Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 72 (1981)

Heft: 5

Artikel: Gleichrichter für die Aufladung von Stossgenerator-Kondensatoren

Autor: Modrušan, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905086

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: 12.07.2025

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

Gleichrichter für die Aufladung von Stossgenerator-Kondensatoren

Von M. Modrušan

621.314.6;

Die Gleichrichter für die periodische Aufladung der Stosskondensatoren arbeiten unter besonderen Betriebsbedingungen und können deswegen mit herkömmlichen Bemessungsmethoden nicht zuverlässig ausgelegt werden. Wie eine Analyse zeigt, besteht bei diesen Gleichrichtern eine optimale Betriebsart, für die man sie auslegen soll.

Les redresseurs destinés à la recharge périodique de condensateurs pour générateurs de chocs fonctionnent dans des conditions spéciales et ne peuvent donc pas être dimensionnés fiablement selon les méthodes classiques. Une analyse a montré qu'il existe, pour ces redresseurs, un mode de fonctionnement limite, pour lequel ils doivent être conçus.

1. Einleitung

Hohe und kurzzeitige Spannungs- bzw. Stromimpulse werden hauptsächlich durch die Entladung von Kondensatorbatterien in bestimmten Kreiskonfigurationen erzeugt. So erhält man die Stoßspannungen durch die Serieentladung einer Vielzahl von Kondensatoren. Diese werden während einer relativ langen Zeit parallel (d.h. mit entsprechend kleinerer Spannung) mittels eines geeigneten Gleichrichters aufgeladen. Bei der Entladung in Serie kann man von einer Spannungsverstärkung sprechen. Ähnlich werden bei Stoßstromkreisen in der Regel mehrere parallelgeschaltete Kondensatoren aufgeladen und dann bei gleicher Spannung auf einen gemeinsamen Prüfling schnell entladen. Hier kann man von einem Stromverstärker reden.

Für die periodische Aufladung der Kondensatorbatterie benötigt man einen Gleichrichter, dessen Betriebsart durch den Spannungsverlauf an der Kondensatorbatterie bedingt ist. Nachfolgend wird dieser spezifischen Betriebsart des Ladegleichrichters Rechnung getragen und dessen optimale Auslegung erörtert.

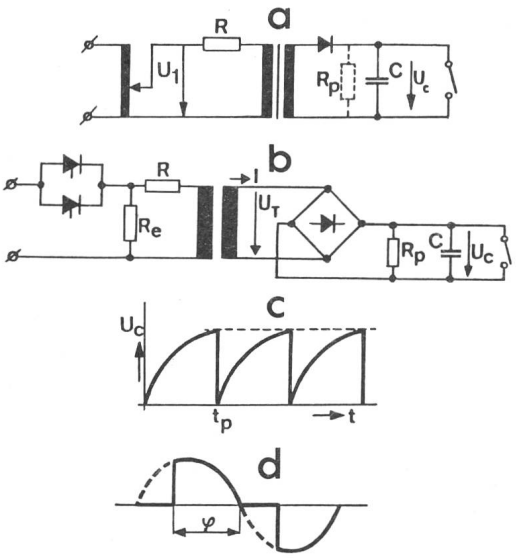

Fig. 1 Typische Gleichrichterschaltungen für die Aufladung der Stossgeneratoren

a Einweg-Gleichrichter, Spannungsregulierung mit dem Stelltransformator
b Brückenschaltungs-Gleichrichter, Spannungsregulierung mit Thyristoren
c Qualitativer Spannungsverlauf an Kondensatoren bei periodischer Auf- und Entladung
d Spannungsverlauf an den NS-Klemmen des Transformators bei Thyristorsteuerung

2. Gebräuchlichste Gleichrichterschaltungen

Bei üblichen Stossgeneratoren werden für deren periodische Aufladung meistens Einweg- oder Brückenschaltungs-Gleichrichter eingesetzt (Fig. 1), die hier eingehend analysiert werden sollen. Weniger häufig werden auch andere Schaltungen verwendet, wie z.B. Verdopplungsschaltung, Dreiphasen-Brükkenschaltung u.a. [1; 2; 3].

