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: 76 (1985)

Heft: 9

Artikel: Statische Entregungsschaltungen für elektrische Maschinen

Autor: Maier, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904595

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: 09.12.2025

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

Statische Entregungsschaltungen für elektrische Maschinen

F. Maier

Nach einem Überblick zur Entwicklung der Erregersysteme für Synchronmaschinen werden die Entregungsschaltungen erörtert, und als letzte Entwicklung wird ein schalterloses Schnellentregungssystem vorgestellt, welches alle Anforderungen hinsichtlich Steueraufwand und Zuverlässigkeit erfüllt. Im letzten Abschnitt werden schliesslich Dimensionierungsergebnisse für eine solche Schaltung mitgeteilt.

L'article donne un aperçu du développement des systèmes d'excitation pour machines synchrones ainsi que des circuits de désexcitation. Il présente ensuite le développement le plus recent, un système de désexcitation rapide sans commutateur, qui satisfait à toutes les exigences de simplicité de la commande et de fiabilité. A la fin les résultats de dimensionnement d'un tel circuit sont indiqués.

Adresse des Autors

Dipl.-Ing. Dr. techn. *F. Maier*, Winzerstrasse 42B, 5430 Wettingen.

1. Einleitung und Übersicht

Seit Charles Brown im Jahre 1898 seinen ersten 6poligen Turbogenerator von 100 kVA in Betrieb gesetzt hat, sind die Einheitsleistungen dieser Maschinen auf 1300 bis 1500 MVA, d.h. auf das 15 000fache angestiegen. Entsprechend haben die Anforderungen an die Erreger- und Entregungsschaltungen zugenommen, welche im wesentlichen die Erregungs- und Entregungsgeschwindigkeit [1] betreffen. Die dazu erforderliche Entwicklung wurde durch die Halbleitertechnik ermöglicht.

2. Anforderungen an das Erregersystem und die Entregungsschaltungen

Bei Parallelbetrieb einer Synchronmaschine müssen, bedingt durch normale und störungsverursachte Betriebsänderungen (Zu- und Abschaltung von Verbrauchern), die Maschinenspannung und Blindleistung entsprechend den Lastverhältnissen geregelt werden. Damit können die statische und dynamische Stabilität verbessert werden [2; 3]. Bei Stromrichtererregung können sehr grosse Regelgeschwindigkeiten erreicht werden. Die Zeitkonstante des Erregersystems hat eine wesentliche Bedeutung für die Stabilität der Regelung. Bei schweren Netzstörungen (z.B. Kurzschluss) wird die Stabilität der Leistungsübertragung massgeblich durch die Erregungsgeschwindigkeit beeinflusst.

Bei manchem Störungsfall wird eine Auslösung des Schutzes die Entregung der Maschine und ihre Trennung vom Netz bewirken. Besondere Anforderungen werden bei inneren Fehlern an die Entregungsgeschwindigkeit gestellt. Durch Schnellentregung ergibt sich eine sinnvolle Ergänzung der übrigen Schutzmassnahmen zur Begrenzung von Fehlerwirkungen [4; 5; 6]. Dabei müssen die vorgegebenen Spannungsgrenzen im Erregerkreis eingehalten werden.

3. Erregerschaltungen bei Stromrichterspeisung

Die Entwicklung der Halbleitertechnik leitete vor gut 20 Jahren die dritte Entwicklungsphase der Erregersysteme ein [7; 8]; sie löste die Quecksilberdampf-Stromrichter ab, welche ihrerseits erstmals Erregersysteme ohne mechanische Stromwender ermöglicht hatten.

In Figur 1 sind vereinfachte Prinzipschaltbilder heute verwendeter Erregerschaltungen dargestellt. Ihre Wirkungsweise wurde in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben.

