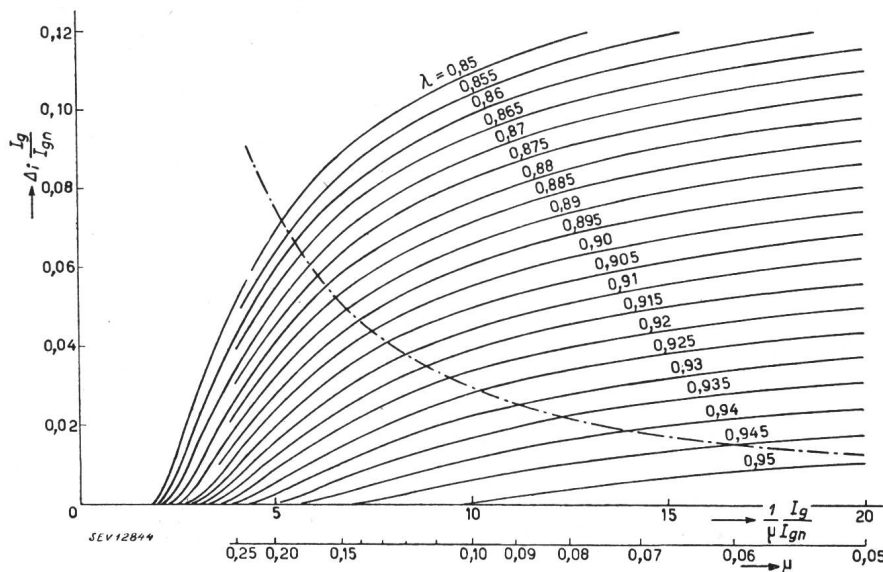


Fig. 7.

Leistungsfaktor λ in Abhängigkeit des induktiven Gleichspannungsabfalles $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ und des Ausdruckes

$$\frac{1}{\mu} \frac{I_g}{I_{gn}} \quad (\text{unregulierter Betrieb})$$

μ Verhältnis des Magnetisierungsstromes zur Grundwelle des ideellen Netzstromes.

hältniswert) dem Gleichstrom I_g proportional. Längs einem vom Ursprung des Koordinatensystems ausgehenden Strahl lässt sich daher der Wert des Leistungsfaktors für kontinuierlich sich ändernden Gleichstrom ablesen. Die strichpunktierte Scheitelpunktkurve⁴⁾ erleichtert die Bestimmung des Leistungsfaktormaximums und des zugehörigen Stromwertes. Mit Rücksicht auf die Wichtigkeit des Leistungsfaktors bei Nennstrom wurde parallel zur $\frac{1}{\mu} \frac{I_g}{I_{gn}}$ -Leiter die Funktionsleiter $\frac{1}{\mu}$ aufgetragen. Der Leistungsfaktor lässt sich damit direkt in Abhängigkeit des Gleichspannungsabfalles Δ_i und des Verhältniswertes μ ablesen.

Der in diesem Abschnitt bestimmte Leistungsfaktor ist zunächst gültig für die Stromform Fig. 4a. Dass die angegebenen Gleichungen allgemein für den Leistungsfaktor des Sechssphasen-Mutators massgebend sind, wird durch die Ausführungen der folgenden Abschnitte verständlich. Stets lässt sich bei bekannter Wirkleistung bzw. bei bekannter Wirkkomponente der Effektivwert des Netzstromes mit Hilfe des Leistungsfaktors festlegen.

Bei wachsender Phasenzahl m wird die Anpassung der Netzstromform an die Sinusform immer besser, d. h. der Netzstromeffektivwert nähert sich

harmonischen Analyse ihre Feinstruktur betrachtet. Es ist üblich, die Dauer dieser Schwingung bzw. der in ihr enthaltenen harmonischen Schwingungen mit der Schwingungsdauer der Drehstromspannung zu vergleichen und in diesem Sinne von Gleichspannungsoberwellen n^{ter} Ordnungszahl zu reden.

An Hand der Fig. 1 d ergibt sich unmittelbar, dass in der induzierten Gleichspannung des m -phasen-Mutators alle Oberwellen der Ordnungszahlen $n = k \cdot m$ für $k = 1, 2, 3 \dots$ enthalten sind. So enthält die Gleichspannung des Sechssphasen-Mutators die Ordnungszahlen 6, 12, 18...

Die Grösse der Oberwellen wurde an anderer Stelle in Abhängigkeit des Steuerwinkels und der Ueberlappung bestimmt. Die Elimination des Winkels

$\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right)$ aus der hierfür erhaltenen Gleichung⁵⁾ und den Gleichungen (1) ergibt für $v = \frac{\sqrt{2} U_n}{U_{go}}$ bzw. für den Effektivwert U_n der n^{ten} Oberwelle

$$\left(\frac{U_g}{U_{go}}\right)^2 = \frac{S_n^2 - v^2}{N_1^2}, \quad \left(\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}\right)^2 = \frac{v^2 - D_n^2}{N_2^2} \quad (4)$$

⁴⁾ geometrischer Ort der Berührungspunkte der vom Ursprung an die Isohypsen gelegten Tangenten.

⁵⁾ Fässler, E.: Spannungswelligkeit, Stromwelligkeit und Störspannung von Mutatoren. Brown Boveri Mitt". Bd. 25 (1938), Nr. 5/6, S. 134...136 [Gl. (4)].

$$S_n = \frac{\cos \left[(n-1) \frac{\gamma}{2} \right]}{n-1} \pm \frac{\cos \left[(n+1) \frac{\gamma}{2} \right]}{n+1}$$

$$N'_1 = \frac{4}{1 \pm \cos \gamma} \cdot \frac{\cos \gamma + \cos n \gamma}{n^2 - 1}$$

Zwei Mutatorgruppen gleicher Phasenzahl haben demnach bei übereinstimmenden induzierten Gleichspannungen $\frac{U_g}{U_{go}}$ und induktiven Gleichspannungsabfällen $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ im Verhältnis zu den Leerlaufgleichspannungen Gleichspannungsoberwellen gleicher Ordnungszahl und Grösse. Bei voneinander abweichender Phasenzahl bleibt diese Gleichheit für die gemäss der ersten Gesetzmässigkeit bei beiden Gruppen vorkommenden Ordnungszahlen gültig.

