Bremszeiten von Antrieben in Feldumkehrschaltung

J. Schwarz, Berlin

Antriebe, die im Normalbetrieb durchlaufen (Einrichtungsbetrieb), bei seltenen betriebsmäßigen Stillsetzungen aber gebremst werden müssen, z. B. Hauptantriebe von Kontistraßen und von Zentrifugen, arbeiten oft in Feldumkehrschaltung. Es ist von Interesse, die Bremszeiten dieser Antriebe zu bestimmen. Dabei ist die Möglichkeit des Betriebs im Feldschwächbereich zu berücksichtigen.

1. Voraussetzungen

Gegeben sei ein Antrieb mit einer bestimmten Drehzahl ω_0 ohne Last und ohne Feld. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird das Feld erregt und ein netzgelöschter Stromrichter mit einem konstanten Begrenzungsstrom I speist die gespeicherte mechanische Energie in das Netz zurück. Die maximal zulässige Spannung im Wechselrichterbetrieb sei $U_{\max}$. Drehzahl, Fluß und Spannung in der Maschine verhalten sich wie im Bild 1 dargestellt.

Nach Bild 1 können drei Bereiche unterschieden werden. Bei großer Feldzeitkonstante, kleinem Trägheitsmoment und bei großer Wechselrichtergegenspannung tritt der mittlere Bereich nicht auf. Die gezeigten Kennlininen werden durch eine Drehzahlregelung mit unterlagerter Stromregelung und ankerspannungsabhängiger Feldregelung erzwungen.

Dipl.-Ing. *Jürgen Schwarz* ist Entwicklungsingenieur im VEB Kombinat Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin.

Verwendete Formelzeichen

c	Maschinenkonstante
e	Maschinen-EMK
i	Stromaugenblickswert
I	Strom (konst.)
J	Trägheitsmoment
K	Integrationskonstante
m_M	Motormoment
m_W	Widerstandsmoment
M, N	Maschinenkonstanten
P_{bgr}	Stromrichterbegrenzungsleistung
R_m	magnetischer Widerstand
t	Zeit
U_{err}	maximale Erregerspannung
u_F	Erregerspannung
u_M	Maschinenspannung
$U_{\max}$	maximale Stromrichterspannung
U_N	Maschinennennspannung
U_{NF}	Erregernennspannung
w	Windungszahl
Θ	Durchflutung
Φ	Fluß
Φ_N	Nennfluß
τ	Erregerzeitkonstante
ω	Winkelgeschwindigkeit
ω_0	Winkelgeschwindigkeit bei $t = 0$
ω_N	Nennwinkelgeschwindigkeit
$\Delta\omega$	Winkelgeschwindigkeitsdifferenz

Alle mit einem * gekennzeichneten Größen sind bezogen.

2. Grundgleichungen

Für eine Gleichstrommaschine gilt allgemein:

$$e(t) = c\,\Phi(t)\,\omega(t) \tag{1}$$

$$m_M(t) = c\,\Phi(t)\,i(t) \tag{2}$$

$$m_M(t) = m_W + J\,\frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,t} \tag{3}$$

Nach Abschn. 1 gilt zusätzlich

$$m_W = 0 \tag{4}$$

$$I = -\,I_{\text{Begrenzungsstrom}} = \text{konstant.}$$

Aus den Gln. (2) bis (5) erhält man

$$\omega = \omega_0 - \frac{c\,I}{J}\int_0^t \Phi(t)\,\mathrm{d}t\,. \tag{6}$$

Zur Vereinfachung wird mit linearen Verhältnissen, also mit konstanter Feldzeitkonstante $\tau_{\text{Feld}} = \tau =$ konstant gerechnet:

$$\Phi(t) = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{i_w}{R_m} \tag{7}$$

Es werden folgende bezogene Größen definiert:

$$\omega_N = \frac{U_N}{c\,\Phi_N} \qquad u_M{}^* = \frac{U_{\max}}{U_N}$$

$$P_{\text{bgr}} = U_{\max}\,I$$

$$t^* = \frac{t}{\tau} \qquad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_N} \qquad u_F{}^* = \frac{U_{\text{err}}}{U_{NF}}$$

$$M = \frac{J\,\omega_N{}^2\,u_M{}^*}{P_{\text{bgr}}\,\tau}\;\frac{J\,\omega_N{}^2}{\tau\,U_N\,I}$$

$$N = \frac{\omega_0{}^*}{u_F{}^*}\,M \qquad P = \frac{u_M{}^*}{u_F{}^{*2}}\,M \qquad \Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_N}$$

3. Berechnung

3.1. Bereich 1

3.1.1. Berechnung der Grenzen

Wird eine konstante Spannung U_{err} auf die Feldwicklung geschaltet, so ist

$$\Phi^*(t^*) = u_F{}^*\,(1 - \mathrm{e}^{-t^*}) \tag{8}$$

und

$$\omega^*(t^*) = \omega_0{}^* - \frac{u_F{}^*}{M}\,(t^* + \mathrm{e}^{-t^*} - 1)\,. \tag{9}$$

Die Drehzahl verändert sich, bis entweder
$\Phi^* = 1$ oder $e = U_{\max}$ ($e^* = u_M{}^*$) ist.

