

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	32 (1941)
Heft:	23
Artikel:	Die Berechnung des selbstgeführten, fremdgesteuerten Sechsphasen-Gleichstrom-Drehstrom-Mutators
Autor:	Goldstein, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1060045

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: 13.01.2026

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

lässt sich der Ausbau oft wesentlich verbilligen. Aber vorerst suchen wir ja Akkumulierwerke mit vorwiegend Winterenergie. Der Weg zu wirklich billiger Winterenergie muss anderswo gesucht werden, nämlich in ganz grossen Akkumulierwerken. Es kann kein Zweifel bestehen, dass nur die beiden einzigen noch verfügbaren Gelegenheiten dieser Art, Hinterrhein- und Urseren-Reusstal—Werke die Forderung nach billiger Winterkraft erfüllen können. Aus der genannten Publikation des Wasserwirtschaftsamtes ist bei eingehendem Studium klar ersichtlich, dass die Energiegestehungskosten mit steigendem Totalgefälle abnehmen, und mit kleiner werdendem Verhältnis Staumauerkubatur zu Speichervolumen ebenfalls abnehmen. Dieser Quotient wird um so günstiger, je grösser bei gegebener Situation das Speichervolumen gemacht werden kann. Ein ganz grosser Speicher ist daher im allgemeinen viel wirtschaftlicher als mehrere kleine und mittelgrosse von zusammen gleichviel Volumen wie der grosse.

Das von der Ako vorgeschlagene Minimal-Programm für die nächsten 10 Jahre sieht an Akkumulierwerken das rasch realisierbare, kleinere *Lucendrosee-Projekt* sowie den zweistufigen Ausbau der Hinterrheinwerke vor, diese mit Staubecken Splügen-Nufenen und Sufers von zusammen 300 Millionen m³ Speichervolumen und den zwei Maschinenhäusern Andeer und Sils. Die verfügbare Winter- und Sommerenergie dieser Akkumulierwerke deckt gerade die früher genannten Beträge von 740 bzw. 460 Millionen kWh, total pro Jahr 1,2 Milliarden kWh. Das macht mit dem schweizerischen Energieanteil der 6 Laufwerke zusammen die 2,2 Milliarden kWh.

Dies ist, wie erwähnt, ein Minimal-Programm.

Bei der Wahl des zunächst auszuführenden grossen Akkumulierwerkes hat die Ako auch das neueste Projekt für die Urserental-Reusswerke in Betracht gezogen, kam aber zur Ueberzeugung, dass die Vorbereitung dieses ganz grosszügigen Werkes noch einige Zeit beanspruche, so dass nicht mit Sicherheit anzunehmen ist, dass es im Rahmen des Zehn-

jahres-Programmes rechtzeitig fertig erstellt werden kann. Es unterliegt aber keinem Zweifel, dass die Reusswasserkräfte dazu berufen sind, die schweizerische Energieversorgung in verhältnismässig naher Zukunft, vielleicht mit ihrem ersten Ausbau noch vor Ablauf der 10 Jahre, in glücklichster Weise zu ergänzen. Beim Vollausbau in 3 Gefällstufen vom Urserental bis zum Vierwaldstättersee hinunter, unter Miteinbezug des obersten Teils des Vorderrheins, können mit einem Stauraum von 1200 Millionen m³ im Urserental und einer grosszügigen Heranziehung von fremder Sommerenergie zur vollständigen Füllung des Stauraumes mit Pumpbetrieb folgende Energiemengen gewonnen werden: im Winterhalbjahr rund 2800 Millionen kWh, im Sommerhalbjahr rund 360 Millionen kWh. Dazu braucht es aber für den Pumpbetrieb im Vollausbau rund 2000 Millionen kWh Sommerenergie aus andern Werken. Dieser Vollausbau ermöglicht später wenn keine Laufwasserkräfte von der Art der günstigen Hochrheinstufen mehr verfügbar sind und nur noch die an sich unwirtschaftlichen Laufwasserkräfte mit sehr viel Sommerenergieüberschuss frei sind, deren wirtschaftlichen Ausbau, der sonst kaum möglich wäre. Wenn einmal diese Reusswerke bestehen, wird auch der bereits erwähnte Ausbau mittelgrosser Akkumulierwerke auf wirtschaftlichere Art, d. h. mit ungefähr Jahresausgleich, statt mit voller Konzentration auf den Winter, ermöglicht.

In der Eingabe des SEV und VSE an die Behörden wird ausser dem grossen Programm ferner empfohlen, diejenigen Projekte für Werke von lokaler oder regionaler Bedeutung, die einem Bedürfnis entspringen und sich wirtschaftlich rechtfertigen lassen, ebenfalls zu fördern. So dient z. B. das Projekt Rossens im Kanton Freiburg einem regionalen Bedürfnis. Es ist mitten im Konsumgebiet gelegen.

Es ist meines Wissens das erste Mal, dass ein solches Programm für den Bau weiterer Kraftwerke vom SEV und VSE aufgestellt wurde. Die Verbände glauben damit der schweizerischen Wirtschaft einen Dienst zu leisten.

Die Berechnung des selbstgeführten, fremdgesteuerten Sechsphasen-Gleichstrom-Drehstrom-Mutators.¹⁾

Von A. Goldstein, Zürich.

621.314.57

Es wird gezeigt, dass das Betriebsverhalten des selbstgeführten Gleichstrom-Drehstrom-Mutators mit Hilfe des Leitwertdiagramms der wechselstromseitigen Belastung leicht übersehen werden kann. Die erhaltenen Charakteristiken für Gleichstrom und Wechselspannung — insbesondere die Belastungsgrenzen — in Funktion der Belastungsimpedanz werden eingehend diskutiert und durch Messresultate belegt. Für rein ohmsche Belastung wird die Wechselrichterberechnung auf Grund der auftretenden Schaltvorgänge durchgeführt.

Bisher wurden in der Literatur nur selbstgeführte Gleichstrom-Einphasenwechselstrom-Mutatoren in Serie- und Parallelschaltung eingehender

L'auteur montre que le comportement du mutateur continu-alternatif à autoréglage se détermine aisément à l'aide du diagramme des conductances. Il examine ensuite en détail les caractéristiques obtenues pour le courant continu et la tension alternative, plus particulièrement les limites de charge, en fonction de l'impédance de la charge, et indique des résultats de mesures. Il présente pour terminer le calcul d'un onduleur sous charge purement ohmique, basé sur les processus de couplage.

behandelt²⁾ ³⁾ ⁴⁾ ⁵⁾. Dabei wurde die Differentialgleichung des bei der Wechselrichtung entstehenden Schaltausgleichsvorganges mit den entsprechen-

¹⁾ Diplomarbeit am Elektrotechnischen Institut der ETH.

²⁾ Ostendorf, Arch. f. Elektrotechn. 1938, S. 355, Der fremdgeführte Wechselrichter in Gegentaktschaltung.

³⁾ Teh-shin Kuo, Z. Phys. 1935, S. 769.

⁴⁾ P. Brückner, Arch. f. Elektrotechn. 1940, S. 1.