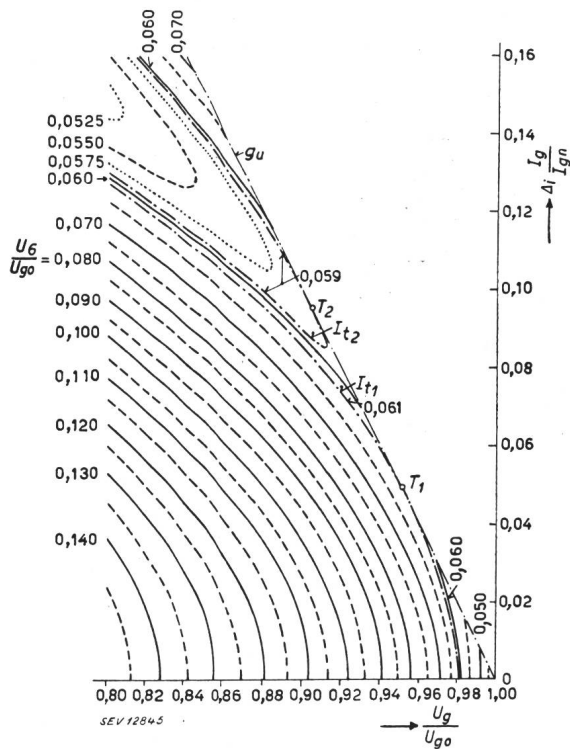


Fig. 8.

6. Gleichspannungsoberwelle in Abhängigkeit der induzierten Gleichspannung $\frac{U_g}{U_{go}}$ und des induktiven Gleichspannungsabfalles $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$

U_6 Effektivwert der 6. Oberwelle.
 U_{go} Leerlaufgleichspannung.

In Fig. 8 ist die 6. Gleichspannungsoberwelle in Abhängigkeit von $\frac{U_g}{U_{go}}$ und $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ dargestellt. Die speziellen Isohypsen I_{t1} und I_{t2} tangieren die Gerade g_u (längs welcher der Steuerwinkel $= 0$ ist) in T_1 und T_2 , die Extremwerte der Oberwelle im unregulierten Betrieb festlegend. Mit Hilfe der eingezeichneten Kurven konstanten Verhältnisses $\frac{U_6}{U_{go}}$ wird eine gute Vorstellung des Verlaufes der Funktion erhalten: Ihre Fläche wird durch zwei in ein Tal

einfallende Bergflanken gebildet. An Hand dieser Darstellung lässt sich die einem beliebigen Betriebspunkt entsprechende 6. Oberwelle bestimmen und der Einfluss irgend eines Regulierungsvorganges oder einer Überlastung der Mutatorgruppe anschaulich verfolgen. Bei gebräuchlichen induktiven Gleichspannungsabfällen Δ_i (etwa 0,03...0,07) entspricht in der Regel einer Verkleinerung der Gleichspannung durch Spannungsregulierung eine Vergrösserung der Oberwellen.

In analoger Weise wie die 6. lassen sich die 12., 18., 24., ... Oberwelle darstellen. Mit grösser werdender Ordnungszahl nehmen die Höhenquoten des «Oberwellengebirges» anhaltend ab, während seine Faltung zunimmt: Bergzüge und Täler wechseln in immer schneller werdender Reihenfolge miteinander ab.

6. Die Oberwellen des drehstromseitigen Netzstromes

Zur Bestimmung der Oberwellen des Netzstromes sind zunächst die Oberwellen seines Bausteines, des Anodenstromes, zu bestimmen. Dieser enthält im allgemeinen Oberwellen geradzahlgiger und ungeradzahlgiger Ordnungszahl. Da sich in den hier in Frage kommenden Schaltungen die sekundären Amperewindungen aus zeitlich um 180° verschobenen Anodenströmen aufbauen, die Wicklungen mit entgegengesetzten magnetischen Achsen durchfliessen, heben sich in den sekundären Amperewindungen die Oberwellen gerader Ordnungszahl fort, und es bleiben nur noch Oberwellen ungerader Ordnungszahl.

Von diesen nehmen die Oberwellen mit durch 3 teilbarer Ordnungszahl (3, 9, 15, ...) eine Sonderstellung ein. Sie sind bei einer von 3 abweichenden Phasenzahl m' (Fig. 2b) ⁶⁾ zu erwarten (wenn auch nicht unbedingt wie im Beispiel der Gabelschaltung mit $m' = 6$) und werden durch den Kreisstrom der primären Dreieckwicklung bzw. einer tertiären Ausgleichwicklung (bei primärer Sternwicklung) kompensiert. Jedenfalls treten sie im Netzstrom nicht auf. In dieser Weise verbleiben im Netzstrom des 6-Phasen-Mutators Oberwellen der Ordnungszahlen

$$\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25.$$

Die Oberwellen 5, 7 gehören der 6er-Gruppe an, die Oberwellen 11, 13 der 12er-Gruppe usw. Die Gruppennzahlen stimmen, wie ersichtlich, mit den Ordnungszahlen n der Gleichspannungsoberwellen überein.