Die Spannungsregulierung kann mit einem Reguliertransformator (Fig. 1a) oder neuerdings, insbesondere bei grösseren Generatoren, mit automatischer Steuerung, d.h. mit einer Thyristor-Steuereinheit, durchgeführt werden (Fig. 1b). Dabei wird der Anschnittwinkel φ (Fig. 1d) entsprechend der gewünschten Spannung bzw. Ladezeit eingestellt, wobei die Spannungshöhe lediglich bis $\varphi \leqq \pi/2$ und die Ladedauer bis $\varphi \leqq \pi$ regulierbar ist. Der Anschnittwinkel kann auch automatisch laufend reguliert werden, um einen konstanten Ladestrom zu erhalten, was in der Regel aus Kostengründen lediglich bei sehr grossen Generatoren durchgeführt wird [4]. Die Auslösung des Gleichrichters, insbesondere des Hochspannungstransformators, wird dadurch wesentlich erleichtert, da die Ströme primär und sekundär die ganze Zeit konstant bleiben. Wesentlich schwieriger ist jedoch die genaue Ermittlung der Effektivströme und somit der Typenleistung des Transformators beim Betrieb gemäss Fig. 1c. Dies ist das eigentliche Ziel dieser Arbeit.

3. Optimierung der Gleichrichterleistung beim Brückenschaltungs-Gleichrichter

3.1 Strom während einer Halbperiode

Die maximale Leistung eines Gleichrichters wird normalerweise durch den Transformator bestimmt, da der zulässige Diodenstrom (1 A oder mehr) meistens keine Belastungseinschränkung darstellt. Deswegen wird von Interesse sein, den Effektivstrom in den Transformatorwicklungen bei spezifischer Betriebsart des Ladegleichrichters gemäss Figur 1c zu ermitteln. Der Widerstand R in Figur 1b stellt die Summe aller auf die Hochspannungsseite bezogenen Widerstände dar (Wicklungs- und Diodenwiderstände inbegriffen). Vernachlässigt wird zunächst der Einfluss des resultierenden Ableitwiderstandes R_p sowie die Streuimpedanz des Transformators, was meistens eine geringfügige Beeinträchtigung des Resultates zur Folge hat. Bei relativ grosser Ableitung des Ladestromes muss diese dagegen berücksichtigt werden.

Bei der Aufladung des Kondensators C wird somit der Augenblickswert des Stromes lediglich vom Verlauf der gleichgerichteten Spannung $e(t)$ und der Gegenspannung $u_c(t)$ sowie vom Widerstand R abhängen (Fig. 2). Wenn man noch eine zusätzliche, durchaus zulässige Näherung trifft, nämlich, dass

die Kondensatorspannung während einer Halbperiode mit deren Mittelwert u_0 als konstant angenommen wird, dann gilt für den Strom $i = (e - u_0)/R$. Mit dem Spannungsverlauf $e = E \sin \omega t$ und der mittleren Spannung $u_0 = E \sin \vartheta$ kann für den Augenblickswert des Stromes geschrieben werden:

$$i = \frac{E}{R} (\sin \omega t - \sin \vartheta) \tag{1}$$

wobei mit E der Scheitelwert der Transformatorspannung in unbelastetem Zustand bezeichnet wird.

Innerhalb einer Halbperiode wird der Effektivstrom

$$I_\vartheta = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\vartheta}^{\pi-\vartheta} i^2 \, \mathrm{d}\omega t} = \frac{E}{R} \sqrt{\frac{f(\vartheta)}{\pi}} \, . \tag{2}$$

Dabei beträgt die Hilfsfunktion

$$f(\vartheta) = (\pi - 2\vartheta)\ (1 - 0{,}5 \cos 2\vartheta) - 1{,}5 \sin 2\vartheta \tag{3}$$

Diese ist in der Figur 3 graphisch aufgetragen.

3.2 Strom während der Ladeperiode

Der ermittelte Strom, der eigentlich den Durchschnittswert während einer Halbperiode darstellt, kann während der wesentlich längeren Ladezeit t_p als Augenblickswert betrachtet werden. In Figur 4 ist der qualitative Stromverlauf beim periodischen Aufladen des Stossgenerators dargestellt. Für den resultierenden Effektivstrom ergibt sich mit (2)

$$I_{\mathrm{eff}} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} I_\vartheta^2 \, \mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} I_\vartheta^2 \, \mathrm{d}\tau} \, , \tag{6}$$

wobei mit $\tau = t/RC$ die bezogene Zeit bezeichnet wurde.