⁵⁾ W. Schilling, Wechselrichter u. Umrichter, S. 59.

den Randbedingungen gelöst. Dieses Verfahren er gab ziemlich komplizierte Formeln zur Berechnung der entstehenden Spannungen und Ströme. Ausserdem war eine Erweiterung der so erhaltenen Ergebnisse auf den Mehrphasenmutator-Betrieb nicht möglich. Eine ganz allgemeine Lösung der zuletzt genannten Aufgabe hat J. Müller-Strobel⁶⁾ mit Hilfe der Operatorenrechnung gefunden. W. Schilling hat eine Berechnung des Einphasen-Parallel-Wechselrichters mittels Fourierreihen angegeben⁵⁾. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, wie dieses Verfahren auch auf selbstgeführte Gleichstrom-Drehstrom-Mutatoren angewendet werden kann, während für die Schaltausgleichsvorgänge die Ansätze nach⁶⁾ Verwendung finden.

1. Der Vorgang der Wechselrichtung.

Im folgenden soll die Berechnung des selbstgeführten Sechsphasenwechselrichters mit sekundärseitigen Löschkondensatoren (Fig. 1) dargestellt werden. Die Wirkung der Kondensatoren ist in Schaltung Fig. 1 die gleiche wie bei direkt zwischen den Anoden angeschlossenen Kondensatoren⁶⁾, nur

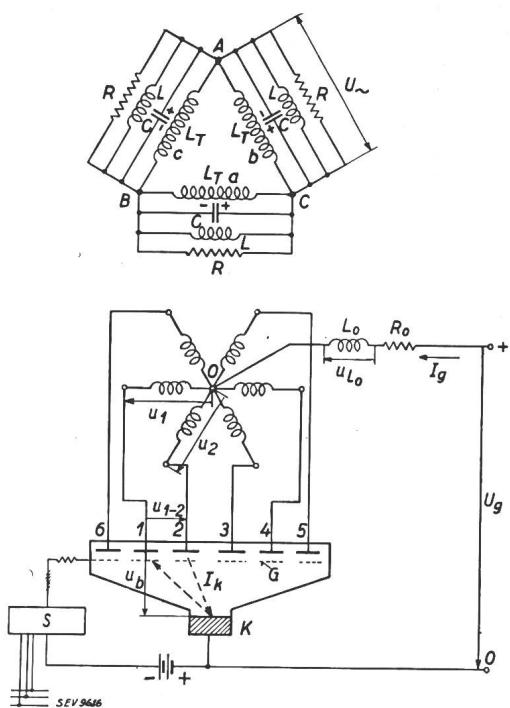


Fig. 1.

Schaltung des selbstgeführten, fremdgesteuerten Wechselrichters mit belastungsseitigen Löschkondensatoren. R , L äussere Belastung, C Löschkapazität, L_0 Glättungsdrosselspule, R_0 Widerstand des Gleichstromkreises, K Kathode, $1 \dots 6$ Anoden, S Steuergerät, G Gitter $1 \dots 6$.

wirken die Transformatorenstreuungen als zusätz lich vorgeschaltete Induktivitäten.

Anode 1 werde durch einen positiven Spannungs stoss auf das sonst negative Gitter G_1 gezündet; da durch entsteht in der Transformatorwicklung 1 ein ansteigender Strom, der eine entsprechende Spannung induziert und die Löschkondensatoren in der

⁶⁾ J. Müller-Strobel, Bull. SEV 1940, Nr. 22, Beitrag zur Berechnung des selbstgeführten, fremdgesteuerten Gleichstrom-Drehstrom-Mutators mittels der Laplace-Transformation (s. Arch. f. Elektrotechn. Bd. 35 (1941), H. 1, S. 45).

angegebenen Polarität auflädt. Wird nun Anode 2 gezündet, so entsteht ein Kurzschlusskreis Kathode K —Anode 2—Transformatorwicklungen 2 und 1—Anode 1— K , in welchem die transformatorisch ange koppelten, geladenen Kondensatoren einen Kurz schlussstrom im in Fig. 1 angegebenen Sinn erzeu gen. Dieser Kurzschlussstrom ist aber der Stromrichtung der Anode 1 entgegengesetzt, weshalb Anode 1 löscht; die Kondensatorkommutierung erfolgt dabei im allgemeinen in einigen μ s, so dass die Kommu tierungsdauer $t_{\bar{u}} = 0$ gesetzt werden darf. Durch die Wiederholung des beschriebenen Vorganges wird der Gleichstrom I_g der Reihe nach auf alle 6 Phasen des Transformatoren geschaltet und belastungsseitig ein Drehstromsystem erzeugt.

Betrachten wir die Spannungsverteilung: Beim Zünden von Anode 2 wird Anode 1 negativ gegen die Kathode und löscht. Dies wird durch die beschriebene Kondensatoraufladung erreicht. Fig. 2 zeigt die sich ergebende Phasenlage der Ströme und

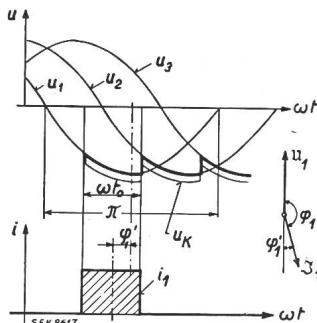


Fig. 2.

Spannungen und Ströme beim selbstgeführten Wechselrichter. u_1 , u_2 primäre Transformatorphasenspannungen (Spannungen der Anoden 1 u. 2 gegen den Sternpunkt O), i_t Anodenstrom der Anode 1, t_0 Anodenbrenndauer, $t_0 = 1/f \cdot m$, f Frequenz, m Phasenzahl des Wechselrichters, u_K Kathoden spannung.

Spannungen. Bei annähernd sin-förmiger Spannungskurve (dies ist im Sechsphasenbetrieb erfüllt) folgt daraus, dass der Anoden- bzw. Transformator primärstrom der zugehörigen Transformatorphasen spannung voreilen muss. Die Gesamtbelastung muss also kapazitiv sein. Dieser Bedingung entspricht beim Gleichrichter und netzgeführten Wechselrichter die Tatsache, dass diese für das speisende (ge speiste) Wechselstromnetz immer eine induktive Belastung darstellen. Beide Gesetze folgen aus den allgemeinen Zündbedingungen.

Für die anschliessenden Betrachtungen seien fol gende Voraussetzungen gemacht:

- Grosse Gleichstromglättungsdrosselspule, $L_0 = \infty$ (Fig. 1), daher wellenfreier Gleichstrom.
- Kommutierungszeit $t_{\bar{u}} = 0$. Daraus folgt, dass alle Kondensatoren ihre Ladung während der Kommutierung nicht ändern und dass ebenso alle magnetischen Felder ihren Fluss beibehalten.

Es gilt: $U_{Ct=0} = U_{Ct=t_{\bar{u}}} = i_{L_t=0} = i_{L_t=t_{\bar{u}}}$.

- Der Magnetisierungsstrom ($i_{\mu} = 0$) und die Streuung des Transformators ($\lambda = 0$) sind vernachlässigt. Transformatorunsymmetrien bleiben unberücksichtigt.
- Die Drehstrombelastung sei vollkommen symmetrisch. $R_a = R_b = R_c$, $L_a = L_b = L_c$, $C_a = C_b = C_c$.
- Von den Verlusten ist nur der Lichtbogenspannungsabfall u_b berücksichtigt. Es ist also $U_- = (U_g - u_b)$ als Gleich spannung einzusetzen.

