

Das System „Netzgelöschter Stromrichter – Glättungs-drossel – Gleichstrommaschine“ im nichtlückenden Betrieb

J. Schwarz, Berlin

Dieser Beitrag gibt überblicksmäßig und mit zum Teil neuen Methoden eine Anleitung zum Dimensionieren stromrichter gespeister Gleichstromantriebe. Er soll dazu dienen, dem projektierenden Ingenieur, der kein Experte auf dem Gebiet der Leistungselektronik ist, den Einsatz von netzgelöschten Stromrichtern in Antriebssystemen zu erleichtern.

Außerdem werden dem Konstrukteur von Gleichstrommaschinen Hinweise zum Anpassen der Maschinen an den Stromrichter gegeben. Es sollen damit die Bemühungen nach einer hohen Materialökonomie in der Leistungselektronik gefördert werden.

Verwendete Formelzeichen

B	Bandbreite einer bestimmten Kommutierungsstufe
B_1	Bandbreite bei Nennbedingungen
F	Formfaktor
f_d	bezogene Extremwertdifferenz
f_e	bezogene Schwankungsbreite
f_l	Lückfaktor
f_w	Welligkeitsfaktor
I	Strom
\hat{I}	maximale Abweichung des Stroms vom arithmetischen Mittel nach oben
\check{I}	maximale Abweichung des Stroms vom arithmetischen Mittel nach unten

Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz ist Ingenieur für Meßtechnik im VEB Kombinat Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin.

i	Augenblickswert des Stroms
I_{da}	arithmetischer Mittelwert des Stroms
I_{de}	Effektivwert des Stroms
\tilde{I}_{de}	Effektivwert des Oberwellengehalts des Stroms
I_{dl}	arithmetischer Mittelwert des Stroms an der Lückgrenze
I_{max}	Maximalwert des Stroms
I_{min}	Minimalwert des Stroms
K	Kommutierungsstufe der Gleichstrommaschine
L	Gesamtkreisinduktivität
L_D	Drosselinduktivität
L_M	Maschineninduktivität (Ankerkreis)
n	Drehzahl
n_{max}	Maximaldrehzahl (im Feldschwächebetrieb)
T	Periodendauer
t	Zeit
U_{di0}	ideelle Leerlaufspannung (ungesteuert)
$U_{di\alpha}$	ideelle Leerlaufspannung beim Steuerwinkel α

U_N	Maschinennennspannung
w	Effektivwertwelligkeit gemäß Definition Gl. (5)
\hat{w}	Oberschwingungsgehalt gemäß Definition Gl. (8)
w_E	Extremwertwelligkeit gemäß Definition Gl. (9)
w_L	Effektivwertwelligkeit an der Lückgrenze
α	Steuerwinkel
ΔI	Schwankungsbreite des Stroms
ω	Netzfrequenz

Entscheidend für das Dimensionieren der Glättungsdrossel in stromrichtergespeisten Antrieben ist der durch die Gleichstrommaschinen begrenzte zulässige Anteil der Oberschwingungen. In der Literatur werden verschiedene Parameter des Stroms als Maß für die Kommutierungsbeanspruchung der Gleichstrommaschinen angeführt [1] [2] [3].

In diesem Beitrag soll gezeigt werden, wie das System „Netzgelöschter Stromrichter — Glättungsdrossel — Gleichstrommaschine“ optimal auszulegen ist.

Die folgenden wichtigsten netzgelöschten Stromrichterschaltungen werden betrachtet:

- vollgesteuerte Stromrichter mit $p = 2, 3, 6$ und 12
- Einpulsstromrichter mit Nullventil (E0)
- Einphasenbrückenschaltung mit Nullventil (hEB)
- Drehstrombrückenschaltung mit Nullventil (hDB).

Die angegebenen Diagramme sind unter idealisierenden Voraussetzungen berechnet:

- symmetrisches Netz ohne Oberschwingungen
- symmetrisch arbeitende Ansteuervorrichtung
- keine Kommutierungsreaktanzen vorhanden
- ideal leitende und sperrende Ventile
- keine Resistenzen vorhanden

Die Diagramme sind entweder aus [4] entnommen oder aber direkt daraus abgeleitet.

