

Interner Bericht

DESY - K/2

März 1969

DESY-Bibliothek

8. APR. 1969 ✓

Sender-Gleichrichter mit Thyristoren als Stellglied

- Schaltung und Kurzschlußbetrachtung -

a) Erweiterung des Gleichrichters für den Synchrotron-Sender auf 50 kV, 32 A

b) Vorschlag für die Gleichrichter zur Speisung der Speicherring-Sender 45 kV, 17 A

von

Heinz Narciß

DESY-Sender-Gleichrichter mit Thyristoren als Stellglied -
Schaltung und Kurzschlußbetrachtung.

- a) Erweiterung des Gleichrichters für den Synchrotron-Sender auf
50 kV, 32 A
- b) Vorschlag für die Gleichrichter zur Speisung der Speicherring-
Sender 45 kV, 17 A

=====

I. Anforderungen

- Ia) Der Klystron-Sender für die Speisung der Beschleunigerstrecken des Synchrotrons wird bei DESY von einem Gleichrichter mit den Ausgangsdaten $U_n = 50 \text{ kV}$; $I_n = 16 \text{ A}_{arithm}$ versorgt. Der Gleichrichter besteht aus einem Hauptteil in Drehstrombrückenschaltung, dessen Versorgungsspannung über einen Stelltransformator in Stufen verstellt werden kann, und aus einem Zusatzgleichrichter, ebenfalls in Drehstrombrückenschaltung, dessen Eingangsspannung jetzt stufenlos mit Hilfe eines Transduktors geändert wird (Bild 1).

Die Anlage soll für den "Flat-Top-Betrieb" des Synchrotrons so erweitert werden, daß später der doppelte Strom bei gleicher Spannung abgegeben werden kann. Die kleinste bei Leerlauf noch einstellbare Spannung soll $U_{min} = 40 \text{ kV}$ betragen. Für das Testen des Klystrons muß dieser Wert bis auf 32 kV herabgesetzt werden können, dann wird jedoch gleichzeitig höchstens der halbe Gleichstrom der Gesamtanlage, also 16 A_{arithm} , gebraucht. Vorhandene Geräte sollen weitgehend weiterbenutzt werden. Austauschbarkeit der Bauteile in Schadensfällen ist wichtig. Die Anlage soll mit halbem Strom bei voller Spannung weiterbetrieben werden können, wenn Teile ausfallen sollten.

- b) Für den Speicherring werden 6 bis 8 Sendergleichrichter mit einer Nennspannung $U_n = 45 \text{ kV}$ und einem Nennstrom von $I_n = 17 \text{ A}_{arithm}$ gebraucht. Der Stellbereich soll von 35 kV bis 45 kV im ungünstigsten Fall reichen, das bedeutet 45 kV bei Nennstrom und 35 kV bei annähernd Leerlauf. Der Ripple soll, bezogen auf die Istspannung, kleiner als

1⁰/₀₀ bleiben. Schaltung und Glättungseinrichtung sind entsprechend zu wählen.

II. Schaltung

Für die Auswahl der Schaltung sind folgende Gesichtspunkte maßgebend:

- 1.) Die elektrische Beanspruchung der eingesetzten Bauteile soll im Betrieb und im Kurzschlußfall gering sein. Das wirkt sich günstig auf den Preis und auf die Betriebssicherheit aus.
- 2.) Die Forderung nach Austauschbarkeit der Geräte und nach Teilbetrieb in Störungsfällen macht ähnlich aufgebaute Anlagenteile notwendig.
- 3.) Das Stellglied soll auf schnelle Änderungen entsprechend rasch antworten können.
- 4.) Die Oberschwingungen auf der Gleichspannungsseite sollten möglichst klein sein, da dann der Aufwand für die Glättung entsprechend kleiner gehalten werden kann.
- 5.) Auch auf der Drehstromseite soll die Belastung des Netzes durch Stromüberschwingungen klein gehalten werden. Das bringt zwar keine Vorteile für den Verbraucher, dafür aber ganz erhebliche Betriebsverbesserungen für das Netz. Die Verringerung der Stromüberschwingungen bewirkt eine entsprechend geringere Verzerrung der Netzspannung. Da das DESY-Netz fast ausschließlich durch Gleichrichter belastet wird, läßt sich absehen, daß eines Tages kostspielige Maßnahmen gegen die Verzerrungen der Netzspannung angewandt werden müssen (Filterkreise mit den zugehörigen Schaltergeräten, Drosseln und Kondensatoren), wenn bei der Anschaffung von Gleichrichtergeräten nicht auch diese Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Bei den zuletzt beschafften 15 Gleichrichtergeräten für Experimente-Strahlführungsmagnete mit einer Gesamtleistung von 5,5 MW wurde die Schaltung entsprechend gewählt.
- 6.) Die Belastung des Netzes durch Blindleistung soll klein sein. Blindleistung kostet, wenn sie gewisse Beträge übersteigt, Geld.