Der Wechselrichter ist damit auf folgenden ein fachen Vorgang reduziert: Das Drehstrombelastungs dreieck ABC (Fig. 1) wird durch den Wechselrichter fortlaufend an je zwei andern Punkten

in einen konstanten Gleichstrom I_g hineingeschaltet. Es nimmt dabei entsprechend den 6 Anoden

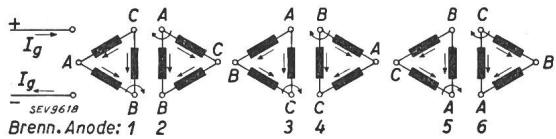


Fig. 3.

Lage des Drehstrombelastungsdreieckes ABC (Fig. 1) in bezug auf den Gleichstrom I_g beim Brennen der Anoden 1...6.

des Wechselrichters innerhalb einer Periode $T = 1/f$ sechs verschiedene Stellungen ein (Fig. 3). Der Leitwert $G = 1/Z$ einer Phase ist:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{p \cdot L} + p \cdot C. \quad (1)$$

wo $p = \frac{d}{dt}$ der Differentialoperator ist.

Bei brennender Anode 1 ist: $Z_{BC} = Z$, $Z_{B-A-C} = 2Z$, folglich:

$$\begin{aligned} i_{BC} &= -\frac{2}{3} I_g = i_a, \quad i_{AB} = \frac{1}{3} I_g = i_c, \\ i_{AC} &= -\frac{1}{3} I_g = -i_b \end{aligned} \quad (2)$$

Folgen wir dem Stromverlauf der Belastungsphase $AB = c$ (Fig. 4, Osz. 1):

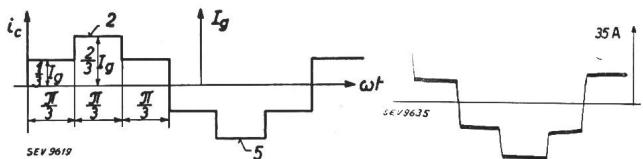


Fig. 4. Osz. 1. Gesamtwechselstrom durch R , L u. C . $\cos \varphi = 1$, $Z \omega C = 1,81$.

Brennende Anode: 1 2 3 | 4 5 6
 $i_{AB} = i_c = \frac{1}{3} I_g \quad \frac{2}{3} I_g \quad \frac{1}{3} I_g \quad -\frac{1}{3} I_g \quad -\frac{2}{3} I_g \quad -\frac{1}{3} I_g$.

Der Gesamtstrom springt also jede $1/6$ -Periode. Der Kondensatorstrom i_c nimmt diese Sprünge allein auf.

2. Die Berechnung der Ströme und Spannungen mittels der Fourierzerlegung der Kurven.

Der Gleichstrom I_g sei zunächst als bekannt vorausgesetzt: Dann ist der Strom einer Belastungsphase (inkl. Kondensator):

$$\begin{aligned} i_c &= \frac{2 I_g}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \frac{1}{7} \sin 7 \omega t \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{11} \sin 11 \omega t + \dots \right) \quad (3) \end{aligned}$$

Um zur Wechselspannung zu gelangen, muss jede harmonische Oberschwingung der Frequenz $n \cdot \omega$ des Stromes i_c mit der zugehörigen Impedanz β_n des Wechselstromkreises multipliziert werden. Stellt man die Außenbelastung als Parallelschaltung von R und L dar (Fig. 1), so gilt für den Leitwert von R , L und C für die n te Harmonische (vgl. Fig. 5)

$$\frac{1}{\beta_n} = \mathfrak{G}_n = \frac{1}{R} + \frac{1}{j n \omega L} + j n \omega C = G_n e^{j \varphi_n};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_n = R \left(\frac{1}{n \omega L} - n \omega C \right) \quad (4)$$

$$Z_n = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{n \omega L} - n \omega C \right)^2} = R \cos \varphi_n,$$

$$\cos \varphi_n = \sqrt{1 + R^2 \left(\frac{1}{n \omega L} - n \omega C \right)^2}$$

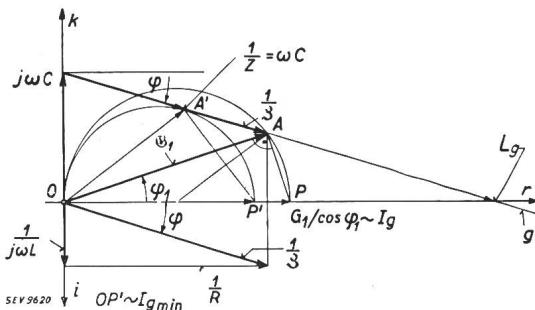


Fig. 5.

Leitwertdiagramm des Wechselrichters für die Grundfrequenz. \mathfrak{Z} Impedanz der äusseren Belastung R , L mit Phasenwinkel φ . \mathfrak{G}_1 Gesamtwechselstromleitwert (R , L u. C) mit Phasenwinkel φ_1 . k kapazitiv, i induktiv, r reell. L_g Lastgrenze $\varphi_1=0$, für $\tau=0$

Für die Spannung folgt:

$$\begin{aligned} u_c &= \sum u_n = \sum i_n \cdot \beta_n = \frac{2 I_g}{\pi} \left[Z_1 \sin (\omega t + \varphi_1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{Z_5}{5} \sin (5 \omega t + \varphi_5) + \frac{Z_7}{7} \sin (7 \omega t + \varphi_7) + \dots \right] \quad (5) \end{aligned}$$

Für den Gleichstromkreis gilt während der Brenndauer einer Anode, z. B. der Anode 1:

$$u_1 + u_{L_0} = U_g - u_b \quad (\text{Fig. 1}) \quad (6)$$

Da im stationären Zustand der Mittelwert der Drosselspannung u_{L_0} über die Brenndauer t_0 einer Anode gleich 0 sein muss, folgt:

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u_1 dt = U_g - u_b$$

Aus dieser Bedingung lässt sich die Abhängigkeit des Gleichstromes I_g von der Belastungsimpedanz berechnen. In unserem Falle ist die Brenndauer einer Anode: $\omega t = \frac{\pi}{3} \dots \frac{2\pi}{3}$ (vgl. Fig. 4).