1. Der Wellenstrom und seine Parameter

In stromrichtergespeisten Gleichstrommaschinen fließt ein Strom, dessen Augenblickswert nicht konstant ist. Im Bild 1 ist ein ausgewähltes Beispiel gezeigt. Der Formfaktor ist das Verhältnis von Effektivwert zum Mittelwert des Stroms

$$F = \frac{I_{de}}{I_{da}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt} \quad (1)$$

Die Welligkeit (Effektivwertwelligkeit) des Stroms wird durch Division des Effektivwerts des überlagerten Wechselanteils

$$\tilde{I}_{de} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - I_{da}]^2 dt} \quad (2)$$

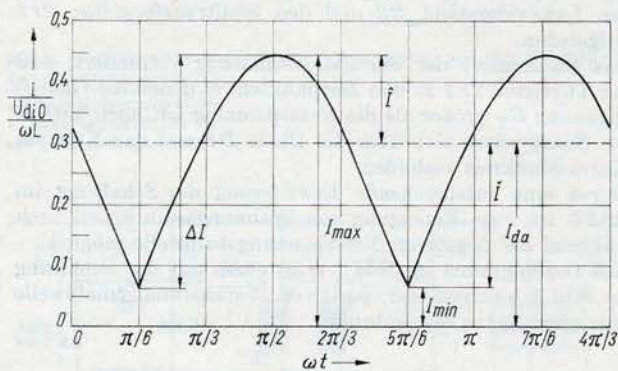


Bild 1. Laststrom einer halbgesteuerten Drehstrombrückenschaltung mit Nullventil bei $\alpha = \frac{\pi}{2}$ rad ($\Delta 90^\circ$ el.) und $I_{da} = 0,3 \frac{U_{d10}}{\omega L}$

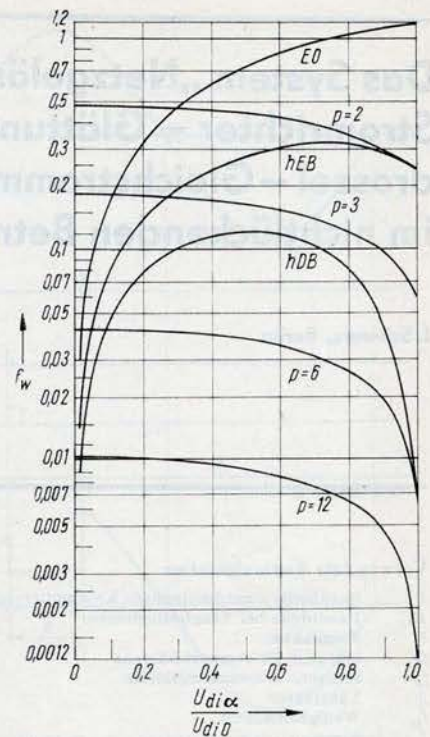


Bild 2. Welligkeitsfaktor für netzgelöschte Stromrichterschaltungen [Gl. (7)]

durch den arithmetischen Mittelwert berechnet

$$w = \frac{\tilde{I}_{de}}{I_{da}} \quad (3)$$

Welligkeit und Formfaktor lassen sich direkt ineinander überführen

$$F = \sqrt{w^2 + 1} \quad (4)$$

Beide Parameter werden zum Beispiel in [1] als Maß der Kommutierungsbeanspruchung angegeben.

In [2] wird als wesentlicher Parameter des Stroms der Oberschwingungsgehalt

$$\hat{w} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2 I_{da}} = \frac{\Delta I}{2 I_{da}} \quad (5)$$

definiert.

Die Extremwertwelligkeit nach [3]

$$w_E = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{\Delta I}{2 I_{da} - (|\tilde{I}| - |\hat{I}|)} \quad (6)$$

ist das vierte Maß der Kommutierungsbeanspruchung.

2. Berechnung der Parameter

In [1] werden bereits Faktoren zum Ermitteln der Welligkeit des Stroms angegeben, die aber nicht allgemeingültig sind. Im Bild 2 ist der Welligkeitsfaktor

$$f_w = \frac{w I_{da} \omega L}{U_{d10}} \quad (7)$$

für die netzgelöschten Stromrichterschaltungen dargestellt. Mit Gl. (7) läßt sich direkt die Welligkeit und mit Hilfe von Gl. (4) der Formfaktor ermitteln.

Ein allgemeingültiges Diagramm zum Ermitteln des Oberschwingungsgehaltes \hat{w} ist im Bild 3a gezeigt. Es gilt

$$f_e = \frac{\Delta I \omega L}{U_{d10}} = \frac{2 \hat{w} \omega L I_{da}}{U_{d10}} \quad (8)$$

Für die Extremwertwelligkeit w_E wird außer f_e noch die Extremwertdifferenz $|\tilde{I}| - |\hat{I}|$ benötigt. Im Bild 3b ist die

