

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 18

Rubrik: Diskussionsbeiträge : zu den an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. April 1965 in Zürich gehaltenen Vorträgen

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: 08.01.2026

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

Diskussionsbeiträge

zu den an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. April 1965 in Zürich gehaltenen Vorträgen¹⁾

Dr. E. Anwander, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Bei Bahnunterstationen geht die Tendenz auf reichliche, kurzschlussfeste Auslegung mit einfacher Schutzeinrichtung. Man verzichtet auf hohe Ausnutzung der Dioden durch erhöhten Kühlaufwand und relativ komplizierten Schutz. Für die Auslegung im Kurzschlussfall ist die Grenzstromkennlinie der Diode massgebend.

In Fig. 1 ist der Grenzstromfaktor, d. i. das Verhältnis des bei einer Diode zugelassenen Grenzstromes $I_{Dzul.}$ zu ihrem Nenn-

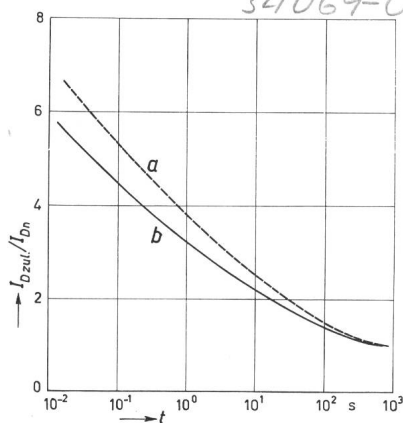


Fig. 1

Grenzstromkennlinie für forcierte Luftkühlung der Diode DS 200 mit einem Nennstrom von 200 A Mittelwert

Der Grenzstromfaktor $I_{Dzul.}/I_{Dn}$ stellt das zulässige Vielfache des Durchlaßstromes gegenüber dem Wert bei Nennbetrieb dar
a Belastung einer kalten Diode bei Gehäuse- und Sperrschichttemperatur von 35 °C; b wie unter a, aber für eine betriebswarme Diode bei 110 °C; t Zeit

strom I_{Dn} über der Überlastdauer aufgetragen. Man kann daraus ersehen, dass die Kühlung nur einen geringen Einfluss auf die Überlastbarkeit einer Siliziumdiode hat. Die Kurve a gilt für die Belastung einer kalten Diode von 35 °C Gehäuse- und Sperrschichttemperatur, die Kurve b für die Belastung der betriebswarmen Diode mit 110 °C Gehäuse- und 140 °C Sperrschichttemperatur. Bei einer Primärschalterzeit von 100 ms ergibt sich der Faktor 5 gegenüber dem Nennstrom. Der Kurzschlußstrom übersteigt aber den Nennstrom je nach Lage der Kurzschlußstelle um das 10- bis 15-fache. Also muss für eine kurzschlussfeste Auslegung bis zur Auslösung des Primärschalters der Belastungsstrom der Zelle auf den halben Nennstrom oder weniger herabgesetzt werden.

Andererseits verlangt auch schon die bei Bahnunterstationen geforderte betriebliche Überlastbarkeit eine Reduktion des

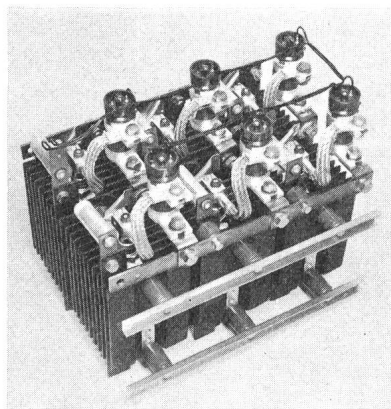


Fig. 2

Siliziumgleichrichter in Horizontalbauweise für natürliche Luftkühlung
Schaltung: Dreiphasen-Brückenschaltung; Gleichstrom bei 35 °C Zulufttemperatur 420 A; Gleichspannung 550...900 V je nach Diodenspannung

¹⁾ Siehe auch Bull. SEV 56(1965), Nr. 13, 14, 15 und 17.

Dauerstromes der Zellen, damit diese Überlasten ohne Überschreitung der zulässigen Grenzschichttemperatur von 140 °C aufgenommen werden können. So ist z. B. bei der CEI-Klasse E (mittlere Traktion) mit einer Überlast von 200 % während 1 min eine Überdimensionierung um den Faktor 1,6 und bei der Klasse F (schwere Traktion) 300 % während 1 min eine solche um den Faktor 2,2 nötig.

