

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 62 (1971)
Heft: 11

Artikel: Über den transienten Stromverlauf in doppelerregten Gleichstrommaschinen bei plötzlichem Klemmenkurzschluss
Autor: Palit, B.B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915825>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

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

Über den transienten Stromverlauf in doppelerregten Gleichstrommaschinen bei plötzlichem Klemmenkurzschluss

Von B. B. Palit, Zürich

621.313.2:621.3.014

Unter Anwendung der allgemeinen Theorie von elektrischen Maschinen lassen sich die transienten Vorgänge in den elektrischen Maschinen analytisch erklären. Eine Gleichstrommaschine mit Fremd- und Reihenschluss-erregung wird im Hinblick auf ihr Kurzschlussverhalten untersucht. Die Anker- und Erregerstromgleichungen werden entwickelt und mit Hilfe der Laplace-Transformation gelöst. Ein Beispiel, gerechnet an Hand der Maschinenkonstanten einer mittelgrossen Gleichstrommaschine, zeigt den transienten Verlauf der Anker- und Erregerströme.

L'application de la théorie générale des machines électriques permet l'analyse des phénomènes transitoires dans ces machines. Une machine à courant continu, avec excitation indépendante et en série, est examinée du point de vue de son comportement aux courts-circuits. On développe des équations des courants d'induit et d'excitation qu'on résout à l'aide de transformations de Laplace. Un exemple, calculé sur la base des valeurs constantes d'une machine à courant continu de grandeur moyenne, démontre l'allure transitive des courants d'induit et d'excitation.

1. Buchstabensymbole

f	Fremderregerwicklung
a	Ankerwicklung
s	Reihenschlusswicklung
w	Wendepolwicklung
k	Kompensationswicklung
R_f, R_a, R_s, R_w, R_k	Ohmscher Widerstand der entsprechenden Wicklungen
L_f, L_a, L_s, L_w, L_k	Selbstinduktivität der entsprechenden Wicklungen
R	gesamter Ohmscher Widerstand im Ankerkreis
L	effektive Selbstinduktivität im Ankerkreis
M_{af}	Rotationsinduktivität zwischen der Anker- und der Fremderregerwicklung
M_{as}	Rotationsinduktivität zwischen der Anker- und der Reihenschlusswicklung
M_{fs}	Gegeninduktivität zwischen der Fremderreger- und der Reihenschlusswicklung
M_{aw}	Gegeninduktivität zwischen der Anker- und der Wendepolwicklung
M_{ak}	Gegeninduktivität zwischen der Anker- und der Kompensationswicklung
M_{wk}	Gegeninduktivität zwischen der Wendepol- und der Kompensationswicklung
u	Momentanwert der Klemmenspannung des Ankerkreises
$u(p)$	Bildfunktion der Klemmenspannung des Ankerkreises
u_f	Momentanwert der Klemmenspannung des Fremderregerkreises
U_f	konstant gehaltene angelegte Spannung am Fremderregerkreis
$u_f(p)$	Bildfunktion der Fremderregerspannung
U_0	Leerlaufspannung an den Ankerkreisklemmen entsprechend dem Fremderregerstrom vor dem Kurzschluss
i_a	Momentanwert des Ankerstromes
$i_a(p)$	Bildfunktion des Ankerstromes
$i_a(t)$	Zeitfunktion des Ankerstromes
I_{a0}	stationärer Ankerstrom vor dem Kurzschluss
I_{aN}	Nennankerstrom
$I_{a\infty}$	Ankerstrom nach unendlich langer Zeit (Dauerkurzschlussstrom)
i_f	Momentanwert des Fremderregerstromes
$i_f(p)$	Bildfunktion des Fremderregerstromes
$i_f(t)$	Zeitfunktion des Fremderregerstromes
I_{f0}	stationärer Fremderregerstrom vor dem Kurzschluss
Ω	Winkelgeschwindigkeit des Ankers
p'	Differentialoperator
p	Operatorvariable der Laplace-Transformation
τ_f	Zeitkonstante des Erregerkreises
τ_a	effektive Zeitkonstante des Ankerkreises

k_{fs}	Kopplungsfaktor zwischen der Fremderreger- und der Reihenschlusswicklung
t	Zeit
$t_{\max}$	Zeitpunkt des maximalen transienten Stromes
$t_{\min}$	Zeitpunkt des minimalen transienten Stromes
d	Längsachse
q	Querachse
S	Schalter
V	Verbraucher

2. Einleitung

Der transiente Stromverlauf in der Anker- und Erregerwicklung einer doppelerregten Gleichstrommaschine wird beim plötzlichen Kurzschliessen der Maschinenklemmen untersucht. Die Doppelerregung besteht aus der Fremd- und der Reihenschluss-erregung. Die Fremderregung dient als die Haupt-erregung und die Reihenschluss-erregung als die Compound-erregung. Um das Problem allgemein zu erfassen, werden bei der Aufstellung der Spannungsgleichungen auch die beiden Hilfswicklungen — die Wendepol- und die Kompensationswicklung — in Betracht gezogen. Weiterhin wird in den Gleichungen die vor dem Kurzschluss bestehende stationäre Belastung der Maschine berücksichtigt. Die Stromgleichungen werden für die gegenwirkende Schaltung der Reihenschluss-erregung besprochen. Die Ergebnisse aus dieser Betrachtung können, nach einigen Änderungen, für die mitwirkende Schaltung der Reihenschluss-erregung angewandt werden.

