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: 74 (1983)

Heft: 15

Artikel: Berechnung der Kommutierungskreise von elektronischen Impulsschaltungen für Fusionsanlagen

Autor: Maier, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904843

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: 10.12.2025

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

Berechnung der Kommutierungskreise von elektronischen Impulsschaltungen für Fusionsanlagen

F. Maier

In Anlagen der Fusionsforschung müssen für die Plasmazündung Hochleistungsimpulse erzeugt und übertragen werden. Die Impulserzeugung erfolgt in herkömmlichen Anlagen durch Kommutierung des im Speicherkreis fliessenden Gleichstromes auf einen Widerstand. Gemäss neueren Schaltungsvorschlägen kann diese Stromkommutierung auch durch elektrische Ventile erreicht werden. An [1] anschliessend wird die praktische Berechnung der hierfür erforderlichen Kommutierungskreise dargestellt.

Dans des installations de recherche sur la fusion, l'allumage du plasma requiert des impulsions de grande puissance, produites dans des installations usuelles par commutation sur une résistance du courant continu circulant dans le circuit d'accumulation. Selon les propositions récentes, cette commutation du courant peut également être obtenue par des valves électriques. Ce travail fait suite à [1] et présente le calcul des circuits de commutation nécessaires.

Adresse des Autors

Dipl. Ing. Dr. techn. *Franz Maier*, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Abt. NLP (Turgi), 5401 Baden.

1. Einleitung und Übersicht

In [1] wurden neue elektronische Schaltungen für das kontaktlose Kommutieren sehr grosser Gleichströme beschrieben. Die dabei erzeugten Impulse werden durch transformatorische Wirkung in den Plasmakreis übertragen und bewirken im vollionisierten Plasma den Aufbau eines kräftigen achsenparallelen Stromes. Das polare Feld dieses Stromes addiert sich zum toroidalen der Einschlussspulen und bewirkt so eine Verdrillung der Feldlinien. Dadurch kann ein Driften des heissen Plasmas gegen die materielle Begrenzungswand verhindert werden. Der induzierte Strom heizt auch das Plasma.

Für die eigentliche Impulserzeugung wurde im Verlaufe der Zeit eine grössere Anzahl verschiedener Schaltungen entwickelt. Diese verwenden in der Mehrzahl einen synchron wirkenden mechanischen Schalter mit erzwungenem Stromnulldurchgang. Damit kann der gespeicherte Gleichstrom auf einen Widerstand kommutiert werden. Die dadurch bedingte Stromabnahme erzeugt die für die Transformation des Plasmastromes erforderliche Flussänderung im Transformator. Die Anforderungen an einen solchen Kommutierungsschalter sind hoch.

Die Funktion des mechanischen Schalters kann von elektrischen Halbleiterventilen übernommen werden. Damit erfolgt die Kommutierung des Stromes kontaktlos. Die einfache und bewährte Steuerung solcher Ventile ermöglicht den Aufbau einer für den periodischen Betrieb geeigneten und sicher wirkenden Schaltung. In Figur 1 ist die in [1] beschriebene Schaltung mit kapazitiver Zwischenspeicherung dargestellt. Der Löschimpuls aus dem mit korrekter Polarität aufgeladenen Kondensator (11) über das gesteuerte Ventil (9) wird durch die Wicklung (16) in den Plasmakreis als Zündimpuls eingekoppelt. Nach erfolgter Abschaltung der Stromrichterbrücke (Ventile 1...6) durch diesen Löschimpuls erfolgt der Stromfluss abwechselnd über die gesteuerten Ventile (8) und (9).

Nachstehend werden die für die Kommutierungskreise gültigen Zusammenhänge angegeben und daraus die praktische Berechnung solcher Kreise abgeleitet.