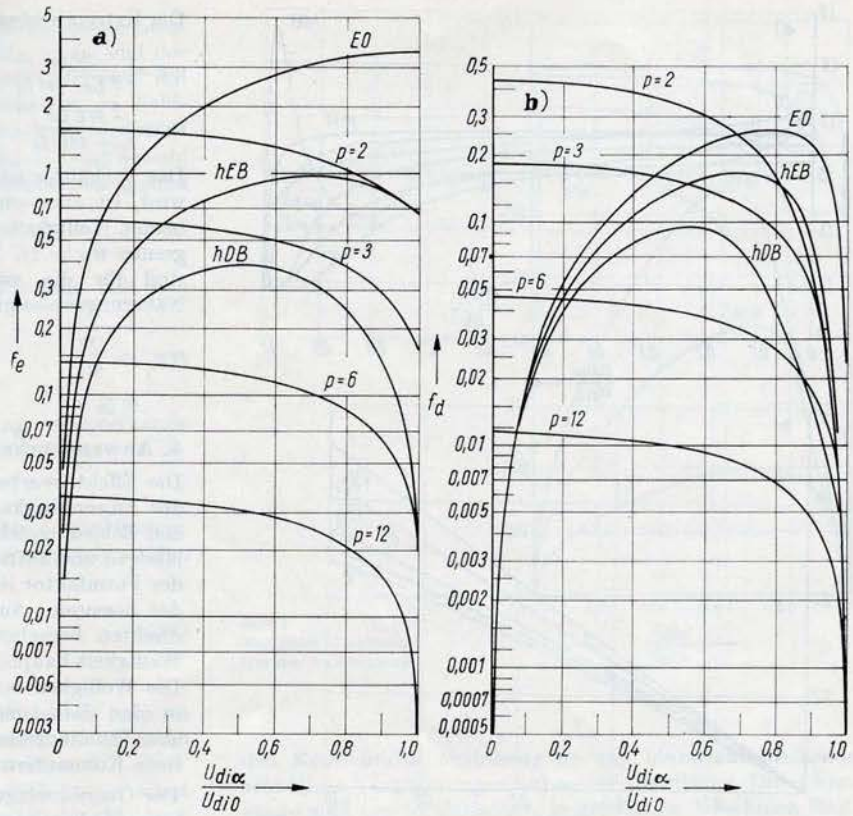


Bild 3. Kennzeichnende Größen des überlagerten Wechselstroms
 a) bezogene Schwankungsbreite [Gl. (8)]
 b) bezogene Extremwertdifferenz [Gl. (9)]

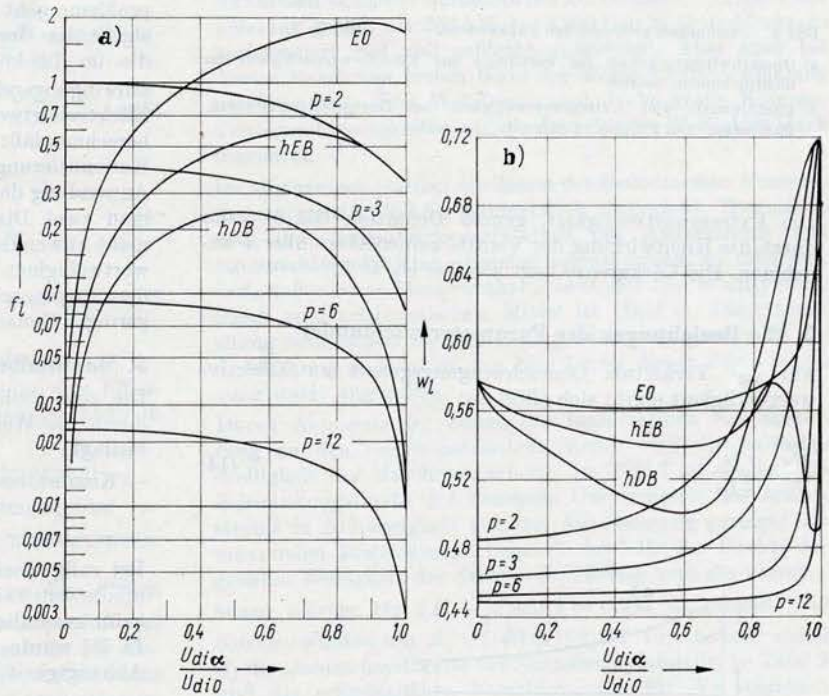


Bild 4. Kennzeichnende Größen für die Lückgrenze
 a) Lückfaktor [Gl. (11)]
 b) Welligkeit an der Lückgrenze

Extremwertdifferenz bezogen dargestellt

$$f_d = \frac{(|\hat{I}| - |\hat{I}'|) w_L}{U_{di0}} \quad (9)$$

Damit ergibt sich für die Extremwertwelligkeit

$$w_E = \frac{f_e}{2 I_{da} \omega L - f_d} \quad (10)$$

Die Gln. (7) bis (10) gelten nur bei nichtlückendem Betrieb.

