

Das System „Netzgelöschter Stromrichter — Glättungsdrossel — Gleichstrom- maschine“ im lückenden Betrieb

Teil I

Von *J. Schwarz*¹

Mit 7 Abbildungen

(Eingegangen am 30. April 1976)

Der Einsatz von Gleichstrommaschinen mit geblechten Jochen und Wendepolen gestattet den Betrieb von elektrischen Antrieben ohne Glättungsdrossel bei minimalem Materialaufwand und, in Zusammenhang mit dem Einsatz von adaptiven Ankerstromreglern, optimalen dynamischen Eigenschaften. Bereits bei Nennstrom liegt die Welligkeit solcher Antriebe ungewöhnlich hoch. Bei der heute üblichen Maschinenauslegung (GFC-Motorenreihe des VEB Elbtalwerk Heidenau) steigt die Welligkeit des Ankerstromes bei einem 22 kW-Antrieb mit einer Nenndrehzahl von 1 500 U/min bei Speisung durch eine halbgesteuerte Drehstrombrückenschaltung mit Nullventil bei Nennstrom bis zu $w = 0,46$; sie liegt also in unmittelbarer Nähe der Grenze zum lückenden Ankerstrom (vgl. Abb. 24, Teil II). Bei Entlastung geht der Antrieb sofort in den lückenden Betrieb über.

Die bisher bekannten Methoden lassen eine Berechnung der Welligkeit im Lückbetrieb nicht zu. Zur optimalen Auslegung der Bauelemente sind aber genaue Kenntnisse der Stromparameter, insbesondere der Effektivwertwelligkeit und des Oberschwingungsgehaltes erforderlich [1].

1. Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit werden die folgenden wichtigsten netzgelöschten Stromrichterschaltungen behandelt:

- Vollgesteuerte Stromrichter mit $p = 1, 2, 3, 6$ und 12 ,
- Einpulsstromrichter mit Nullventil (M 1 F),
- Halbgesteuerte Einphasenbrücke mit Nullventil (B 2 HF),
- Halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil (B 6 HF).

Die Betrachtungen für die halbgesteuerte Einphasenbrücke mit Nullventil B 2 HF gelten auch für die Schaltungen mit gleichem äußeren Betriebsverhalten wie die Zweipulsmittelpunktschaltung mit Nullventil M 2 F und die halbgesteuerte unsymmetrische (zweiggesteuerte) Einphasenbrücke B 2 HZ. (Bezeichnungen nach der IEC-Publikation 146 (2. Ausgabe 1973), DIN 41 761 und TGL 200-0608/21 (2. Entwurf Dezember 1976)).

¹ Dipl.-Ing. *Jürgen Schwarz*, DDR-1017 Berlin, Koppenstraße 66.

1.1. Voraussetzungen

Alle Berechnungen in dieser Arbeit gelten unter folgenden Voraussetzungen:

- symmetrisches Netz ohne Oberschwingungen,
- symmetrisch arbeitende Ansteuervorrichtung,
- keine Kommutierungsreaktanzen vorhanden,
- ideal leitende und sperrende Ventile,
- keine Resistanzen vorhanden,
- die Gegenspannung E sei konstant,
- lineare Kreisinduktivität L .

Abb. 1 zeigt das Ersatzschaltbild der zu berechnenden Schaltungen.

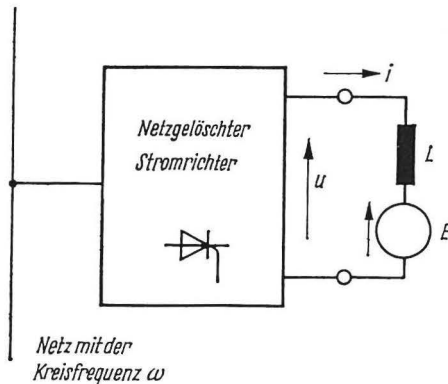


Abb. 1. Ersatzschaltbild

1.2. Parameter des Wellenstromes

In [1] wurden als charakteristische Größen des Wellenstromes sein arithmetischer Mittelwert

$$I_{da} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (1.1)$$

seine Effektivwertwelligkeit

$$w = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - I_{da}]^2 dt}}{I_{da}} \quad (1.2)$$

und sein Oberschwingungsgehalt

$$\hat{w} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_{da}} \quad (1.3)$$

angegeben. Für lückenden Betrieb ist $I_{\min} = 0$, so daß sich (1.3) auf

$$\hat{w} = \frac{I_{\max}}{2 \cdot I_{da}} \quad (1.4)$$

vereinfacht.