2. Die Kommutierungskreise von elektronischen Impulsschaltungen

Mit Kommutierung wird der Stromübergang von einem Schaltkreis auf einen anderen bezeichnet. Da der Strom im Speicherkreis ein unipolarer Strom ohne Nulldurchgang ist, kann die Kommutierung des Stromes nur durch einen Hilfskreis, den *Kommutierungskreis*, erreicht werden. Dieser besteht aus einer Reihenschaltung eines gesteuerten Ventils, mit einer Induktivität und einem Kondensator (z.B. 9, 16 und 11 in Fig. 1).

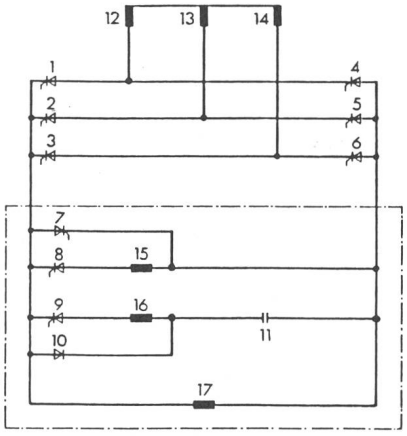

Fig. 1 Kommutierungsschaltung für Impulserzeugung und Übertragung durch kapazitive Zwischenspeicherung (einstufige Kommutierung)

1...6	Stromrichterventile
7, 10	Rückladeventile
8, 9	Freilauf- und Kommutierungsventile
11	Kommutierungskondensator
12, 13, 14	Transformatorwicklungen
15, 16	Kommutierungsinduktivitäten
17	Speicherinduktivität

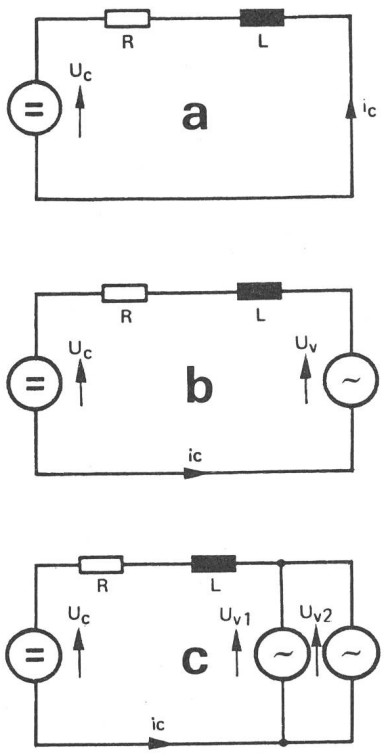

Fig. 2 Ersatzschaltbilder für den Kommutierungskreis

a ohne Gegenspannung
b mit zeitlich sinusförmiger Gegenspannung
c mit zeitlich sinusförmiger Gegenspannung und bei kommutierendem Stromrichter

Der Kommutierungsvorgang erfordert eine *Kommutierungsspannung*. Im abzulösenden Stromrichterventil (Schaltthyristor) muss der Strom unter den Haltestrom gebracht werden. Das Ventil wird beim Vorgang der *Zwangskommutierung* durch den Entladestromimpuls eines Kondensators gelöscht. Damit das Ventil wieder in der Vorwärtsrichtung sperren (blockieren) kann, muss seine *Freiwerdezeit* t_q eingehalten werden. Während dieser Zeit muss in Rückwärtsrichtung (Sperrichtung) des Ventils Sperrspannung anstehen. Die Zeit, während der die negative Kondensatorspannung in Sperrichtung wirkt, wird als *Freihaltezeit* t_H bezeichnet.

Die genannten zwei Bedingungen (Löschen des Ventilstromes und Spannung in Sperrichtung) müssen vom Kommutierungskreis erfüllt werden [2, 3, 4]. Wie den Ersatzschaltbildern der Figur 2 zu entnehmen ist, kann im Kommutierungskreis auch eine zeitabhängige Gegenspannung wirken. Für die richtige Bemessung des Kommutierungskreises müssen alle erwähnten Einflüsse berücksichtigt werden. In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Zusammenhänge für die Berechnung der Kommutierungskreise angegeben. Die praktische Anwendung der abgeleiteten Gleichungen erfolgt in Kapitel 3 durch ein Berechnungsbeispiel.