4. Herkömmliche kombinierte Entregungsschaltungen mit Schaltern und elektrischen Ventilen

Im wesentlichen werden drei Entregungsverfahren verwendet, nämlich Selbstentregung, Entregung über einen Widerstand und Entregung durch Gegenspannung im Erregerkreis [5]. Diese Entregungsmethoden ergeben entsprechend ihrer Wirkung verschiedene Entregungszeiten. Für Erregersysteme mit umlaufender Stromrichtererregung (Fig. 1d) kommt Selbstentregung zur Anwendung. Nur bei extrem schneller Entregung kann die Energie an der Kurzschlussstelle massgeblich abgesenkt werden. In der Figur 2 sind einige Entregungsschaltungen mit mechanischen Schaltern dargestellt. Die Schaltung nach Figur 2b ermöglicht nur Selbstentregung

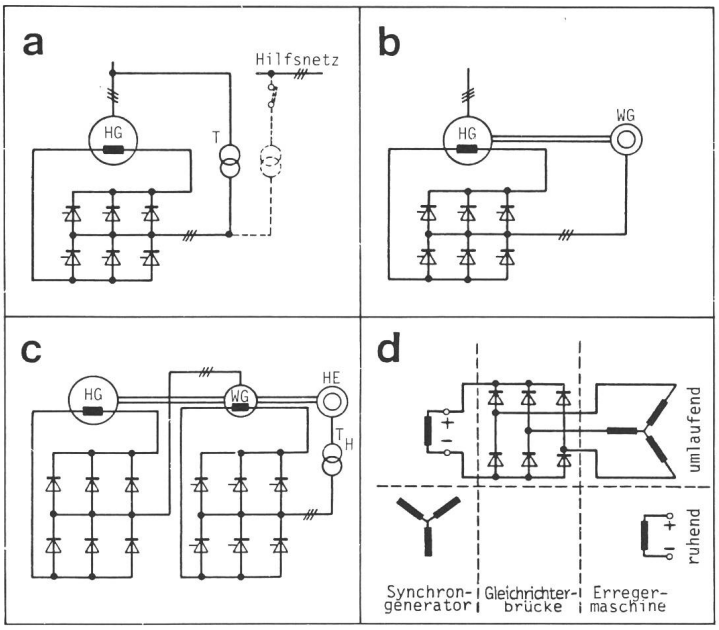

Fig. 1 Erregersysteme für Synchronmaschinen
(vereinfachte Prinzipschaltbilder)

a Direkterregung und Fremderregung mit feststehendem, gesteuertem Halbleiterstromrichter
b Indirekte Erregung mit Wellengenerator und feststehendem, gesteuertem Halbleiterstromrichter
c Indirekte zweistufige Erregung mit Wellengenerator und Hilfserregermaschine
d Wellengenerator mit umlaufender Erregung

HG Hauptgenerator
WG Wellengenerator
HE Hilfserregermaschine
T Erregertransformator
T_H Hilfserregertransformator

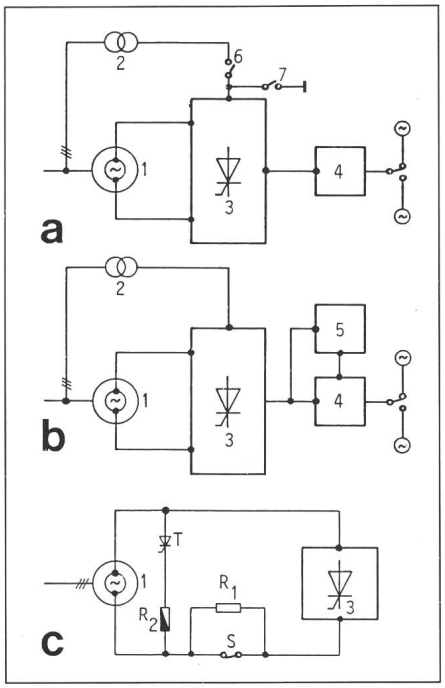

Fig. 3 Kombinierte Entregungsschaltungen mit Schaltern und Steuereingriffen

a Entregung durch Kurzschluss der Speisespannung und Freizündung der Stromrichterventile
b Entregung über die Stromrichterventile durch Steuereingriffe (Impulssperre, Impulsgenerator)
c Entregung über einen Polarisierwiderstand und Freilaufthyristor
1 Synchrongenerator
2 Erregertransformator
3 Erregerstromrichter
4 Regelelektronik
5 Impulslogik
6 Schalter (Öffner)
7 Schalter (Schliesser)
R_1 Polarisierwiderstand
S Schalter

