

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 3

Artikel: Steuerbare Siliziumdioden (Thyristors)
Autor: Flückiger, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916333>

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: 23.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Steuerbare Siliziumdioden (Thyristors)

Von H. Flückiger, Bern

621.314.632-519

Vermehrt werden heute von verschiedenen Firmen steuerbare Siliziumdioden (Thyristors) angeboten. Die Bestimmung des zweckentsprechenden Thyristors stößt oft auf Schwierigkeiten. Die anschliessende Betrachtung soll als Richtlinie für die Wahl des richtigen Bauelementes dienen. Vorerst werden die Strom-Spannungskennlinie, sowie die Steuerkennlinie beschrieben. Darauf die Durchlaßströme und Verluste, die Überlastbarkeit, der thermische Widerstand und die transitorische thermische Impedanz, die Schaltzeiten, die Parallel- und Serieschaltung und der Überspannungs- und Überstromschutz einer Kurzbetrachtung unterzogen. Vervollständigt wird der Aufsatz durch die Erwähnung des «Turn-off» und des «Avalanche-Thyristors».

De plus en plus, divers fournisseurs offrent sur le marché des diodes commandées (thyristors). Il arrive fréquemment que le choix du genre de thyristors présente certaines difficultés. Cet exposé doit faciliter la détermination de l'élément destiné à un but précis. En premier lieu, les caractéristiques courant-tension et de commande sont décrites. L'article se poursuit par une brève orientation concernant les courants directs et les pertes, les caractéristiques de surcharge, la résistance thermique, l'impédance thermique transistore, les temps de commutation, le montage en parallèle et en série, ainsi que la protection contre les surtensions et les surcharges. L'exposé est complété par une information sur le thyristor à blocage et celui à avalanche.

1. Einleitung

Vermehrt werden heute für verschiedene Anwendungen, wo früher Thyratrons oder gittergesteuerte Quecksilberdampf-Gleichrichter gebraucht wurden, steuerbare Siliziumdioden verwendet. Diese haben gegenüber den erwähnten Bauelementen die Vorteile des kleineren Spannungsabfalls in Durchlassrichtung, der Unzerbrechlichkeit, der kürzeren Schaltzeiten, der kleineren Abmessungen usw.

Dieser Aufsatz soll den Konstrukteur über einige Eigenschaften, Schaltungsmassnahmen usw. orientieren und dazu beitragen, ihm bei der Anwendung dieser neuen Bauelemente behilflich zu sein. Ein Thyristor für einen Strommittelwert von 150 A ist in Fig. 1 abgebildet.

33'93-413

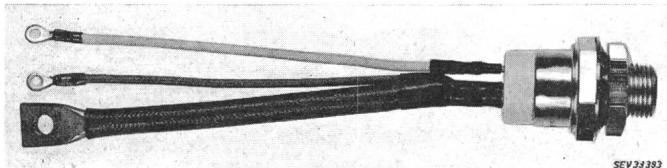


Fig. 1
Thyristor für einen Strommittelwert von 150 A

2. Strom-Spannungskennlinie und deren Bezeichnungen

Die Strom-Spannungskennlinie einer steuerbaren Siliziumdiode zeigt Fig. 2.

Die Buchstabensymbole haben folgende Bedeutung:

- | | |
|----------|--|
| U_F | Spannung in Schaltrichtung |
| I_F | Strom in Schaltrichtung |
| U_R | Sperrspannung |
| I_R | Sperrstrom |
| U_{FD} | max. Scheitelwert der Spannung in Schaltrichtung, ohne dass der Widerstand vom hochohmigen in den niederohmigen Zustand übergeht |
| I_{FD} | max. Scheitelwert des Stromes in Schaltrichtung, ohne dass der Widerstand vom hochohmigen in den niederohmigen Zustand übergeht |
| U_{BO} | Umschaltspannung vom hochohmigen in den niederohmigen Zustand in der Schaltrichtung |