3. Voraussetzungen

3.1 Die Selbst-, Gegen- und Rotationsinduktivitäten der Wicklungen werden mit dem wirksamen Luftspalt berechnet. Dieser lässt sich durch Anwendung des Carterschen Faktors für die Nutung und eines anderen Faktors bestimmen, der den Einfluss der Kühlluftkanäle auf den magnetischen Widerstand des geometrischen Luftspaltes berücksichtigt.

3.2 Die Stromwendung ist linear. Sie übt keinen Einfluss auf die transienten Wicklungsströme.

3.3 Die Winkelgeschwindigkeit des Ankers ist während des ganzen Kurzschlussvorganges konstant.

3.4 Bei der gegenwirkenden Schaltung wird die Fremderregung durch die grosse Gegendurchflutung, die zum Kurzschlussstrom proportional ist, stark abgeschwächt. Der Arbeitspunkt liegt auf dem unteren geradlinigen Teil der Leerlauf-

kennlinie. Die Ankerrückwirkung schiebt den Punkt der induzierten Spannung auf der Leerlaufkennlinie noch weiter nach unten in Richtung des Koordinatenursprungs. Die Ankerrückwirkung selbst wird in den Gleichungen nicht berücksichtigt. Das Eisen wird unendlich permeabel angenommen.

3.5 Bei der mitwirkenden Schaltung ist angenommen, dass im Anker stets der Spannungsverlust wegen der Ankerrückwirkung dem Spannungsgewinn infolge der Reihenschluss-erregung gleich ist. Der Arbeitspunkt verschiebt sich auch in diesem Fall nach unten entlang der Leerlaufkennlinie als Folge einer Erscheinung, die später ersichtlich wird. Das Eisen wird gleich wie in der vorhergehenden Voraussetzung unendlich permeabel angenommen.

3.6 Die Leerlaufspannung vor dem Kurzschluss ist gleich hoch für die beiden Schaltungsarten.

4. Spannungsgleichungen bei gegenwirkender Schaltung

Gemäss Fig. 1 lassen sich die Spannungsgleichungen für den Erreger- und Ankerkreis wie folgt aufstellen:

$$\begin{bmatrix} u_f \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f + L_f p' & -M_{fs} p' \\ \Omega M_{af} + M_{fs} p' & -(R + Lp' + \Omega M_{as}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

wobei

$$R = R_s + R_a + R_w + R_k \quad (2)$$

und

$$L = L_s + L_a + L_w + L_k - 2M_{aw} - 2M_{ak} + 2M_{wk} \quad (3)$$

Durch Laplace-Transformation der Gl. (1) und nach dem Einsetzen der Anfangsbedingungen erhält man folgende Gleichungen.

$$\begin{bmatrix} u_f(p) \\ u(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f + L_f p & -M_{fs} p \\ \Omega M_{af} + M_{fs} p & -(R + Lp + \Omega M_{as}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f(p) \\ i_a(p) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_f - M_{fs} \\ M_{fs} - L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{f0} \\ I_{a0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Der Klemmenkurzschluss findet um $t = 0$ durch Einschalten des Schalters S in Fig. 1 statt.

Nun bei $t \geq 0$, $u(p) = 0$, da die Maschinenklemmen kurzgeschlossen sind und $u_f(p) = \frac{U_f}{p}$, da U_f konstant ist.

Gl. (4) lässt sich dann folgenderweise umschreiben:

$$\begin{bmatrix} \frac{U_f}{p} + L_f I_{f0} - M_{fs} I_{a0} \\ M_{fs} I_{f0} - L I_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f + L_f p & -M_{fs} p \\ \Omega M_{af} + M_{fs} p & -(R + Lp + \Omega M_{as}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_f(p) \\ i_a(p) \end{bmatrix} \quad (5)$$

5. Stromgleichungen bei gegenwirkender Schaltung

5.1 Ankerstrom

Aus Gl. (5) erhält man:

$$i_f(p) = \frac{\frac{U_f}{p} + L_f I_{f0} - M_{fs} I_{a0} + M_{fs} p i_a(p)}{R_f + L_f p} \quad (6)$$

$$i_a(p) = \frac{(M^2 - N^2) \left[\frac{U_0}{R + \Omega M_{as}} + \left(\frac{U_0 \tau_f}{R + \Omega M_{as}} + \frac{2M I_{a0}}{M^2 - N^2} - \tau_f I_{a0} \right) p + \frac{p^2 I_{a0}}{M^2 - N^2} \right]}{p(p + M - N)(p + M + N)} \quad (14)$$

$$i_a(p) = \frac{U_0}{R + \Omega M_{as}} \left[\frac{1}{p} - \left(1 - \frac{I_{a0}(R + \Omega M_{as})}{U_0} \right) \left\{ \left(\frac{M + N}{2N} \right) [1 - (M - N) \tau_f] \frac{1}{p + M - N} - \left(\frac{M - N}{2N} \right) [1 - (M + N) \tau_f] \frac{1}{p + M + N} \right\} \right] \quad (15)$$