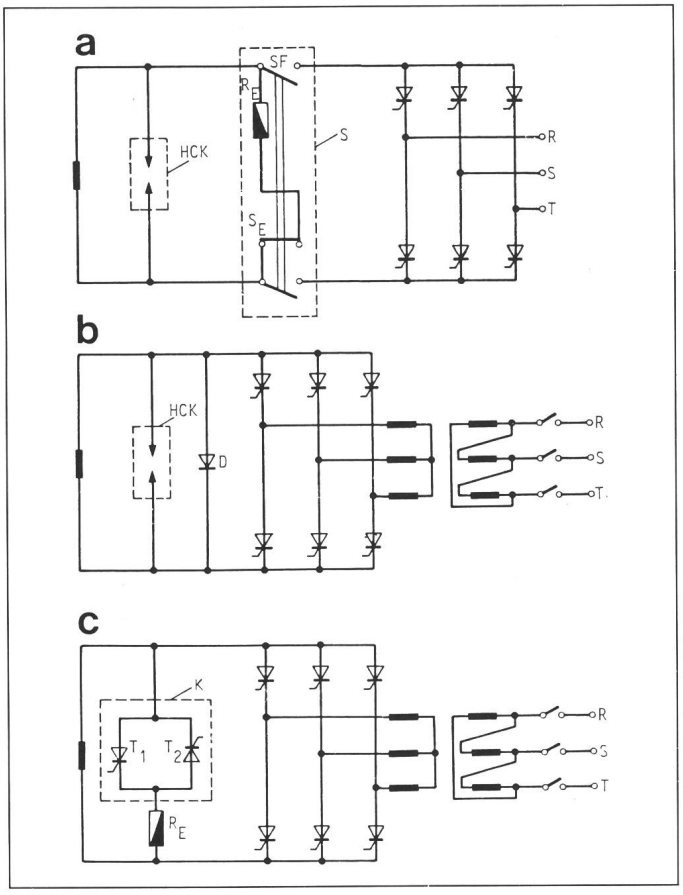

Fig. 2 Herkömmliche kombinierte Entregungsschaltungen mit Schaltern und elektrischen Ventilen

a Abschaltung im Gleichstromkreis und Widerstandsentregung
b Abschaltung im Wechselstromkreis und Selbstentregung über eine Freilaufdiode
c Abschaltung im Wechselstromkreis und Widerstandsentregung über einen gesteuerten Freilaufkreis

HCK Schutzfunkenstrecke
R_E Entregungswiderstand
S Gleichstromschalter
S_E Entregungskontakt
D Freilaufdiode
K Halbleiterkurzschliesser
T_1 Entregungsthyristor
T_2 Überspannungsthyristor

und hat damit den Nachteil langer Entregungszeit. In Figur 3 sind weitere Entregungsschaltungen dargestellt. Sie werden durch Kombinationen aus Schaltern und Steuereingriffen gebildet. Bei direkter statischer Erregung (Fig. 1a) wird überwiegend im Gleichstromkreis geschaltet und der über die Feldwicklung weiterfliessende Strom wird durch den Schalter auf einen nichtlinearen oder auch linearen Entregungswiderstand kommutiert. Dadurch kann durch entsprechende Bemessung des Widerstandes Schnellentregung erreicht werden.

5. Elektronische Entregungsschaltungen mit minimalen Steuereingriffen und Komponentenaufwand

Infolge der Leistungsentwicklung im Erregerkreis wurden bei Gross-

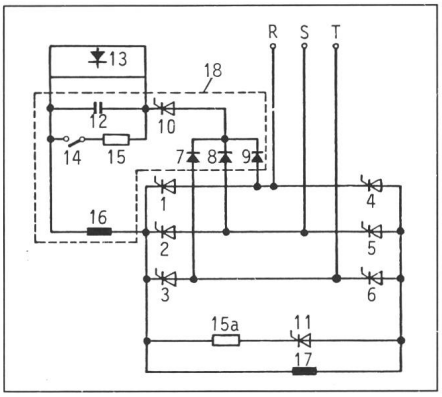

Fig. 4 Lösch- und Entregungsschaltung mit getrenntem Lösch- und Freilaufkreis

1, 2, 3, 4, 5, 6	Stromrichterventile
7, 8, 9	Entkopplungsdioden
10	Löschthyristor
11	Freilaufthyristor
12	Löschkondensator
13	Speisegleichrichter für 12
14	Entladekontakt für 12
15	Entladewiderstand für 12
15a	Entregungswiderstand
16	Kommutierungsdrossel
17	Feldwicklung
18	Löschkreis