Für die Bedingung $\Phi^* \leqq 1$ ist

$$t_1{}^* \leqq -\ln\left(1 - \frac{1}{u_F{}^*}\right) \tag{10}$$

(Bild 2).

Für die Bedingung $e^* \leqq u_M{}^*$ erhält man

$$\mathrm{e}^{-2\,t_1{}^*} + \mathrm{e}^{-t_1{}^*}\,(t_1{}^* - 2 - N) + N - P - t_1{}^* + 1 = 0. \tag{11}$$

3.1.2. Spannungsmaximum

Ausgehend von einer Maximabetrachtung für $e^*\,(t_M{}^*)$ erhält man für ein gegebenes N

$$P \leqq \mathrm{e}^{-2\,t_M{}^*} + \mathrm{e}^{-t_M{}^*}\,(t_M{}^* - 2 - N) + N - t_M{}^* + 1. \tag{12}$$

3.1.3. Drehzahldifferenz

Aus Gl. (9) folgt

$$\Delta\,\omega_1{}^* = \frac{\omega_1{}^*}{\omega_0{}^*} = 1 - \frac{1}{N}\,(t_1{}^* + \mathrm{e}^{-t_1{}^*} - 1)\,. \tag{13}$$

Tafel 1. Berechnungsbeispiel für einen Antrieb mit Feldumkehrschaltung

Technische Daten des Antriebs

Motor	Stromrichter
P_N = 100 kW	P_{bgr} = 170 kW
U_N = 300 V	$U_{\max}$ = 340 V
I_N = 495 A	I_{bgr} = 500 A
n_N = 410 U/min	U_{err} = 340 V
τ_{Feld} = 1 s	
U_{FN} = 150 V	
n_0 = 1200 U/min	
J = 55,03 Nms²	

Bezogene Parameter

$\omega_N = 2\,\pi\,n_N = 42{,}9\ {}^1/\text{s}$

$\omega_0{}^* = \dfrac{n_0}{n_N} = 2{,}93$

$u_F{}^* = 2{,}25$

$u_M{}^* = 1{,}132$

Berechnungsgang nach Bild 5

$M = 0{,}676$

$N = 0{,}878$

$\dfrac{N}{P} = 5{,}84$

$t_{1f}{}^*$ aus Bild 2 $= 0{,}59$

$t_{1a}{}^*$ aus Bild 4 $= 0{,}19$

$t_1{}^* = 0{,}19$

$\Delta\,\omega_1{}^* = 1 - \dfrac{1}{0{,}878}\,0{,}017 = 0{,}9906$

$\omega_1{}^* = 2{,}90$

$t_2{}^* = 2{,}125$

$\omega_2{}^* = 1{,}132$

$t_3{}^* = 0{,}765$

$t_{\text{brems}} \approx 3{,}1$ s

Die Kurvenverläufe der interessierenden Größen sind im Bild 1 dargestellt.

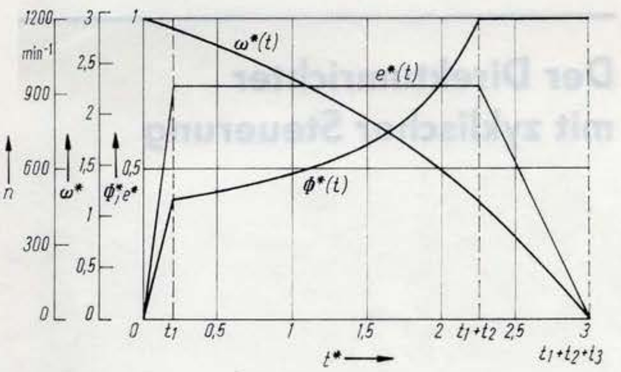

Bild 1. Anschauungsbeispiel

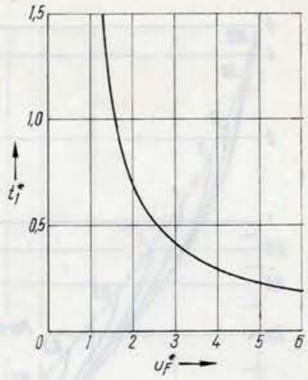

Bild 2. Zeit bis zur Nennerregung der Maschine in Abhängigkeit vom Stoßverhältnis