Somit gilt: $\frac{2\pi}{3}$

$$\frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} u_c \cdot d\omega t = U_g - u_b \quad (7)$$

Setzt man Gl. (5) in (7) ein und integriert aus, so folgt:

$$U_g - u_b = \frac{6 I_g}{\pi^2} \left(Z_1 \cos \varphi_1 + \frac{Z_5}{25} \cos \varphi_5 + \frac{Z_7}{49} \cos \varphi_7 + \dots \right) \quad (8)$$

Nach Gl. (4) ist: $Z_n = R \cos \varphi_n$, somit:

$$I_g = \frac{\pi^2}{6} \frac{1}{\sum \frac{1}{n^2} \cos^2 \varphi_n} \cdot \frac{U_g - u_b}{R} \quad (9)$$

Aus Gl. (4) $\operatorname{tg} \varphi_n = R(1/n\omega L - n\omega C)$ und aus der Bedingung, dass die Belastung für die Grundwelle kapazitiv sein muss, also $\operatorname{tg} \varphi_1 < 0$, ergibt sich, dass

$$|\operatorname{tg} \varphi_{n>1}| > |\operatorname{tg} \varphi_1| (n \geq 5) \text{ und mithin:} \\ |\cos \varphi_{n>1}| < |\cos \varphi_1|.$$

Die höheren Harmonischen dürfen also in Gl. (9) vernachlässigt werden.

$$I_g \cong \frac{\pi^2}{6} \frac{U_g - u_b}{R \cos^2 \varphi_1} = \frac{\pi^2}{6} \frac{U_g - u_b}{Z_1 \cos \varphi_1} \quad (10)$$

Die Leistung des Wechselrichters ist bei Vernachlässigung der Verluste:

$$P_{\sim} = \frac{3 U_{\sim}^2}{R} \cong I_g (U_g - u_b)$$

und damit:

$$U_{\sim} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{U_g - u_b}{\cos \varphi_1} \quad (11)$$

Für den Wechselstrom in der Belastungsimpedanz $\frac{1}{3} = 1/R + 1/j\omega L$ gilt schliesslich:

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{Z} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{U_g - u_b}{Z \cos \varphi_1} \quad (12)$$

Die Verhältnisse lassen sich am besten mit Hilfe einer graphischen Darstellung der belastungsseitig gegebenen Leitwerte für die Grundharmonische übersehen (Fig. 5). Für konstante Löschkapazität C , konstanten $\cos \varphi$ der äusseren Belastung R , L und variable Grösse von $1/Z = \sqrt{1/R^2 + 1/\omega^2 L^2}$ ist der geometrische Ort für den Endpunkt des Vektors $\mathfrak{G}_1 = \frac{1}{3}$ eine zu $1/3$ parallele Gerade g durch den Endpunkt des Vektors $j\omega C$. I_g ist durch die Strecke

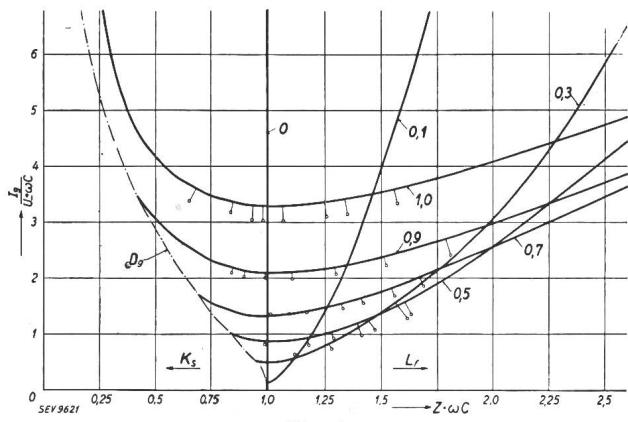
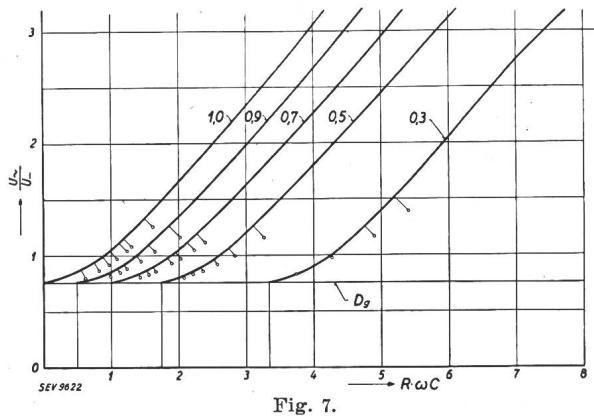


Fig. 6.

Gleichstrom I_g in Funktion der äusseren Belastung $Z \cdot \cos \varphi$ der Außenlast als Parameter. τ Entionisierungszeit der Brennstrecken. I_g ist auf $U_{\sim} \cdot \omega C$ und Z auf ωC bezogen, um allgemeingültige Werte zu erhalten. $U_{\sim} = U_g - u_b$ (Fig. 1). D_g Durchzündungsgrenze für $\tau = 0$. K_s Kurzschluss, L_t Leerlauf

$G_1/\cos \varphi_1$ auf der reellen Achse und U_{\sim} direkt durch $\cos \varphi_1$ gegeben. In Fig. 6 und 7 sind I_g und U_{\sim} in Funktion von $Z\omega C$, bzw. $R\omega C$ mit $\cos \varphi$ als Parameter dargestellt (vgl. Lit. ²). Die Darstellung $U_{\sim} = f(R)$ ist $U_{\sim} = f(Z)$ vorgezogen worden, da sich dabei übersichtlichere Kurven ergeben.



Wechselspannung U_{\sim} in Funktion der Wirklast $R \cdot \cos \varphi$ der Außenlast als Parameter. U_{\sim} ist auf U_{\sim} und R auf ωC bezogen, um allgemeingültige Werte zu erhalten. $U_{\sim} = U_g - u_b$ (Fig. 1). D_g Durchzündungsgrenze für $\tau = 0$, $\frac{U_{\sim \min}}{U_{\sim}} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0,74$.

3. Das Verhalten von I_g und U_{\sim} .

$G_1/\cos \varphi_1$ und damit I_g hat für jeden Phasenwinkel φ der Außenlast R , L bei einem bestimmten Wert von Z ein Minimum. Dieses ist erreicht, wenn der Kreis OAP (Fig. 5) die Gerade g tangiert (Lage $OA'P'$), also für $1/Z = \omega C$. Für kleinere und grössere Werte von Z steigt I_g wieder an. U_{\sim} ist minimal für $\cos \varphi_1 = 1$, der Minimalwert $U_{\sim \min} = (U_g - u_b) \frac{\pi}{3\sqrt{2}}$ ist unabhängig von $\cos \varphi$, er wird jedoch bei verschiedenen $\cos \varphi$ für andere Werte von R erreicht. Mit steigendem $R(Z)$ wird U_{\sim} rasch sehr gross.

Die in Fig. 6 und 7 eingetragenen Messpunkte liegen alle unterhalb der berechneten Kurven. Eine nähere Ueberprüfung der gemachten Voraussetzungen zeigte, dass für den verwendeten Mutatortransformator die Vernachlässigung des Magnetisierungs-

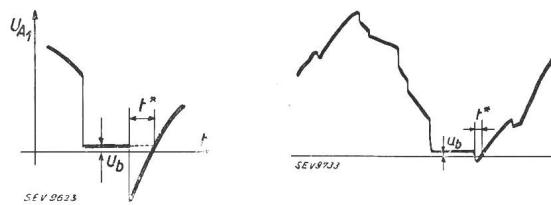


Fig. 8.
Osz. 1 Anodenspannung, u_b Brennspannung, t^* Zeit, während der Anode 1 negativ gegen die nach Anode 1 brennende Anode 2 ist.
Osz. 2. Anodenspannung (Anode 1 gegen Kathode). $\cos \varphi = 0,9$, $Z \omega C = 0,835$.

stromes nicht ganz zulässig war. Er sollte, wie dies für die nachfolgende Berechnung der Belastungsgrenzen erfolgt, durch Einführung der Transformatorinduktivität L_T (Fig. 1) in die Rechnung einbezogen werden.