generatoren die Grenzen des mechanischen Gleichstromschalters erreicht, und es erfolgte die Entwicklung einer schalterlosen Entregungsschaltung mit Möglichkeit zur Schnellentregung [8]. Nachstehend werden verschiedene Entwicklungsstufen dieser Schaltung beschrieben.

5.1 Lösch- und Entregungsschaltung mit getrenntem Lösch- und Freilaufventil

Diese Schaltung ist in der Figur 4 dargestellt. Sie ergibt sich durch Anwendung des Prinzips der Zwangslöschung, wie sie aus der Wirkungsweise von Gleichstromstellern bekannt ist. Ein Löschkreis (18) wird über die Entkopplungsdioden 7, 8, 9 zu den Brükkenventilen 1, 2, 3 parallel geschaltet. Diese wirken bei dieser Schaltung als Schaltthyristoren. Bei Zündung des Löschthyristors 10 und des Freilaufthyristors 11 entlädt sich der Löschkondensator 12. Dabei schwingt der Strom über die Brückenventile, deren Zündimpulse unterdrückt werden, und der Laststrom kommutiert auf den Löschkreis. Der Kondensator wechselt nach einer gewissen Zeit seine Polarität (Umladung), und schliesslich kommutiert der Feldstrom in den Ventilen der zweiten Brückenhälfte auf den Freilaufthyristor, mit welchem in Reihe ein Entregungswiderstand liegt. Somit erfolgt der Stromabbau nach Massgabe der Zeitkonstante des Entregungskreises. Bei richtiger Bemessung der Schaltung fliesst der Strom bereits nach etwa 2 ms über den Entregungskreis, und die Brücke ist stromlos.

5.2 Lösch- und Entregungsschaltung mit gemeinsamem Lösch- und Freilaufventil

Die Figur 5 zeigt eine Weiterentwicklung der Schaltung, wobei die Funktionen des Lösch- und Freilaufventils in einem einzigen Ventil vereinigt wurden. In der Figur 6 sind die Phasen der Stromkommutierung für einen Lösch- und Entregungsvorgang dargestellt. Da der Strom gleichzeitig in mehreren Maschen fliesst, wird der Schalt- und Kommutierungsvorgang durch simultane Differentialgleichungen beschrieben.

Kommutierungsphase 1 (t_0 ... t_1): Durch Zündung des Löschthyristors 10 wird der Abschalt- und Kommutierungsvorgang eingeleitet. Der Strom kommutiert von dem in einer Brükkenhälfte z.B. allein leitenden Ventil 3 auf die Entkopplungsdioden 7, 9 und den Löschthyristor 10. Im Zeitpunkt t_1 ($i_c = I_d$) löscht das Ventil 3 und der volle Gleichstrom fliesst über das

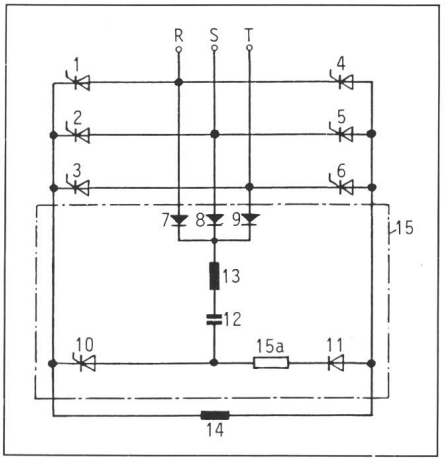

Fig. 5 Lösch- und Entregungsschaltung mit gemeinsamem Lösch- und Freilaufventil

11 Freilauf- und Entkopplungsdiode
15 Thyristorschalter und Freilaufkreis

Löschventil 10. Für die Knoten A und B gelten die Stromgleichungen

$$i_2 = i_3 + i_4 \quad (1a)$$

$$i_2 = i_c + i_1 \quad (1b)$$

Kommutierungsphase 2 (t_1 ... t_2): Der Strom kommutiert natürlich vom Ventil 9 auf das Ventil 7. Im Zeitpunkt $t_1(0)$ wird der Kondensator durch den