1.3. Bezogene Größen

Die Spannungen werden auf die Amplituden der treibenden Wechselspannungen und die Zeit auf die Netzkreisfrequenz ω bezogen:

$$u^*(t) = \frac{u(t)}{U\sqrt{2}}, \quad (1.5)$$

$$g = \frac{E}{U\sqrt{2}}, \quad (1.6)$$

$$\vartheta = \omega t. \quad (1.7)$$

Der Strom wird gemäß

$$i^*(\vartheta) = \frac{i(\vartheta)}{\frac{U\sqrt{2}}{\omega L}} \quad (1.8)$$

bezogen.

1.4. Bestimmung der Induktivität

Es wird eine bezogene Induktivität K , der sogenannte „Induktivitätsfaktor“

$$K = \frac{\omega L \cdot I_{da}}{U_{di0}} \quad (1.9)$$

definiert. K wird im Rahmen dieser Arbeit als Funktion der Effektivwertwelligkeit w und des Oberschwingungsgehaltes \hat{w} berechnet.

1.4.1. K im nichtlückenden Betrieb

Im nichtlückenden Betrieb gilt allgemein nach [1]

$$w = \frac{f_w U_{di0}}{\omega L I_{da}} \quad (1.10)$$

und

$$\hat{w} = \frac{f_e U_{di0}}{2\omega L I_{da}}. \quad (1.11)$$

Mit (1.9) ergibt sich

$$K = f(w) = \frac{f_w}{w} \quad (1.12)$$

und

$$K = f(\hat{w}) = \frac{f_e}{2\hat{w}}. \quad (1.13)$$

1.4.2. K im lückenden Betrieb

Durch Einsetzen von (1.8) in (1.9) ergibt sich

$$K = I_{da}^* \frac{U}{U_{di0}} \sqrt{2} \quad (1.14)$$

bzw.

$$K = q \cdot I_{da}^*, \quad (1.15)$$

wobei q für jede Stromrichterschaltung ermittelt werden muß.

1.5. Überlagerung mehrerer ineinandergeschachtelter Ströme

Überlagern sich m gleiche Ströme mit einer Stromflußdauer

$$\beta \leq \frac{2\pi}{m} \tag{1.16}$$

und einer Welligkeit w sowie einem Oberschwingungsgehalt \hat{w} so, daß sich die Ströme gemäß Abb. 2 ineinanderschachteln, so wird die Welligkeit des Gesamtstromes

$$w_m = \sqrt{\frac{1}{m} (w^2 + 1) - 1} = \sqrt{\frac{I_{de}^2}{m \cdot I_{da}^2} - 1} \tag{1.17}$$

und der Oberschwingungsgehalt

$$\hat{w}_m = \frac{\hat{w}}{m} = \frac{I_{max}}{2 \cdot m \cdot I_{da}} \tag{1.18}$$

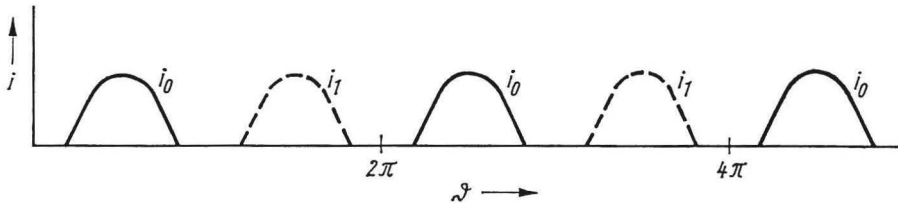


Abb. 2. Ineinanderschachtelung von Strömen für $m = 2$

2. Berechnung

2.1. Vollgesteuerte Schaltungen ohne Nullventil

2.1.1. Einpulsstromrichter

[2] enthält eine ausführliche Diskussion über das Betriebsverhalten des Einpulsstromrichters bei Gegenspannung und induktiver Strombegrenzung (Abb. 3).