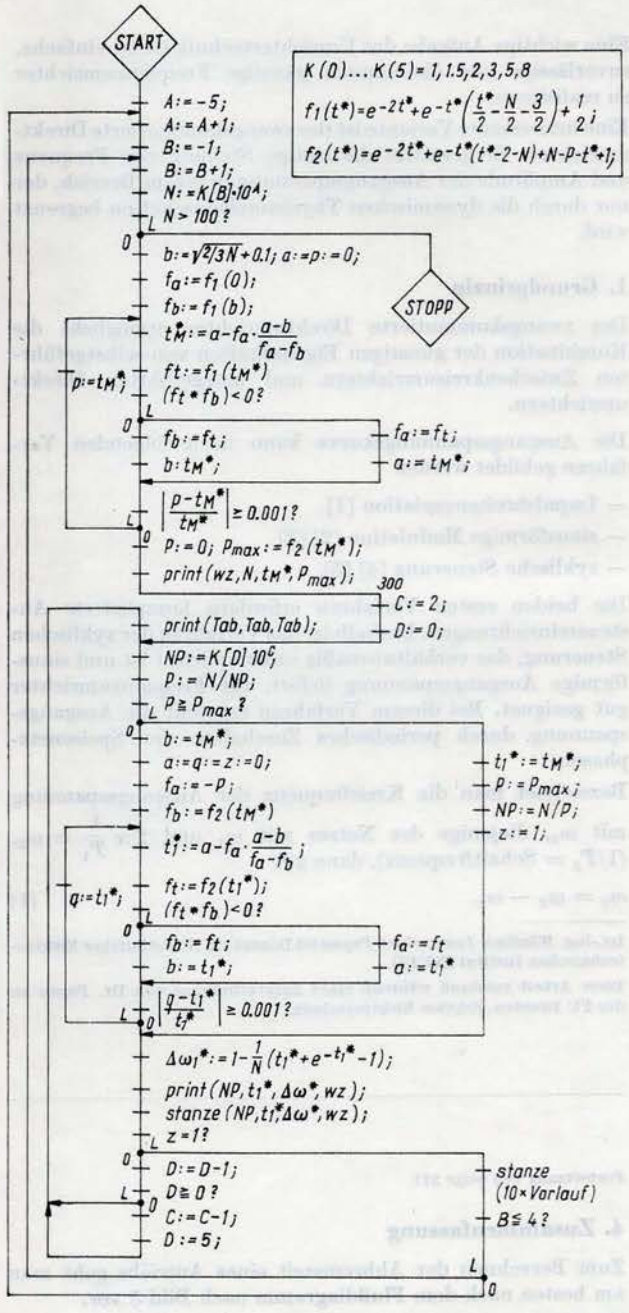

Bild 3. Programmablaufplan zur Berechnung von $t_1{}^*$

3.1. 4. Rechenprogramm

Mit dem Rechenprogramm, dessen Programmablaufplan im Bild 3 dargestellt ist, wurden die Gln. (11), (12) und (13) ausgewertet. Die Ergebnisse sind im Bild 4 dargestellt.

3.2. Bereich 2

Im zweiten Bereich ($e^* = u_M{}^* =$ konstant) gilt

$$\Phi^*(t^*) = \frac{u_M{}^*}{\omega^*(t^*)}. \tag{14}$$

Für das mechanische Gleichungssystem erhält man aus Gl. (3)

$$\frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,t} = \frac{m_M(t)}{J} = \frac{P_{\mathrm{bgr}}}{J\,\omega(t)}. \tag{15}$$

Damit folgt unter Einführen des bezogenen Gleichungssystems

$$\omega^*(t^*) = \sqrt{K^* - \frac{2\,u_M{}^*}{M}\,t^*} \tag{16}$$

mit den Randbedingungen

$$\omega^*(t_1{}^* + t_2{}^*) = u_M{}^*$$

$$\omega^*(t_1{}^*) = \omega_1{}^*$$

für die Zeit des Abschnitts 2

$$t_2{}^* = \frac{M}{2\,u_M{}^*}\,(\omega_1{}^{*2} - u_M{}^{*2}) \tag{17}$$

und für den Drehzahlverlauf

$$\omega^*(t^*) = \sqrt{\omega_1{}^{*2} + \frac{2\,u_M{}^*}{M}\,(t_1{}^* - t^*)}. \tag{18}$$