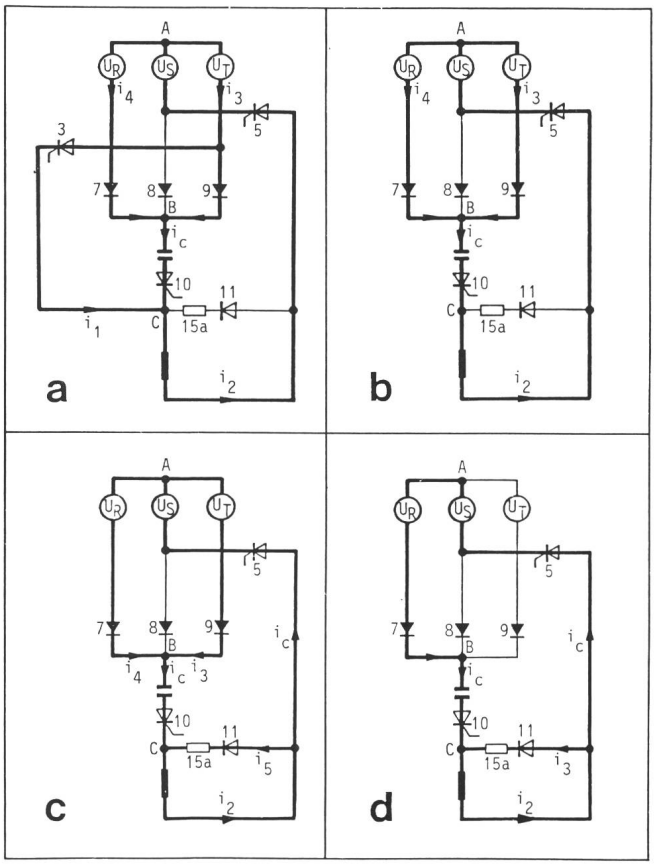

Fig. 6
Phasen der Stromkommutierung bei einem Abschalt- und Entregungsvorgang

a Kommutierungsphase 1: $t = t_0 ... t_1$
b Kommutierungsphase 2: $t = t_1 ... t_2$
c Kommutierungsphase 3: $t = t_2 ... t_3$
d Kommutierungsphase 4: $t = t_3 ... t_4$

Stromfluss $i_c = I_d$ umgepolt. Für die Knoten A und B gelten die Stromgleichungen

$$i_2 = i_3 + i_4 \quad (2a)$$

$$i_2 = i_c \quad (2b)$$

Kommutierungsphase 3 (t_2 ... t_3): Im Zeitpunkt t_2 beginnt der Strom auf die Freilaufdiode 11, d.h. auf den Entregungskreis zu kommutieren. Im Zeitpunkt t_3 ist die Kommutierung des Stromes vom Ventil 9 auf das Ventil 7 beendet. Für die Knoten A, B, C gelten wieder die Stromgleichungen

$$i_2 = i_3 + i_4 \quad (3a)$$

$$i_c = i_3 + i_4 \quad (3b)$$

$$i_2 = i_c + i_5 \quad (3c)$$

Kommutierungsphase 4 (t_3 ... t_4): Der Strom fliesst in 2 Maschen gemäss der Figur 6d. Die Kommutierung vom Brückenventil 5 ist im Zeitpunkt t_4 beendet, und somit ist die Brücke stromlos. Für den Knoten C gilt die Stromgleichung