2.1 Schaltung ohne Gegenspannung im Löschkreis

Für die Kommutierungsvorgänge zwischen den Ventilen (8) und (9) der Figur 1 enthält der Kommutierungskreis keine Gegenspannung.

Verlauf von Spannung und Strom

Im vereinfachten Ersatzschaltbild gemäss Figur 2a gilt die homogene Differentialgleichung

$$U_C + U_L = 0 = U_C + L\frac{di_c}{dt} \qquad (1)$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass der Löschkreis dämpfungsfrei ist ($R = 0$). Diese Bedingung ist weitgehend erfüllt. Gleichung (1) hat die allgemeine Lösung

$$U_c = U_{C0}\cos(\nu t + \gamma) \qquad (2)$$

Für einen willkürlich gewählten Anfangszustand mit $\gamma = 0$ gilt für den Strom

$$i_C = C\frac{du_c}{dt} = -\hat{U}_{C0}\sqrt{L/C}\sin \nu t \qquad (3)$$

mit dem Scheitelwert

$$\hat{I}_C = -\hat{U}_{C0}\sqrt{C/L} \qquad (4)$$

Löschkreisinduktivität

Die Löschkreisinduktivität ist so festzulegen, dass die maximal zulässige Stromsteilheit $(di/dt)_{krit}$ für das Lösch- und Freilaufventil nicht überschritten wird. Somit gilt

$$L = \frac{\hat{U}_{C0}}{(di/dt)_{t=0}} = \frac{\hat{U}_{C0}}{(di/dt)_{krit}} \qquad (5)$$

Löschkreiskapazität

Die Kapazität des Löschkondensators muss so bestimmt werden, dass die erforderliche Freihaltezeit der zu löschenden Ventile (Schaltthyristoren) eingehalten wird. Die Kondensatorspannung wird mit Rücksicht auf die Zündbedingung des Löschventils wie folgt festgelegt:

$$\hat{U}_{C0} \geqq U_{dio} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_{V0} \qquad (6)$$

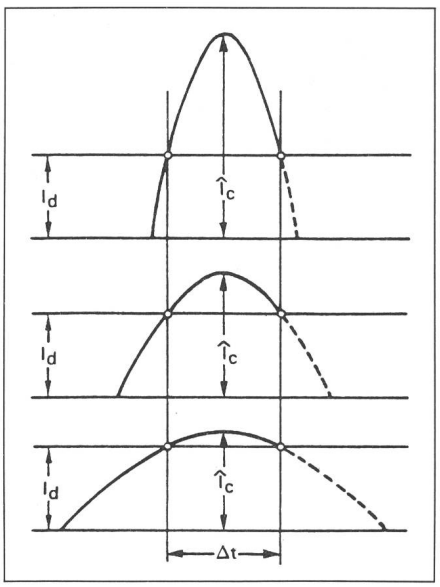

Fig. 3 Sinusförmige Löschimpulse verschiedener Breite und Höhe

Diese Gleichung mit der ideellen Leerlaufspannung U_{dio} gilt für eine Drehstrombrückenschaltung. Bei anderen Schaltungen sind entsprechende Gleichungen zu verwenden.