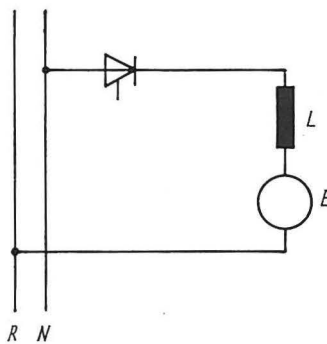


Abb. 3. Einpulsstromrichter (M 1)

2.1.1.1. Ungesteuerter Stromrichter

Beim natürlichen Zündzeitpunkt

$$\zeta = \text{Arc sin } g \tag{2.1}$$

beginnt ein Stromfluß

$$i^*(\vartheta) = \cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta). \tag{2.2}$$

Durch Nullsetzen von (2.2) an der Stelle $\zeta + \beta$ ergibt sich für die Gegenspannung nach [2]

$$g = \sin \left(\arctan \frac{1 - \cos \beta}{\beta - \sin \beta} \right) = \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{(\beta - \sin \beta)^2 + (1 - \cos \beta)^2}}. \tag{2.3}$$

Der Gleichstrommittelwert ist

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{g} (1 - \cos \beta) - g \frac{\beta^2}{2} \right] \tag{2.4}$$

und der Effektivwert

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\zeta}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta}. \tag{2.5}$$

Die explizite Lösung führt zu unübersichtlichen Ergebnissen, so daß eine numerische Auswertung zweckmäßig ist.

Der Strom durch die Induktivität hat einen Extremwert, wenn die Spannung über der Induktivität einen Nulldurchgang hat. Hier ist dies der Fall, wenn die Gegenspannung gleich dem Augenblickswert der treibenden Wechselspannung ist:

$$\vartheta_m = \pi - \zeta. \tag{2.6}$$

Der Strom hat dann den Wert

$$I_{max}^* = 2 \cdot \cos \zeta + g(2 \cdot \zeta - \pi). \tag{2.7}$$

2.1.1.2. Gesteuerter Einpulsstromrichter

Ist

$$\alpha \geq \zeta, \tag{2.8}$$

dann ergibt sich für den Strom

$$i^*(\vartheta) = \cos \alpha - \cos \vartheta + g(\alpha - \vartheta). \tag{2.9}$$

Im Löszeitpunkt $\alpha + \beta$ ist $i^* = 0$, damit

$$g = \frac{\cos \alpha - \cos (\alpha + \beta)}{\beta} \tag{2.10}$$

bzw.

$$\alpha = \arccos \left[\frac{g\beta}{2} \pm \sqrt{\frac{g^2\beta^2}{4} - \frac{g^2\beta^2 - \sin^2 \beta}{2(1 - \cos \beta)}} \right]. \tag{2.11}$$

Hierbei gilt das positive Vorzeichen vor der Wurzel für $\beta \geq \pi$ und das negative Vorzeichen für $\beta \leq \pi$. Der Gleichstrommittelwert ist

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\beta \cos \alpha + \sin \alpha - \sin (\alpha + \beta) - g \frac{\beta^2}{2} \right] \tag{2.12}$$

und der Effektivwert wird mit

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\beta} [\cos \alpha - \cos \vartheta + g(\alpha - \vartheta)]^2 d\vartheta} \tag{2.13}$$

berechnet. Das Strommaximum tritt bei (2.6) mit einem Wert von

$$I_{\max}^* = i^*(\pi - \zeta) = \cos \alpha + \cos \zeta + g(\alpha + \zeta - \pi) \quad (2.14)$$

auf.