$$i_c = i_2 - i_3 \quad (4)$$

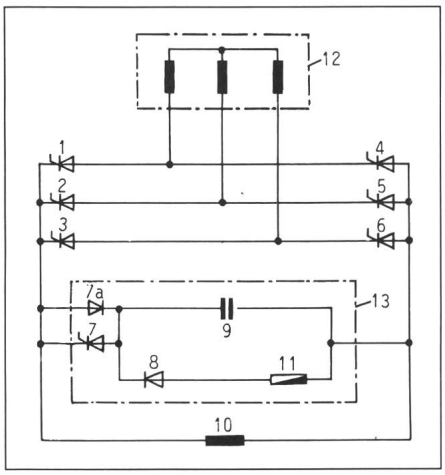

Fig. 7 Lösch- und Entregungsschaltung mit parallel zur Stromrichterbrücke geschaltetem Lösch- und Freilaufkreis

1, 2, 3, 4, 5, 6	Stromrichterventile
7	Lösch- und Freilaufthyristor
7a	Ladediode
8	Entkopplungs- und Freilaufdiode
9	Löschkondensator
10	Feldwicklung
11	Entregungswiderstand
12	Erregertransformator (Sekundärwicklung)
13	Thyristorschalter

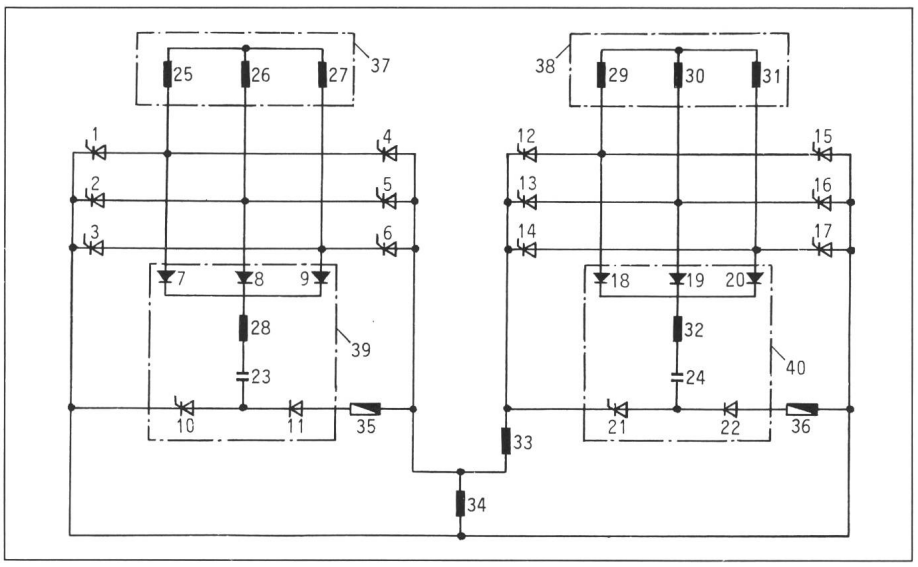

Fig. 8 Lösch- und Entregungsschaltung für Stromrichter in kreisstrombehafteter Gegenparallelschaltung

33 Kreisstromdrossel; 37, 38 Erregertransformatoren; 39, 40 Thyristorschalter mit Freilaufkreis

5.3 Lösch- und Entregungsschaltung mit zur Stromrichterbrücke parallel geschaltetem gemeinsamem Lösch- und Freilaufventil

Die in der Figur 7 dargestellte Schaltung vereinfacht die vorher beschriebene Schaltung, indem sie auf die Entkopplungsdioden verzichtet. Die Stromkommutierung erfolgt direkt auf den Freilaufkreis in einer einzigen Stufe, da der Laststrom in beiden Brükkenhälften gleichzeitig gelöscht wird. Die zum Löschventil 7 antiparallele Diode 7a ermöglicht stets die Aufladung des Löschkondensators 9 mit richtiger Polarität auf die Spitzengleichspannung des Stromrichters. Da der Umschwingvorgang über die sekundären Transformatorwicklungen erfolgt, kann die Löschdrossel entfallen. Allerdings muss bei der Berechnung des Löschkreises beachtet werden, dass die Kommutierung bei sinusförmiger Gegenspannung im Kommutierungskreis erfolgt [9]. Bei dieser Schaltung ergibt sich ein minimaler Komponentenaufwand unter Beachtung der Zuverlässigkeit.