Zur Bestimmung des Oberwellengehaltes des Netzstromes einer 12-Phasen-Doppelgruppe (etwa in Stern/Dreieck-Saugschaltung) ist ebenfalls von den Oberwellen der Anodenströme auszugehen. Gegenüber den Oberwellen der sterngeschalteten Gruppe resultiert für die Oberwellen der dreieckgeschalteten Gruppe für $\nu = 5, 7$ eine Verschiebung von 180° , verursacht durch die Nacheilung des Anodenstromes der zweiten Gruppe und durch den Auf-

⁶⁾ m' ergibt sich aus der Beziehung $\vartheta^* = 2\pi/m'$, wo ϑ^* die zeitliche Verschiebung der Phasenspannungen sich ablösender Anoden darstellt.

bau der Netzstromoberwelle aus den phasenverschobenen Oberwellen der Wicklungsströme. Wie die Grundwellen der Netzströme der beiden Gruppen sind auch ihre 5. und 7. Oberwellen je einander gleich, so dass die Oberwellen der 6er-Gruppen sich herausheben. Dieselben Gesetzmässigkeiten lassen sich bei der 18er-, 30er-, ...-Gruppe feststellen.

Allgemein sind im Netzstrom des m -Phasen-Mutators alle Oberwellen der Ordnungszahlen $\nu = mk \pm 1$ bzw. die Oberwellengruppen mk ($k = 1, 2, 3, \dots$) enthalten.

Die Elimination des Winkels $(\alpha + \frac{\gamma}{2})$ aus der für die Netzstromoberwellen gültigen Gleichung⁷⁾ und den Gleichungen (1) ergibt für $w = 2\Delta_i \frac{I_\nu}{I_p}$ bzw. für den Effektivwert I_ν der ν -ten Netzstromoberwelle

$$\left(\frac{U_g}{U_{go}}\right)^2 = \frac{\Sigma_\nu^2 - w^2}{N_1''}; \quad \left(\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}\right)^2 = \frac{w^2 - \Delta_\nu^2}{N_2''} \quad (5)$$

mit

$$\Sigma_\nu = \frac{\sin\left[(\nu-1)\frac{\gamma}{2}\right]}{\nu-1} \pm \frac{\sin\left[(\nu+1)\frac{\gamma}{2}\right]}{\nu+1};$$

$$N_1'' = \frac{4}{1 \pm \cos \gamma} \cdot \frac{\cos \gamma - \cos \nu \gamma}{\nu^2 - 1}$$

$I_\nu' = \nu^{te}$ Oberwelle des ideellen Netzstromes (Effektivwert).

Zwei Mutatorgruppen gleicher Phasenzahl haben bei übereinstimmenden induzierten Gleichspannungen $\frac{U_g}{U_{go}}$, induktiven Gleichspannungsabfällen sowie induktiven Gleichspannungsabfällen bei Nennstrom $(\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}, \Delta_i)$ ins Verhältnis zu den ideellen Netzstromoberwellen gesetzte Netzstromoberwellen gleicher Ordnungszahl und Grösse. Bei voneinander abweichender Phasenzahl bleibt diese Gleichheit für die nach der ersten Gesetzmässigkeit bei beiden Gruppen vorkommenden Ordnungszahlen gültig. Für den ideellen Netzstrom gilt im besondern, dass das Verhältnis der ν -ten Oberwelle zur Grundwelle gleich dem Kehrwert der Ordnungszahl ν ist.

In Fig. 9 ist der zur Bestimmung der 7. Netzstromoberwelle dienende Ausdruck $(\Delta_i \frac{I_7}{I_7'})$ in Abhängigkeit von $\frac{U_g}{U_{go}}$ und $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$ dargestellt. Die spezielle Isohypse tangiert die Gerade g_u im Punkte T , den höchsten Oberwellenwert im unregulierten Betrieb festlegend. Das Gebirge der 7. Netzstromoberwelle wird von einem Bergrücken gebildet, dessen Flanken gegen die $\frac{U_g}{U_{go}}$ -Achse bzw. gegen die Grenzlinie hin abfallen. Einer Vergrösserung des Stromes im unregulierten Betrieb entspricht

zunächst eine Vergrösserung und dann mit zunehmender Verbesserung der Kurvenform (grössere Ueberlappungen) eine Verkleinerung der 7. Oberwelle. Eine Verkleinerung der Spannung durch Gittersteuerung ergibt bei ansteigendem oder konstant bleibendem Strom eine Vergrösserung der Oberwelle (Uebergang auf steilere Stufenanstiege),

zunächst eine Vergrösserung und dann mit zunehmender Verbesserung der Kurvenform (grössere Ueberlappungen) eine Verkleinerung der 7. Oberwelle. Eine Verkleinerung der Spannung durch Gittersteuerung ergibt bei ansteigendem oder konstant bleibendem Strom eine Vergrösserung der Oberwelle (Uebergang auf steilere Stufenanstiege),

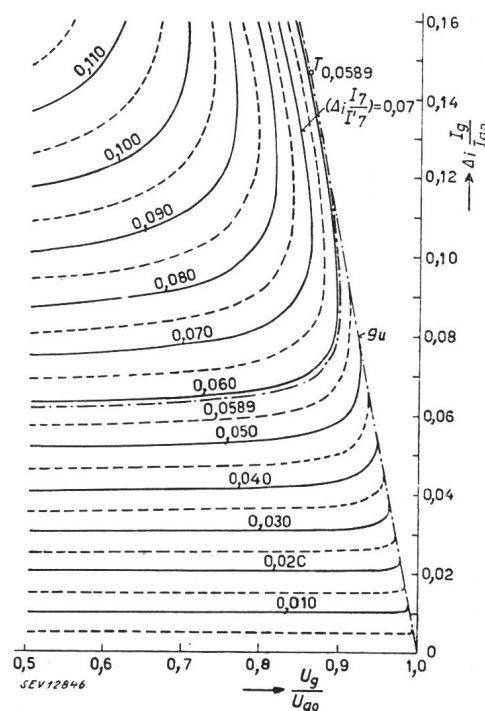


Fig. 9.

7. Netzstromoberwelle in Abhängigkeit der induzierten Gleichspannung $\frac{U_g}{U_{go}}$ und des induktiven Gleichspannungsabfalles $\Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}$

Δ_i Induktiver Gleichspannungsabfall bei Nennstrom.

I_7 Effektivwert der 7. Netzstromoberwelle.