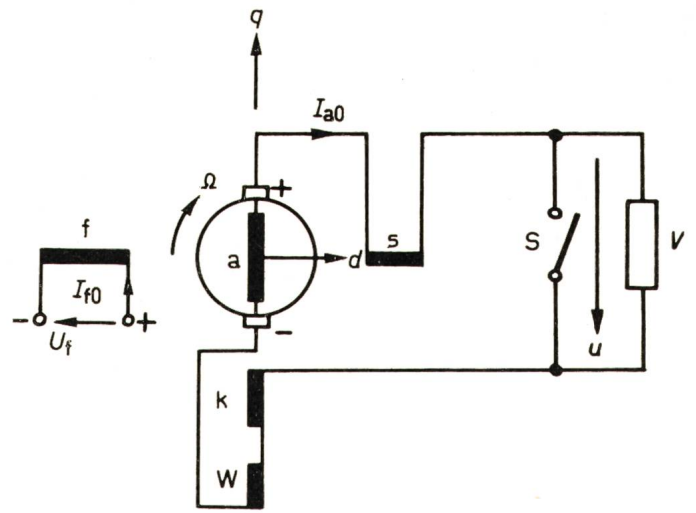


Fig. 1

Gegenwirkende Schaltung

d Längsachse; I_{a0} stationärer Ankerstrom; I_{f0} stationärer Fremderregerstrom; q Querachse; U_f Erregerspannung; u momentane Ankermklemmenspannung; V Verbraucher; Ω Winkelgeschwindigkeit des Ankers

Setzt man Gl. (6) in Gl. (5) ein, so ergibt sich nach dem Einsetzen der folgenden Beziehungen und nach einigen Vereinfachungen

$$U_f = R_f I_{f0} \quad (7)$$

$$U_0 = \Omega M_{af} I_{f0} \quad (8)$$

$$\tau_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (9)$$

$$\tau_a = \frac{L}{R + \Omega M_{as}} \quad (10)$$

$$M_{fs}^2 = k_{fs}^2 L_f L_s \quad (11)$$

$$M = \frac{1}{2\tau_f \tau_a \left(1 - k_{fs}^2 \frac{L_s}{L} \right)} \left(\tau_f + \tau_a - \frac{\Omega M_{af} M_{fs}}{R_f (R + \Omega M_{as})} \right) \quad (12)$$

$$N = M^2 - \frac{1}{\tau_f \tau_a \left(1 - k_{fs}^2 \frac{L_s}{L} \right)} \quad (13)$$

Nach Partialbruchzerlegung und Koeffizientenvergleich der Gl. (14) erhält man die endgültige Gleichung für die Rücktransformation vom Bildbereich auf den Zeitbereich:

Nach Rücktransformation und mit Einsetzen

$$I_{a\infty} = \frac{U_0}{R + \Omega M_{as}} \quad (16)$$

nimmt der transiente Ankerstrom folgenden Ausdruck an:

$$i_a(t) = I_{a\infty} \left[1 - \left(1 - \frac{I_{a0}}{I_{a\infty}} \right) \left\{ \left(\frac{M+N}{2N} \right) [1 - (M-N)\tau_f] e^{-(M-N)t} - \left(\frac{M-N}{2N} \right) [1 - (M+N)\tau_f] e^{-(M+N)t} \right\} \right] \quad (17)$$

Erfolgt der Kurzschluss im Leerlauf, so ist in Gl. (17) $I_{a0} = 0$ einzusetzen.

$$i_a(t) = I_{a\infty} \left[1 - \left(\frac{M+N}{2N} \right) [1 - (M-N)\tau_f] e^{-(M-N)t} + \left(\frac{M-N}{2N} \right) [1 - (M+N)\tau_f] e^{-(M+N)t} \right] \quad (18)$$

Aus Gl. (17) lässt sich der Zeitpunkt $t_{\max}$ ableiten:

$$t_{\max} = \frac{1}{2N} \ln \frac{1 - (M+N)\tau_f}{1 - (M-N)\tau_f} \quad (19)$$

Die Zeit zum Erreichen des höchsten Kurzschlußstromes ist also unabhängig vom stationären Belastungsstrom. Dagegen ist aus Gl. (17) zu erkennen, dass der höchste Kurzschlußstrom vom Belastungsstrom abhängt. Je grösser die Belastung vor dem Kurzschluss, desto tiefer liegt das Maximum des Kurzschlußstromes.

5.2 Fremderregerstrom

Die angelegte Spannung am Fremderregerkreis wird konstant gehalten. Der Fremderregerstrom vor dem Kurzschluss ist auch konstant. Während der Kurzschlusszeit wird in der Fremderregerwicklung eine transformatorische Spannung von der Reihenschlusswicklung induziert. Der Fremderregerstrom ist nicht mehr gleich I_{f0} . Der transiente Fremderregerstrom lässt sich aus Gl. (6) folgenderweise ausdrücken:

$$i_f(p) = \frac{U_f + p L_f I_{f0}}{p(R_f + p L_f)} - \frac{M_{fs} I_{a0}}{R_f + p L_f} + \frac{p M_{fs} i_a(p)}{R_f + p L_f} = i_{f1}(p) - i_{f2}(p) + i_{f3}(p) \quad (20)$$

$$i_{f1}(p) = \frac{I_{f0} R_f (1 + p\tau_f)}{p R_f (1 + p\tau_f)} = \frac{I_{f0}}{p} \quad (21)$$