5.4 Lösch- und Entregungsschaltung für Stromrichter in kreisstrombehafteter Gegenparallelschaltung

Sollen Synchrongeneratoren bei starker Untererregung mit langen leerlaufenden Leitungen im Lastkreis betrieben werden, so kann deren Erregung über eine Schaltung gemäss der Figur 8 erfolgen. Dabei besteht die Möglichkeit der Führung negativen Erregerstromes [10]. Die zwei antiparallelen Stromrichter bedingen die Anordnung von zwei Lösch- und Entregungskreisen.

Die modifizierte Schaltung gemäss Figur 9 fordert nur einen, beiden Brükken gemeinsamen Löschkreis 39. Allerdings muss zusätzlich ein Entkopplungswiderstand vorgesehen werden. Wegen der vorstehend ausführlich beschriebenen Schaltungen wird hier auf eine nähere Beschreibung verzichtet, da die Wirkungsweise ohne weiteres abgeleitet werden kann.

6. Zu erwartender Komponentenaufwand

Die Dimensionierung solcher Schaltungen wurde ausführlich in [9] behandelt. Um eine Vorstellung vom Komponentenaufwand für die neuen Schaltungen zu geben, seien die Berechnungsergebnisse für einen Grossgenerator skizziert. Für den Erregerkreis sollen dabei die Daten der Tabelle I

Daten des Erregersystems Tabelle I

Deckenspannung U_{dl}	896 V
Nennstrom I_{dl}	12 700 A
Deckenstrom I_{dmax}	19 500 A
Fehlerstrom bei Statorklemmenkurzschluss I_{dsk}	24 360 A
Fehlerstrom bei Hochspannungskurzschluss I_{dhk}	22 790 A
Feldwiderstand R_f bei 75 °C	0,0441 Ω
Induktivität der Feldwicklung L_f	0,25 H

Spannungsabhängiger Entregungswiderstand

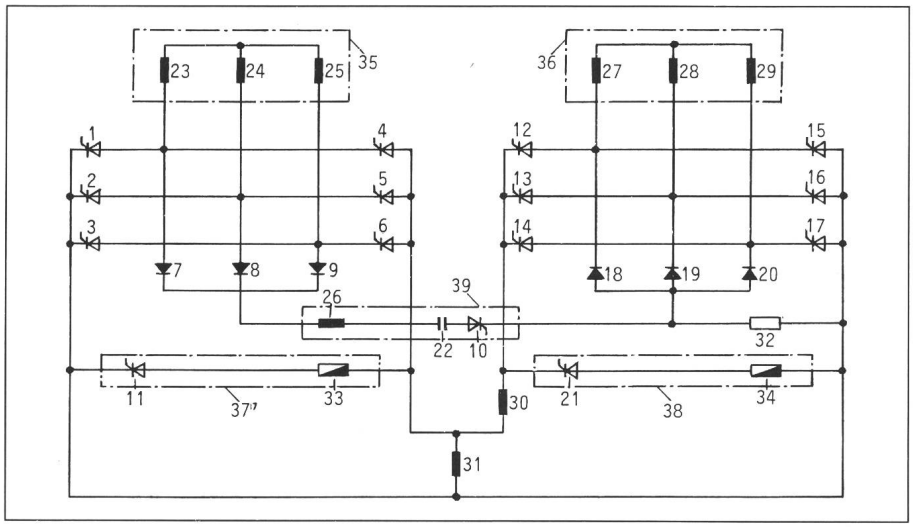

Fig. 9 Lösch- und Entregungsschaltung mit gemeinsamem Löschkreis für Stromrichter in kreisstrombehafteter Gegenparallelschaltung

32 Löschwiderstand; 33, 34 Entregungswiderstände; 35, 36 Erregertransformatoren
37, 38 Freilaufkreise; 39 Löschkreis

steuerung des Erregerstromrichters in Wechselrichterendlage noch massgeblich herabgesetzt werden. Mit Rücksicht auf die Grenzspannung der Erregerwicklung könnte im vorliegenden Fall der Entregungswiderstand erhöht und die Entregungszeit entsprechend zusätzlich verkürzt werden.