Setzt man nun in (2) für $f(\vartheta)$ den entsprechenden Durchflusswinkel $\vartheta = \arcsin u$, mit relativer Spannung $u = u_0/E$, ein, so wird der Effektivstrom über die Ladezeit

$$I_{\mathrm{eff}} = \frac{E}{R\sqrt{\pi \tau_p}} \sqrt{\int_0^{\tau_p} g(\tau) \, \mathrm{d}\tau} . \tag{6a}$$

In Figur 5 ist die Hilfsgrösse $g(\tau)$ als Funktion der bezogenen Zeit aufgetragen. Dabei wurde eine logarithmische Skalenteilung mit zugänglichem Nullpunkt [5] gewählt.

Der Verlauf der Ladespannung $u(\tau)$ kann als bekannt angenommen werden [6; 7]. Man kann ihn recht gut mit einer doppelt exponentiellen Funktion der Form

$$u = 1 - A\, \mathrm{e}^{-\tau/T_1} - B\, \mathrm{e}^{-\tau/T_2} \tag{7}$$

annähern. Die vier Koeffizienten (A, B, T_1, T_2) sind vom Verhältnis R/R_p (d.h. von der Grösse der Ableitung) abhängig und sind in Tabelle I für die gebräuchlichsten Fälle angegeben.

Konstante zur Aufladungskurve gemäss Gl. (7) bei verschiedenen Selbstentladungen für den Zweiweggleichrichter. Beim Einweggleichrichter sind die Konstanten T_1 und T_2 zu verdoppeln Tabelle I

R/R_p	A	B	T_1	T_2
0	0,519	0,481	1,057	4,311
0,005	0,636	0,364	1,230	6,150
0,01	0,725	0,275	1,375	9,845
0,02	0,702	0,298	1,299	11,99
0,05	0,685	0,315	1,214	32,71

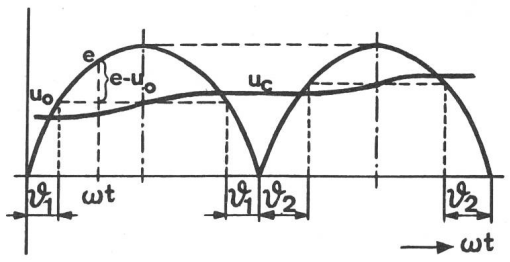

Fig. 2 Aufladevorgang während einer Periode bei verlustlosen Kondensatoren

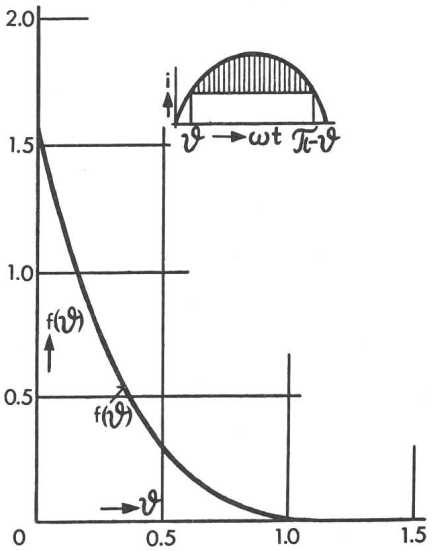

Fig. 3 Hilfsfunktion $f(\theta)$ zur Berechnung des Effektivwertes des Ladestromes

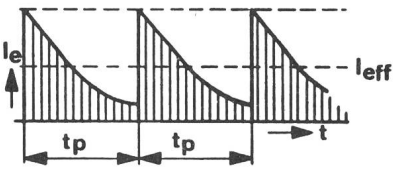

Fig. 4 Qualitativer Verlauf des Effektivstromes

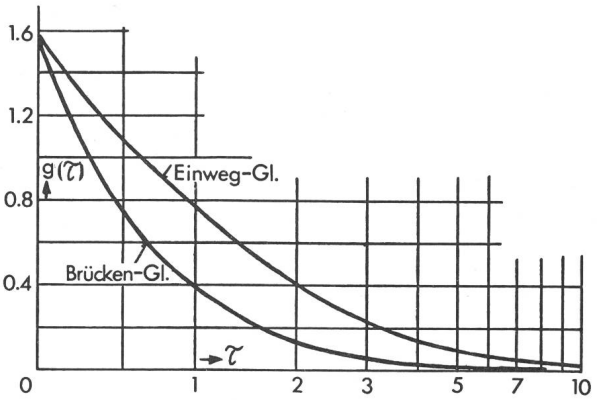

Fig. 5 Hilfsfunktion $g(\tau)$ zur Berechnung des resultierenden Effektivwertes des Ladestromes