Wenn aber aus Gründen der Kurzschlussfestigkeit bzw. Überlastbarkeit der Belastungsstrom der Dioden auf den halben Nennstrom und weniger reduziert werden muss, dann ist ein erhöhter Kühlaufwand nicht mehr nötig. Es genügt eine einfache natürliche Kühlung ohne Ventilator. Daher wurde bei Brown Boveri ein spezieller Kühler für die natürliche Kühlung der 200-A-Diode entwickelt. Er gestattet, diese Diode bei einer Zulufttemperatur von 35 °C mit 140 A zu belasten. Die Kühler können mit Isolatoren einfach zu Gleichrichtersätzen zusammengebaut werden (Fig. 2), wobei das Isolationsniveau durch die Länge der Isolatoren beliebig gewählt werden kann. Die Stromanschlüsse werden an den angegossenen Flanschen befestigt. Bei der in Fig. 2 dargestellten horizontalen Bauweise können 24 Dioden in einer Ebene horizontal in ein Schaltfeld von 100 cm Breite und 80 cm Tiefe eingesetzt werden.

Wie Fig. 3 zeigt, ist es auch möglich, die Kühler stufenförmig anzuordnen, wodurch sich bei grösserer Diodenzahl eine bessere

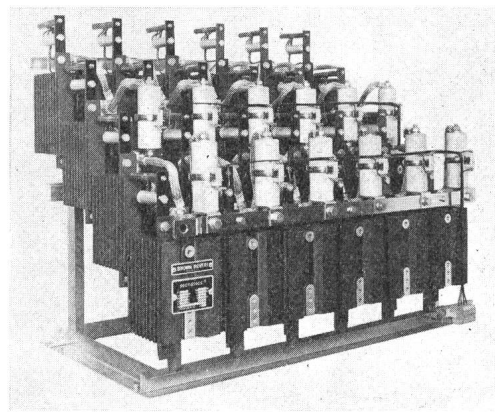


Fig. 3

Siliziumgleichrichter in Treppenbauweise für natürliche Luftkühlung
Schaltung: Dreiphasen-Brückenschaltung pro Schaltzweig 2 Dioden parallel und 2 Dioden in Serie; Gleichstrom bei 35 °C Zulufttemperatur 800 A; Gleichspannung 1000...1600 V je nach Diodenspannung

Zugänglichkeit ergibt. Ein solcher Gleichrichtersatz kann frei aufgestellt oder in ein Schaltfeld eingebaut werden. Meistens werden jedoch die Kühler gemäss Fig. 4 unter 45° geneigt und in einer vertikalen Ebene gruppiert. In dieser vertikalen Anordnung können bis zu 54 Dioden in einem Schaltfeld von 120 cm Breite, 220 cm Höhe und 80 cm Tiefe untergebracht werden. Dies entspricht einem Gleichstrom von 3000 A bei 550...900 V Gleichspannung je nach Diodenspannung. Die Neigung der Kühler um 45° hat auf die Kühlwirkung nur einen geringfügigen Einfluss. Es erhöht sich dadurch der Wärmewiderstand eines solchen Kühlers nur um 10 %.

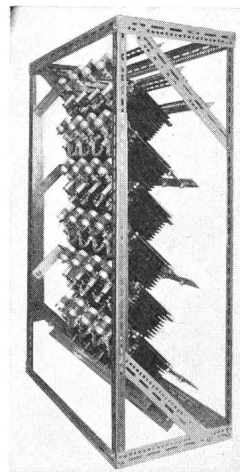


Fig. 4

Siliziumgleichrichter in Rectistackbauweise mit natürlicher Luftkühlung
Schaltung: Dreiphasen-Brückenschaltung, pro Schaltzweig 4 Dioden parallel; Gleichstrom bei 35 °C Zulufttemperatur 1400 A; Gleichspannung 550...900 V je nach Diodenspannung

Durch Entfall des Ventilators, seiner Überwachung und der Luftführung ergeben sich auf diese Weise sehr einfache und robuste Konstruktionen, die sich besonders für unbewachte Bahnunterstationen eignen. Sie haben auch den Vorteil, dass sie im Schaltfeld nur von einer Seite zugänglich sein müssen und daher eine Aufstellung an der Wand oder Rückseite gegen Rückseite möglich ist.