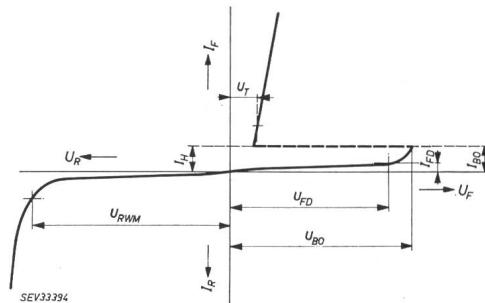


Fig. 2
Strom-Spannungskennlinie eines Thyristors
Bezeichnungen siehe im Text

I_{BO} Umschaltstrom vom hochohmigen in den niederohmigen Zustand in der Schaltrichtung

U_{RWM} Scheitelperrspannung

I_H Haltestrom; kleinster Strom in der Schaltrichtung im niederohmigen Zustand vor der Umschaltung in den hochohmigen Zustand

U_T Spannungsabfall in der Schaltrichtung im niederohmigen Zustand

3. Steuerkennlinie

Die Verhältnisse der Steuerspannung und des Steuerstromes sind aus Fig. 3 ersichtlich. Der Zündbereich ist von der Zonenübergangstemperatur (Junctiontemperatur) und der Umgebungstemperatur abhängig.

Die Buchstabensymbole haben folgende Bedeutung:

- | | |
|-----------|--|
| U_{FG} | Steuerspannung (allgemein) |
| I_{FG} | Steuerstrom (allgemein) |
| U_{FGM} | max. Scheitelwert der Steuerspannung |
| I_{FGM} | max. Scheitelwert des Steuerstromes |
| U_{GT} | Nenn-Steuerspannung (innerhalb Nenn-Zündbereich) |
| I_{GT} | Nenn-Steuerstrom (innerhalb Nenn-Zündbereich) |
| U_{GD} | Steuerspannung unterhalb des Zündbereiches |
| I_{GD} | Steuerstrom unterhalb des Zündbereiches |

(Unterhalb U_{GD} und I_{GD} zündet der Thyristor nicht.)

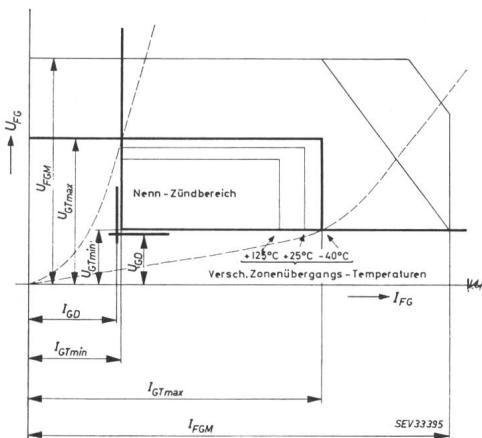


Fig. 3
Steuerkennlinie eines Thyristors
Bezeichnungen siehe im Text

4. Durchlaßströme und Verluste

Die Strommittelwerte in Schaltrichtung eines Thyristors bei verschiedenen Zündwinkeln, in Funktion der Gehäusetemperatur zeigt Fig. 4.

Fig. 5 gibt die Strommittelwerte bei verschiedenen Zündwinkeln in Funktion des Durchlassverlustes, bei einer Zonenübergangstemperatur von 125 °C an.

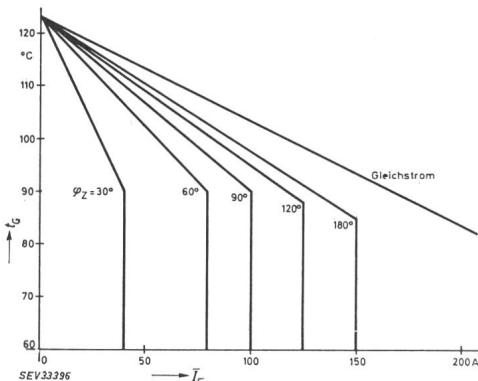


Fig. 4
Gehäusetemperatur t_G eines Thyristors in Funktion des Strommittelwertes I_F