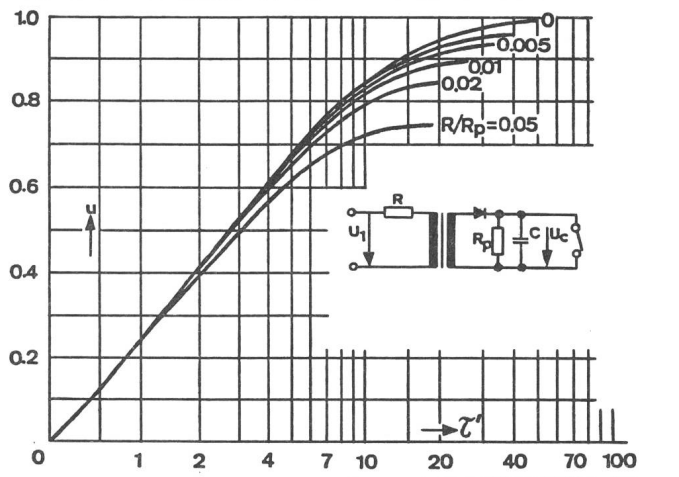

Fig. 6 Aufladekurven der Kondensatoren beim Einweg-Gleichrichter (s. Fig. 1a)
Beim Zweiweg-Gleichrichter muss die Ladezeit halbiert werden (d.h. $\tau = \tau'/2$)

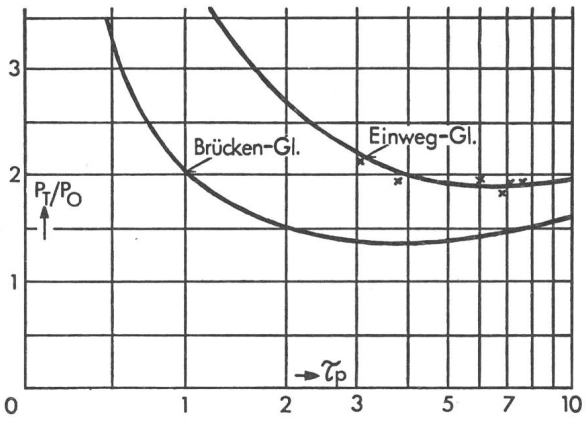

Fig. 8 Transformatorleistung als Funktion der Ladedauer

Die normierte Ladespannung für den Einweggleichrichter ist in Figur 6 aufgetragen. Beim Zweiweggleichrichter erfolgt die Aufladung bei halber Zeit (d.h. $\tau = \tau'/2$).

Der Effektivstrom gemäss (6a) ist das wichtigste Kriterium zur Auslegung des Gleichrichtertransformators und ist im wesentlichen von der bezogenen Ladezeit $\tau_p = t_p/RC$ abhängig. In Figur 7a ist der Effektivstrom in Funktion dieser Zeit aufgetragen, wobei als Bezugsgrösse der maximale Strom beim ungeladenen Kondensator gewählt wurde (d.h. $I_m = E/R$). Bei $\tau_p \to 0$ wird das Verhältnis $k = I_{eff}/I_m = 1/\sqrt{2}$, d.h. wie für eine Halbperiode ohne Gegenspannung. Mit zunehmender Ladezeit wird Effektivstrom relativ kleiner, was jedoch keine Aussage über die optimale Auslegung des Gleichrichtertransformators ermöglicht.