Gemäss Figur 3 gilt die Beziehung

$$\cos\frac{\nu\Delta t}{2} = I_d/\hat{I}_c = 1/\chi \qquad (7)$$

mit $\nu = 1/\sqrt{LC}$. Somit wird

$$\Delta t/\sqrt{LC} = 2\arccos\frac{1}{\chi} = g(\chi) \qquad (8)$$

Die vom Kommutierungskreis aufzubringende Löschenergie ist

$$W = \frac{1}{2}C\hat{U}_{C0}^2 = \frac{1}{2}L\hat{I}_C^2$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{LC}\,\hat{U}_{C0}\,\hat{I}_C \qquad (9)$$

$$W = \frac{1}{2}\frac{\Delta t}{2\arccos 1/\chi}\hat{U}_{C0}\,\chi\, I_d \qquad (10)$$

oder in bezogener Form

$$\frac{W}{\hat{U}_{C0}\, I_d \Delta t} = \frac{\chi}{4\arccos 1/\chi}h(\chi) \qquad (11)$$

Die Funktionen $g(\chi)$ und $h(\chi)$ sind in Figur 4 dargestellt. Das Minimum für die spezifische Kommutierungsenergie kann durch Bildung der Ablei-

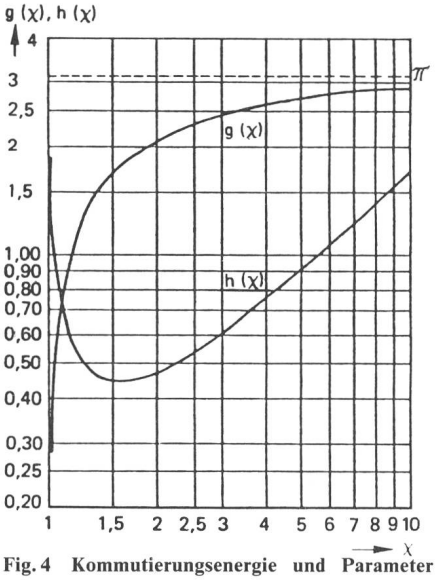

Fig. 4 Kommutierungsenergie und Parameter des Löschkreises

tung der Funktion (11) nach χ bestimmt werden. Dies führt zur transzendenten Bedingungsgleichung für χ

$$\arccos \frac{1}{\chi} = \frac{1}{\chi\sqrt{1-1/\chi^2}} \qquad (12)$$

Die Lösung lautet $\chi = 1{,}533$, wobei $h(\chi) = 0{,}446$ und $g(\chi) = 1{,}720$. Somit ergibt sich für die optimalen Werte der Löschkapazität C_0 und der Löschinduktivität L_0

$$C_0 = \frac{\chi_0}{g(\chi_0)} \frac{I_{d0}\Delta t}{\hat{U}_{C0}} = 0{,}891 \frac{I_{d0}\Delta t}{\hat{U}_{C0}} \qquad (13)$$

$$L_0 = \frac{1}{\chi_0\, g(\chi_0)} \frac{\hat{U}_{C0}\Delta t}{I_{d0}} = 0{,}379 \frac{\hat{U}_{C0}\Delta t}{I_{d0}} \qquad (14)$$

Lösch- und Freihaltezeit

Es gilt die Löschbedingung

$$I_d = i_c = \hat{I}_c \sin \nu\, t_L = -\hat{U}_{C0}\sqrt{C/L}\sin \nu\, t_L \qquad (15)$$

Somit erhält man für die Löschzeit

$$t_L = \frac{1}{\nu} \arcsin\left(\frac{I_d}{\hat{U}_{CO}}\sqrt{\frac{L}{C}}\right) \qquad (16)$$

Im Löschzeitpunkt beträgt die Kondensatorspannung

$$U_C = U_{C1} = \hat{U}_{C0}\cos(\nu t_L) \qquad (17)$$

Ab diesem Zeitpunkt ändert sich wegen des konstanten Stromes $I_d = i_c$ die Kondensatorspannung u_c linear mit der Zeit. Es gilt

$$U_C = U_{C1} - \frac{1}{C}\int_{t_1}^{t_2} I_d\, dt$$

$$= U_{C1} - \frac{I_d}{C}(t_2 - t_1) = 0 \qquad (18)$$

Im Zeitpunkt t_2 wird die Kondensatorspannung $u_c = 0$ (Umpolung). Somit erhält man für den Zeitraum mit negativer Kondensatorspannung die entsprechende Freihaltezeit