Zum Ermitteln der Lückgrenze läßt sich Bild 4 anwenden. Im Bild 4a ist der Lückfaktor

$$f_l = \frac{I_{dl} \omega L}{U_{di0}} \quad (11)$$

dargestellt, aus dem sich der arithmetische Mittelwert des Stroms an der Lückgrenze I_{dl} ermitteln läßt. Im Bild 4b ist die Welligkeit an der Lückgrenze gezeigt. Für nichtlückenden Betrieb gelten die Bedingungen

$$I_{da} \geq I_{dl} \quad (12)$$

$$w \leq w_L \quad (13)$$

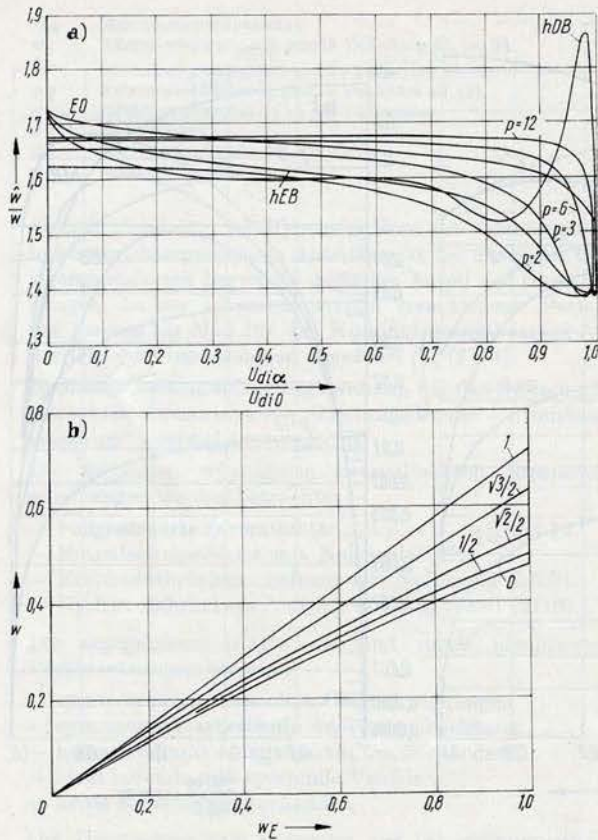


Bild 5. Beziehungen zwischen den Parametern

- a) Oberschwingungsgehalt im Verhältnis zur Effektivwertwelligkeit im nichtlückenden Betrieb
 b) Effektivwert- und Extremwertwelligkeit bei Zweipulsstromrichtern. Parameter: $U_{di\alpha} / U_{di0}$

Die Extremwertwelligkeit, gemäß Definition Gl. (6) kann durch die Richtwirkung der Ventile keinen Wert über 1 annehmen. Die Lückgrenze liegt also bei $w_E = 1$.

3. Die Beziehungen der Parameter zueinander

Für das Verhältnis Oberschwingungsgehalt zu Effektivwertwelligkeit ergibt sich (Bild 5a)

$$\frac{\hat{w}}{w} = \frac{f_e}{2 f_w} \quad (14)$$

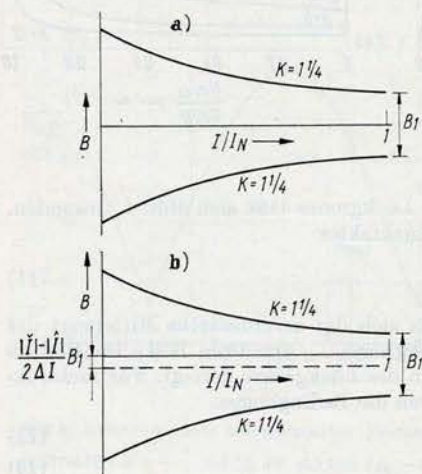


Bild 6 Zonen der funkenarmen Kommutierung
 a) im Normalzustand (symmetrische Einstellung) bei Speisung mit reinem Gleichstrom
 b) unsymmetrisch eingestellte Kurven für Zwölfpulsstromrichter

Die Extremwertwelligkeit ist

$$w_E = \frac{w f_e}{2 f_w - w f_d} \quad (15)$$

$$w = \frac{2 w_E f_w}{f_e + w_E f_d} \quad (16)$$

Das Verhältnis ist also nicht linear. Wie im Bild 5b gezeigt wird, ist aber eine annähernd lineare Beziehung zwischen beiden Welligkeiten vorhanden (bis zum Erreichen der Lückgrenze $w_E = 1$). Die im Bild 6 dargestellten Beziehungen sind für die anderen Stromrichterschaltungen ähnlich. Näherungsweise gilt also

$$w_E \approx \frac{w}{w_L} \quad (17)$$

$$w \leq w_L$$

4. Anwendbarkeit der Parameter

Die Effektivwertwelligkeit w und der Formfaktor F sind in der Anwendbarkeit prinzipiell gleich. Betrachtet man aber den Zahlenbereich, so ergibt sich, daß bei den üblichen zulässigen und auftretenden Welligkeiten von 0,05 bis 0,3 sich der Formfaktor im Bereich 1,0013 bis 1,044 bewegt. Wegen der besseren „Auflösung“ und wegen der Möglichkeit der direkten Berechnung mittels Gl. (7) ist zu empfehlen, die Welligkeit hauptsächlich zu verwenden.