Nach Rücktransformation ergibt sich: der stationäre Fremderregerstrom:

$$i_{f1}(t) = I_{f0} \quad (22)$$

$$i_{f2}(p) = \frac{M_{fs} I_{a0}}{R_f} \frac{1}{1 + p\tau_f} \quad (23)$$

Nach Rücktransformation:

$$i_{f2}(t) = \frac{M_{fs} I_{a0}}{R_f \tau_f} e^{-\frac{t}{\tau_f}} \quad (24)$$

Nach Einsetzen der Gl. (14) im Ausdruck für $i_{f3}(p)$ in Gl. (20) erhält man nach Partialbruchzerlegung und Koeffizientenvergleich:

$$i_{f3}(p) = \frac{M_{fs} (M^2 - N^2) I_{a0}}{R_f} \left[\frac{1}{\tau_f (M^2 - N^2)} \frac{1}{p + \frac{1}{\tau_f}} + \right] \quad (25)$$

$$+ \frac{1}{2N} \left(\frac{U_0}{(R + \Omega M_{as}) I_{a0}} - 1 \right) \left(\frac{1}{p + M - N} - \frac{1}{p + M + N} \right) \Bigg]$$

Nach Rücktransformation und mit Einsetzen der Gl. (16):

$$i_{f3}(t) = \frac{M_{fs} (M^2 - N^2)}{R_f} \left[\frac{I_{a0}}{\tau_f (M^2 - N^2)} e^{-\frac{t}{\tau_f}} + \frac{1}{2N} (I_{a\infty} - I_{a0}) \left[e^{-(M-N)t} - e^{-(M+N)t} \right] \right] \quad (26)$$

Der transiente Fremderregerstrom ist somit:

$$i_f(t) = i_{f1}(t) - i_{f2}(t) + i_{f3}(t) = I_{f0} + \frac{M_{fs}}{R_f} \cdot \frac{M^2 - N^2}{2N} (I_{a\infty} - I_{a0}) \left[e^{-(M-N)t} - e^{-(M+N)t} \right] \quad (27)$$

Erfolgt der Kurzschluss im Leerlauf, so ist $I_{a0} = 0$:

$$i_f(t) = I_{f0} + \frac{M_{fs}}{R_f} \cdot \frac{M^2 - N^2}{2N} I_{a\infty} \left[e^{-(M-N)t} - e^{-(M+N)t} \right] \quad (28)$$

mit

$$t_{\max} = \frac{1}{2N} \ln \frac{M+N}{M-N} \quad (29)$$

Der Zeitpunkt, wann der transiente Fremderregerstrom den maximalen Wert hat, ist ebenfalls wie beim Ankerstrom unabhängig von der Belastung. Dagegen hängt der maximale Strom in gleicherweise wie beim Ankerstrom von der Belastung ab.

Falls die Gleichstrommaschine keine Kompensationswicklung hat, bleiben die Ausdrücke für $i_a(t)$, $i_f(t)$ und $t_{\max}$ gleich wie in den Gleichungen (17), (18), (19) und (27), (28), (29). Lediglich sind die Werte der folgenden Konstanten verschieden. In diesem Fall:

$$R_1 = R_s + R_a + R_w \quad (30)$$

$$L_1 = L_s + L_a + L_w - 2M_{aw} \quad (31)$$

$$\tau_{a1} = \frac{L_1}{R_1 + \Omega M_{as}} \quad (32)$$

M_1 = wie Gl. (12) mit den Werten von R_1 , L_1 und τ_{a1}

N_1 = wie Gl. (13) mit den Werten von L_1 , τ_{a1} und M_1

$$I_{a\infty 1} = \frac{U_0}{R_1 + \Omega M_{as}} \quad (33)$$

Falls die Gleichstrommaschine keine der beiden Hilfswicklungen hat, sind die Ausdrücke für $i_a(t)$, $i_f(t)$ und $t_{\max}$ gleich wie in den Gleichungen (17), (18), (19) und (27), (28), (29). Nur die folgenden Konstanten nehmen verschiedene Werte an:

$$R_2 = R_s + R_a \quad (34)$$

$$L_2 = L_s + L_a \quad (35)$$

$$\tau_{a2} = \frac{L_2}{R_2 + \Omega M_{as}} \quad (36)$$

$M_2 =$ wie Gl. (12) mit den Werten von R_2, L_2 und τ_{a2}
 $N_2 =$ wie Gl. (13) mit den Werten von L_2, τ_{a2} und M_2

$$I_{a\infty 2} = \frac{U_0}{R_2 + \Omega M_{as}} \quad (37)$$

In Abwesenheit der Wendepolwicklung wird aber die 2. Voraussetzung nicht erfüllt. Man muss die verzögerte Stromwendung dann durch eine in Serie geschaltete Spule auf der d -Achse darstellen [1]¹⁾.

5.3 Stromgleichungen bei mitwirkender Schaltung

Sieht man Fig. 2 und Gl. (1) an, so stellt man bei mitwirkender Schaltung fest, dass gegenüber der gegenwirkenden Schaltung das Vorzeichen von M_{fs} und M_{as} , erstens ohne Berücksichtigung der Ankerrückwirkung, umgekehrt werden muss. Gemäss der 5. Voraussetzung darf aber M_{as} gleich Null gesetzt werden.