Alle diese Punkte lassen sich durch die Wahl einer Schaltung mit hoher Pulszahl erfüllen. Gegenüber der normalerweise üblichen 6-pulsigen Schaltung (z.B. Drehstrom-Brückenschaltung) bietet die 12-pulsige Schaltung bei nur geringer Erhöhung der Anlagekosten die o.g. betrieblichen Vorteile. Eine 24-pulsige Schaltung würde schon erhebliche Mehrkosten verursachen und gleichzeitig unübersichtlich und damit störanfälliger werden. Außerdem ist nicht sicher, ob sich die hohe Pulszahl auf die Punkte 5 und 6 noch auswirkt, da die im Netz von anderen Geräten her vorhandenen Oberschwingungen Phasendrehungen der Versorgungsspannung verursachen können, die den theoretisch möglichen Vorteil der 24-Pulsigkeit praktisch aufheben. (VDE 0555, § 28.)

Über die Abhängigkeit des Oberschwingungsanteils von der Pulszahl p orientiert VDE 0555, § 64 - 67. Im Idealfall sind auf der Gleichspannungsseite nur Oberschwingungen der Ordnungszahl $\nu \geq k \cdot p$ und auf der Drehstromseite der Ordnungszahl $\nu \geq k \cdot p \pm 1$ möglich (k bedeutet einen ganzzahligen Faktor 1,2,3...). Eine Erhöhung der Pulszahl von $p = 6$ auf $p = 12$ bewirkt also, daß die Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen $\nu < 12$ bzw. $\nu < 11/13$ herausfallen. Da die Amplitude der Oberschwingungen im ungünstigsten Fall ungefähr proportional $1/\nu$ ist, wirkt sich die höhere Pulszahl so aus, als ob die Amplitude der Oberschwingungen herabgesetzt worden wäre. Der für die dem Netz entnommene Blindleistung maßgebende Leistungsfaktor λ ist abhängig vom Grundschwingungsgehalt des Netzstromes V , von dem von der Aussteuerung abhängigen Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ und vom strom- und schaltunsabhängigen Gleichspannungsfall d_x . Auch hier macht sich die Erhöhung der Pulszahl vorteilhaft bemerkbar.

- IIa) Aus den o.g. Gründen soll die vorhandene 6-pulsige Drehstrombrücke zu einer 12-pulsigen Saugdrosselschaltung ergänzt werden. Die für die Glättung der Gleichspannung erforderlichen Drosseln können so aufgeteilt und angeordnet werden, daß sie gleichzeitig als Saugdrossel wirken. Der Modulatorwiderstand dient als Grundlast.

Der als Stellglied jetzt benutzte Transduktor hat sich in der vorhandenen Schaltung nicht bewährt. Der Transduktor neigt unter bestimmten Lastverhältnissen zum Schwingen, so daß etwa die Hälfte des Aussteuerbereiches verschänkt werden muß. Ohne größere Änderungen der Anlage mit dem damit verbundenen Aufwand an Zeit und Geld ist ihm dieses Schwingen auch nicht abzugewöhnen. Es wurde deshalb beschlossen, für die erweiterte Anlage Thyristorstellglieder zu verwenden. Dafür stehen im Prinzip drei Schaltungen zur Verfügung:

- 1.) Ersatz des Zusatzgleichrichters und des Transduktors durch Thyristoren in Drehstrombrückenschaltung (Bild 2). Dieser Weg ist problematisch, da die Ansteuerung von so vielen in Reihe geschalteten Thyristoren nicht ganz einfach und die Gefahr einer Unterbrechung des Hauptkreises in Fehlerfällen zu groß ist.
- 2.) Anwendung einer von Wolfgang Reichelt in den AEG-Mitteilungen 8 (1968) 3, S. 169 - 171, angegebenen Schaltung nach Bild 3 mit Schwenk- und Anpassungstransformatoren. Die Primärwicklungen der Anpassungstransformatoren werden bei dieser Schaltung offen ausgeführt und an die Sternpunktseite eine Thyristorbrückenschaltung gelegt. Die Glättungsdrossel muß zum Schutz der Thyristoren vor Einschaltstromstößen auf der Unterspannungsseite angeordnet werden.
- 3.) Verwendung eines Thyristor-Drehstromstellers nach Bild 4, bestehend aus Schwenktransformatoren, Thyristoren in Antiparallel-Schaltung und Anpassungstransformatoren.
Diese Schaltung wird von BBC ohne Verbindung der Transformator-Sternpunkte empfohlen, wobei nur Y_y - bzw. Dd-Schaltungen verwendet werden dürfen, wenn Kennlinienknicke bei den verschiedenen Aussteuerungen vermieden werden sollen.
Siemens verbindet die Sternpunkte der Transformatoren und kommt damit zu niedrigeren Thyristorbeanspruchungen (Bardahl, Anschnittsteuerungen durch Thyristoren, Technische Rundschau 1968, Nr. 32, 34, 36, 39). Dafür müssen die Transformatorsternpunkte voll belastbar sein, so daß nur Dy-, Yz-Schaltungen oder Yy-Schaltungen mit Ausgleichwicklung benutzt werden können.
Mit der Siemenslösung ergibt sich die Gesamtschaltung nach Bild 5.

IIb) Die Gleichrichter für den Speicherring könnten 12-pulsig nach Bild 6a oder 6b geschaltet werden. Der Gesichtspunkt des Teilbetriebs bei Störungen entfällt hier, da 5 bis 7 andere Gleichrichter mit gleicher Schaltung vorhanden sind. Dagegen werden die noch nicht vorhandenen Filter auf der Gleichspannungsseite kleiner als bei einer 6-pulsigen Schaltung. Bei dieser Gleichrichtergröße (ca. 760 kW) lohnt es sich heute nicht mehr, noch eine Aufteilung in einen unverstellbaren Teil und ein in Reihe geschaltetes Stellglied vorzunehmen. Die Anwendung eines Stelltransformators bringt wegen der hohen Kosten für den Stufenschalter ebenfalls keine Vorteile.

Bei den Sendergleichrichtern für den Speicherring handelt es sich insgesamt um eine Gleichrichterleistung zwischen 4,5 MW und 6 MW. Nach dem vorher Gesagten sollte eine 12-pulsige Schaltung auch dann vorgenommen werden, wenn damit nur auf die Verhältnisse im 10 kV-Netz Rücksicht genommen würde und sonst keine weiteren Vorteile vorhanden wären. Zum Vergleich:

Bei DESY installierte Gleichrichterleistung	ca. 22 MW
1969 werden zusätzlich angeschlossen	5,5 MW
Leistung der Sendergleichrichter für den Speicherring	4,5bis 6 MW
Leistung der Gleichrichter f. Strahlführungsmagnete	ca. 5 MW (3 GeV)
Speicherring	ca. 9 MW (4 GeV)
DESY 110/10 kV Transformatorleistung	40 MVA
Augenblickliche Spitzenleistung	ca. 10 MW

III. Kurzslußbetrachtung

1.) Zweck

Die Thyristoren müssen gegen äußere und innere Kurzschlüsse durch Sicherungen geschützt werden. Eine Überdimensionierung der Thyristoren für den vollen Kurzschlußstrom wie bei den Hochspannung-Brückengleichrichtern wäre nicht sinnvoll. Andererseits dürfen die Sicherungen der Thyristoren nicht ansprechen, wenn Kurzschlüsse auf der Hochspannungsseite auftreten, da diese z.B. durch Überschläge in einem Klystron verursachten Kurzschlüsse als betriebsmäßig möglich angesehen werden sollen. In ungünstigen Fällen ist mit 10 solcher Kurzschlüsse pro Tag zu rechnen.