I_7' Effektivwert der 7. Oberwelle des ideellen Netzstromes.

dagegen bei proportional abnehmendem Strom naturgemäss eine Verkleinerung der Oberwelle.

In analoger Weise wie die 7. Oberwelle lässt sich die 5., 11., 13., ... Oberwelle darstellen, wobei wiederum bei dauernd sich vermindern den Höhenquoten die Faltung des Gebirges immer stärker zunimmt.

Zur Bestimmung der Lage der Netzstromoberwellen sind zunächst die Komponenten des Anodenstromes $A_2 B_2 C_2 D_2$ der Fig. 2 zu bestimmen (die Ordinatenachse durchsetzt den Nullpunkt von u''). An Hand einer an anderer Stelle abgeleiteten Gleichung⁸⁾ ergibt sich für die Scheitelwerte a_ν und b_ν der cos- bzw. sin-Komponente der ν -ten Oberwelle ($\nu = 6k \pm 1$; $k = 1, 2, 3, \dots$)

$$\Delta_i \frac{a_\nu}{\sqrt{2} I_\nu'} = f \cdot \{s_\nu(\alpha + \gamma) - s_\nu(\alpha)\};$$

$$\Delta_i \frac{b_\nu}{\sqrt{2} I_\nu'} = f \cdot \{c_\nu(\alpha) - c_\nu(\alpha + \gamma)\} \quad (6)$$

⁷⁾ Fässler, E.: Die Stromoberwellen auf der Wechselstromseite von Stromrichtern. Arch. Elektrotechn. Bd. 32 (1938), Nr. 10, S. 640...654 [Gl. 4].

⁸⁾ Fässler, E.: Der Einfluss von Oberwellen im Drehstromnetz auf die Harmonischen der Gleichspannung und des Netzstromes von Stromrichtern. Arch. Elektrotechn. Bd. 34 (1940), Nr. 4, S. 209...229 [Gl. (18)].

$$f = \begin{cases} +1 & \text{für ungerades } k \\ -1 & \text{für gerades } k \end{cases}$$

$$s_{\nu} (x) = \frac{1}{4} \left[\frac{\sin \cos [(\nu - 1) x]}{\nu - 1} - \frac{\sin \cos [(\nu + 1) x]}{\nu + 1} \right]$$

In Fig. 10 ist das Vektordiagramm der 5. Anodenstromoberwelle durch Angabe der Ortskurven konstanten Steuerwinkels α und Summenwinkels «Steuerwinkel α + Ueberlappung γ » dargestellt. Längs der strichpunktierten Hüllkurve der Doppelkurvenschar und der innern Begrenzung ist der Ueberlappungswinkel konstant ($\gamma = \frac{180^\circ}{5} = 36^\circ$ bzw. $\gamma = 5^\circ$). Anschaulich lässt sich verfolgen, wie eine Aenderung des Steuerwinkels und der Ueberlappung eine Schwankung der Lage und des Radiusvektors der Länge ($\Delta_i \frac{I_5}{I_5}$) zur Folge hat.

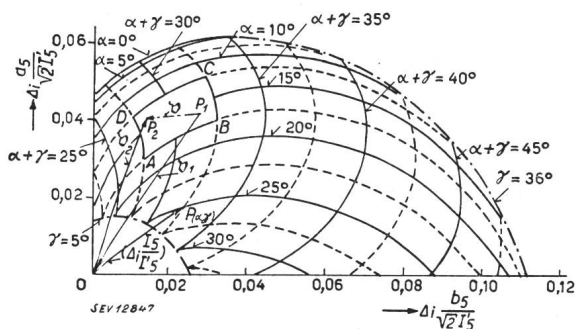


Fig. 10.

Vektordiagramm der 5. Anodenstromoberwelle (Saugerschaltung) Ortskurven konstanten Steuerwinkels α und konstanten Summenwinkels «Steuerwinkel α + Ueberlappung γ »

- Δ_i Induktiver Gleichspannungsabfall bei Nennstrom.
- I_5 Effektivwert der 5. Stromoberwelle.
- I_5' Effektivwert der 5. Oberwelle des ideellen Stromes.
- a_5 (b_5) Scheitelwert der \cos -(\sin -) Komponente.

Für die Saugschaltung mit primärer Sternschaltung übertragen sich die Oberwellen unverschoben aus dem Anoden- in den Netzstrom. Gleichung (6) gibt ebenso die Grösse der ν ten Netzstromoberwelle richtig wieder, da die Komponentenamplituden ins Verhältnis zur ideellen Oberwellenamplitude gesetzt sind. Fig. 10 kann daher auch als Vektordiagramm der Netzstromoberwelle für die γ/γ -Schaltung angesehen werden. Bei unveränderter Lage der Ordinatenachse bezüglich der primären Phasenspannung gilt es bei Umkehrung des Vektorpfeiles auch für die Δ/γ -Schaltung [Richtung Punkt (α , γ) gegen Nullpunkt].

In ähnlicher Weise lässt sich die 7., 11., 13., ... Oberwelle darstellen, wo bei dauernd sich vermindern den Radiusvektoren die radiale und tangentielle Ueberdeckung der Ortskurven immer stärker zunimmt⁹⁾.

7. Einfluss einer Verzerrung der Drehstromspannung

Im Streifzug durch die Spannungs- und Stromformen wurde bisher von der Annahme einer rein

sinusförmigen Drehstromspannung ausgegangen. Das ist ein Idealfall, der praktisch nicht erfüllt ist. Die Spannung grösserer Drehstromnetze ist in der Regel nur praktisch sinusförmig, das will sagen, dass die Summe der in der verzerrten Spannung enthaltenen Oberwellenamplituden den zwanzigsten Teil der Grundwellenamplitude nicht überschreitet. Die Verzerrung der vom starren Netz abgegebenen Drehstromspannung spiegelt sich in den Spannungs- und Stromformen der Mutatorgruppe wieder.