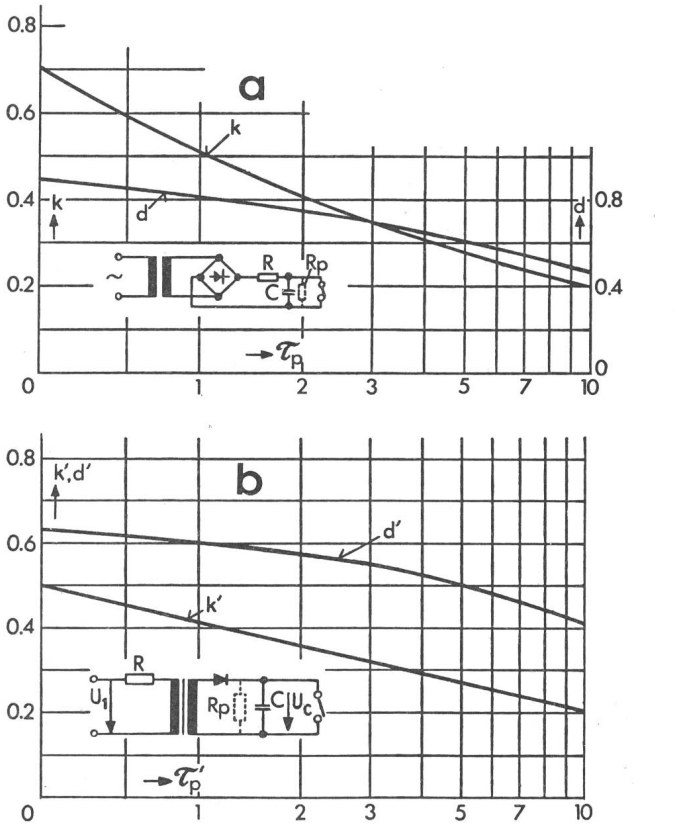

Fig. 7 Bezogener Effektivstrom in Abhängigkeit der Ladezeit τ_p
a Brücken-Gleichrichter
b Einweg-Gleichrichter

Auf ähnliche Weise wird für den mittleren Ladestrom das Verhältnis $d = I_0/E_{eff}$ eingeführt (Fig. 7), wobei $I_0 = CU_c/t_p$ der mittlere Ladestrom in der Ladeperiode ist. Als U_c wird die mittlere Ladespannung u_0 im Augenblick vor der Entladung bezeichnet. Für $\tau_p \to 0$ wird $I_0 = 2\, I_m/\pi$ und damit $d = 2\sqrt{2}/\pi$.

Um eine optimale Auslegung des Gleichrichtertransformators zu ermöglichen, wird dessen Leistung als Funktion der relativen Ladedauer τ_p dargestellt. Man definiert die Transformatorleistung als

$$P_T = E\, I_{eff}/\sqrt{2} \tag{8}$$

und die Gleichspannungsleistung

$$P_0 = C \cdot U_c^2/t_p \tag{9}$$

Mit den normierten Grössen τ, u, k, d sowie I_m erhält man für die bezogene Transformatorleistung

$$\frac{P_T}{P_0} = \frac{I_{eff}}{I_m} \cdot \frac{\tau_p}{\sqrt{2}\, u^2} = \frac{1}{\sqrt{2}\, ud} \tag{10}$$

In Figur 8 ist dieses Leistungsverhältnis in Abhängigkeit von der bezogenen Ladedauer aufgezeichnet und zwar nur für den ableitungslosen Fall ($R_p \to \infty$). Wie man sieht, verläuft die Funktion $P_T/P_0 = f(\tau_p)$ durch ein flaches Minimum von $P_T/P_0 \approx 1{,}35$ bei $\tau_p = t_p/RC \approx 3{,}65$. Dieser Auslegungsfall ergibt somit den günstigsten Gleichrichtertransformator, dessen minimal erforderliche Leistung etwa 35% grösser als die Gleichspannungsleistung ist.

In der Ladekurve Figur 6 erhält man für $\tau_p = 2 \cdot 3{,}65 = 7{,}30$ eine bezogene Kondensatorspannung $u_c = U_c/E = 0{,}78$ (Faktor 2 dient zur Umrechnung der Ladedauer vom Ein- auf den Zweiweggleichrichter).