4. Die Belastungsgrenzen.

Durchzündungsgrenze: Die Durchzündungsgrenze ist durch die Bedingung gegeben, dass die Zeit t^* , während der eine Anode nach dem Löschen negativ gegen die brennende Anode ist, grösser sein muss als die Entionisierungszeit τ der Brennstrecke (Fig. 8, Osz. 2). Sonst ist die gelöschte Anode noch nicht sperrfähig, wenn ihre Spannung gegen die Kathode bereits wieder positiv und gleich der Brennspannung geworden ist; die gelöschte Anode «zündet durch».

Die Zeit t^* soll für den Fall rein sin-förmiger Spannungen berechnet werden. Die Spannung zwischen den Anoden 1 und 2 ist (Fig. 1):

$$u_{1-2} = u_1 - u_2; \quad u_1 = \sqrt{2} U_{\infty} \sin(\omega t + \varphi_1); \\ u_2 = \sqrt{2} U_{\infty} \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{m}\right);$$

dabei bedeutet m die primäre Phasenzahl.

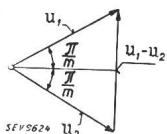


Fig. 9.
Spannungsdiagramm zur Ermittlung der Spannung zwischen Anoden 1 und 2.
 u_1, u_2 Spannungen der Transformatorkreisläufe 1 und 2 (Fig. 1).

Aus Fig. 9 folgt:

$$u_{1-2} = 2\sqrt{2} U_{\infty} \sin \frac{\pi}{m} \cos\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{\pi}{m}\right)$$

Am Ende der Zeit t^* ist $u_{1-2} = 0$.

$$u_{1-2} = 0 \text{ für: } \omega t + \varphi_1 - \frac{\pi}{m} = \frac{\pi}{2}.$$

Die Löschung erfolgt im Zeitpunkt $\omega t = 2\pi/3$ (siehe Fig. 4); $\omega t^* = \omega t - 2\pi/3$;

$$\omega t^* = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}, \\ \text{da } \pi/m = \pi/6 \text{ ist: } \omega t^* = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3} - \varphi_1 \\ \underline{\underline{\omega t^* = -\varphi_1 \geq \omega t.}} \quad (13)$$

Im Leitwertdiagramm (Fig. 13) ist die Belastungsgrenze also gegeben durch die Gerade d durch den Nullpunkt mit dem Neigungswinkel $\varphi_1 = -\omega\tau$ (kapazitiv).

Die Grenzbedingung Gl. (13) ist aus dem Schnitt zweier benachbarter Wechselspannungskurven $u_1(t)$ und $u_2(t)$ hervorgegangen, die im Sechphasen-

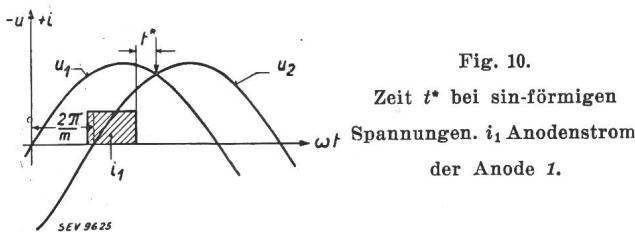


Fig. 10.
Zeit t^* bei sin-förmigen Spannungen. i_1 Anodenstrom der Anode 1.

betrieb um 60° gegeneinander verschoben sind (Fig. 10). Gl. (13) ist nur dann annähernd richtig, wenn der Oberwellengehalt der Spannungskurve klein

ist, denn sonst ist der Schnittpunkt der Spannungskurven gegenüber der berechneten Lage verschoben (Fig. 11), und dies kann auf die Grösse von t^* einen erheblichen Einfluss haben. $t^* = \tau$ wird dann für einen andern als den errechneten Belastungszustand erreicht.

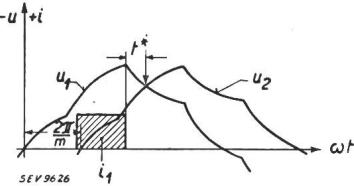


Fig. 11.
Zeit t^* bei verzerrten Spannungen.

Der Vergleich mit den Messresultaten zeigt, dass für kleinen $\cos \varphi$ Gl. (13) gute Resultate ergibt, dagegen nicht für grosse $\cos \varphi$ -Werte. Für kleine $\cos \varphi$ ($\varphi > \frac{1}{R}$) zeigt Fig. 13, dass bei Grenzlast $G_1 \sim 0$ wird.

$$\mathfrak{G}_1 \cong j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \sim 0 \quad \text{also: } \omega C = 1/\omega L$$

Bei Grenzlast und kleinem $\cos \varphi$ haben wir als Wechselstromimpedanz einen schwach gedämpften Parallelschwingungskreis vor uns, der fast auf die aufgedrückte Frequenz abgestimmt ist. Die sich ergebende Spannung weicht wenig von der sin-Form ab, so dass die Voraussetzungen für die Gültigkeit von Gl. (13) erfüllt sind. Eine genaue Bestimmung der Durchzündungsgrenze ist nur möglich, wenn die Gleichungen der Spannungskurven explizite (nicht durch eine Reihe) gegeben sind. Die Durchführung dieser Rechnung auf Grund der beim Gleichstrom-Drehstrom-Mutator erfolgenden Schaltvorgänge soll in einem späteren Aufsatz erfolgen.

5. Kippgrenze.

Infolge der Nichtlinearität der Transformatorkapazität treten oberhalb einer bestimmten maximalen Spannung Kipperscheinungen zwischen Transformatorkreis und Löschkondensator auf (Fig. 12).

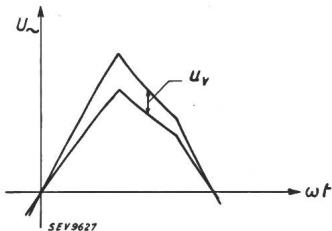


Fig. 12.
Spannungsschwankungen nach Ueberschreiten der Kippgrenze.
 u_v Schnelle Spannungsschwankungen.

Diese «Kippspannungsgrenze» ist nur vom Transformatorkreis und dem Löschkondensator abhängig²⁾, nicht dagegen von der Belastung. Aus Gl. (11)

$$U_{\infty} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{U_g - u_b}{\cos \varphi_1}$$

folgt, dass im Leitwertdiagramm Fig. 13 der Kippspannungsgrenze U_{max} eine Gerade k durch den Nullpunkt mit der U_{max} zugehörigen Neigung φ_{1max} entspricht.

An der Kippspannungsgrenze ist der Transformatorkreis übersättigt, und der Magnetisierungsstrom

darf infolgedessen nicht mehr vernachlässigt werden. Er wird berücksichtigt, indem bei der Berechnung von Z die Transformatorinduktivität L_T (Fig. 1) miteinbezogen wird.