Die aus den Sekundärspannungen des Mutatortransformators sich aufbauenden ideellen Phasenspannungen werden verzerrt und damit die Leerlaufgleichspannung und die induzierte Gleichspannung, d. h. deren bisher sinusförmigen Bögen (Fig. 1b und 1d) weisen Verzerrungen auf, während die Vertikalsprünge bestehen bleiben. Der Mittelwert der Leerlaufgleichspannung und der Verlauf der Kennlinie ist von der Verzerrung der Drehstromspannung abhängig. Unter der immer noch geltenden Annahme eines konstanten Gleichstromes bleiben indessen die Kennlinien geradlinig, und die bei sinusförmiger Spannung sich ergebende Neigung bleibt unverändert. Das ist dadurch zu erklären, dass unabhängig von der Form der Wendespannung zur Kommutierung des Anodenstromes eine bestimmte Spannungsfläche erforderlich ist, die dem induktiven Gleichspannungsabfall ergebenden Ueberlappungszipfel proportional ist. Ueber die Wendespannung und den Wendekurzschlussstrom hält die Verzerrung auch in den Stufenanstiegen des drehstromseitigen Netzstromes ihren Einzug, während die Stufenböden (vom Magnetisierungsstrom abgesehen) horizontal bleiben.

Zwei 6-Phasen-Mutatoren, eine 12-Phasen-Gruppe darstellend, haben in der Regel ideale Phasenspannungen ungleicher Form, da beispielsweise Stern- und Dreieckschaltung eine verschiedene Uebertragung der Drehstromspannungsoberwellen ergeben. Die zugehörigen Kennlinien sind damit parallel zueinander verschoben. Um bei variabler Verzerrung gleiche Strombelastungen zu erhalten, muss bei automatischer Regulierung jeder Mutator individuell reguliert werden.

Für sinusförmige Drehstromspannung gehen bei Kombination einer 12-Phasen-Gruppe aus zwei 6-Phasen-Gruppen die Gleichspannungsoberwellen der Ordnungszahl 12 bei Parallelschaltung unverändert von der 6- in die 12-Phasen-Schaltung über. Bei Serieschaltung verdoppeln sie sich; doch behält infolge gleichzeitiger Verdoppelung der Leerlaufgleichspannung ihr Verhältnis $\frac{U_{12}}{U_{g0}}$ seinen Wert bei.

Ebenso bleiben bei der Parallelschaltung die resultierenden Netzstrom-Oberwellen der Ordnungszahlen 11 und 13 im Verhältnis zu den betreffenden Oberwellen des ideellen Netzstromes unverändert. Die Erhöhung der Phasenzahl ergibt eine Verbesserung der Kurvenform durch Eliminierung ganzer Oberwellengruppen, bleibt aber ohne Einfluss auf die (verhältnismässige) Grösse der verbleibenden Oberwellen.

Bei verzerrter Drehstromspannung (mit Oberwellen der Ordnungszahlen 5, 7, 11, 13, ...) dagegen

⁹⁾ siehe Anhang c.

bleiben im allgemeinen bei Erhöhung der Phasenzahl über 6 in der Gleichspannung alle Oberwellen der Ordnungszahlen 6, 12, 18, ... und im drehstromseitigen Netzstrom alle Oberwellen $\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$, d. h. kurz gesagt, alle 6er-Gruppen enthalten. Dabei werden die dem m -Phasen-Betrieb fremden Oberwellen (d. s. diejenigen, deren Gruppenzahl kein Vielfaches der Phasenzahl beträgt) in Abhängigkeit des Grades der Verzerrung mehr oder weniger geschwächt.

Die Grösse der Gleichspannungs- und Netzstromoberwellen bei verzerrter Drehstromspannung bestimmt sich durch vektorielle Addition ihrer Grund- und Oberwellenanteile. Der Grundwellenanteil der Gleichspannungsoberwelle wird erhalten, indem man sich die Verzerrungen in den Sinusbögen der Gleichspannung wegdenkt und analog der Oberwellenanteil bei alleiniger Berücksichtigung der den Sinusbögen überlagerten Verzerrung. In ähnlicher Weise ist bei der Bestimmung der Anoden- bzw. Netzstromoberwellen vorzugehen. In dieser Weise lassen sich die Oberwellen von 6phasigen Mutatorgruppen rechnerisch ermitteln¹⁰⁾.

Die Bestimmung des Grundwellenanteiles sei im Beispiel der 5. Oberwelle der 12phasigen Stern/Dreieck-Schaltung erläutert. In Fig. 10 stelle der Vektor \mathbf{v}_1 den Oberwellenvektor der im Dreieck geschalteten Gruppe dar entsprechend dem Veränderlichenpaar $(\alpha_1 \gamma_1)$, der Vektor \mathbf{v}_2 den Oberwellenvektor der in Stern geschalteten Gruppe $(\alpha_2 \gamma_2)$. Infolge der ungleichen Leerlaufspannungen sind, wie ersichtlich, Steuerwinkel und Ueberlappung bei individueller Konstanzhaltung des Stromes verschieden. Die Summe $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$ dieser Komponenten stellt den Grundwellenanteil der resultierenden 5. Netzstromoberwelle dar. Die Oberwellenanteile der resultierenden Oberwelle sind streng genommen ebenfalls durch vektorielle Addition der Anteile der Einzelgruppen zu ermitteln; doch kann man sich oft mit einem betreffenden additiven Zuschlag begnügen. Die dem 12-Phasen-Betrieb fremde 5. Oberwelle wird in der Regel nur geschwächt, aber nicht eliminiert. Erst bei verschwindender Verzerrung der Drehstromspannung verschwinden Grund- und Oberwellenanteil, womit die 5. Oberwelle aus dem resultierenden Netzstrom eliminiert wird. In ähnlicher Weise ist die für den 12-Phasen-Betrieb gesetzmässige 11. (13.) Netzstromoberwelle aus ihrem Grund- und Oberwellenanteil zu bestimmen. Infolge ungleichen Steuerwinkels und ungleicher Ueberlappung weicht der resultierende Grundwellenanteil vom doppelten Wert einer Gruppe ab. Nur bei verschwindender Verzerrung der Drehstromspannung nimmt er diesen dem Oberwellengesetz entsprechenden Wert an.