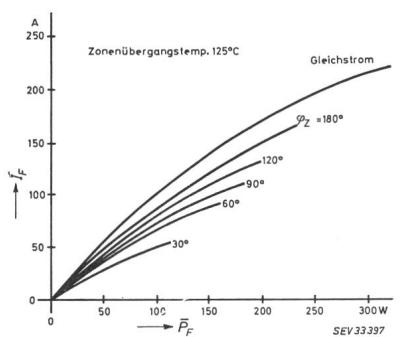


Fig. 5
Strommittelwert I_F eines Thyristors in Funktion des Durchlassverlustes P_F

5. Überlastbarkeit

Infolge der niedrigen Durchlasswiderstände bei ganz ausgesteuerten Thyristors, dürfen diese kurzzeitig überlastet werden. Der Scheitelwert eines sinusförmigen nicht wiederkehrenden Halbwellenstromes einer Frequenz von 60 Hz darf ca. das 20fache des Gleichstrommittelwertes betragen, ohne

dass der Thyristor beschädigt wird. Eine experimentell bestimmte Überstromkurve eines Thyristors für den Gleichstrommittelwert von 35 A in Funktion der Periodenzahl, bei einer Frequenz von 60 Hz, ist aus Fig. 6 ersichtlich. Unter

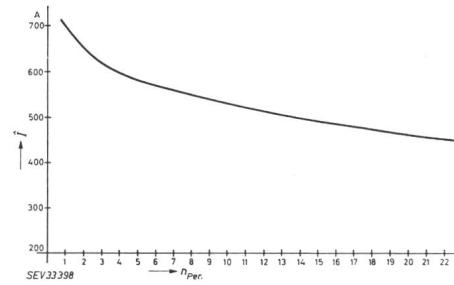


Fig. 6
Überstromkurve eines Thyristors in Funktion der Periodenzahl n_{per} .
I Scheitelwert des sinusförmigen Halbwellenstromes

nicht wiederkehrendem Überstrom versteht man eine Stromspitze, die sich nicht wiederholen darf, bevor die Zonentemperatur, erhöht durch die Stromspitze, auf den Anfangswert zurückgefallen ist.

Fig. 7 gibt den Mittelwert des Halbwellen-Überstromes nach Normalbelastung in Funktion der Zeit, für einen Thyristor von 70 A Gleichstrommittelwert.

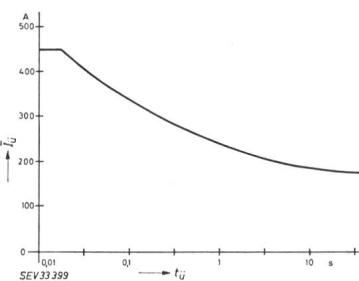


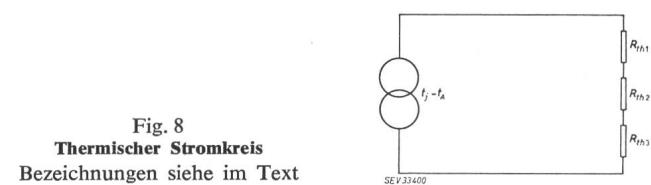
Fig. 7
Überstromkurve eines Thyristors in Funktion der Zeit t_u .
 I_u Mittelwert des Überlaststromes einer Diode

6. Thermischer Widerstand und transitorische thermische Impedanz

Unter thermischem Widerstand versteht man die Temperaturdifferenz zwischen zwei verschiedenen Punkten in der Wärmeflussrichtung pro Watt Verlustleistung, bei statischer Belastung. Dieser Wert wird z. B. zwischen Zonenübergang und einem markierten Punkt am Gehäuseboden des Thyristors angegeben. Für einen bekannten Durchlaßstrom lässt sich ein Kühlkörper mit Hilfe des thermischen Stromkreises nach Fig. 8 berechnen.