4. Optimierung der Gleichrichterleistung beim Einweggleichrichter

4.1 Strom auf der Gleichrichterseite

Auf ähnliche Weise wie oben kann der Effektivstrom in einer Periode auch beim Einweggleichrichter ermittelt werden, wobei über 2π integriert wird. Man erhält somit für $I_\vartheta' = I_\vartheta/\sqrt{2}$. Für die Hilfsfunktion $g'(\tau)$ soll die Aufladekurve für den

Einweggleichrichter herangezogen werden. Bei einer gegebenen Kapazität C sowie einem Ladewiderstand R verdoppelt sich beim Einweggleichrichter die Ladedauer ($t_p' = 2\,t_p$). Der entsprechende Verlauf der Hilfsfunktion $g'(\tau)$ ist zusammen mit demjenigen des Brückengleichrichters in Figur 5 angegeben.

Beim Einweggleichrichter müssen die Ströme in der Primär- und der Sekundärwicklung separat betrachtet werden. Für die Gleichrichterseite gilt für den Verlauf des Effektivstromes

$$I'_{2\,\mathrm{eff}} = \sqrt{\frac{1}{t_p'}\int_0^{t_p'} I_\vartheta'^{\,2}\,\mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{1}{\tau_p'}\int_0^{\tau_p'} I'^2\,\mathrm{d}\tau} \tag{11}$$

und mit $I_\vartheta' = I_\vartheta/\sqrt{2}$ wird

$$I'_{2\,\mathrm{eff}} = k' \cdot I_m = I_m \sqrt{\int_0^{\tau_p} \frac{g'(\tau)\,d\tau}{\pi\,\tau_p'}} \tag{11a}$$

Das Verhältnis des Effektiv- und Scheitelwertstromes k' ist in Figur 7b aufgetragen. Ausserdem ist dort das Verhältnis des mittleren Ladestromes und des Effektivstromes ($d' = I_0'/I'_{2\,\mathrm{eff}}$) angegeben.

4.2 Strom auf der Netzseite

Bei unsymmetrisch belasteten Transformatoren, wie dies beim Einweggleichrichter der Fall ist, wird der Magnetisierungsstrom so weit vergrössert, bis der Primärstrom ein reiner Wechselstrom wird [1; 2]. Dabei weicht die Halbperiode des Magnetisierungsstromes etwas von der reinen Sinusform ab. Mit einigen Vereinfachungen kann für den Primärstrom angegeben werden:

$$\frac{I_{1\,\mathrm{eff}}}{\ddot{u}_T} = \sqrt{I^2_{2\,\mathrm{eff}} - I_0^2} \tag{12}$$

mit $\ddot{u}_T$: Übersetzung des Transformators. Der Primärstrom stellt also die geometrische Differenz des Effektiv- und des mittleren Ladestromes dar. Damit kann die Typenleistung des Transformators als Mittelwert der Wicklungsleistungen angegeben werden, nämlich

$$P_T' \approx U_1\,(I_{1\,\mathrm{eff}} + \ddot{u}_T\,I_{2\,\mathrm{eff}})/2 \tag{13}$$

Mit $P_0 = I_0\,U_C$ und $U_c = \ddot{u}_T\sqrt{2}\cdot u \cdot U_1$ sowie mit der Definition für k und d folgt für die bezogene Transformatorleistung

$$\frac{P_T'}{P_0} = \frac{1 + \sqrt{1 - d'}}{2\sqrt{2}\,u'\,d'}\,. \tag{14}$$

Da sowohl d' als auch u' Funktionen der relativen Ladezeit τ_p' sind, kann die bezogene Leistung $P_T'/P_0 = f(\tau_p')$ in Figur 8 aufgetragen werden. Auch hier handelt es sich um den Fall für $R_p \to \infty$. Bei einer merklichen Ableitung (z.B. $R/R_p \geqq 0{,}01$) sollte wiederum eine entsprechende bezogene Leistung ermittelt werden, wobei die zugehörige Ladekurve für die Ermittlung der Hilfsfunktion $g(\tau)$ herangezogen werden muss.

Wie aus Figur 8 hervorgeht, verläuft die bezogene Leistung auch für den Einweggleichrichter durch ein flaches Minimum, $P_T/P_0 \approx 1{,}9$ bei $\tau_p' \approx 6{,}5$. Eine Optimierung der Ladeeinheit ist somit durch die Wahl der entsprechenden Ladezeit τ_p' möglich.