Von besonderer Bedeutung ist bei Halbleiteranlagen der Überspannungsschutz. Das Verhältnis von höchstzulässiger Stoßspitzensperrspannung zu Nennsperrspannung wird bei Dioden etwa mit dem Faktor 2 angesetzt. Die gewöhnlichen Überspannungsableiter auf der Primärseite des Transformators haben ein Ansprechverhältnis über 2. Sie genügen schon aus diesem Grunde allein nicht. Man schaltet daher üblicherweise auf der Sekundärseite Kondensatoren zu, die so ausgelegt sind, dass sie ohne Überschreitung der zulässigen Stoßspitzensperrspannung der Dioden die magnetische Energie des Transformators aufnehmen können. Für normale Leerabschaltungen des Transformators können damit die Kondensatoren ohne allzugrossen Aufwand bemessen werden; schwieriger wird es jedoch für atmosphärische Überspannungen und «rush»-Abschaltungen. Deshalb wurde ein spezieller Überspannungsableiter (Fig. 5) für Dioden entwickelt. Er wird entweder zwischen die Phasen der Sekundäranschlüsse oder parallel zu den Dioden geschaltet. Ein solcher Ableiter muss wegen des Faktors 2 zwischen der höchstzulässigen Stoss-

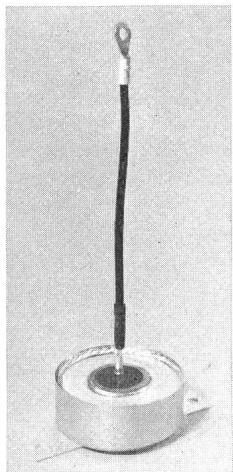


Fig. 5
Überspannungsableiter Typ HVM zum
Schutz von Halbleiterelementen

spitzensperrspannung und der Nennsperrspannung der Dioden ein Ansprechverhältnis um 1,7 haben. Darin lag die besondere Aufgabe dieser Entwicklung. Für eine Diode von 600 V Nennsperrspannung kann dieser Ableiter Typ HVM beispielsweise auf eine Ansprechspannung von 100 V und eine Löschspannung von 610 V eingestellt werden.

H.-J. Bossi, AG Brown, Boveri & Cie, Baden: Es stellt sich die Frage, warum sich die reine Stufenschaltersteuerung ohne Regeldrosselspulen, sei es mit schnellem Bahnstufenschalter, sei es mit konventionellem Schalter bei Chlor-Elektrolysen, bis heute nicht durchgesetzt hat.

Ein erster Grund liegt im Elektrolysebetrieb. Bei einer Aluminium-Elektrolyse mit magnetischer Anschnittsteuerung muss die Anlagenspannung dauernd bis zu 10 % zurückreguliert werden, da beim Anodeneffekt eine plötzliche Erhöhung der Ofenspannung auftritt. Dies bedeutet schlechten $\cos \varphi$ über den grossen Teil der Betriebsdauer. Bei Chlor-Elektrolysen mit einer stetigen magnetischen Regelung zwischen nur 1 bis 2 Transformatorstufen ist die $\cos \varphi$ -Verschlechterung nicht so markant. Wenn nicht grosse magnetische Regelreserven zum Auffangen des Überstromes beim Ausfall einer Gruppe vorhanden sind, ist auch der totale Regelaufwand bei Chlor wesentlich kleiner als bei Aluminium.

Bezüglich $\cos \varphi$, Wirkungsgrad und Preis ist daher das Bedürfnis nach einer reinen Stufenschaltersteuerung bei Chlor-Elektrolysen nicht so gross wie bei Aluminium-Elektrolysen.

Weitere Gründe liegen in der Stufenschaltersteuerung selber. Die Begrenzung der Stufenzahl pro Phase auf ca. 30...40 und der Wunsch nach möglichst grossen Regelbereichen führt dazu, dass die Steuerung sowohl unsymmetrisch im Bezug auf die Phasen wie auch auf die Gruppen gefahren werden muss. Eine unsymmetrische Phasensteuerung stellt keine besonderen Probleme. Die Verhältnisse bei unsymmetrischer Gruppensteuerung sind aus Tabelle I ersichtlich. Die Erhöhung der Spannung in nur einer Gruppe hat eine grössere relative Änderung des betreffenden Gruppenstromes zur Folge. Die dadurch notwendige

Strom- und Spannungsverhältnisse in Elektrolyse-Anlagen mit unsymmetrischen Gruppensteuerungen