Die in der Figur angegebenen Buchstabsymbole haben folgende Bedeutung:

P_v	Verlustleistung aus Fig. 5
t_j	Zonenübergangstemperatur
t_A	Umgebungstemperatur
R_{th}	thermischer Widerstand zwischen Zonenübergang und Thyristorboden
R_{th2}	thermischer Widerstand von Thyristorboden zu Kühlkörper
R_{th3}	thermischer Widerstand des Kühlkörpers



Bezeichnungen siehe im Text

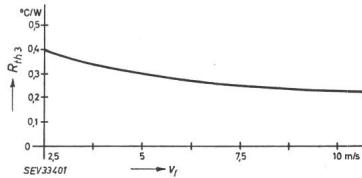


Fig. 9
Thermischer Widerstand R_{th3} in Funktion der Kühlungsgeschwindigkeit v_f

Wenn man die Wärmeabstrahlung vom Thyristorgehäuse vernachlässigt, kann der Kühlkörper nach folgender Formel bestimmt werden:

$$R_{th3} = \frac{t_f - t_A}{P_v} - (R_{th1} + R_{th2})$$

Bei künstlicher Luftkühlung werden vom Kühlkörperhersteller Kurven herausgegeben, welche den thermischen Widerstand des Kühlkörpers in Funktion der Luftgeschwindigkeit angeben. Fig. 9 gibt eine solche Kurve für einen Kühlkörper nach Fig. 10.

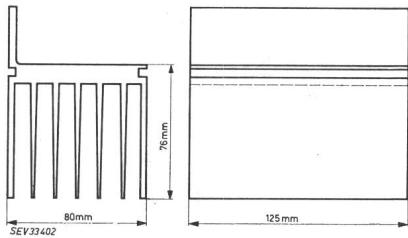


Fig. 10
Kühlkörper welcher Fig. 9 zu Grunde liegt

Die Berechnung muss nicht unbedingt auf die Zonenübergangstemperatur bezogen werden, sondern kann auch von der max. Gehäusetemperatur aus, die vom Hersteller angegeben wird, erfolgen.

Beim Impulsbetrieb rechnet man nicht mehr mit dem thermischen Widerstand, sondern mit der transitorischen thermischen Impedanz. Unter transitorischer thermischer Impedanz wird die durch einen Stromimpuls hervorgerufene Zonenübergangstemperaturänderung während der Impulsdauer, bei unveränderter Gehäuse- oder Kühlkörpertemperatur, pro Watt Impulsverlustleistung verstanden.

Fig. 11 zeigt die transitorische thermische Impedanz zwischen Zonenübergang und Gehäuse in Funktion der Impulsdauer für einen Thyristor von 70 A Gleichstrommittelwert. Die Zonenübergangstemperatur wird damit für eine bestimmte Impulsdauer nach folgender Formel bestimmt:

$$t_f = t_G + P_{v1} Z_{th}$$

worin

- t_f Zonenübergangstemperatur
- t_G Thyristorgehäusetemperatur
- P_{v1} Verlustleistung, hervorgerufen durch den Stromimpuls
- Z_{th} transitorische thermische Impedanz

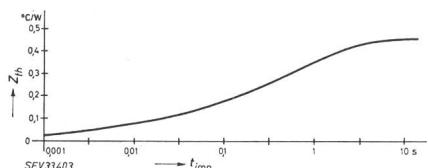


Fig. 11
Transitorische thermische Impedanz Z_{th} in Funktion der Impulsdauer t_{imp} .