Die Welligkeit ist ein Maß für die zusätzliche Erwärmung in den Bauelementen (Sammelschienen, Drosseln usw.), aber, zumindestens nicht direkt, kein Maß für die zusätzliche Kommutierungsbeanspruchung.

Der Oberschwingungsgehalt \hat{w} ist besser zum Kennzeichnen eines Wellenstroms geeignet, wenn es um Kommutierungsprobleme geht [2] [5]. Er ist dazu auch im Lückbetrieb geeignet, im Gegensatz zur Extremwertwelligkeit w_E [3] [6], die im Lückbetrieb $w_E = 1 = \text{konst.}$ ist. Da der Oberschwingungsgehalt \hat{w} in direkter linearer Beziehung zur Effektivwertwelligkeit steht, sich leicht mit Hilfe von Gl. (8) berechnen läßt und überdies im Lückbetrieb ein Maß für die Kommutierungsbeanspruchung liefert, ist er gegenüber der Anwendung der Extremwertwelligkeit, zu deren Berechnung man zwei Diagramme benötigt und die im Lückbetrieb nicht anwendbar ist, vorzuziehen. Der Vorzug der Extremwertwelligkeit liegt hauptsächlich darin, daß sie leicht aus dem Stromoszillogramm ermittelbar ist (allerdings nur mit geringer Genauigkeit).

5. Maximalbeanspruchung der Maschinen

Die zusätzliche Beanspruchung der Gleichstrommaschinen durch die Wellenstromspeisung wird durch zwei Faktoren bedingt:

- Kommutierungsbeanspruchung (Erhöhung der Reaktanzspannung in der kommutierenden Spule),
- zusätzliche Erwärmung der Maschine.

Bei vollgeblähten Maschinen stellt die Kommutierung, zumindestens bei Leistung $n \leq 250 \text{ kW}$ ($n_{\text{Grund}} = 1500 \text{ U/min}$), keine zusätzliche Beanspruchung dar.

In [5] wurde für den zulässigen Oberschwingungsgehalt in Abhängigkeit von Drehzahl (bzw. Spannung)

$$\hat{w}_{\text{zul}} = \hat{w}_{N \text{ zul}} \frac{n_N}{n} \quad (18)$$

abgeleitet. In [7] ist eine ähnliche Abhängigkeit bei Vernachlässigung der höheren Oberwellen für die Effektivwertwelligkeit angegeben

$$w \approx w_{N \text{ zul}} \frac{n_N}{n} \quad (19)$$

Durch Bild 5a ist der Zusammenhang der Gln. (18) und (19) bestätigt. Aus Gl. (8) läßt sich für die Gesamtkreisinduktivität

$$L = \frac{f_e U_{di0}}{2 I_{da} \omega \hat{w}_{\text{zul}}} \quad (20)$$

ableiten. Für einen gegebenen Antrieb sind die ideale Leerlaufgleichspannung, der Motornennstrom $I_{da} = I_N$ und der zulässige Oberschwingungsgehalt im Nennarbeitspunkt unveränderlich. Der Faktor f_e hat im allgemeinen im Feldschwächbetrieb einen der Motornennspannung zugeordneten Wert. Im Ankersteuerbetrieb ist f_e variabel. \hat{w}_{zul} ist sowohl im Ankersteuer- als auch im Feldschwächbetrieb gemäß Gl. (18) variabel.

Feldschwächbetrieb

Ist n_{max} die höchste Feldschwächdrehzahl, dann läßt sich die Induktivität nach [5] berechnen zu

$$L = \frac{U_{di0}}{2 I_N \hat{w}_{Nzul} \omega} \frac{n_{max}}{n_N} f_e \quad (21)$$

Für f_e wird der der Motornennspannung entsprechende Wert eingesetzt.

Ankersteuerbetrieb

Im Ankersteuerbetrieb ändern sich f_e und \hat{w}_{zul} gleichzeitig. In [5] ist ein kritisches Spannungsverhältnis ermittelt worden (Tafel 1). Die erforderliche Induktivität ist

$$L = \frac{U_{di0}}{2 I_N \hat{w}_{Nzul} \cdot \omega} \frac{U_N}{U_{di0}} \left(\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} \right)_{krit} f_e \quad (22)$$

Für Motoren, die sowohl im Ankersteuerbetrieb als auch im Feldschwächbetrieb betrieben werden, muß L sowohl nach Gl. (21), als auch nach Gl. (22) berechnet werden.

Die Induktivität der Glättungsdrossel erhält man, indem man von der ermittelten Induktivität L nach Gl. (21) bzw. (22) die Ankerinduktivität abzieht.