5. Experimentelle Überprüfung der Berechnung

Die Berechnungsresultate wurden in einem entsprechenden Kreis gemäss Figur 1a überprüft. Gemessen wurde der Strom in beiden Wicklungen eines 5-kVA-Transformators, 220/75000 V. In Figur 9a, b sind die Ströme in der Primär- bzw. Sekundärwicklung während des periodischen Ladevorganges in ihren Kurz- und Langzeitverläufen wiedergegeben. Bei der Aufnahme der Effektivstromverläufe wurde ein entsprechender Effektivwert-Wandler (RMS) eingesetzt, mit dem die kurzzeitigen Effektivwerte (Zeitdauer der Stromperiode) während der Ladeperiode aufgenommen werden konnten (Fig. 9c). Die Auswertung der Messresultate ergab eine recht gute Übereinstimmung mit den berechneten Daten der Transformatorleistungen bei dieser Betriebsart. In Figur 8 sind die ausgewerteten Messdaten $P_T/P_0 = f(\tau_p)$ für den Einweggleichrichter eingetragen; ein weiterer Messpunkt liegt bei $\tau_p = 12{,}9$ mit $P_T/P_0 = 2{,}21$.

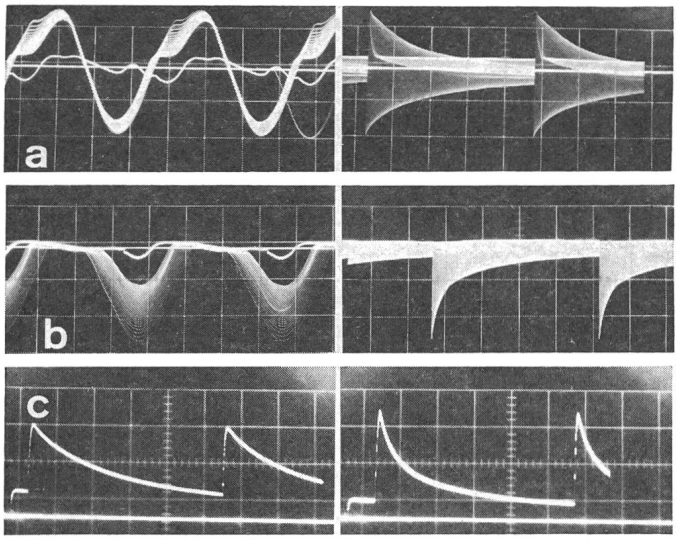

Fig. 9 Stromverlauf in den Transformatorwicklungen (Schaltung Fig. 1a)
a Strom in der Primärwicklung
b Strom in der Sekundärwicklung
c Effektivstrom in der Primär- (links) bzw. Sekundärwicklung (rechts) während der Ladeperiode

6. Überlastungsmöglichkeit von Ladegleichrichtern

Im Gegensatz zu normalen Netztransformatoren bleibt ein Transformator im Ladegleichrichter meistens nur während relativ kurzer Zeit im Betrieb (z.B. lediglich während ein paar Stunden täglich). Dem kann bereits bei der Auslegung des Transformators Rechnung getragen werden. Bei Öltransformatoren wird z.B. für die Isolationsklasse A eine maximale Temperatur von 105 °C zugelassen [9]. Gemäss Lebenserwartungsregel nach *Montsinger* [8] würde dieser Isolationstemperatur eine Lebensdauer von etwa 7 Jahren entsprechen (Fig. 10). Die tatsächliche Lebensdauer der Öltransformatoren beträgt dagegen das Drei- bis Vierfache, da die maximale Isolationstemperatur äusserst selten und dann nur für kurze Zeit erreicht wird. Bei Gleichrichtertransformatoren ist die Betriebsdauer noch wesentlich kürzer, und der Gleichrichter bleibt die meiste Zeit vom Speisenetz abgeschaltet. Die maximale Temperatur wird daher praktisch nie oder äusserst selten erreicht. All das ermöglicht es, die Gleichrichtertransformatoren für die Aufladung von Kondensatorbatterien derart auszulegen, dass die Isolationstemperatur im Extremfall über die erwähnte Grenztemperatur von 105 °C ansteigen würde, derart, dass die daraus