Eine Gleichstrommaschine mit beiden Hilfswicklungen wird nun folgende Ausdrücke von τ_a, M, N , und $I_{a\infty}$ haben:

$$\tau_a' = \frac{L}{R} \quad (38)$$

$$M' = \frac{1}{2\tau_f \tau_a' \left(1 - k_{fs}^2 \frac{L_s}{L}\right)} \left\{ \tau_f + \tau_a' + \frac{\Omega M_{af} M_{fs}}{R_f R} \right\} \quad (39)$$

$$N' = M'^2 - \frac{1}{\tau_f \tau_a' \left(1 - k_{fs}^2 \frac{L_s}{L}\right)} \quad (40)$$

$$I_{a\infty} = \frac{U_0}{R} \quad (41)$$

Die Gleichungen für $i_a(t)$ und $i_f(t)$ sind die gleichen wie Gl. (17), (18) und (27), (28). Zur Auswertung dieser Gleichungen für die mitwirkende Schaltung muss man die Konstanten M, N und $I_{a\infty}$ durch M', N' und $I_{a\infty}$ ersetzen. Nach der 5. Voraussetzung erreicht der Ankerstrom den maximalen Wert nach unendlich langer Zeit. Somit:

$$t_{\max} = \infty \quad (42)$$

$$i_a(\infty) = I_{a\infty} \quad (43)$$

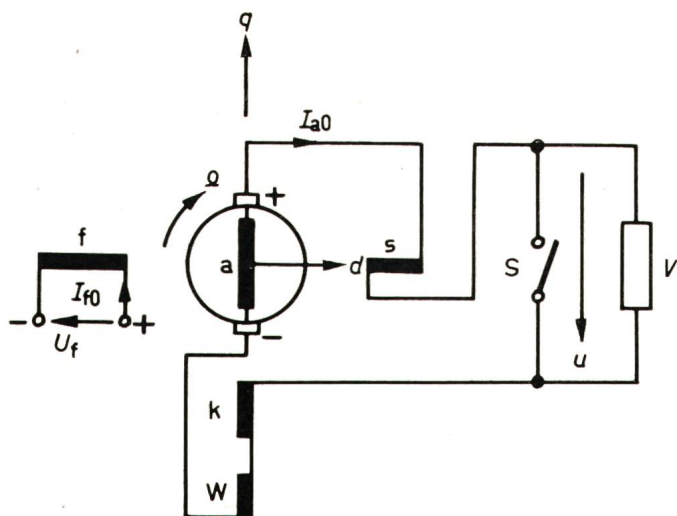


Fig. 2
Mitwirkende Schaltung
Bezeichnungen siehe Fig. 1

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Auf Grund der Umpolung der Reihenschlusswicklung nimmt der transiente Fremderregerstrom zunächst ab, erreicht ein Minimum und nimmt dann wieder bis auf den stationären Wert zu. Die Gleichung für $t_{\min}$ ist gleich wie Gl. (29):

$$t_{\min} = \frac{1}{2N} \ln \frac{M + N}{M - N} \quad (44)$$

Im Falle die Gleichstrommaschine eine oder keine Hilfswicklung hat, sind die Überlegungen und die Gleichungen gleich wie bei gegenwirkender Schaltung. Die Konstanten müssen gleicherweise wie in den Gleichungen (38), (39), (40) und (41) berechnet werden. Dabei muss man jeweils die veränderten Werte von R und L berücksichtigen.

Beispiel

Ein 6-poliger Gleichstrommotor mit Wendepolwicklung und folgenden Hauptdaten wurde als Beispiel genommen [2]:

150 PS, 500 V, 450 U./min

Die Selbst- und Rotationsinduktivitäten wurden gemäss [3 bis 6] berechnet. In Tabelle I sind die konstanten Grössen, die zur Berechnung des transienten Verlaufs der Anker- und Fremderregerströme verwendet wurden, zusammengestellt.

Zusammenstellung der Maschinenkonstanten

Tabelle I

1.	$R_a = 0,073 \, \Omega$
2.	$R_s = 0,0032 \, \Omega$
3.	$R_w = 0,0131 \, \Omega$
4.	$R_f = 230,5 \, \Omega$
5.	$L_a = 0,0087 \, \text{H}$
6.	$L_s = 0,0014 \, \text{H}$
7.	$L_w = 0,0063 \, \text{H}$
8.	$L_f = 706,0 \, \text{H}$
9.	$M_{af} = 7,43 \, \text{H}$
10.	$M_{as} = 0,01 \, (0,0) \, \text{H}$
11.	$M_{fs} = 0,5755 \, (-0,5755) \, \text{H}$
12.	$M_{aw} = 0,006 \, \text{H}$
13.	$\Omega = 47,1 \, \text{s}^{-1}$
14.	$I_{f0} = 2,1692 \, \text{A}$
15.	$I_{aN} = 243,0 \, \text{A}$
16.	$U_f = 500,0 \, \text{V}$
17.	$U_0 = 499,6 \, \text{V}$

Die Werte in Klammern gelten als die Konstanten für die mitwirkende Schaltung der Reihenschluss-erregung

Der Verlauf des Ankerstromes bis zu 1 s ist der Fig. 3 zu entnehmen. Die Ordinate stellt $i_a(t)$ bezogen auf I_{aN} dar. Bei jeder Schaltung wurden Kurzschlussberechnungen für zwei Betriebszustände der Gleichstrommaschine ausgeführt. Sie sind:

- a) Leerlauf (Fig. 3, unten)
 - und b) Belastung entsprechend dem Nennankerstrom (Fig. 3, oben)
- Bei der gegenwirkenden Schaltung sind:

$$I_{a\infty} = 891,6652 \, \text{A}$$

und

$$\frac{I_{a\infty}}{I_{aN}} = 3,6694$$

Bei der mitwirkenden Schaltung sind:

$$I_{a\infty} = 5594,6249 \, \text{A}$$

und

$$\frac{I_{a\infty}}{I_{aN}} = 23,0231$$

(nicht ersichtlich aus Fig. 3)

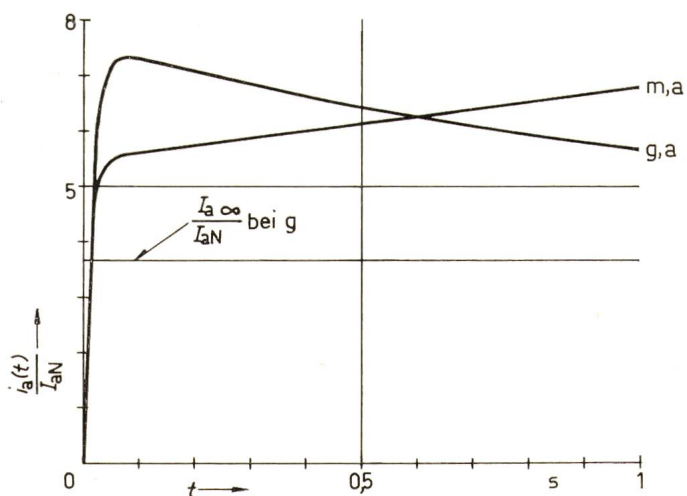
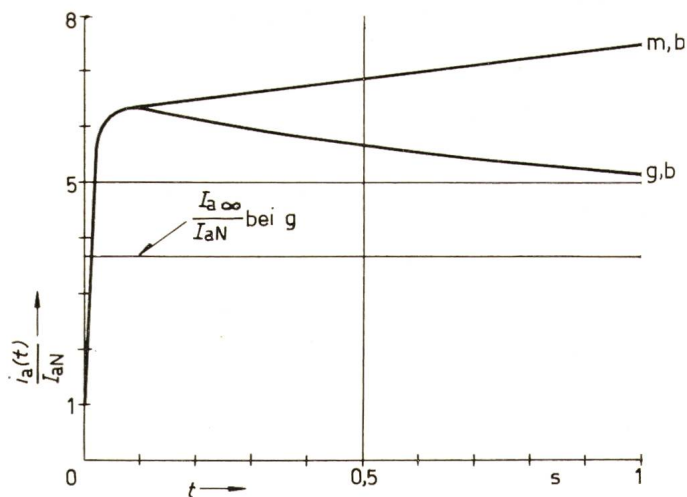


Fig. 3

Zeitlicher Verlauf der Ankerströme

a : $I_{a0} = 0$; b : $I_{a0} = I_{aN}$; m : bei der mitwirkenden Schaltung;
g : bei der gegenwirkenden Schaltung
 i_a Momentanwert des Ankerstromes; t Zeit

Die errechneten Ströme bei der gegenwirkenden Schaltung liegen eher etwas höher als sie in der Wirklichkeit liegen würden, denn die Ankerrückwirkung, wenn auch klein, ist bei dieser Schaltung nicht berücksichtigt worden. Bei der mitwirkenden Schaltung ist jedoch die Berechnung bis etwa 3 bis 4-fachem Nennankerstrom der Wirklichkeit getreu. Darüber hinaus sind die errechneten Werte grösser, da die Ankerrückwirkung mit zunehmendem Ankerstrom stärker als die mitwirkende Durchflutung anwachsen wird. Die Dauerkurzschlußströme werden ebenfalls aus genannten Gründen tiefer liegen als die berechneten Werte.

Der weitere Verlauf der Ankerströme bis zu 10 s ist aus der Tabelle II ersichtlich. Die Tabelle zeigt, mit welcher Schnelligkeit der transiente Kurzschlußstrom seinem Endwert zustrebt. Dieser Endwert ist in der letzten Zeile der Tabelle eingetragen worden.

Der Verlauf des Fremderregerstromes bis zu 1 s zeigt Fig. 4. Die Ordinate stellt $i_f(t)$ bezogen auf I_{f0} dar. Wie beim Ankerstrom wurden auch die Erregerströme bei den gleichen Belastungszuständen berechnet. Bei beiden Schaltungen gelten ferner:

$$\text{bei } t = 0: i_f(0) = I_{f0}$$

und

$$\text{bei } t = \infty: i_f(\infty) = I_{f0}$$

Der transiente Fremderregerstrom ist im ganzen Zeitbereich, d.h. von $t = 0$ bis $t = \infty$, grösser als I_{f0} bei gegenwirkender und kleiner als I_{f0} bei mitwirkender Schaltung.