Tabelle I

	Al	Cl
$\frac{\Delta i_1}{i_1} = \frac{\Delta i_2}{i_2} \frac{\Delta U_{dio}}{U_{dio}} = \frac{(1-b)(1-d)}{nd[1-b(1-d)]}$	7,8	7,1
$\frac{\Delta i_3}{i_3} \frac{\Delta U_{dio}}{U_{dio}} = \frac{nd-(1-b)(1-d)(n-1)}{nd[1-b(1-d)]}$	17,0	17,8
$\frac{\Delta i_0}{i_0} \frac{\Delta U_{dio}}{U_{dio}} = \frac{1}{n[1-b(1-d)]}$	0,47	1,2
$\frac{\Delta i_0}{i_0} \frac{\Delta U_N}{U_N} = \frac{1}{1-b(1-d)}$	1,4	3,6

U_{dio} Leerlaufgleichspannung der Gleichrichtergruppen; U_N Netzspannung; U_0 Ersatzspannung in der Badnachbildung; $i_{1,2,3}$ Gruppengleichströme; i_0 Badstrom; n Anzahl der Gleichrichtergruppen; d relativer Gleichspannungsabfall; b Badkenngrösse. Die Zahlenwerte beziehen sich auf ein Beispiel mit: $n = 3$; $d = 0,04$; $b = 0,3$ Aluminium, 0,75 Chlor.

Überdimensionierung spielt bei Aluminium-Elektrolysen mit $(n-1)$ -Dimensionierung eine viel kleinere Rolle als bei Chlor. Bei Aluminium ist auch die unruhige Last eher ein Vorteil, da dadurch die Überlast gleichmässig auf alle Gruppen verteilt wird, während beim ruhigen Chlorbetrieb die unsymmetrische Stufenstellung andauern und die Überlast für längere Zeit an einer Gruppe anstehen kann.

Noch wichtiger ist aber eine ungefähre Voraussage der zu erwartenden Schaltungen pro Zeiteinheit. Gerade diese Voraussage ist bei Chlor-Elektrolysen sehr schwierig. Soll der Strom auf ca. 1 % genau geregelt werden, müssen entsprechend den Tabellenwerten schon Netzspannungsschwankungen von weniger als 2,5 % zu einer Schaltung führen. Eine Voraussage über Netzschwankungen dieser Grössenordnung ist sehr schwierig. Gerade hier ist nun aber die Möglichkeit vorhanden, durch ein entsprechendes Integralverhalten des Reglers die Schaltzahlen des Stufenschalters fast beliebig herabzusetzen. Dabei wird allerdings in Kauf genommen, dass die momentanen Abweichungen des Badstromes grösser werden. Es ist sicher lohnend, die hier möglichen Grenzen besser auszunutzen. Der Gewinn am Wirkungsgrad von 1 bis 2 kW/MW, der bessere $\cos \varphi$ und vor allem die wesentliche Vereinfachung der Regelapparatur durch den Wegfall der Regeldrosselspulen sind sicher ein ebenso erstrebenswertes Ziel wie komplizierte Regeleinrichtungen, mit denen eine Genauigkeit und eine Schnelligkeit erreicht werden kann, die in vielen Fällen gar nicht notwendig ist.

P. Knapp, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Ich möchte hier noch ein Beispiel eines bereits ausgeführten Triebwagenantriebes mit Thyristorsteuerung anfügen.

Der Stromrichter des Triebwagens umfasst einen steuerbaren und einen nichtsteuerbaren Teil. Der nichtsteuerbare, mit Siliziumdioden bestückte Gleichrichter ist für die gesamte Motorleistung von 400 kW ausgelegt. Dem Gleichrichter ist der mit Thyristoren und Dioden ausgerüstete steuerbare Teil der Schaltung in Serie geschaltet. Dieser Teil ist wechselstromseitig über einen Stufenschalter an zwei benachbarte Abgriffe des Transformators angeschlossen. Sein Sperrvermögen ist für die Spannung zwischen den Abgriffen bemessen. Mit Hilfe der Steuerung kann es erreicht werden, dass der Sekundärstrom zur Gänze oder zu beliebigen Anteilen über den einen oder anderen Abgriff abgenommen wird. Wird der ganze Strom von einem Abgriff und über einen Stromrichtereingang geführt, kann der stromlose zweite Eingang des Stromrichters abbrandfrei um eine Stufe weiter geschaltet werden.