Bei einer Impulsform nach Fig. 12 muss diese in Rechteckimpulse zerlegt werden. Die Zonenübergangstemperatur ist in der Zeit t_3 :

$$t_f(t_3) \approx t_G + P_{v3} Z_{th}(t_3-t_2) + P_{v2} [Z_{th}(t_3-t_1) - Z_{th}(t_3-t_2)] + P_{v1} [Z_{th}(t_3) - Z_{th}(t_3-t_1)]$$

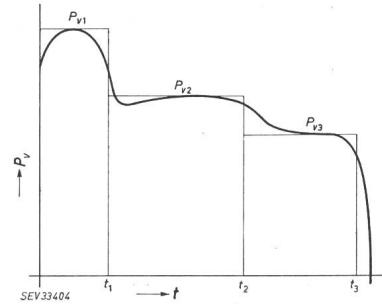


Fig. 12
Zerlegung eines Stromimpulses
 P_v Verlustleistung; t Zeit

7. Einschaltzeit

Mit Hilfe von Fig. 13 wird die Einschaltzeit eines Thyristors definiert.

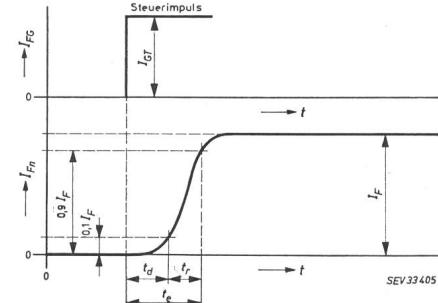


Fig. 13
Definition der Einschaltzeit eines Thyristors
 I_{Fn} Strom in Schaltrichtung; I_{Gt} Steuerstrom (allgemein); I_{Gt} Nennsteuerstrom; t Zeit; t_d Verzögerungszeit; t_r Anstiegszeit; t_e Einschaltzeit

Die Einschaltzeit eines Leistungsthryristors in Funktion des Laststromes, bei einer Steuerspannung von 5 V, einer Stromkreisimpedanz von $4,7 \Omega$ und einer Anstiegszeit von $0,1 \mu s$ zeigt Fig. 14.

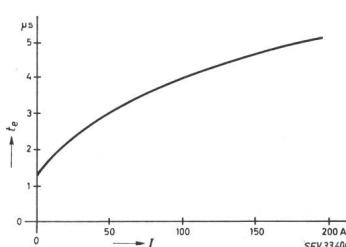


Fig. 14
Einschaltzeit t_e eines Thyristors in Funktion der Belastung I

Fig. 15 gibt die Einschaltzeit in Funktion der Steuerspannung bei einer Steuerstromkreisimpedanz von $4,7 \Omega$ und verschiedenen Belastungen, für einen Thyristor gleicher Grösse wie derjenige, welcher Fig. 14 zu Grunde liegt.

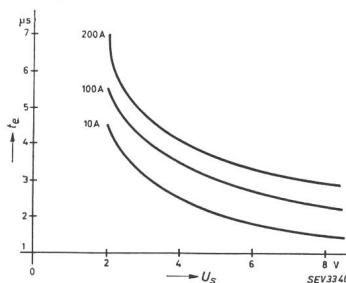


Fig. 15
Einschaltzeit t_e eines Thyristors in Funktion der Steuerspannung U_{Gt}

Um den Thyristor vom Durchlass- in den Sperrzustand zu schalten, muss der Durchlaßstrom unter den Haltestrom reduziert werden. Dies kann durch Erhöhung des Lastwiderstandes, durch Anschalten einer Gegenspannung an den Thyristor usw. erfolgen. Die Abschaltzeit ist länger als die Einschaltzeit und stark von der Belastung und der Zonenübergangstemperatur abhängig.

Bei raschem Spannungsanstieg du/dt in der Schaltrichtung kann ein Thyristor vom hochohmigen in den niederohmigen Schaltzustand übergehen, bevor die Umschaltspannung U_{BO} erreicht ist. Der Grenzwert des Spannungsanstieges, bei welchem die Umschaltspannung noch nicht reduziert wird, liegt bei den heute zur Verfügung stehenden Thyristors zwischen 20 V/ μ s und 200 V/ μ s.