Tabelle III zeigt den weiteren Verlauf der Fremderregerströme bis zu 10 s. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, wie langsam der tran-

Zeitlicher Verlauf der Ankerströme bis $t = 10$ s

Tabelle II

t	$\frac{i_a(t)}{I_{aN}}$			
	gegenwirkende Schaltung		mitwirkende Schaltung	
	$I_{a0} = 0$	$I_{a0} = I_{aN}$	$I_{a0} = 0$	$I_{a0} = I_{aN}$
s				
0	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000
1	5,6565	5,1150	6,7697	7,4756
2	4,6882	4,4106	7,9833	8,6366
3	4,1918	4,0494	9,1063	9,7108
4	3,9372	3,8643	10,1455	10,7048
5	3,8067	3,7693	11,1070	11,6246
6	3,7398	3,7206	11,9968	12,4757
7	3,7055	3,6957	12,8201	13,2633
8	3,6879	3,6829	13,5819	13,9920
9	3,6789	3,6763	14,2869	14,6664
10	3,6743	3,6729	14,9392	15,2903
∞	3,6694	3,6694	23,0231	23,0231

siente Fremderregerstrom seinen stationären Wert wieder erreicht. Die letzte Zeile dieser Tabelle zeigt eben diesen bezogenen Endwert.

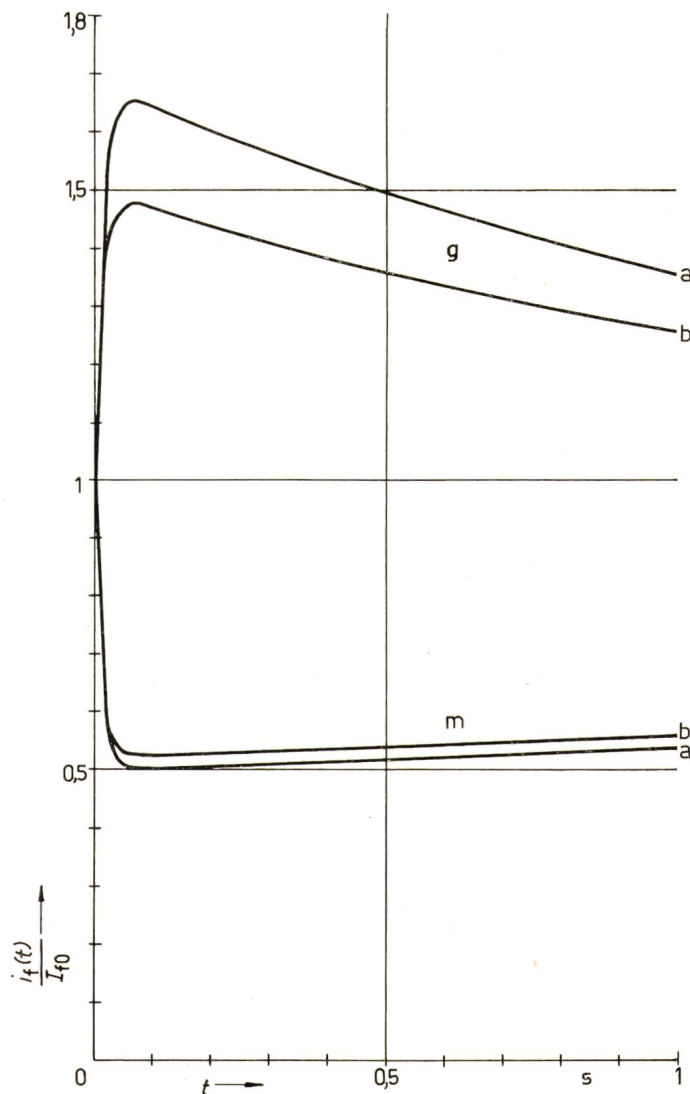


Fig. 4

Zeitlicher Verlauf der Fremderregerströme

i_f Momentanwert des Fremderregerstromes; I_{f0} stationärer Fremderregerstrom

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Tabelle III

t s	$\frac{i_t(t)}{I_{t0}}$			
	gegenwirkende Schaltung		mitwirkende Schaltung	
	$I_{a0} = 0$	$I_{a0} = I_{aN}$	$I_{a0} = 0$	$I_{a0} = I_{aN}$
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
1	1,3549	1,2583	0,5372	0,5573
2	1,1820	1,1324	0,5718	0,5904
3	1,0933	1,0679	0,6037	0,6210
4	1,0478	1,0348	0,6333	0,6493
5	1,0245	1,0178	0,6607	0,6755
6	1,0126	1,0091	0,6860	0,6997
7	1,0064	1,0047	0,7095	0,7221
8	1,0033	1,0024	0,7312	0,7429
9	1,0017	1,0012	0,7513	0,7621
10	1,0009	1,0006	0,7698	0,7798
∞	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

6. Schlussbemerkungen

Für eine genauere Berechnung der Kurzschlußströme soll vor allem die Nichtlinearität im magnetischen Zustand des Eisens berücksichtigt werden. Diese Nichtlinearität kommt im wesentlichen zweimal zur Betrachtung vor. Einerseits die

Ankerrückwirkung und andererseits die verschiedenen Induktivitäten der Wicklungen werden von der Nichtlinearität in der Leerlaufkennlinie der Gleichstrommaschine beeinflusst. Diese Faktoren können leider in einer geschlossenen analytischen Lösung ständig im richtigen Verhältnis nicht betrachtet werden. Verschiedene numerische Rechenverfahren, die ziemlich aufwendig und den Studierenden im ersten Blick oft unübersichtlich sind, können für die genaueren numerischen Untersuchungen der Ausgleichvorgänge in elektrischen Maschinen verwendet werden.