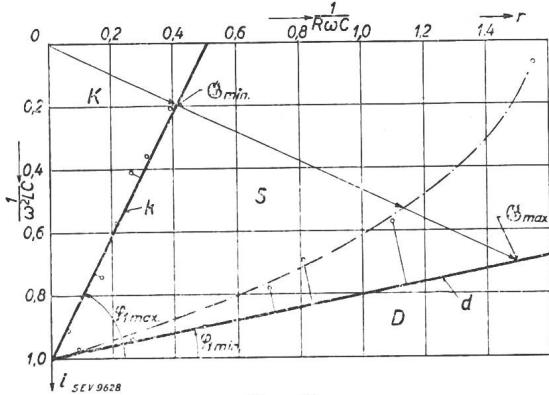
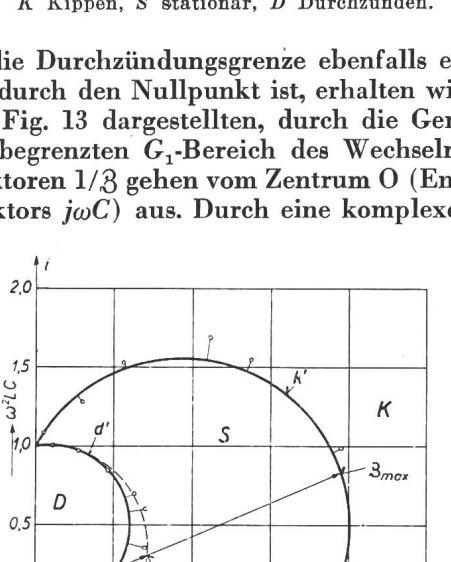
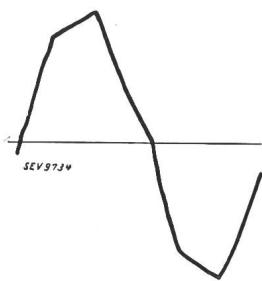


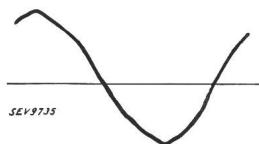
Fig. 14.



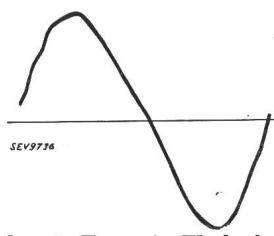
lastung gegeben. Aus Gl. (11) und Fig. 13 und 14 folgt jedoch, dass bei rein induktiver Belastung nur ein Betriebsfall, nämlich Resonanz $\omega C = 1/\omega L$ möglich ist, da andernfalls $\cos \varphi_1 = 0$, und damit $U_{\infty} = \infty$ wäre.



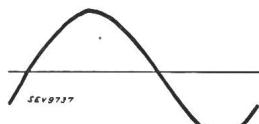
Osz. 3. Erzeugte Wechselspannung u_{∞} nahe der Kippgrenze.
 $\cos \varphi = 1$, $Z\omega C = 2,67$
 $U_{\infty}/U_{\infty} = 2,97$.



Osz. 4. Erzeugte Wechselspannung u_{∞} nahe der Durchzündungsgrenze.
 $\cos \varphi = 0,8$, $Z\omega C = 0,97$
 $U_{\infty}/U_{\infty} = 1,53$.



Osz. 5. Erzeugte Wechselspannung u_{∞} nahe der Kippgrenze.
 $\cos \varphi = 0,5$, $Z\omega C = 2,4$
 $U_{\infty}/U_{\infty} = 2,98$.



Osz. 6. Erzeugte Wechselspannung u_{∞} nahe der Durchzündungsgrenze.
 $\cos \varphi = 0,3$, $Z\omega C = 1,1$
 $U_{\infty}/U_{\infty} = 1,58$.

7. Die Berechnung des Gleichstrom-Drehstrom-Mutators mittels Schaltausgleichsvorgängen.

Zum Vergleich soll jetzt für rein ohmsche Außenlast die Gleichung der Wechselspannungskurve an Hand des bei der Wechselrichtung auftretenden Schaltausgleichsvorganges (vgl. Lit.⁶) berechnet werden. Für das sekundärseitige Belastungsdreieck *ABC* gilt Schema Fig. 16. Die im ersten Abschnitt gemachten Voraussetzungen seien auch jetzt gültig.

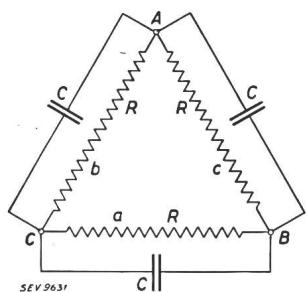


Fig. 16.
Drehstrombelastungsdreieck
ABC bei rein ohmscher Aus-
ßenlast *R*.

Lastdreieck *ABC* wird jede $1/6$ -Periode an je zwei andern Punkten in den konstanten Gleichstrom I_g hineingeschaltet (vgl. Fig. 3). Die Impedanz zwischen den Anschlusspunkten besteht immer aus einer Parallelschaltung von Z und $2Z$ (Z = Gesamtempedanz einer Belastungsphase). Diese Impedanz sei mit Z' bezeichnet, sie kann durch Ersatzschaltelemente R' und C' dargestellt werden (Fig. 17). (15)

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} = \frac{3}{2R}; R' = \frac{2R}{3}, C' = C + \frac{C}{2} = \frac{3C}{2}$$

An diesen Ersatzkreis wird im Zeitpunkt $t = 0$ — beim Zünden der zugehörigen Anode — der Strom $i = I_g = \text{const.}$ gelegt. I_g sei wieder zunächst als

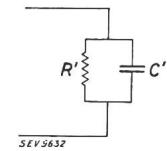


Fig. 17.
Ersatzschaltelemente R' und C' zur Be-
trachtung der Schaltausgleichsvorgänge
 $R' = 2 \cdot R/3$, $C' = 3 \cdot C/2$.

bekannt vorausgesetzt. Dann gilt für die vom Einschaltvorgang des Stromkreises $R' — C'$ (Fig. 17) herrührende Spannung Gl. (16)

$$u_e(t) = I_g \cdot R' \left(1 - e^{-\frac{t}{R' C'}} \right) \quad (16)$$

$R' C' = T$ ist die Zeitkonstante des Kreises $R' — C'$.

Im Zeitpunkt $t = 0$ sei Punkt *C* des Belastungsdreiecks an + und Punkt *B* an — geschaltet (Fig. 3). Dann ergibt sich für die Zeitdauer t_0 , während der die zugehörige Anode 1 brennt, folgender Spannungsverlauf an den drei Phasen $CB = a$, $AC = b$ und $BA = c$ der Drehstrombelastung (Fig. 3):

$$u_{CB} = I_g \cdot R' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = u_a; u_{CA} = \frac{I_g}{2} R' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \\ = -u_b; u_{AB} = \frac{I_g}{2} R' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = -u_c \quad (17)$$

Im stationären Betrieb sind jedoch die Kondensatoren C_a , C_b und C_c im Zeitpunkt $t = 0$ (Zündpunkt der Anode 1) nicht ladungsfrei. Infolge der schon vorher stattgefundenen Schaltausgleichsvorgänge sind die Kondensatoren zur Zeit $t = 0$ auf die uns bis jetzt noch unbekannten Spannungen U_{a0} , U_{b0} und U_{c0} aufgeladen. Diese Spannungen müssen aus den Randbedingungen des stationären Zustandes, die aus der Voraussetzung: Kommutationszeit $t_{\ddot{u}} = 0$ folgen, ermittelt werden.