8. Parallelschaltung

Nicht alle Thyristors vom gleichen Typ haben die gleiche Widerstandskenntlinie im niederohmigen Schaltzustand. Daher können sie nicht ohne weiteres parallel geschaltet werden.

Für die Parallelschaltung müssen Thyristors mit gleicher Widerstandskenntlinie im niederohmigen Schaltzustand ausgesucht werden, oder es ist jedem Thyristor ein Seriowiderstand vorzuschalten. Oft werden besondere Ausgleichstransformatoren verwendet und die Thyristors nach Fig. 16 geschaltet.

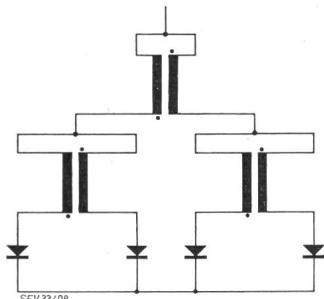


Fig. 16
Parallelschaltung von Thyristors mit Ausgleichstransformatoren

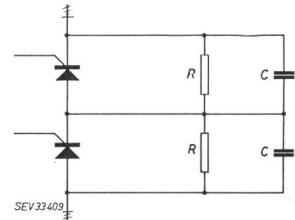
Alle parallel geschalteten Thyristors müssen gleichzeitig gezündet werden. Die Steuerimpulse müssen lange genug dauern, so dass eine einwandfreie Zündung gewährleistet ist. Es ist empfehlenswert, voneinander isolierte Steuerstromkreise, welche rechteckige Impulse abgeben, zu verwenden. Die Impulsanstiegszeit sollte nicht länger als eine Mikrosekunde dauern.

9. Serieschaltung

Nur Thyristors der gleichen Spannungsklasse dürfen in Serie geschaltet werden. Da trotzdem Unterschiede des Sperrstromes feststellbar sind, ist jedem Thyristor ein Widerstand parallel zu schalten, dessen Wert etwa halb so gross wie der Widerstand bei der Scheitelperrspannung sein sollte. Der genaue Widerstandswert ist jeweils beim Fabrikanten anzufragen. Die Steuerstromkreise sollten voneinander isoliert sein. Wie bei der Parallelschaltung ist die Anstiegszeit der Steuerimpulse unter einer Mikrosekunde zu halten.

Beim Übergang von der Durchlass- zur Sperrphase tritt ein kurzzeitiger Überstrom in der Sperrrichtung auf, der plötzlich abreißt, was zu schädlichen Übergangsspitzen führen kann. Da das Abreissen nicht bei allen in Serie geschalteten Thyristors gleichzeitig erfolgt, muss derjenige, welcher zuerst sperrt, die ganze Spannung aufnehmen. Um dadurch eine Beschädigung der Thyristors zu vermeiden, werden alle mit einem Kondensator nach Fig. 17 ausgerüstet, dessen Kapazität in den Datenblättern angegeben wird. Bei hoher Induktivität im Lastkreis sollte ein Kondensator schon bei nur einem Thyristor Verwendung finden.

Fig. 17
Schaltung der Thyristors mit Kondensator C und Widerstand R bei der Serieschaltung



10. Überspannungsschutz

Vorübergehende Überspannungsspitzen können einen Thyristor zerstören, wenn diese die Scheitelperrspannung U_{RWM} überschreiten. Als Schutzmaßnahmen werden die Transformatorkreisläufe primär- oder sekundärseitig mit RC-Gliedern oder speziellen Selen-Schutzelementen, welche eine ähnliche Kennlinie wie Zenerdiode haben, jedoch für wesentlich höhere Ströme gebaut sind, überbrückt. Nach Westinghouse werden die RC-Glieder nach folgenden Formeln berechnet.