Bei Festhaltung der Gleichspannung und des Gleichstromes und variabler Verzerrung der Drehstromspannung können die den Grundwellenanteil bestimmenden Oberwellen-Vektoren der beiden Gruppen je nach der Grösse des Steuerwinkels und der Ueberlappung alle möglichen Werte annehmen. Es ist jedoch vielfach gar nicht nötig, diese Mög-

lichkeiten, wie im Beispiel, einzeln zu bestimmen; es genügt vielmehr, die Gebiete B_1 (B_2) zu kennen, innerhalb welchen Anfangs- und Endpunkt der Vektoren liegen müssen. Wie die Rechnung zeigt¹⁰⁾, lässt sich bei gegebenen Höchstwerten der Drehstromspannungsoberwellen das Gebiet B_1 (B_2) in erster Näherung (wie in Fig. 10 angedeutet) durch ein gemeinsames krummliniges Rechteck $ABCD$ umranden, wobei längs AB und CD der Steuerwinkel, längs BC und DA der Summenwinkel «Steuerwinkel + Ueberlappung» konstant ist. Der als Vektorsumme $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$ erhaltene resultierende Grundwellenanteil ist dann sicher kleiner als der grösste Durchmesser (AC) des Rechteckes. In ähnlicher Weise lassen sich auch die Grundwellenanteile der Oberwellen der 12er-Gruppe bestimmen.

Diese bei der 12-Phasen-Schaltung angewendete Betrachtungsweise lässt sich auf Mutator-Gruppen höherer Phasenzahl übertragen. Die der Phasenzahl fremden Netzstrom-Oberwellengruppen verschwinden bei sinusförmiger Drehstromspannung, indem sich das Vektor-Polygon ihrer Komponenten schliesst. Die Erfassung des Grundwellenanteiles sowie des Oberwellenanteiles bei verzerrter Drehstromspannung mit einfachen, die Phasenzahl genügend berücksichtigenden Methoden wird naturgemäss immer schwieriger. Indessen gelingt es, bei Auswahl gewisser charakteristischer Oberwellenverteilungen (Spektren) der Drehstromspannung und verfeinerter Methoden ein Bild über den jeweiligen Einfluss der Spannungsverzerrung auf den Oberwellengehalt des Netzstromes zu erhalten und die Bedeutung einer Erhöhung der Phasenzahl abzuschätzen.

8. Die netzseitigen Spannungs- und Stromformen

In der Regel sind dem Mutatortransformator die Induktivitäten von Leitungen und Transformatoren vorgeschaltet, so dass die Drehstromspannung erst in einigen vom Standort der Mutatorgruppe mehr oder weniger entfernten Knotenpunkten des Netzes als starr angesehen werden kann. Wie bisher, ist für die Ueberlappung bzw. den Gleichspannungsabfall bei Nennstrom der Wendekurzschlußstrom massgebend. Dieser lässt sich vorteilhaft mit der Methode der symmetrischen Komponenten oder mit Hilfe eines Netzmodells bestimmen. Die den Wendekurzschlußstrom treibende Spannung wird teilweise durch die vorgeschalteten Transformatoren und Leitungen aufgenommen, d. h. nicht mehr ausschliesslich durch die Streuinduktivität des Mutatortransformators. Damit verzerrt sich die Drehstromspannung an den Klemmen des Mutators. Bei unregulierter (regulierter) Gleichspannung entstehen in ihr dreieckförmige (rechteckförmige) Einbrüche und Ausbuchtungen, die um so schwächer sind, je grösser der induktive Widerstand des Mutatortransformators ist im Verhältnis zu den vorgeschalteten Induktivitäten¹¹⁾.

¹¹⁾ Kern, E.: Die Messung des im Wechselstromnetz auftretenden zusätzlichen Spannungsabfalles in Mutator-Anlagen. Bull. SEV Bd. 28(1937), Nr. 9, S. 183...185.

¹⁰⁾ siehe Fussnote 8).

Vielfach sind die Netzkapazitäten (Einspeisung über lange Leitungen und Kabel oder mittlere Spannungen) und die Kapazitäten parallel arbeitender Verbraucher nicht zu vernachlässigen. Bei den zyklisch aufeinanderfolgenden Kurzschlüssen der Ueberlappingsperioden entstehen im Netzstrom und in der Drehstromspannung Schwingungen, die sich rechnerisch ermitteln lassen. Da der Einfluss auf die Form des in die Anlage eintretenden Netzstromes bei stark induktivem Gleichstromkreis sich im wesentlichen auf die Ueberlappingsperiode beschränkt, behält dieser seine charakteristische Form bei¹²⁾.

Auch die zweite Annahme, die eines absolut konstanten Gleichstroms, trifft streng genommen nicht zu, indem der Gleichstrom einen überlagerten Wechselstrom enthält. Dessen Schwingungsweite wird jedoch durch im Gleichstromkreis vorhandene oder zu diesem Zweck eingeschaltete Glättungs-Drosselpulen klein gehalten. Es genüge zu erwähnen, dass bei überwiegend induktivem Widerstand die Spannungsfläche der der Gleichspannung überlagerten Wechselspannung für den Verlauf massgebend ist, die bei verschiedenen Steuerwinkeln und Ueberlappingsperioden eine grosse Mannigfaltigkeit von Stromformen ergibt. Infolge des nicht mehr konstanten Gleichstroms entstehen Rückwirkungen auf die Form der drehstromseitigen Spannungen und Ströme. Die Belastungsart (ohmsche, Batterie-Belastung, Anordnung von Kapazitäten, besondere Wellenglätter, gemischte Belastungsarten) übt streng genommen einen Einfluss aus auf den Ueberlappungsvorgang. Die induzierte Gleichspannung folgt während des Ueberlappungsvorganges nicht mehr dem Mittelwert der ideellen Phasenspannungen, und die Schwingungen des Gleichstromes werden in den Stufenböden des drehstromseitigen Netzstromes sichtbar.