Die Gl. (19) liefert ähnliche Werte für die Maximalbeanspruchung des Kommutators

$$L = \frac{U_{di0}}{I_N \omega \hat{w}_{Nzul}} \frac{n_{max}}{n_N} f_w \quad (23)$$

für den Feldschwächbetrieb

$$L = \frac{U_{di0}}{I_N \omega \hat{w}_{Nzul}} \frac{U_N}{U_{di0}} \left(\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} \right)_{krit} f_w \quad (24)$$

für Ankersteuerung. Die kritischen Werte sind in Tafel 2 zusammengestellt [7].

Das Verfahren nach [5] liefert genauere Ergebnisse.

Zusätzliche Verluste, die wesentlich höher als die vom Effektivwert her zu erwartenden sind, treten hauptsächlich in folgenden Bauteilen der Maschine auf [7]

- Wicklungen (Effektivwert und Stromverdrängung)
- im massiven Joch (Wirbelstromverluste).

Sie erfordern, die Nennleistung der Maschine herabzusetzen.

6. Anpassung der Gleichstrommaschine an den Strom

Durch die Phasenverschiebung zwischen Wendepolfluß und Ankerstrom durch die nichtgeblechten Eisenteile der Maschine überschreitet der Augenblickswert des Ankerstroms die Zone der funkenfreien bzw. funkenarmen Kommutierung (K wird $> 1 1/2$). Er greift bei zu kleiner Glättungsdrossel

Tafel 1. Kritische Werte für die Kommutierungsbeanspruchung der Maschinen (nach [5])

Schaltung	$\left(\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} \right)_{krit}$	$\left(\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} \right)_{krit} f_e$
$p = 2$	0,75	0,826
$p = 3$	0,77	0,314
$p = 6$	0,72	0,0722
$p = 12$	0,71	0,00173
E0	0,998	3,47
hEB	0,83	0,773
hDB	0,68	0,229

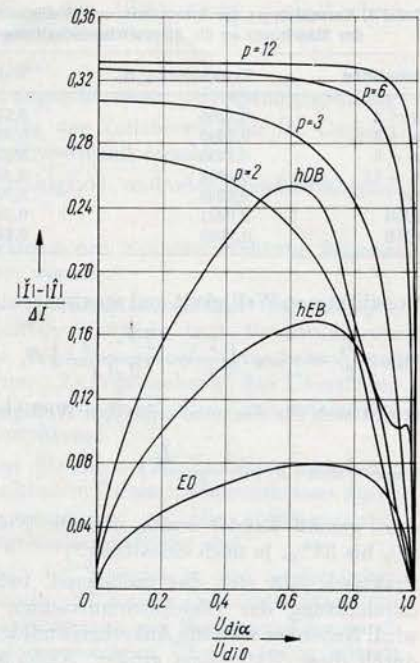


Bild 7. Bezogene Unsymmetrie des Ankerstroms

den Kommutator unzulässig an und hinterläßt bleibende schädliche Veränderungen auf seiner Oberfläche. Diese Vorgänge sind um so kritischer, je größer die Maschinen sind. Aus diesen Gründen werden in der DDR Maschinen mit einer Leistung größer als 250 kW bei 1500 U/min Grunddrehzahl kompensiert und voll geblecht ausgeführt. Aber auch bei diesen Maschinen treten trotz der Kompensationswicklung und der geblechten Wendepole und Joche große Kommutierungsschwierigkeiten auf, die die zulässige Welligkeit stark begrenzen.

Im allgemeinen werden die Zonen der funkenarmen Kommutierung gemäß Bild 6a symmetrisch eingestellt. Betrachtet man den Augenblickswertverlauf des Ankerstroms von stromrichtergespeisten Gleichstrommaschinen, so fällt auf, daß, außer beim Steuerwinkel $\alpha = 0$, der Strom unsymmetrisch zum arithmetischen Mittel ist (Bild 1). Die Abweichung nach unten ist dem Betrag nach stets größer als die Abweichung nach oben. Im Bild 3b ist dieser Sachverhalt quantitativ angegeben.

Durch Anpassen der Zonen der funkenarmen Kommutierung an den unsymmetrischen Strom wird die zulässige Welligkeit der Maschinen erhöht. Im Bild 7 ist die auf die Schwankungsbreite ΔI bezogene Unsymmetrie des Ankerstroms in Abhängigkeit von der Aussteuerung gezeigt. Die maximalen Abweichungen liegen in der Nähe der Punkte der größten Welligkeit des Stroms. Im Bild 6b sind die verschobenen Kurven für $(|\dot{I}| - |\hat{I}|) / \Delta I = 0,332$ dargestellt. Die Kurven werden um $B_1 (|\dot{I}| - |\hat{I}|) 2 / \Delta I$ verschoben, wobei B_1 die Gesamtbandbreite bei Nennstrom darstellt. In Tafel 3 sind die erforderlichen Verschiebungen für die einzelnen Schaltungen zusammengestellt. Ausgehend von der Propor-