Literatur

- [1] D. O'Kelly and S. Simmons: Introduction to generalized electrical machine theory. London/New York/Toronto/Sydney, McGraw-Hill, 1968.
- [2] A. E. Clayton: The performance and design of direct current machines. Second edition. London, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd., 1945.
- [3] H. Weh: Elektrische Netzwerke und Maschinen. Matrizendarstellung. B. I. Hochschultaschenbücher 108/108a. Mannheim/Zürich, Bibliographisches Institut, 1968.
- [4] R. Richter: Elektrische Maschinen. 1. Band: Allgemeine Berechnungselemente. Die Gleichstrommaschinen. 3. Auflage. Basel/Stuttgart, Birkhäuser-Verlag, 1967.
- [5] J. Klamt: Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1962.
- [6] M. Liwischitz: Die elektrischen Maschinen. Band 3: Berechnung und Bemessung. Leipzig/Berlin, Teubner-Verlag, 1934.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. B. B. Palit, Institut für Elektrische Maschinen der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Sonneggstrasse 3, 8006 Zürich.

JEAN MAURICE EMILE BAUDOT

1845 – 1903

Bei der Übertragung von Information spielen neben der Übertragungsgeschwindigkeit — Läufer, Reiter, Schallgeschwindigkeit für Rufzeichen, Lichtgeschwindigkeit für Lichtzeichen und elektrische Signale — noch eine Reihe anderer Fakten eine Rolle.

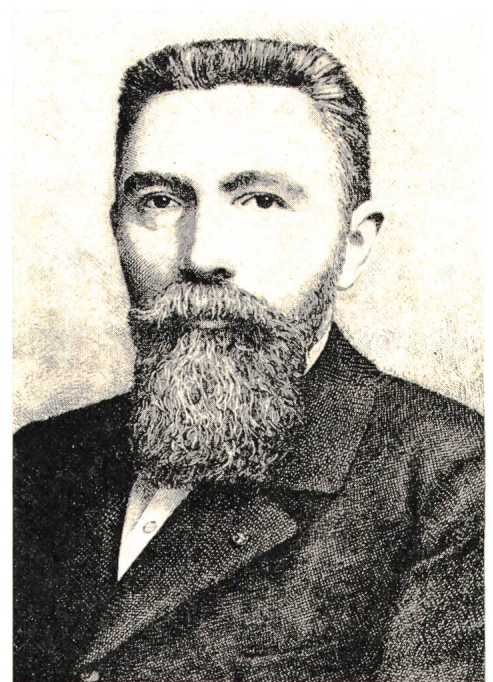
Mit den schon bei den Römern üblichen Rauch- und Feuerzeichen konnte pro Minute etwa 1 Zeichen übertragen werden. Chappes Zeigertelegraph (1793) brachte es auf 3...5 Worte/min. Der erste elektrische Telegraph der Professoren Gauss und Weber (1833) gestattete lediglich 1 Wort/min, aber er hatte den Vorteil praktisch unbegrenzter Reichweite. Steinheil verbesserte die Leistung auf 6 Worte/min (1834). Dann brachte der Morsetelegraph (1844) mit 133 und der Hughesche Schnelltelegraph (1855) mit rund 400 Worten/min entscheidende Verbesserungen zustande. Eine Telegraphenleitung kostete aber viel Geld. Trotz gesteigerter Informationsmenge, die dank der neuen Mittel über eine Leitung befördert werden konnte, war aber die Ausnützung der Telegraphenleitungen schlecht, denn zwischen den einzelnen Signalen und Depeschen gab es immer noch grosse Lücken, in denen die Leitung «ungenützt» war.

Das brachte den 1845 in Magneux (Marne) geborenen Baudot auf die Idee, die Leitung mehrfach auszunützen, indem mehrere Stationen an die gleiche Leitung angeschlossen und verschiedene Depeschen verschachtelt über diese geschickt werden. Dank einer genauen Synchronisierung gelang es, die verschiedenen Depeschen an den Empfangsorten wieder getrennt aufzufangen.

Baudot war 1869 bei der französischen Telegraphenverwaltung eingetreten und schon im gleichen Jahr überraschte er diese mit der Patentanmeldung für einen «Typendruker mit Verteiler». Fünf Jahre später wurde dieser Apparat zum Verkehr zugelassen und am 12. November 1877 fanden auf der Strecke Paris-Bordeaux erfolgreiche Versuche statt. Anfänglich arbeiteten die Baudot-Apparate mit Zweifachausnützung, später gelang es ihm Vielfachschaltungen (bis 4). Die Einrichtungen wurden an der Weltausstellung von 1878 und an der berühmten Elektrizitätsausstellung von 1881, beide in Paris, gezeigt.

Baudot schuf auch das sog. 5er-System, bei dem er statt mit 40 mit nur 5 Tasten auskam. Dieses System wird heute noch gebraucht. Baudots Erfindung hat nicht nur in Frankreich, sondern weltweit Anwendung gefunden für stark belegte Leitungen. Auch in der Schweiz war es von 1896...1944 im Gebrauch, wurde dann aber durch modernere Systeme abgelöst.

Am 28. März 1903 starb Baudot in Sceaux. Sein Andenken lebt auch weiter in der international festgelegten Einheit für die Informationsgeschwindigkeit: 1 Baud = 1 bit/s.



Larousse. Paris

H. Wüger