2.1.2. p -Pulsstromrichter

Die Anwendung der Gl. (2.11) liefert einen Wert für α . Die Werte für den Zündverzögerungswinkel gehen vom Nulldurchgang der jeweils treibenden Wechselspannung aus. Da der Wert für den Steuerwinkel üblicherweise vom natürlichen Kommutierungspunkt ausgeht, ergibt sich der Zusammenhang zu

$$\alpha' = \alpha - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{p}. \quad (2.15)$$

Die Mittelwerte für den Stromrichter mit der Pulszahl p ergeben sich durch Multiplikation von (2.4) und (2.12) mit p bzw. durch Multiplikation von (2.5) und (2.13) mit \sqrt{p} . Zur Berechnung der Kenngrößen können selbstverständlich auch (1.17) und (1.18) angewendet werden.

Bei Anwendung von (2.11) ergeben sich unter bestimmten Umständen (große Werte von g und β) Werte für α , die die Ungleichung (2.8) nicht mehr erfüllen. Praktisch bedeutet das, obwohl Lückbetrieb vorliegt, ein Kommutierungsvorgang stattfindet. Der Strom beginnt in seinem natürlichen Zündzeitpunkt gemäß Gl. (2.2) im Bereich $\zeta \leq \vartheta \leq \alpha + \frac{2\pi}{p}$ zu fließen (Abb. 4).

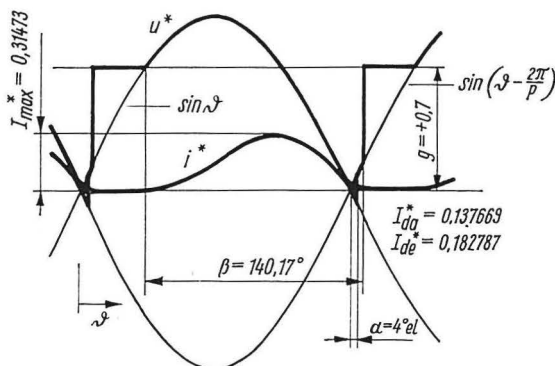


Abb. 4. Doppelte Stromführung der Ventile für $p = 2$

Zum Zeitpunkt $\vartheta = \alpha + \frac{2\pi}{p}$ kommutiert der Strom auf das folgende Ventil und fließt im Bereich $\alpha + \frac{2\pi}{p} \leq \vartheta \leq \zeta + \beta$ gemäß

$$i^*(\vartheta) = \cos \zeta - \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{p} \right) - \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{p} \right) + \cos \alpha + g(\zeta - \vartheta). \quad (2.16)$$

Zur Berechnung der Spannung wird (2.16) an der Stelle $\vartheta = \zeta + \beta$ Null gesetzt. Es ergibt sich

$$g = \frac{\cos \zeta + \cos \alpha - \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{p} \right) - \cos \left(\zeta + \beta - \frac{2\pi}{p} \right)}{\beta} \quad (2.17)$$

und umgestellt nach α

$$\alpha = \arccos \left[\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{\sin^2 \frac{2\pi}{p} - A^2}{2 \left(1 - \cos \frac{2\pi}{p}\right)}} \right] \quad (2.18)$$

mit

$$A = g\beta + \cos \left(\zeta + \beta - \frac{2\pi}{p} \right) - \cos \zeta. \quad (2.19)$$

Die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes ergibt sich aus dem Ansatz

$$\begin{aligned} I_{\text{da}}^* = \frac{p}{2\pi} & \left\{ \int_{\zeta}^{\alpha + \frac{2\pi}{p}} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta \right. \\ & + \int_{\alpha + \frac{2\pi}{p}}^{\zeta + \beta} \left[\cos \zeta + \cos \alpha - \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{p} \right) - \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{p} \right) \right. \\ & \left. \left. + g(\zeta - \vartheta) \right] d\vartheta \right\} \quad (2.20) \end{aligned}$$

zu

$$\begin{aligned} I_{\text{da}}^* = \frac{p}{2\pi} & \left\{ \sin \alpha + g \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right) + \beta \cos \zeta - \sin \left(\alpha + \frac{2\pi}{p} \right) \right. \\ & \left. - \sin \left(\zeta + \beta - \frac{2\pi}{p} \right) + \left[\cos \alpha - \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{p} \right) \right] \left(\zeta + \beta - \alpha - \frac{2\pi}{p} \right) \right\}. \quad (2.21) \end{aligned}$$