Tafel 2. Kritische Werte für die Kommutierungsbeanspruchung der Maschinen (nach [7])

Schaltung	$\left(\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} \right)_{krit}$	$\left(\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} \right)_{krit} f_w$
$p = 2$	0,819	0,277
$p = 3$	0,765	0,0965
$p = 6$	0,718	0,0213
$p = 12$	0,707	0,0052
E0	0,999	1,136
hEB	0,910	0,258
hDB	0,604	0,0718

Tafel 3. Verschiebung der Symmetrie und Welligkeitsgewinn bei Anpassung der Maschinen an die Stromrichterschaltung nach (18)

Schaltung	Verschiebung/ B_1	Welligkeitsgewinn
$p = 2$	0,1366	0,273
$p = 3$	0,1540	0,308
$p = 6$	0,1636	0,327
$p = 12$	0,1659	0,332
E0	0,0394	0,0788
hEB	0,0841	0,1683
hDB	0,1266	0,253

tionalität von Welligkeit und maximal zulässiger Abweichung

$$w_{\text{alt}} : \frac{B_1}{2} = w_{\text{neu}} : \left(\frac{1}{2} + \frac{|\hat{I}| - |\check{I}|}{2 \Delta I} \right) B_1 \quad (25)$$

ergibt sich für die neue zulässige Welligkeit

$$w_{\text{neu}} = w_{\text{alt}} \left(1 + \frac{|\hat{I}| - |\check{I}|}{\Delta I} \right), \quad (26)$$

d.h., gemäß Tafel 3 ergibt sich ein Welligkeitsgewinn von 80% bis 330%, je nach Schaltung.¹⁾

Praktisch läßt sich das realisieren, indem die Wendepoldurchflutung der Gleichstrommaschine kleiner eingestellt wird. Nebenher wird die Ankerkreisinduktivität der Maschine durch diese Maßnahme größer. Nicht angewendet werden kann das Verfahren bei Umkehrantrieben in Antiparallelschaltung der Stromrichter, da hierbei die Unsymmetrie des Stroms in beiden Richtungen auftritt [8].

7. Beispiele

7.1. Beispiel 1

Gleichstrommotor: 40 kW, 440 V, 102 A, 1470 U/min,

$$L_M = 4,6 \text{ mH}, \hat{w}_{N \text{ zul}} = 0,25$$

Stromrichter: hDB, $U_{di0} = 513 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$ ($\omega = 100\pi^1/\text{s}$)
keine Feldstellung Gl. (22) liefert mit Tafel 1

$$L = \frac{513 \text{ V}}{2 \cdot 102 \text{ A} \cdot 0,25 \cdot 314 \text{ 1/s}} \cdot 0,229 = 8,57 \text{ mH}$$

$$L_D = L - L_M = 8,57 \text{ mH} - 4,6 \text{ mH} = 3,97 \text{ mH} \quad (27)$$

7.2. Beispiel 2

Motor und Stromrichter wie Beispiel 1, nur Feldstellbereich bis zu $n_{\text{max}} = 3000 \text{ U/min}$.

Hier muß Gl. (21) angewandt werden:

$$\text{Nach Bild 3a ist } f_e = 0,18 \text{ für } \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \frac{440 \text{ V}}{513 \text{ V}} = 0,856$$

$$L = \frac{513 \text{ V}}{2 \cdot 102 \text{ A} \cdot 0,25 \cdot 314 \text{ 1/s}} \cdot \frac{3000 \text{ U/min}}{1470 \text{ U/min}} \cdot 0,18 = 11,78 \text{ mH}$$

$$L_D = L - L_M = 11,78 \text{ mH} - 4,60 \text{ mH} = 7,18 \text{ mH}$$

7.3. Beispiel 3

Motor und Stromrichter wie im Beispiel 1. Es sollen die Extremwertwelligkeit, der Oberschwingungsgehalt und die Effektivwertwelligkeit im Nennarbeitspunkt sowie der Strom an der Lückgrenze für die Kreisinduktivität $L = 8,57 \text{ mH}$ ermittelt werden. Angewandt werden die Gln. (10) (8) (7) und (11).

$$\left. \begin{array}{l} \text{Aus Bild 3b: } f_d = 0,023 \\ \text{Aus Bild 2: } f_w = 0,058 \\ \text{Aus Bild 4a: } f_l = 0,105 \end{array} \right\} \text{ für } \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = 0,856$$

¹⁾ Die hier abgeleitete Symmetrierverschiebung überlagert sich mit anderen Einflüssen, wie der Symmetrierverschiebung durch variable Drehzahlen und der Dämpfung des Wendepoldfelds in Abhängigkeit von der Frequenz der Oberschwingungen, so daß sich die in Tafel 3 angegebenen Welligkeitsgewinne u. U. nicht erreichen lassen.