Einphasen-Schaltung:

$$C = \frac{200 P_2}{U_{ph}^2} \quad R = \frac{200}{C}$$

Dreiphasen-Schaltung:

$$C = \frac{60 P_2}{U_{ph}^2} \quad R = \frac{100}{C}$$

worin

C Kapazität des Kondensators pro Phase [μ F]

R Widerstand pro Phase [Ω]

P_2 totale Gleichstrom-Ausgangsleistung [W]

U_{ph} Spannung parallel zum RC-Glied (Phasenspannung des Transformators)

Der Kondensator muss mindestens für den doppelten Wert von U_{ph} ausgelegt sein. Es muss auch ein induktionsarmer Widerstand verwendet werden. Im weiteren sei festgehalten, dass die Formeln für eine Netzfrequenz von 50 Hz gelten. Die Schaltung eines Einphasen-Transformators mit Selen-Schutzelementen zeigt Fig. 18a. Wie aus Fig. 18b ersichtlich ist, können die Thyristors auch direkt mit solchen Schutzelementen verbunden werden.

Fig. 19 zeigt die Wirkungsweise der Selen-Schutzelemente. Die Berechnung dieser Schutzelemente bei bestimmter Energie der Überspannungsspitze und bei bestimmtem Intervall zwischen zwei Überspannungsspitzen wird in den Datenblättern angegeben.

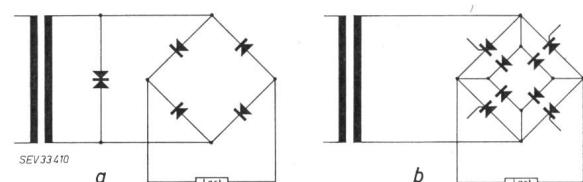


Fig. 18
Verwendung von Selen-Schutzelementen
a bei Einphasen-Transformatoren; b bei Thyristors

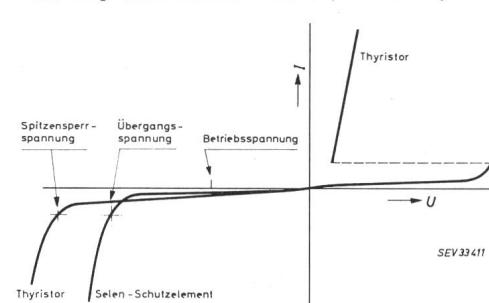
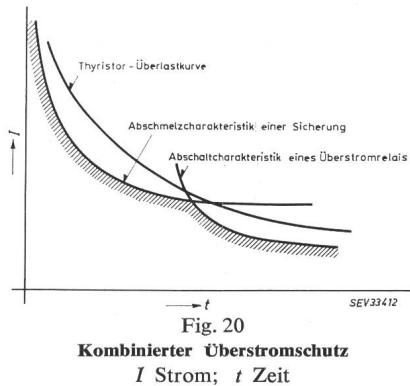


Fig. 19
Wirkungsweise der Selen-Schutzelemente
I Strom; U Spannung

11. Überstromschutz

Die kleine thermische Masse eines Thyristors bedingt eine genaue Bestimmung des Überstromschutzes. Die Abschmelzcharakteristik einer Sicherung, oder die Abschaltcharakteristik eines Überstromrelais müssen in allen Punkten unterhalb der Überlastkurve eines Thyristors liegen. In vielen Fällen müssen Sicherungen und Überstromrelais miteinander kombiniert werden. Ein Beispiel einer solchen Kombination zeigt Fig. 20.



Je nachdem, ob der Überstromschutz in einem Schaltzweig, auf der Gleichstromseite, oder der Wechselstromseite eingebaut wird, muss man die Überlastkurve eines Thyristors entsprechend umrechnen, um diese mit der Abschaltkennlinie des Überstromschutzes vergleichen zu können. Es ist besonders darauf zu achten, dass nur Effektivwerte, oder Mittelwerte miteinander verglichen werden. Meistens wird die Überstromkurve als Strommittelwert in Funktion der Überlastdauer angegeben. Wenn nun der Überstromschutz in den Gleichstromkreis einer Einphasenbrücke eingebaut wird, muss der Mittelwert der Überstromkurve z. B. mit dem Faktor 2 und beim Einbau in den Gleichstromkreis einer Dreiphasenbrücke mit dem Faktor 3 multipliziert werden. Die Umrechnungsfaktoren vom Mittelwert in den Effektivwert sind in der Fachliteratur angegeben.