Der hiermit angegebene Komponentenaufwand dürfte wohl kaum den Preis eines Gleichstromschalters, wenn dieser überhaupt erhältlich ist, übersteigen. Dazu ergibt sich aus der vollständig statischen Wirkungsweise der Schaltung die nötige Zuverlässigkeit und der Vorteil, dass praktisch keine Unterhaltskosten zu erwarten sind.

Berechnungsergebnisse für die Entregungsschaltung Figur 7 Tabelle II

Schaltthyristoren (Brückenventile):	
Spitzensperrspannung U_{RRM}	1600 V
Anzahl Ventile in Reihe N_s	2
Freiwerdezeit t_q	150 µs
Lösch- und Freilaufthyristor:	
Spitzensperrspannung U_{RRM}	3200 V
Anzahl Ventile in Reihe N_s	1
Anzahl Ventile parallel N_p	5
Freilaufdiode:	
Spitzensperrspannung U_{RRM}	3200 V
Anzahl Ventile in Reihe N_s	1
Anzahl Ventile parallel N_p	4
Löschkreis:	
Löschkapazität C	9360 µF
Löschspannung U_c	985 V
Freihaltezeit t_H	270,2 µs

Als Löschinduktivität wirken die Sekundärwicklungen des Stromrichtertransformators.

gelten. Die Berechnungsergebnisse für die Entregungsschaltung gemäss Figur 7 sind in Tabelle II wiedergegeben.

Die digitale Berechnung des Verlaufes der zeitabhängigen Grössen hat gezeigt, dass die Spannungsgrenzen mit grossem Sicherheitsabstand eingehalten werden. Auch die Freihaltezeit der Schaltthyristoren ergibt eine genügende Sicherheit. Der Stromabfall vollzieht sich in folgenden Zeiten:

Eigenentregung:
nach 20 s von $I_f = 25$ kA auf $I_f = 0$,

Schnellentregung:
nach 3,75 s von $I_f = 25$ kA auf $I_f = 0$.

Bei Schnellentregung kann die Entregungszeit ausserdem durch Aus-

Literatur

[1] *K. Bonfert:* Bedeutung und Kennzeichnung der Erregungsgeschwindigkeit von Erregeranordnungen. ETZ-A 81(1960)7, S. 246...262.

[2] *R. Gärtner:* Die Stabilitätsgrenzen der Synchronmaschine im Impedanzdiagramm. ETZ-A 91(1970)6, S. 352...356.

[3] *W. Kmenta:* Die Bedeutung der Erregung und Aufgaben der Spannungsregelung für den Netzbetrieb von Synchrongeneratoren. Elin-Z. 26(1974)1/2, S. 18...39.

[4] *M. Schleicher:* Die moderne Selektivschutztechnik und die Methoden zur Fehlerortung in Hochspannungsanlagen. Berlin, Julius-Springer-Verlag, 1936.

[5] *I.M. Canay:* Beitrag zur Schnellentregung von grossen Turbogeneratoren. E und M 86(1969)1, S. 4...9.

[6] *R. Rüdenberg:* Elektrische Schaltvorgänge. 5. Auflage. Berlin u.a., Springer-Verlag, 1974.

[7] *H.J. Bossi:* Stromrichtererregung von Synchronmaschinen. Brown Boveri Mitt. 50(1963)9/10, S. 661...674.

[8] *F. Maier:* Electronic protective circuit; USA-Patentschrift Nr. 4,428,023 vom 24.1.1984.
Elektronische Schutzschaltung; Europa-Patentschrift Nr. 0 034 845 vom 25.7.1984.
Electronic protective circuit; Kanada-Patentschrift Nr. 1 171 905 vom 31.7.1984.

[9] *F. Maier:* Berechnung der Kommutierungskreise von elektronischen Impulsschaltungen für Fusionsanlagen. Bull SEV/VSE 74 (1983)15, S. 857...860.

[10] *F. Peneder, H.-J. Herzog* und *R. Bertschi:* Die statische Erregung für positiven und negativen Erregerstrom. Brown Boveri Mitt. 65(1978)9, S. 598...601.