Für jede der Phasen *a*, *b* und *c* gelten im Verlauf einer Periode 6 Gesetze $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, ..., je nachdem, welche Anode brennt. Immer gilt die Dreieckschaltungsbedingung:

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (18)$$

Ist u_1 das Spannungsgesetz einer Phase während der Brenndauer der zugehörigen Anode (einer Anode, die an eine Primärwicklung auf dem gleichen Transformatorschwenkel mit der der Belastungsphase zugehörigen Sekundärwicklung angeschlossen ist), so ist:

u_1 = Gesetz während der Brenndauer d. Anode, (u_4),
 u_2 = Gesetz nach dem Löschen der Anode, (u_5),
 u_6 = Gesetz vor dem Zünden der Anode, (u_3).

Für die Anode 1 stimmt nach dieser Konvention der Index des Spannungsgesetzes gerade mit der Nummer der jeweils brennenden Anode überein (siehe Fig. 3).

Aus der Bedingung, dass die Spannung an Kondensatoren keine Sprünge machen kann, da sonst der Kondensatorstrom $i_c = C \cdot du_c/dt$ während des Sprunges ∞ werden müsste, folgt:

$$t = 0, \quad u_{1t=0} = u_{6t=t_0}; \quad t = t_0, \quad u_{1t=t_0} = u_{2t=0} \\ t_0 \text{ Anodenbrenndauer.} \quad (19)$$

da ja die Gesetze u_6 , u_1 und u_2 einander zeitlich ablösen. Die für eine einzige Phase geltende Bedingung (19) muss nun in eine Bedingung umgewandelt werden, die die Spannungen u_a , u_b und u_c während der Brenndauer t_0 einer Anode miteinander verknüpft. Eine der beiden der Phase a zugehörigen Anoden 1 und 4 (siehe Schaltung Fig. 1), die Anode 1, brenne; damit gilt: $u_1 = u_a$; aus Fig. 3 ersieht man, dass während der Brenndauer von Anode 1 ist: $u_b = u_5 = -u_2$, $u_c = u_3 = -u_6$. u_c ist nach, u_b vor dem Brennen der Anode 1 die Spannung der direkt an den Gleichstromklemmen angeschlossenen Phase. Wir gewinnen somit die Randbedingungen:

(20)

$$t = 0: \quad u_{at=0} = -u_{ct=t_0}; \quad t = t_0: \quad u_{at=t_0} = -u_{bt=0}$$

Dem von aussen durch Einschaltung des Gleichstromes I_g erzwungenen Schaltausgleichsvorgang überlagert sich ein interner freier Ausgleichsvorgang infolge des Abklingens der Spannungen u_{a0} , u_{b0} und u_{c0} , die von den Kondensatorladungen zur Zeit $t=0$ herrühren. Dieser Ausgleichsvorgang sei in drei Teilausgleichsvorgänge je für das Abklingen von u_{a0} , u_{b0} und u_{c0} zerlegt. Da wir lineare Systeme

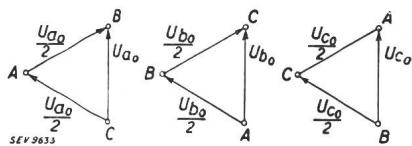


Fig. 18.

Abklingen der Spannungen u_{a0} , u_{b0} und u_{c0} . Spannungsverteilung auf das Lastdreieck ABC wenn nur je u_{a0} , u_{b0} oder u_{c0} zur Zeit $t=0$ allein vorhanden wären.

($R = \text{const}$, $C = \text{const}$, unabhängig von der Belastung) betrachten, ist dieses Vorgehen zulässig (Fig. 18). Der Kreis für die abklingenden Spannungen ist der gleiche Ersatzkreis aus R' und C' wie für den Einschaltvorgang (Fig. 17). Durch das Abklingen von u_{a0} , u_{b0} und u_{c0} entstehen die in Gl. (21) folgenden Spannungen an den drei Phasen a , b und c :

(21)

$$u_{a(t)} = U_{a0} e^{-\frac{t}{T}} \equiv u_{a1} \quad u_{b(t)} = U_{b0} e^{-\frac{t}{T}} \quad u_{c(t)} = U_{c0} e^{-\frac{t}{T}} \\ u_{b(t)} = -\frac{U_{a0}}{2} e^{-\frac{t}{T}} \equiv u_{b1} \quad u_{a2} = -\frac{U_{b0}}{2} e^{-\frac{t}{T}} \quad u_{a3} = -\frac{U_{c0}}{2} e^{-\frac{t}{T}} \\ u_{c(t)} = -\frac{U_{a0}}{2} e^{-\frac{t}{T}} \equiv u_{c1} \quad u_{c2} = -\frac{U_{b0}}{2} e^{-\frac{t}{T}} \quad u_{b3} = -\frac{U_{c0}}{2} e^{-\frac{t}{T}}$$

Die Superposition der Gl. (17) und (21) ergibt für jede Phase das Gesetz der Spannung während der Brenndauer der Anode 1. Wegen:

$$u_a \equiv u_1 = -u_4, \quad u_b \equiv u_5 = -u_2, \quad u_c \equiv u_3 = -u_6 \quad (22)$$

ist damit der Spannungsverlauf während der ganzen Periode gegeben.

Superposition:

$$u_a = I_g \cdot R' + e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(-I_g R' + U_{a0} - \frac{U_{b0}}{2} - \frac{U_{c0}}{2} \right) \\ = I_g R' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + A e^{-\frac{t}{T}} \\ u_b = -\frac{I_g R'}{2} + e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(\frac{I_g R'}{2} - \frac{U_{a0}}{2} + U_{b0} - \frac{U_{c0}}{2} \right) \\ = -\frac{I_g R'}{2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + B e^{-\frac{t}{T}} \\ u_c = -\frac{I_g R'}{2} + e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(\frac{I_g R'}{2} - \frac{U_{a0}}{2} - \frac{U_{b0}}{2} + U_{c0} \right) \\ = -\frac{I_g R'}{2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + C e^{-\frac{t}{T}}$$

Diese Gleichungen genügen den Randbedingungen (20) und der Bedingung (18). Bezeichnen wir noch $e^{-\frac{t_0}{T}}$ mit ψ , so folgen daraus die Gleichungen zur Bestimmung der unbekannten Konstanten A , B und C .

$$A = +\frac{I_g R'}{2} (1 - \psi) - C \psi; \\ -B = I_g R' (1 - \psi) + A \psi; \\ 0 = A + B + C$$

Daraus folgt für u_a , u_b und u_c :

(23)

$$u_a = I_g R' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \frac{I_g R'}{2} e^{-\frac{t}{T}} \cdot \frac{(1 - \psi)(1 - 2\psi)}{1 - \psi + \psi^2} a \\ u_b = -\frac{1}{2} I_g R' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \frac{I_g R'}{2} e^{-\frac{t}{T}} \cdot \frac{(1 - \psi)(-2 + \psi)}{1 - \psi + \psi^2} b \\ u_c = -\frac{1}{2} I_g R' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \frac{I_g R'}{2} e^{-\frac{t}{T}} \cdot \frac{(1 - \psi)(1 + \psi)}{1 - \psi + \psi^2} c$$