$$t_H = t_2 - t_1 = \frac{u_{C1}\, C}{I_d} \qquad (19)$$

2.2 Schaltung mit zeitabhängiger Gegenspannung im Löschkreis

Soll der Speicherstrom in Figur 1 von der Stromrichterbrücke auf den Freilaufkreis (9), (11), (16) kommutiert werden, so erfolgt die Stromlöschung über die Wicklungsstränge (12), (13), (14) des Speisekreises. Es gilt das Ersatzschaltbild gemäss Figur 2b oder 2c. Die Induktivitäten der Wicklungen und die im Löschkreis wirksame Gegenspannung müssen entsprechend berücksichtigt werden. Der grösste Induktivitätswert der Wicklungen ergibt sich bei nicht kommutierendem Stromrichter zu $2L_{\sigma T}$.

Verlauf von Spannung und Strom

Bei Vernachlässigung von R gilt die Differentialgleichung

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{u_c}{LC} = \frac{\hat{U}_V}{LC}\sin \omega t = k \sin \omega t \qquad (20)$$

Die Lösung der homogenen Differentialgleichung wurde bereits mit Gleichung (2) angegeben. Die inhomogene Differentialgleichung wird mit nachstehendem Ansatz gelöst:

$$u_c = C \sin \omega t + D \cos \omega t \qquad (21)$$

Daraus folgt die spezielle Lösung der inhomogenen Differentialgleichung (20)

$$u_c = \hat{U}_{C0}\cos \nu t + \frac{\hat{U}_V}{1-\omega^2 LC}\sin(\omega t + \varphi_z) \qquad (22)$$

φ_z bezeichnet den Zündwinkel des Löschthyristors gezählt vom Nulldurchgang der verketteten Spannung U_V des Transformators. Für den Kondensatorstrom i_c kann entsprechend Gleichung (3) geschrieben werden

$$i_c = C\frac{du_c}{dt} = -\hat{U}_{CO}\sqrt{\frac{C}{L}}\sin \nu\, t + \frac{C\,\omega\,\hat{U}_v}{1-\omega^2 LC}\cos(\omega t + \varphi_z) \qquad (23)$$

Löschkreis

Für die Berechnung der Löschkreiskomponenten C und L wird in 1. Näherung gemäss Figur 3 $\Delta t = 1{,}5\, t_H$ gesetzt. Somit erhält man nach Gleichung (13) und (14)

$$C_0 = 0{,}891 \frac{I_{d0}\, 1{,}5\, t_H}{\hat{U}_{C0}} \qquad (24)$$

$$L_0 = 0{,}379 \frac{\hat{U}_{C0}\, 1{,}5\, t_H}{I_{d0}} \qquad (25)$$

Lösch- und Freihaltezeit

Es gilt die Löschbedingung gemäss Gleichung (15)

$$I_d = i_c = -\hat{U}_{CO}\sqrt{\frac{C}{L}}\sin \nu\, t_L + \frac{C\,\omega\,\hat{U}_v}{1-\omega^2 LC}\cos(\omega t_L + \varphi_z) \qquad (26)$$

Diese transzendente Gleichung für die Löschzeit t_L muss iterativ gelöst werden. Mit der so berechneten Löschzeit kann sodann die Kondensatorspannung U_{C1} nach Gleichung (17) berechnet werden. Die Freihaltezeit t_H ergibt sich schliesslich aus Gleichung (19).

Realer Löschkreis mit parallelen Strommaschen

Da der Strom gleichzeitig in mehreren Maschen fliessen kann (z.B. Fig. 2c), wird der Schalt- und Kommutierungsvorgang durch simultane Differentialgleichungen beschrieben. Sie können schrittweise numerisch in bekannter Weise mittels eines Digitalrechners gelöst werden.