Beim Mutator geht mit dem zyklischen Wechsel der Anoden auch ein zyklischer Wechsel der Strombahnen einher. Die zur Ueberwindung ihrer ohmschen Widerstände in zyklischer Folge entstehenden Spannungsflächen bewirken den ohmschen Gleichspannungsabfall. In der Regel trennt man den ohmschen Abfall vom induktiven¹³⁾ und bestimmt ihn aus den Kupferverlusten der den Mutator speisenden Netzteile und Transformatoren¹⁴⁾. Um vom Mittelwert der induzierten Gleichspannung zur Sammelschienengleichspannung zu gelangen, ist hievon der ohmsche Gleichspannungsabfall, der Lichtbogenabfall und gegebenenfalls der Abfall von Gleichstromdrosselpulen abzuziehen. In be-

sonderen Fällen kann der ohmsche Abfall gegenüber dem induktiven stärker hervortreten und sich auf die Form der Anodenströme auswirken.

Sehr mannigfaltig sind die Formen der dem Verbraucher zugeführten Gleichspannung. Alle Uebergänge treten auf: Von der nur durch einen kleinen konstanten Betrag von der induzierten Gleichspannung verschiedenen Form stark induktiver Verbraucher bis zur unmerklich gewellten Form bei natürlich vorhandenen bzw. künstlich angeordneten Glättungs-Drosselpulen oder der praktisch ganz konstanten Gleichspannung bei vorgeschalteten Wellenglätttern mit Resonanzkreisen.

Anhang

a) Das Nomogramm (Fig. 5) ist aus Fig. 9a der in der Fussnote 7 erwähnten Arbeit entstanden¹⁵⁾, unter Ausübung einer linear gebrochenen Transformation.

b) Für die Grundwellen-Wirkkomponente I_{1w} und die Grundwellen-Blindkomponente I_{1q} (Effektivwerte) des Netzstromes ohne Magnetisierungsstrom-Anteil gilt allgemein

$$2 \Delta_i \frac{I_{1w}}{I_1} = \frac{\sin \gamma}{2} \sin (2\alpha + \gamma);$$

$$2 \Delta_i \frac{I_{1q}}{I_1} = \frac{\gamma}{2} - \frac{\sin \gamma}{2} \cos (2\alpha + \gamma) \quad (\text{I})$$

Der Effektivwert des totalen Netzstromes ergibt sich durch Addierung des Magnetisierungsstromes I_m zur Blindkomponente I_{1q} , Bildung der Grundwelle und Berücksichtigung des Oberwellenanteiles des Netzstromes unter Berücksichtigung der Formeln (4) und (13) der in Fussnote 7 erwähnten Arbeit (Stromform der Fig. 4a enthält den symmetrischen Differenzstrom mit $m' = 3$). Der Quotient der Wirkkomponente und des Effektivwertes berechnet sich zu

$$\lambda = 2 \frac{\frac{U_g}{U_{go}} \cdot \Delta_i \frac{I_g}{I_{gn}}}{\sqrt{B - A \cos (2\alpha + \gamma)}} \quad (\text{II})$$

$$\text{mit } B = b_1 + b_2; \quad A = a_1 + a_2;$$

$$b_1 = \left(\frac{I'}{I_1} \right)^2 \left\{ (1 - \cos \gamma) - 2a \left[\gamma \frac{1 - \cos \gamma}{2} - (\gamma - \sin \gamma) \right] \right\}$$

$$b_2 = 2 \Delta_i \mu (\gamma + 2 \Delta_i \mu);$$

$$a_1 = \left(\frac{I'}{I_1} \right)^2 \{ (1 - \cos \gamma) - a (\gamma - \sin \gamma) \};$$

$$a_2 = 2 \Delta_i \mu \sin \gamma; \quad \text{wo } \mu = \frac{I_m}{I_1} \text{ und für } m = 6$$

$$\frac{I'}{I_1} = \frac{\pi}{3}; \quad a = \frac{3}{2\pi};$$

I' und I_1 Effektivwert des ideellen Netzstromes bzw. seiner Grundwelle bedeuten.

¹²⁾ Leukert, W., und Kübler, E.: Oberwellenbelastung von Drehstromnetzen durch Stromrichter. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 54 (1936), Nr. 4, S. 37...44, u. Nr. 5, S. 52...55.

Aymann, K.: Der Einfluss der Netzkapazitäten auf die Stromoberwellen in Gleichrichteranlagen. Elektrotechn. Z. Bd. 58 (1937), Nr. 19, S. 499...503, u. Nr. 20, S. 535...538.

Lebrecht, L.: Beitrag zur Frage der Oberwellenbelastung von Drehstromnetzen. AEG-Mitt. Bd. 1942, Nr. 5/8, S. 44...48.

¹³⁾ Glaser, A., und Müller, K.: Theorie der Stromrichter. Berlin.

¹⁴⁾ Waldvogel, P.: Zusatzverluste in den Transformatoren und Maschinen, die Mutatoren speisen. Brown Boveri Mitt. Bd. 29 (1942), Nr. 11/12, S. 357...373.

¹⁵⁾ Walther, A., Dreyer, H.-J., und Schüssler, H.: Ersatz von Kurventafeln durch Leitertafeln. Elektrotechn. Z. Bd. 60 (1939), Nr. 3, S. 65...71.

Wird an Stelle des Magnetisierungsstromes der Wirk- und Blindstrom eines parallel zum Mutator arbeitenden oberwellenfreien Verbrauchers in die Grundwelle eingeführt, so lässt sich in ähnlicher Weise ihr resultierender Leistungsfaktor bestimmen.

c) Geometrisch lassen sich die Kurvenscharen der Fig. 10 als Projektionen zweier auf einer Fläche liegenden Scharen auffassen. Die Fläche wird

durch Hebung der Punkte konstanter Ueberlappung auf gleiche Höhe z erhalten und durch die zwei Gleichungen (6) und

$$z = (a + \gamma) - \alpha$$

festgelegt.