3.3. Bereich 3

Hier gilt

$$\Phi^* = 1 \tag{19}$$

und damit

$$\omega^* = \omega_2{}^* - \frac{1}{M}\,(t^* - t_1{}^* - t_2{}^*) \tag{20}$$

sowie

$$t_3{}^* = M\,\omega_2{}^* = M\,u_M{}^*. \tag{21}$$

Schluß auf Seite 372

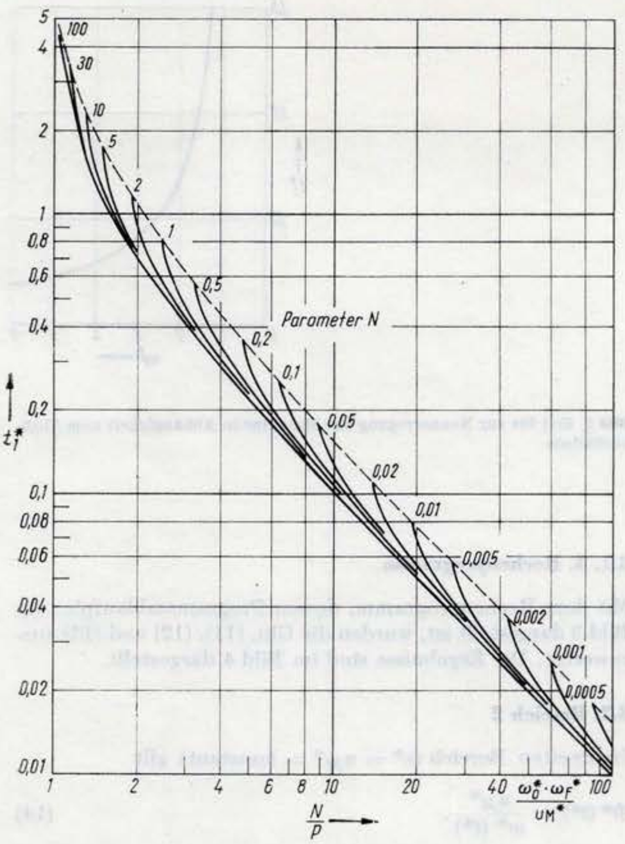

Bild 4. Zeit bis zum Erreichen der Spannungsgrenze des Stromrichters

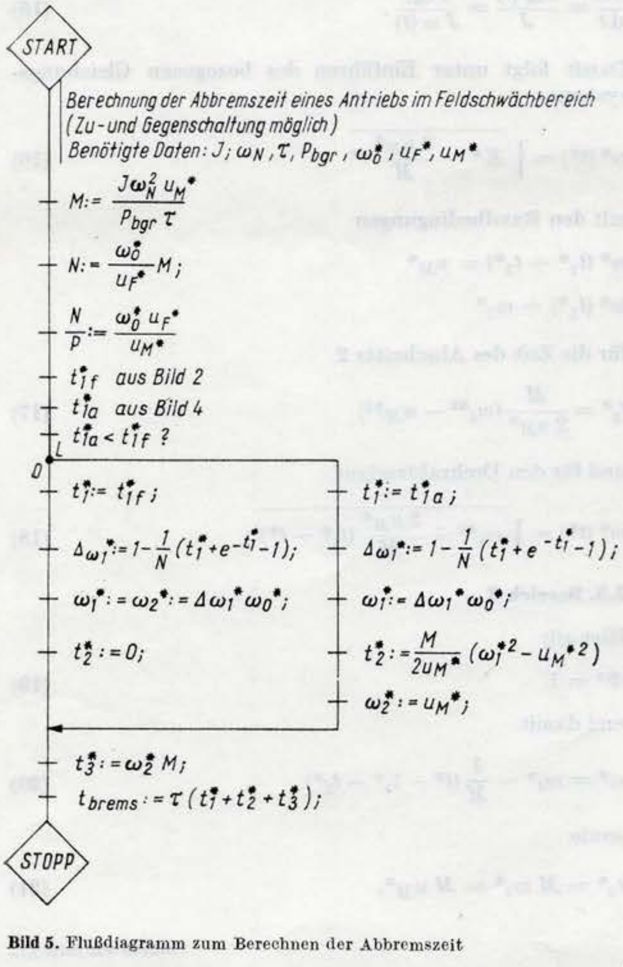

Bild 5. Flußdiagramm zum Berechnen der Abbremszeit

Fortsetzung von Seite 371

4. Zusammenfassung

Zum Berechnen der Abbremszeit eines Antriebs geht man am besten nach dem Flußdiagramm nach Bild 5 vor.

Ein Berechnungsbeispiel zum Demonstrieren der angegebenem Methode ist in Tafel 1 angegeben.

EA 6923