Die grobe Einstellung der Spannung erfolgt somit durch ein Stufenschaltwerk, während die Feineinstellung über die Stromrichtersteuerung stufenlos vorgenommen wird. Der Transformator hat hier im allgemeinen weniger Abgriffe als bei einer Überschalteinrichtung mit Lastschalter.

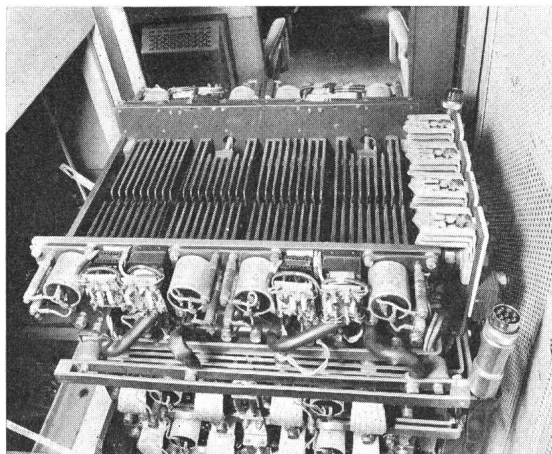


Fig. 1

Steckbare Einheit mit Stromrichterteil

Fig. 1 zeigt eine steckbare Einheit des Stromrichterteiles. In der obersten Reihe sind die Kühler, die Anschlusskabel, die Beschaltungsglieder und die Steuerimpulsübertrager der steuerbaren Ventile sichtbar. Die unteren Reihen sind mit Dioden bestückt, die in Brückenschaltung die gesamte Motorspannung gleichrichten.

Die gewählte Schaltung ermöglicht nicht nur eine stufenlose Regelung des Motorstromes bei geringstem Aufwand an steuerbaren Siliziumzellen, sondern auch eine stromlose Wahl der Transformatorabgriffe. Am Stufenschalter wird damit der sich abnützende Lastschalter entbehrlich. Die Anordnung erscheint als günstige Kombination der konventionellen Technik mit Stufenschalter und der modernen Leistungselektronik.

Der Triebwagen ist seit Jahresbeginn im Vorortverkehr eingesetzt und hat sich in dieser Betriebsart, mit vielem Halten und Wiederanfahren, bestens bewährt.

Messungen bestätigten die erwartete Tatsache, dass durch die Phasenanschnittsteuerung eines nur geringen Leistungsanteiles der Blindstrom und die Stromoberwellen in der Fahrleitung niedrig sind.

Dr. R. Zwicky, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Bei den Synchronmaschinen sind die Möglichkeiten der verlustlosen Drehzahlregelung an sich schon lange bekannt, doch fehlten in früheren Jahrzehnten die erst durch die Thyristoren und Transistoren gebotenen eleganten Mittel für den Aufbau der Leistungs- und Regelungskreise. Immerhin ist es interessant zu sehen, dass aus den 30er und 40er Jahren eine grosse Zahl von Patenten stammt, die mit dem Namen *Kern* verbunden sind und die sich mit dem Betrieb der Synchronmaschine als kommutatorloser Motor befassen. Bereits 1946 wurde ein solcher kommutatorloser Synchronmotor als Anwurfsschaltung für einen Phasenschieber in Portugal verwirklicht, welcher heute noch in Betrieb steht. Allerdings konnte sich diese Technik mit den damals verfügbaren Quecksilberdampfstromrichtern und den bescheidenen Mitteln der Regelungs- und Steuerungstechnik nicht in breitem Masse durchsetzen.

Mit der Entwicklung der Thyristoren und den heute verfügbaren Hilfsmitteln regelungs- und steuerungstechnischer Art ist der ganze Fragenkomplex wieder ausserordentlich aktuell geworden. Das Interesse wendet sich vor allem dem Asynchronmotor zu, da hier nicht nur der Kommutator, sondern auch die Schleifringe weggelassen. Für die verlustlose Drehzahlveränderung des Asynchronmotors müssen Schaltungen mit künstlicher Kommutierung verwendet werden, denn der Asynchronmotor liefert keine Kommutierungsblindleistung.