Der Effektivwert wird mit dem Ansatz

$$\begin{aligned} I_{\text{de}}^* = \sqrt{\frac{p}{2\pi} & \left\{ \int_{\zeta}^{\alpha + \frac{2\pi}{p}} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \right.} \\ & \left. \dots + \int_{\alpha + \frac{2\pi}{p}}^{\zeta + \beta} \left[\cos \zeta + \cos \alpha - \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{p} \right) - \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{p} \right) + g(\zeta - \vartheta) \right]^2 d\vartheta \right\}} \quad (2.22) \end{aligned}$$

numerisch ermittelt. Für den Bereich der doppelten Stromführung gilt zur Berechnung des Maximalwertes des Stromes (2.7).

2.2. Schaltungen mit Nullventil

Es werden die im Abschnitt 1. angegebenen Schaltungen mit Nullventil (Abb. 5 bis 7) behandelt.

2.2.1. Einpulsstromrichter mit Nullventil

2.2.1.1. Ungesteuerter Betrieb

Das Hauptventil wird zum Zeitpunkt $\vartheta = \zeta$ leitend. Für den Strom ergibt sich im Bereich $\zeta \leq \vartheta \leq \pi$ die Gültigkeit der Gl. (2.2). Ohne Nullventilwirkung gelten hier (2.3) bis (2.7) ohne Einschränkung. Ist der Strom zum Zeitpunkt $\vartheta = \pi$ größer als Null, so tritt Nullventilwirkung auf.

Bereich $\pi \leq \vartheta \leq \zeta + \beta$:

Der Strom verhält sich in diesem Bereich nach

$$i^*(\vartheta) = \cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta). \quad (2.23)$$

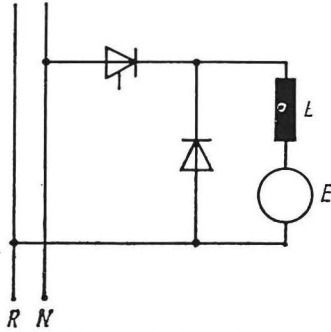


Abb. 5. Einpulsstromrichter mit Nullventil (M 1 F)

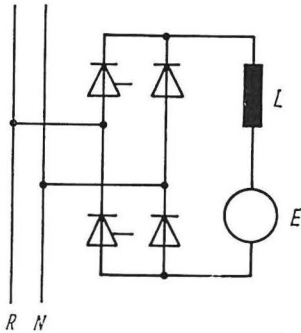


Abb. 6. Halbgesteuerte unsymmetrische Einphasenbrücke (B 2 HZ)

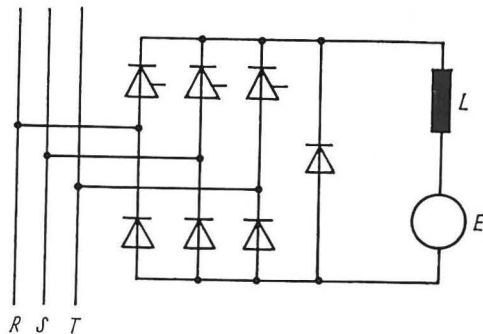


Abb. 7. Halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil (B 6 HKF)

Nullsetzen von (2.23) an der Stelle $\vartheta = \zeta + \beta$ liefert

$$\beta = \frac{1 + \cos \zeta}{g} \tag{2.24}$$

bzw.

$$g = \frac{2\beta}{\beta^2 + 1}. \tag{2.25}$$

Für die Ströme ergibt sich

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\beta}{2} (1 + \cos \zeta) + g + \zeta - \pi \right], \tag{2.26}$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \right.} \\ \left. \dots + \int_{\pi}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}}. \tag{2.27}$$

2.2.1.2. Gesteuerter Betrieb

Im Bereich $\alpha \leq \vartheta \leq \pi$ gilt (2.9). Ohne Nullventilwirkung gelten (2.10) bis (2.14). Ist (2.9) zum Zeitpunkt $\vartheta = \pi$ größer Null, so fließt der Strom im