Der bisher unbekannte Gleichstrom berechnet sich aus der Bedingung, dass der Mittelwert der Spannung u_a während der Brenndauer der zugehörigen Anode 1 der wirksamen Gleichspannung $U_g - u_b$ gleich ist:

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u_a dt = U_g - u_b$$

Daraus folgt:

(24)

$$I_g = \frac{U_g - u_b}{R'} \cdot \frac{1}{1 - \frac{t_0}{T} \cdot (1 - \psi) \cdot \left(1 - \frac{(1 - \psi)(1 - 2\psi)}{1 - \psi + \psi^2} \right)}$$

Vergleicht man Gl. (24) mit der analogen Gl. (9)

$$I_g = \frac{(U_g - u_b) \pi^2}{6 \sum \frac{\cos^2 \varphi_n}{n^2} R}$$

so ist ersichtlich, dass die Ausdrücke $\frac{\pi^2}{6 \sum \frac{\cos^2 \varphi_n}{n^2}}$ und $\frac{1}{1 - \frac{t}{t_0} (1 - \psi) \cdot \left(1 - \frac{1 - \psi}{2} (1 - 2\psi)\right)}$ sich entsprechen.

Die Gl. (23) für die Spannungskurven sind an einem Beispiel verifiziert.

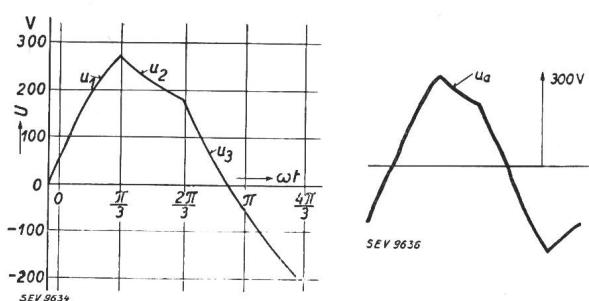


Fig. 19.
Berechnete Wechselspannungskurve für $U_g = 212$ V,
 $Z\omega C = 0,89$, $\cos \varphi = 1$,
 $R' C' = RC = Z\omega C/\omega = T$
 $= 2,84 \cdot 10^{-3}$ s.
(Messpunkt Osz. 7.)

Messpunkt:

$U_g = 240$ V, $I_g = 14,8$ A, $U_\sim = 203$ V
 $C = 64 \mu\text{F}$, $R = 44,5$ Ohm, $u_b = 20$ V.
 $t_0 = 1/f \cdot m = 3,33 \cdot 10^{-3}$ s, $T = R' C' = 2,84 \cdot 10^{-3}$ s.

Damit ergeben sich die aus Gl. (23) und (24) ermittelten Werte zu:

$$I_g = 14,3 \text{ A}, u_1 = u_a = 420 - 350 \cdot e^{-350t} \text{ V},
u_2 = -u_b = 210 + 101 \cdot e^{-350t} \text{ V},
u_3 = u_c = -210 + 454 \cdot e^{-350t} \text{ V}.$$

Das Rechnungsergebnis bei Annahme von Schaltvorgängen ist in Fig. 19 dargestellt und der oszillographierten Spannung (Osz. 7) für die gleiche Belastungsimpedanz gegenübergestellt.

Zusammenfassung.

Der selbstgeföhrte, fremderregte Gleichstrom-Drehstrom-Mutator wird mit Hilfe einer Fourier-Entwicklung der Strom- und Spannungskurven berechnet. Es zeigt sich, dass die höheren Harmonischen — bis auf die Berechnung der Durchzündungsgrenze — vernachlässigt werden dürfen. Damit ist die Anwendung der symbolischen Vektorrechnung der Wechselstromtechnik auf die Resultate ermöglicht. Das Leitwertdiagramm gestattet, $I_g(\beta)$ und $U_\sim(\beta)$ direkt abzulesen. Das Gesetz für die Belastungsgrenzen ist durch die einfache Bedingung für den Phasenwinkel φ_1 der Gesamtimpedanz R, L, C gegeben: $\varphi_{1min} < \varphi_1 < \varphi_{1max}$.

Die Charakteristiken $I_g(\beta)$, $U_\sim(\beta)$ und die Belastungsgrenzen werden durch Messresultate verifiziert.

Weiterhin wird gezeigt, dass der Oberwellengehalt der erzeugten Wechselspannung mit sinkendem $\cos \varphi$ der Außenlast schnell abnimmt und verhältnismässig klein ist.

Zum Vergleich ist für den Fall ohmscher Belastung die Wechselrichterberechnung auf Grund der auftretenden Schaltvorgänge durchgeführt worden. Die sich dabei ergebenden Formeln spiegeln die physikalischen Vorgänge bei der Wechselrichtung getreu wieder, sie sind jedoch wegen ihres allgemein gültigen Charakters für das Verhalten des Wechselrichters im Betriebe weniger übersichtlich als die auf Grund der Fourierzerlegung ermittelten vereinfachten Formeln.

Serienschaltung, gekoppelte Kreise und Bandfilter.

Von Erwin de Gruyter, Zürich.
(Bull. SEV 1941, Nr. 21, S. 541.)

Berichtigung.

S. 548, unten: Die symbolisch abgekürzten Ueberschriften lauten ausgeschrieben:

4 a. *Induktanz-totale Spulenimpedanz-Kopplung*: $k_L = 1$ und

5 a. *Kapazitanz-totale Kondensatorimpedanz-Kopplung*: $k_C = 1$

In der rechten Formel für den Impedanzwert, Zähler unter der Wurzel, 4. Zeile, runde Klammer ist das Quadrat-Zeichen bei k_R zu streichen. Die 4. Zeile lautet richtig:

$$+ 4r^2(1 - k_R)^2$$

S. 549, Mitte: In der linken Formel für den Phasenwert fehlt im Nenner ein Minus-Zeichen. Die Formel lautet richtig:

$$\zeta_Z = -\frac{v}{r} \cdot \frac{2v^2 - 1}{2(1 - k_R)(v^2 - 1)v^2 - k_R}$$

S. 550, rechte Spalte, zweites Drittel: Der Untertitel muss statt der römischen eine arabische Kennziffer erhalten:

1 a. *Symmetrische Impedanzkopplung*: $k_D = 0$

S. 551, linke Spalte, oben: Die innere Wurzel der langen Formel muss bis zum Bruchstrich-Ende bei k_R^2 durchgezogen werden. — Bei der nächsten Formel fehlt das Minuszeichen in der runden Klammer der Zähler-Wurzel.

S. 554, linke Spalte, Mitte: In der Zeile über Fig. 14 ist ein Index «o» undeutlich. Die Zeile lautet richtig:

$$z_{oZ}/r = z'_o = F(k_R) \text{ siehe Fig. 11.}$$

S. 558, linke Spalte, Mitte: Im ersten Ausdruck für β_Z hat der beigeschriebene Wert der zweiten eckigen Klammer fälschlich das «gleich»-Zeichen statt wie richtig das «ungefähr gleich»-Zeichen:

$$v \approx 1$$