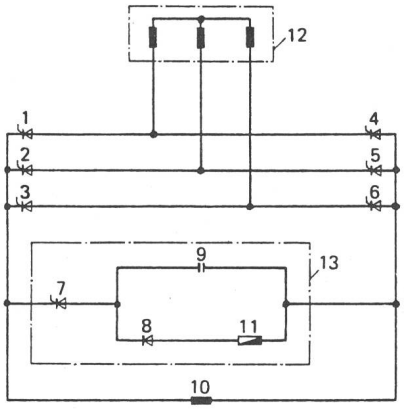

Fig. 5 Thyristorschalter für einstufige Kommutierung

1...6 Stromrichterventile
7 Lösch- und Freilaufventil
8 Entkopplungs- und Freilaufdiode
9 Löschkondensator
10 Lastinduktivität
11 Entregungswiderstand
12 Sekundärwicklungen des Transformators
13 Thyristorschalter und Freilaufkreis

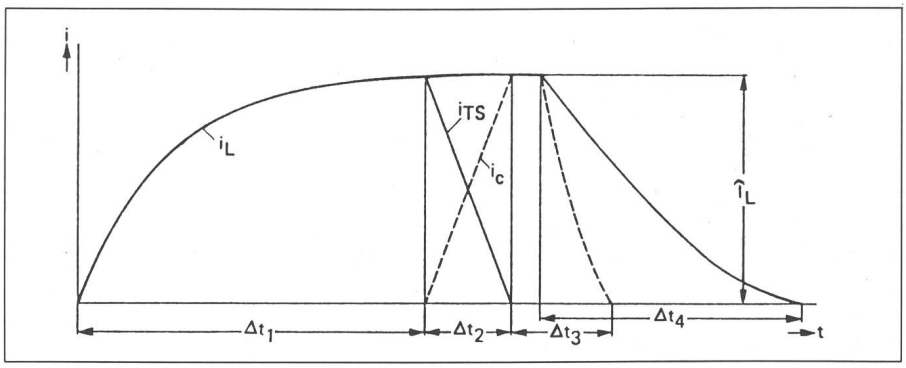

Fig. 6 Primärer Stromverlauf für den Speicher-, Kommutierungs- und Entregungsvorgang (Prinzipielle Darstellung mit verschiedenem Zeitmassstab)

i_L Speicherstrom
i_{TS} Schaltthyristorstrom
i_c Löschkondensatorstrom
$\hat{i}_L$ Scheitelwert des Speicherstromes
Δt_1 Aufladezeit für die Speicherinduktivität
Δt_2 Kommutierungszeit vom Schaltthyristor auf den Löschkreis
Δt_3 Kommutierungszeit vom Lösch- auf den Entregungskreis mit Umpolung des Löschkondensators und Freihaltezeit für den Schaltthyristor
Δt_4 Entregungszeit für die Speicherinduktivität L

3. Berechnung des Kommutierungskreises einer Impulsschaltung

Als Beispiel soll der Kommutierungskreis für eine Impulsschaltung gemäss Figur 5 berechnet werden.

Anforderungen an die Schaltung

I_{d0}	= 60 kA	stationärer Speicherstrom
$U_{R\,max}$	= 4 kV	maximale Impulsspannung
t_E	= 2 s	Entregungszeit
T_p	= 600 s	Impulsperiode (Wiederholungsrate)

Es werden also die Thyristoren der Stromrichterbrücke als Schaltthyristoren verwendet. Sie haben eine Freiwerdezeit von $t_q = 400$ µs.