Die besonderen Eigenschaften des Asynchronmotors werfen einige ungewohnte Probleme bezüglich der Regelung auf. Betreibt man den Asynchronmotor in klassischer Weise mit einer Spannung, die der Frequenz proportional ist, so sinkt das Drehmoment bei tiefen Frequenzen sehr stark ab (Kurve A in Fig. 1). Man kann nun im Bereich der tiefen Frequenzen eine Ohmsche, frequenzunabhängige Komponente zur Spannung zufügen und erhält dann die gestrichelten Kurven B. Das Drehmoment ist

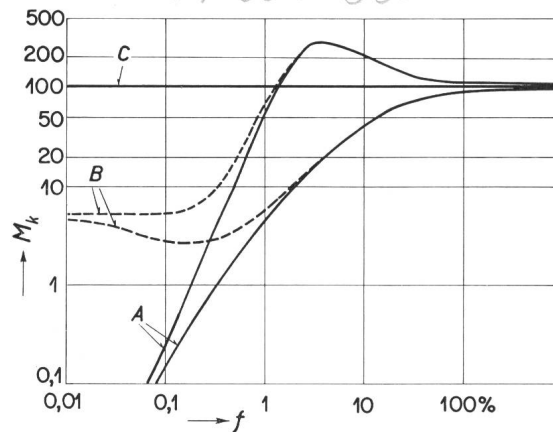


Fig. 1

Kippmoment M_k in Abhängigkeit von der Statorfrequenz f

Untere Kurve von A und B: Motorbetrieb; obere Kurve von A und B: Generatorbetrieb A Spannung proportional der Frequenz; B wie A, jedoch mit zusätzlicher konstanter Ohmscher Komponente; C konstanter Fluss

hier zwar auch bei sehr kleinen Frequenzen noch vorhanden, doch beträgt es weniger als $1/10$ des Nenndrehmomentes. Der Grund dafür liegt in der Ankerrückwirkung, weshalb mit zunehmender Last bei tiefen Frequenzen die Speisespannung erhöht werden muss. Wird dies in der Weise getan, dass der Fluss der Maschine konstant wird, so hat man über dem ganzen Drehzahlbereich ein konstantes Kippmoment (C).

Wird also ein Asynchronmotor in dieser Betriebsart bis zu sehr kleinen Drehzahlen oder im Umkehrbetrieb benutzt, so muss der Regelkreis einen konstanten magnetischen Fluss der Maschine gewährleisten. Dies ist möglich durch direkte Flussfassung mittels einer Hallsonde oder durch indirekte Regelkreise, welche aus den übrigen Betriebsdaten der Maschine die notwendigen Grössen ermitteln, um den Fluss konstant zu halten.

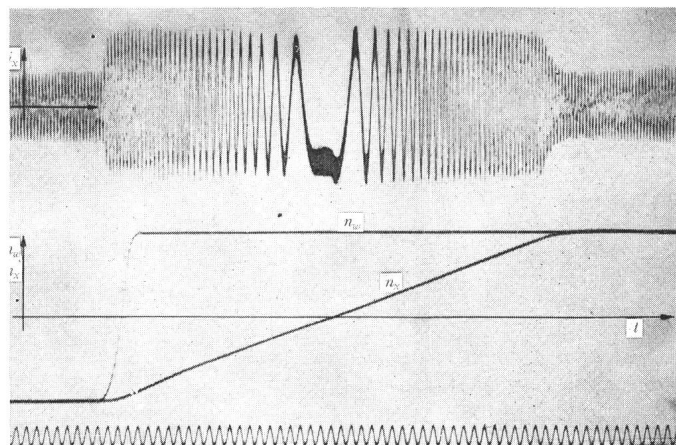


Fig. 2

Reversiervorgang eines umrichter gespeisten Käfigläufermotors von 30 kW

Strom i und Drehzahl n in Funktion der Zeit t

Index w Sollwert; Index x Istwert

Fig. 2 vermittelt einen Eindruck der Anwendung der indirekten Flussregelung an einem thyristorgesteuerten Käfigläufermotor von 30 kW. Die Tatsache, dass das Betriebsverhalten der Kurve C in Fig. 1 entspricht, geht aus der konstanten Beschleunigung des Motors hervor. Selbstverständlich kann eine solche Anordnung auch sehr rasch geregelt werden, da die gesamte Schaltung keine trägen Elemente enthält.

Durch Umrichter mit variabler Frequenz gespeiste Käfigläufermotoren bieten die gleichen betrieblichen Möglichkeiten, die man heute bei stromrichtergespeisten Gleichstrommotoren kennt. Zudem ist der Leistungsfaktor für das speisende Netz günstig. Motoren dieser Art sind zwar heute erst für spezielle Fälle wirtschaftlich, doch wird sich der wirtschaftliche Anwendungsbereich in den nächsten Jahren erweitern.