$$W_E = \frac{0,18}{2 \cdot 102 \text{ A} \cdot 314 \text{ 1/s} \cdot 8,57 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}} = 0,1722$$

$$\hat{w} = \frac{f_e U_{di0}}{2 I_{da} \omega L} = \frac{0,18 \cdot 513 \text{ V}}{2 \cdot 102 \text{ A} \cdot 314 \text{ 1/s} \cdot 8,57 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}} = 0,1668 \quad (28)$$

$$w = \frac{f_w U_{di0}}{I_{da} \omega L} = \frac{0,058 \cdot 513 \text{ V}}{102 \text{ A} \cdot 314 \text{ 1/s} \cdot 8,57 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}} = 0,107 \quad (29)$$

$$I_{d1} = \frac{f_l U_{di0}}{\omega L} = \frac{0,105 \cdot 513 \text{ V}}{314 \text{ 1/s} \cdot 8,57 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/A}} = 20 \text{ A}. \quad (30)$$

Nichtlückender Betrieb bei $I_N = 102 \text{ A}$ ist also gewährleistet.

7.4. Beispiel 4

Gleichstrommaschine: $I_N = 300 \text{ A}$, $w_{\text{alt}} = 0,1$, $L_M = 1,5 \text{ mH}$
Stromrichter: $U_{di0} = 513 \text{ V}$, $p = 6$, $f = 50 \text{ Hz}$, $f_w = 0,042$.
Berechnet werden soll die alte und die neue benötigte Glättungs-drossel [8]. Angewendet werden die Gln. (7) und (27).

$$L_{D \text{ alt}} = \frac{f_w U_{di0}}{w \omega I_{da}} - L_M = \frac{0,042 \cdot 513 \text{ V}}{0,1 \cdot 314 \text{ 1/s} \cdot 300 \text{ A}} - 1,5 \text{ mH} = 0,8 \text{ mH} \quad (31)$$

Gemäß Tafel 3 wird die neue zulässige Welligkeit $w_{\text{neu}} = 0,133$. Aus Gl. (31) läßt sich ableiten, daß die zu erwartende Drosselseinsparung wesentlich größer als die Werte in Tafel 3 sein können

$$\frac{L_{D \text{ neu}}}{L_{D \text{ alt}}} = \frac{w_{\text{alt}}}{w_{\text{neu}}} \left(1 + \frac{L_M}{L_{D \text{ alt}}} \right) - \frac{L_M}{L_{D \text{ alt}}} \quad (32)$$

Die Induktivität der neuen Glättungs-drossel ist

$$L_{D \text{ neu}} = \frac{513 \text{ V} \cdot 0,042}{0,133 \cdot 314 \text{ 1/s} \cdot 300 \text{ A}} - 1,5 \text{ mH} = 0,23 \text{ mH}$$

also

$$\frac{L_{D \text{ neu}}}{L_{D \text{ alt}}} = \frac{0,1}{0,133} \left(1 + \frac{1,5}{0,8} \right) - \frac{1,5}{0,8} = 0,285.$$

EA 7275

Literatur

- [1] *Hütte*: des Ingenieurs Taschenbuch. Band IV A, Elektrotechnik. Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1957.
- [2] *Philipps, W.*: Berechnung des Oberschwingungsgehaltes von Ankerströmen stromrichtergespeister Gleichstrommaschinen. ETZ-A 89 (1968) H. 6, S. 126.
- [3] *Budig, P.-K.*: Das Betriebsverhalten von mischstromgespeisten Gleichstrommaschinen. ELEKTRIE 24 (1970) H. 5, S. 167.
- [4] *Schwarz, J.*: Parameter netzgelöschter Stromrichter im nichtlückenden Betrieb. Zeitschrift elektr. Information u. Energietechnik, Leipzig. Zur Veröffentlichung vorbereitetes Manuskript.
- [5] *Philipps, W.*: Kommutierungsprobleme bei stromrichtergespeisten Gleichstrommaschinen mit massivem Ständerjoch. ETZ-A Bd. 90 (1969) H. 5, S. 103.
- [6] *Pietsch, O.*: Betriebsverhalten und Anpassung von Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen bei Stromrichterspeisung. ELEKTRIE 24 (1970) H. 7, S. 247.
- [7] *Beier, E.*: Einfluß der Glättungsinduktivität auf Kommutierung und Leistung thyristorgespeister Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen. Siemens-Zeitschrift 42 (1968) H. 10, S. 843.
- [8] *Schwarz, J.*: Verfahren zur Verminderung der durch Funken- und Lichtbogenbildung bedingten schädlichen Veränderungen der Oberfläche der Kollektoren bei stromrichtergespeisten Gleichstrommaschinen. Patentanmeldung WP H 02 k/188506 vom 24. 9. 1975.