Löschkreiskapazität

Mit $\hat{U}_{c0} = U_{R\,max} = 4$ kV und $\Delta t = 1{,}25\ t_q$ (Erfahrungswert) folgt nach Gleichung (13)

$$C_0 = 0{,}891\,\frac{I_{d0}\cdot 1{,}5\,\Delta t}{\hat{U}_{c0}} = 10{,}023\cdot 10^{-3}\ \mathrm{F}$$

Löschkreisinduktivität

Entsprechend Gleichung (14) gilt

$$L_0 = 0{,}379\,\frac{\hat{U}_{c0}\cdot 1{,}5\,\Delta t}{I_{d0}} = 0{,}0189\cdot 10^{-3}\ \mathrm{H}$$

Somit ergibt sich die Schwingkreisfrequenz

$$\nu = 1/\sqrt{LC} = 2297$$

3.4 Lösch- und Freihaltezeit

Es wird angenommen, dass die Löschung bei nicht kommutierendem Stromrichter erfolgt. Im Kommutierungskreis wirkt somit die sinusförmige Gegenspannung U_v. Es kann die Löschzeit t_L aus der transzendenten Gleichung (26) berechnet werden, wobei für den Speisegleichrichter gelte: $U_v = 1000$ V, $\alpha = 30°$ el. Im Zeitpunkt $t = 0$ leiten die Ventile (3) und (5) der Stromrichterbrücke. Das Lösch- und Freilaufventil (7) wird gezündet und die Impulse aller Brückenventile gesperrt. Somit ist die im Löschkreis wirkende Gegenspannung $U_v = U_{ST}$ um $(180 + \alpha)°$ el. phasenverschoben. Bei einem Steuerwinkel $\alpha = 30°$ el. des Stromrichters ergibt sich somit

$$\varphi_Z = 180 + \alpha \triangleq 3{,}66\ \mathrm{rad}$$

Aus Gleichung (26) erhält man für die Löschzeit $t_L \approx 1690$ µs.

Im Löschzeitpunkt t_l ist die Kondensatorspannung abgefallen auf

$$U_{C1} = -\hat{U}_{c0}\cos(\nu t_L) = 2950\ \mathrm{V}.$$

Somit wird die Freihaltezeit

$$t_H = t_2 - t_1 = \frac{U_{c1}\,C}{I_{d0}} = 492{,}8\ \mu\mathrm{s}$$

Die Freiwerdezeit der Schaltthyristoren wird also mit guter Sicherheit eingehalten.

3.5 Anzahl Parallelventile im Löschkreis und Energie des Speicherkreises

Mit $N_p = 12$ parallelen Löschventilen (7) ergibt sich die Stromsteilheit zu Beginn des Löschvorganges

$$\left(\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right)_{t=0} = \frac{\hat{U}_c}{L_0\,N_p} = 17{,}63\ \mathrm{A/\mu s}$$

Bei $U_{R\,max} = 4$ kV primärer Impulsspannung erhält man bei $I_{d0} = 60$ kA den Entregungswiderstand $R = 66{,}66$ mΩ.

Mit einer gewählten Zeitkonstanten $\tau = 400$ ms wird die Speicherinduktivität

$$L = \tau R = 26{,}66\ \mathrm{mH}$$

Somit ergibt sich der gespeicherte Energieinhalt

$$W_\mu = \frac{L\,I_{d0}^2}{2} = 47{,}98\ \mathrm{MWs}$$

In Figur 6 wurde der grundsätzliche Verlauf für Speicherung, Kommutierung und Entregung einer solchen Schaltung dargestellt.

Literatur

[1] *F. Maier:* Elektronische Schaltungen zur Erzeugung und Übertragung von Hochleistungsimpulsen in Fusionsanlagen. Bull. SEV/VSE 73(1982)23, S. 1230...1237.
[2] *B. D. Bedford* and *R. G. Hoft:* Principles of inverter circuits. New York/London/Sydney, John Wiley, 1964.
[3] *K. Heumann* und *A. C. Stumpe:* Thyristoren, Eigenschaften und Anwendungen. 3. Auflage. Stuttgart, Teubner, 1974.
[4] *K. Heumann:* Halbleiterschalter in der Energietechnik. Wissenschaftliche Berichte AEG-Telefunken 48(1975)2/3, S. 106...118.