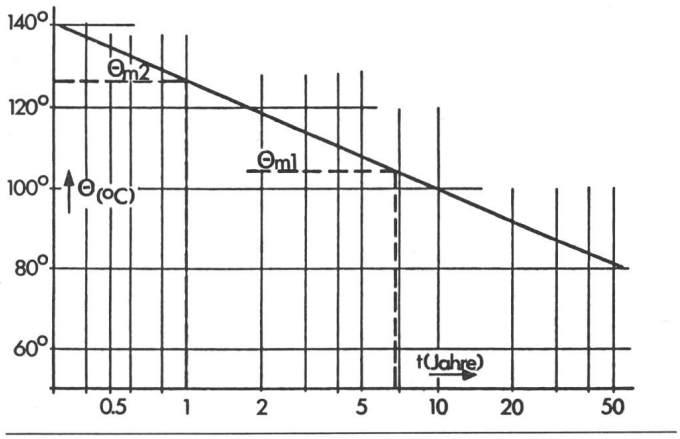

Fig. 10 Lebenserwartungskurve der Transformatorisolation bei Dauerbetrieb [8]

resultierende Lebenserwartung im Dauerbetrieb auf ca. 1 Jahr zurückgehen würde. Aus Figur 10 erhält man dafür eine Übertemperatur der Wicklungsisolation von ca. 127 °C. Da bei einer Umgebungstemperatur von maximal 40 °C und einer Isolationstemperatur von 105 °C die Übertemperatur $\vartheta_1 =$ 65 °C beträgt, erhält man für die erhöhte Erwärmung $\vartheta_{m2} =$ 87 °C.

Da anderseits bei einem Transformator die maximale Erwärmung der Verlustleistung proportional ist, so gilt $\vartheta_{m2}/\vartheta_{m1} = V_2/V_1$, wobei V_1 und V_2 die Gesamtverluste im Transformator darstellen. Man bekommt eine mögliche Zunahme der Verlustleistung von $V_2 = 1{,}34\ V_1$. Da die Eisenverluste praktisch belastungsunabhängig sind, kann die ermittelte Erhöhung der Verluste um 34 % allein durch die Kupferverluste gedeckt werden. Die erhöhte Typenleistung des Gleichrichtertransformators wird demzufolge

$$P_{T2} = P_{T1}\sqrt{V_{Cu2}/V_{Cu1}} \text{ mit } V_{Cu2} = V_2 - V_{Fe}. \qquad (15)$$

Für typische Transformatoren, die im Gleichrichter eingesetzt werden (d.h. bei Nennleistungen von ca. 5 bis 30 kVA), erhält man auf diese Weise eine Erhöhung der Belastbarkeit von rund 20 %.

Literatur

[1] *R. Lappe:* Stromrichter. Berlin, Verlag Technik 1958.
[2] *G. Mierdel* und *J. Kroczek:* Selengleichrichter. Berlin, Verlag Technik, 1959.
[3] *E. Baldinger:* Kaskadengeneratoren. In: Handbuch der Physik. Herausgegeben von S. Flügge. Band 44: Instrumentelle Hilfsmittel der Kernphysik I. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1959; S. 1...63.
[4] *K. Feser* und *R. Niederhauser:* Trend towards the automation of impulse voltage tests. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Zürich 1975, Teil 1, Bericht 3.3–05; S. 301...306.
[5] *W. Kuny:* Eine logarithmische Maßstabsteilung mit zugänglichem Skalennullpunkt. ETZ–B 22(1970)5, S. 103...105.
[6] *R. Elsner:* Die Erzeugung sehr hoher Gleichspannungsstösse mit der Marxschen Vervielfachungsschaltung. Arch. Elektrotechn. 29(1935)10, S. 655...682.
[7] *A.I. Bertinow* und *M.W. Gontscharow:* Gleichung der Aufladekurve für Kondensatoren beim Aufladen durch Gleichrichter. (Russ.) Elektritschestwo –(1970)10, S. 37...42.
[8] *G. Gotter:* Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1954.
[9] Bestimmungen für Transformatoren und Drosselspulen. Teil 1: Transformatoren. VDE-Vorschriften 0532 Teil 1/11.71.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. *Martin Modrušan,* Emil Haefely & Cie AG, 4028 Basel.