12. Schlussbetrachtungen

An den steuerbaren Siliziumdioden wird weiterhin intensiv gearbeitet. Schon heute sind Bauelemente erhältlich, welche durch Polaritätsänderung an der Steuerelektrode sowohl ge-

zündet, wie gelöscht werden können. Diese Elemente sind unter der Bezeichnung «Turn-off-Thyristors» bekannt. Die Steuernennlinie eines «Turn-off-Thyristors» für einen Halbwellenstrom von 5 A ist in Fig. 21 abgebildet.

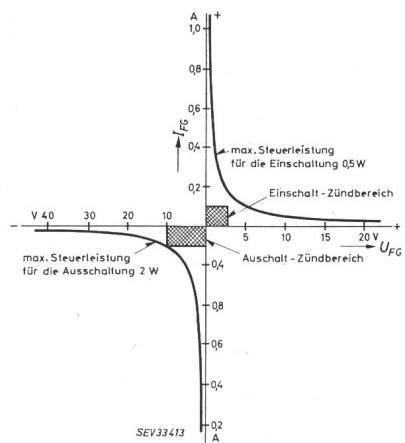


Fig. 21
Steuernennlinie eines «Turn-off-Thyristors»
 I_{FG} Steuerstrom (allgemein); U_{FG} Steuerspannung (allgemein)

Auch werden Thyristors hergestellt, die sich gegen Überspannungsspitzen selbst schützen, d. h. in Sperrrichtung ähnliches Verhalten wie eine Zenerdiode zeigen. Diese Elemente sind unter der Bezeichnung «Avalanche Thyristors» erhältlich.

Im weiteren wird danach getrachtet, die Sperrspannung und den Durchlaßstrom zu vergrößern, sowie die Überlastbarkeit zu verbessern.

Literatur

- [1] Silicon Controlled Rectifier Designers Handbook. Youngwood, Pennsylvania: Westinghouse Electric Corporation. 1963.
- [2] Controlled Rectifier Manual. Auburn N. Y.: General Electric Co. 1961. S. 352.
- [3] Jackson, S. P.: Selection and Application of Metallic Rectifiers, New York, Toronto, London: McGraw-Hill 1957, S. 326.
- [4] Spenke, E.: Silizium als Baustoff für Leistungsgleichrichter. Siemens — 2. 32 (1958) 3, S. 110...115.
- [5] Westinghouse: Publ. RB. 397/5. 5. 1961. London: Westinghouse Brake and Signal Co. Ltd. 1961.

Adresse des Autors:

H. Flückiger, Ingenieur, Westinghouse, Bremsen & Signale AG, Effingerstrasse 35, 3000 Bern.

Elektrizität und Brandgefahr

Von E. Schiessl, Zürich

614.841.245 : 621.3

En se basant sur les statistiques des incendies, dressées par l'Association des établissements cantonaux suisses d'assurance contre l'incendie, l'auteur examine dans quelle mesure l'électricité est la cause d'incendies survenus en Suisse.

Die kürzlich erschienene Brandstatistik 1962 der Vereinigung kantonaler Feuerversicherungs-Anstalten gibt nun Anlass dazu, die Brandursachen, im besonderen jene, die durch Elektrizität verursacht wurden, näher zu betrachten. Als Basis dienen die erwähnten Brandstatistiken, wobei zu bemerken ist, dass nicht alle Kantone dieser Vereinigung angeschlossen sind. Da die Basis jedoch ziemlich breit ist, können die Angaben trotzdem als repräsentativ betrachtet werden. Die folgenden Zahlen geben jeweils den Mittelwert aus den Jahren 1959...1962 an.