Bereich $\pi \leq \vartheta \leq \alpha + \beta$:

$$i^*(\vartheta) = \cos \alpha + 1 + g(\alpha - \vartheta). \tag{2.28}$$

Für die Spannung ergibt sich

$$g = \frac{1}{\beta} (1 + \cos \alpha) \tag{2.29}$$

und für den Steuerwinkel

$$\alpha = \arccos (\beta g - 1). \tag{2.30}$$

Für die Ströme gilt

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\beta}{2} (1 + \cos \alpha) + \sin \alpha + \alpha - \pi \right], \tag{2.31}$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\pi} [\cos \alpha - \cos \vartheta + g(\alpha - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \right.} \\ \left. \dots + \int_{\pi}^{\alpha+\beta} [\cos \alpha + 1 + g(\alpha - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}} \tag{2.32}$$

und (2.14).

2.2.1.3. Doppelte Stromführung der Hauptventile

Ist zum Zeitpunkt $\vartheta = 2\pi + \alpha$ der Strom (2.23) im Freilaufbetrieb größer als Null, so fließt im Bereich $2\pi + \alpha \leq \vartheta \leq \zeta + \beta$ der Strom

$$i^*(\vartheta) = \cos \zeta + 1 + \cos \alpha - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta). \tag{2.33}$$

Nullsetzen von (2.33) an der Stelle $\vartheta = \zeta + \beta$ liefert nach längerer Rechnung

$$g = \sqrt{1 - 2A^2 + 2A \sqrt{A^2 - B} + B} \tag{2.34}$$

mit den Koeffizienten

$$A = \frac{(1 + \cos \alpha)(1 - \cos \beta)}{(\beta - \sin \beta)^2 + (1 - \cos \beta)^2} \quad (2.35)$$

und

$$B = \frac{(1 + \cos \alpha)^2 - (\beta - \sin \beta)^2}{(\beta - \sin \beta)^2 + (1 - \cos \beta)^2}. \quad (2.36)$$

Die Umstellung nach α liefert

$$\alpha = \arccos [\beta g + \cos(\zeta + \beta) - \cos \zeta - 1]. \quad (2.37)$$

Für die Ströme gilt (2.7) und

$$I_{\text{da}}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\beta(\cos \zeta + 1) + g \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right) + \zeta - \pi - \sin(\zeta + \beta) + \sin \alpha + \cos \alpha (\zeta + \beta - 2\pi - \alpha) \right], \quad (2.38)$$

$$I_{\text{de}}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\bar{\zeta}} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \right.} \\ \left. \dots + \int_{\pi}^{2\pi+\alpha} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \right.} \\ \left. \dots + \int_{2\pi+\alpha}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + 1 + \cos \alpha - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}. \quad (2.39)$$

2.2.2. Halbgesteuerte Einphasenbrücke B 2 HF

Es gelten uneingeschränkt die Gln. (2.24), (2.25), (2.29) und (2.30), die Gln. (2.26) und (2.31) nach Verdopplung und die Gln. (2.27) und (2.32) nach Multiplikation mit $\sqrt{2}$. Ohne Nullventilwirkung gelten die entsprechenden Gleichungen des Abschnittes 2.1.2. für $p = 2$.

Für doppelte Stromführung der Hauptventile ergibt sich für den Strom im Bereich $\pi + \alpha \leq \vartheta \leq \zeta + \beta$

$$i^*(\vartheta) = \cos \zeta + \cos \alpha + 1 + \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta). \quad (2.40)$$

Für g gilt (2.34) mit

$$A = \frac{(1 + \cos \beta)(1 + \cos \alpha)}{(1 + \cos \beta)^2 + (\beta + \sin \beta)^2} \quad (2.41)$$

und

$$B = \frac{(1 + \cos \alpha)^2 - (\beta + \sin \beta)^2}{(1 + \cos \beta)^2 + (\beta + \sin \beta)^2}. \quad (2.42)$$

Umgestellt nach α ergibt sich

$$\alpha = \arccos [\beta g - 1 - \cos \zeta - \cos(\zeta + \beta)]. \quad (2.43)$$

Die Integration der Ströme liefert für die Mittelwerte

$$I_{da}^* = \frac{1}{\pi} \left[\cos \alpha (\zeta + \beta - \pi - \alpha) + \sin \alpha + g \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right) + \zeta + \beta(1 + \cos \zeta) - \pi + \sin (\zeta + \beta) \right], \quad (2.44)$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \dots + \int_{\pi}^{\pi+\alpha} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \dots + \int_{\pi+\alpha}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + \cos \alpha + 1 + \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}}. \quad (2.45)$$

Für den Maximalwert gilt (2.7).