Adresse des Autors:

E. Fässler, dipl. Ing., Kilehbergstrasse 86, Zürich 2.

Zählung der Gespräche im vollautomatischen Telephonverkehr

Vortrag, gehalten an der 5. Schweizerischen Tagung für elektrische Nachrichtentechnik am 22. Juni 1946 in Luzern, von W. Munz, Bern¹⁾

621.395.663.2

Dieser Artikel legt die Zuverlässigkeit der automatischen Gesprächszählung im schweizerischen Telephonnetz dar. Einige statistische Zahlen vermitteln die sehr geringe Häufigkeit von technischen Störungen an den Zählwerken. Es wird die Methode der monatlichen Ablesung der Zähler, der Taxberechnung und die Behandlung von Reklamationen seitens der Teilnehmer beschrieben.

Cet article fait ressortir la sûreté de fonctionnement du comptage automatique des conversations dans le réseau téléphonique suisse. Quelques chiffres, tirés de la statistique, indiquent clairement la rareté des perturbations d'origine technique survenant aux compteurs de taxe. L'auteur décrit la méthode du relevé mensuel des compteurs, du calcul des taxes, ainsi que la façon dont les réclamations des abonnés sont examinées.

Nachdem Sie im vorangegangenen Vortrag²⁾ über die Arbeitsweise der automatischen Gesprächszähler orientiert worden sind, wird es Sie interessieren, auch noch etwas über die *Verarbeitung der Zählerangaben* zu vernehmen. Ich werde mich ausschliesslich mit den Gesprächszählern der Teilnehmer, den sogenannten Teilnehmerzählern, befassen, und erwähne nur nebenbei, dass in den Zentralen für die Dienstbeobachtungen und für statistische Zwecke noch viele andere Zähler eingebaut sind.

Ende April 1946 waren von den 425 000 Telephonanschlüssen der ganzen Schweiz rund 390 000 automatisiert, und etwa 95 % aller Telephongespräche wurden automatisch auf den Teilnehmerzählern registriert.

Der Stand der Teilnehmerzähler wird monatlich mindestens einmal festgestellt. Gesprächszähler von Teilnehmern mit besonders starkem Verkehr werden zwei- bis dreimal abgelesen, da es vorkommt, dass das vierstellige Zählwerk in einem Monat mehr als einen ganzen Umgang macht, also mehr als 9999 Impulse registriert. Mit dem Ablesen oder Photographieren der Zähler wird etwa zwischen dem 23. und 25. Tag des Monats begonnen, immer am gleichen Tag, wenn er nicht auf einen Samstag, Sonntag oder Feiertag fällt. Beim Ablesen arbeiten zwei Personen zusammen. Die eine diktiert, die andere trägt den neuen Zählerstand in die Teilnehmerkarten ein. Sicherer und rascher wird gearbeitet, wenn sich die schreibende Person nicht neben der diktierenden in der Zentrale, sondern in einem andern Raum befindet und ihr die Zählerstände durchs Telephon zudiktiert werden. Der Lärm der Apparate und Maschinen, die Störungen durch andere Personen und sonstige Ablenkungen werden auf diese Weise weitgehend ausgeschaltet. Bei gemeinsamer Arbeit in der Zentrale werden stündlich etwa 500...600 Zähler abgelesen, beim telephonischen

Diktat in einen andern Raum 900...1000 Zähler. Sehr geübte Paare bringen es sogar bis auf 1200 Zähler in der Stunde, das heisst auf einen Zähler alle 3 Sekunden.

Wie wenige würden es sein, wenn die Zähler bei den Teilnehmern abgelesen werden müssten?

Beim photographischen Verfahren werden meistens Gruppen von je 100 Zählern photographiert, was sehr rasch geht. In Luzern zum Beispiel werden 10 000 Zähler in 20 Minuten photographiert. Die auf den Filmen festgehaltenen Zählerstände werden später in einem besonders konstruierten Projektionsapparat in 40...60 facher Vergrösserung abgelesen und in die bereits erwähnten Teilnehmerkarten eingetragen. Meistens arbeiten auch hier zwei Personen zusammen und bringen es auf 700...800 Zähler in der Stunde. Der Grund für die etwas geringere Leistung gegenüber dem Telephondiktat liegt in den undeutlicheren photographierten Zahlen und der Bedienung der mechanischen Einrichtung für die Weiterbewegung des Filmes von einem Zählerstand zum andern.

Das Ablesen der Zählerstände hat den Vorteil, dass man die Zähler direkt vor Augen hat. Ferner können beliebig viele Paare eingesetzt werden, beim photographischen Verfahren nur so viele, als Projektionsapparate vorhanden sind. Trotzdem ist das photographische Verfahren dem Ableseverfahren überlegen und für das Personal weniger anstrengend. Die Hauptvorteile sind

- das ungestörte Arbeiten in einem besondern Raum,
- die fast gleichzeitige Aufnahme aller Zählerstände (wichtig bei Reklamationen),
- die Filmaufnahme als bleibendes Dokument.

Nachdem die neuen Zählerstände in die Teilnehmerkarten eingetragen sind, wird die Gesprächstaxenschuld jedes Teilnehmers, das heisst der Unterschied zwischen altem und neuem Zählerstand, ermittelt. Dabei zeigt sich, dass auf je 1000 Zähler etwa 4 bis 5 entweder stehen geblieben, oder unverhältnismässig stark weitergeschritten sind. Diese werden

¹⁾ In Vertretung des verhinderten Autors wurde der Vortrag von J. Gonzenbach, administr. Dienstchef der Telephondirektion Luzern, gehalten.

²⁾ Erscheint später.