2.2.3. Halbgesteuerte Drehstrombrücke (B 6 HF)

Im Steuerwinkelbereich $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \pi$ zeigt die B 6 HF das Betriebsverhalten von drei parallelgeschalteten Einpulsstromrichtern mit Nullventil, die mit um je $\frac{2\pi}{3}$ phasenverschobenen Wechelspannungen betrieben werden. Es gelten also in diesem Bereich die Gln. (2.24), (2.25), (2.29) und (2.30), der dreifache Wert von (2.26) und von (2.31) und der $\sqrt{3}$ -fache Wert von (2.27) und von (2.32). Ohne Nullventilwirkung gelten die Gleichungen des Abschnittes 2.1.2. für $p = 3$.

Im Bereich $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{3}$ ist eine derartige Betrachtungsweise nicht mehr zulässig. Dort kommutiert der Strom nicht mehr auf das Nullventil, sondern auf das folgende Ventil der ungesteuerten Brückenhälfte. Während für Steuerwinkel $\alpha \geq \frac{\pi}{3}$ prinzipiell nur eine Stromflußphase auftritt, können für kleinere Steuerwinkel während einer Periode $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ zwei, im allgemeinen sogar unterschiedliche Stromflußphasen vorkommen. In [3] wird das Betriebsverhalten der B 6 HF im Lückbetrieb ausführlich diskutiert und als Arbeitsergebnis ein Unterprogramm angegeben.

Bezeichnungen

- A, B* Rechenhilfsgrößen
- E* Gegenspannung
- f* Funktion, allgemein
- f_w* Welligkeitsfaktor
- f_e* bezogene Schwankungsbreite
- g* bezogene Gegenspannung
- i* Stromaugenblickswert
- I_{da}* arithmetischer Mittelwert des Stromes
- I_{da0}* arithmetischer Mittelwert des Stromes im Kurzschluß
- I_{de}* Effektivwert des Stromes
- I_{de0}* Effektivwert des Stromes im Kurzschluß
- I_{max}* Maximalwert des Stromes

| | |
|------------------|--|
| I_{\min} | Minimalwert des Stromes |
| K | Induktivitätsfaktor |
| L | Induktivität |
| L_A | Ankerinduktivität |
| L_D | Drosselinduktivität |
| m | Anzahl der ineinandergeschachtelten Ströme |
| p | Pulszahl |
| q | Schaltungskonstante |
| u | Spannungsaugenblickswert |
| U | Netzspannung |
| U_{dio} | ideelle Leerlaufgleichspannung |
| w | Welligkeit |
| \hat{w} | Oberschwingungsgehalt |
| α | Steuerwinkel |
| α' | Steuerwinkel, bezogen auf den natürlichen Kommutierungszeitpunkt |
| β | Stromflußwinkel |
| β_{\max} | maximaler Stromflußwinkel |
| ζ | natürlicher Zündzeitpunkt |
| ϑ | bezogene Zeit |
| ϑ_m | Zeitpunkt des Strommaximums |
| ω | Netzkreisfrequenz |

Mit einem Stern (*) gekennzeichnete Größen sind bezogen.

Schwarz, J.

DK 621.314.63:621.382.2

**Das System „Netzgelöschter Stromrichter — Glättungs-
drossel — Gleichstrommaschine“ im lückenden Betrieb. I.**

Z. elektr. Inform.- u. Energietechnik, Leipzig 7 (1977) 6,
S. 501—512, 7 Abb.

Zur Dimensionierung der gleichstromseitigen Drossel für die wichtigsten netzgelöschten Stromrichterschaltungen im lückenden Betrieb werden im Teil I die Grundlagen in Form der Strom-Spannungs-Beziehungen in den einzelnen Arbeitsbereichen der Stromrichter abgeleitet.