5 Kurzschlüsse können hintereinander auftreten, dann darf eine Viertelstunde Pause angenommen werden. In der Praxis treten bei der Anlage für den Synchronsender Pausen von mindestens einer Minute zwischen 2 Kurzschlüssen auf, da nach einer Auslösung die Anlage erst eingeschaltet werden kann, wenn der Stelltransformator seine unterste Stellung erreicht hat. Bei den Gleichrichtern für den Speicherring entfällt diese Bremse. Dort kann man durch ein Zeitrelais diese Mindestzeit einstellen, damit sich die Thyristoren und Gleichrichter zwischen 2 Kurzschlüssen weitgehend abkühlen können.

Insgesamt sind folgende Schutzmöglichkeiten vorhanden:

Überstromschnellauslösung auf Wechselstromseite

Thermische Überstromauslösung auf Wechselstromseite

Gittersperre

Kurzschließer auf Drehstromseite

Sicherungen

Doppelte Sicherheit wird nach den gemachten Erfahrungen als unbedingt notwendig angesehen. Bei der Kurzschlußbetrachtung soll so vorgegangen werden, daß zunächst der mögliche Kurzschlußstrom ermittelt und dann der Einfluß und die Wirksamkeit der einzelnen Schutzeinrichtungen geprüft wird. Bei der Berechnung werden vereinfachende Annahmen gemacht. Die genaue Berücksichtigung aller Komponenten wäre zu umständlich. Sie ergäbe kleinere Kurzschlußströme, also größere Sicherheit. Zum Teil sind die genauen Daten der Bauelemente noch gar nicht bekannt, zum Teil sind sie noch frei wählbar.

2.) Annahmen und Ersatzschaltbild (Bild 7a und 7b)

2.01 Bei der Ermittlung der Impedanzen wird mit den Kurzschlußspannungen gerechnet; es wird also $X = Z$ gesetzt.

2.02 Netz- und Leitungsinduktivitäten, Netz- und Leitungswiderstände werden vernachlässigt.

- 2.03 Die Drosseln 4k1 und 4k2 werden vernachlässigt.
- 2.04 Der Durchlaßwiderstand der Gleichrichter und Thyristoren wird vernachlässigt.
- 2.05 Alle Impedanzen werden auf $|u| = U_{\text{eff}} = \frac{10300}{\sqrt{3}} \text{ V}$ bezogen eingesetzt (10,3 kV wegen der Primärspannung der Transformatoren), wenn nicht anders vermerkt. Transformatorübersetzung $u_v = \frac{U_{2V}}{U_{1V}}$
- 2.06 Der Unterschied zwischen 380 V und 400 V wird vernachlässigt.
- 2.07 Die Thyristoren der Thyristorsteller 3p1 und 3p2 werden einfach kommutierend angenommen. Die Thyristoren sollen voll geöffnet sein und während des Kurzschlusses auch voll geöffnet bleiben ($\infty \rightarrow 0$).
- 2.08 Bei den Saugdrosselschaltungen wird angenommen, daß sich der Kurzschlußstrom völlig unabhängig voneinander in den beiden sechspulsigen Teilbrücken ausbildet. Andererseits wird angenommen, daß ein Kurzschluß der einen Brücke immer auch einen Kurzschluß der anderen Brücke bedeutet. Gemeinsame Strombegrenzungs-drosseln müssen entsprechend berücksichtigt werden.
- 2.09 Vollkommene Entkopplung der einzelnen Transformatorinduktivitäten wird angenommen. Die Phasenverschiebung von 30° bei der 12-pulsigen Schaltung wird nicht berücksichtigt.
- 2.10 Alle Spannungen werden als Phasenspannungen eingesetzt. Es wird immer mit Effektivwerten gerechnet.
- 2.11 Der Kurzschluß wird an den Klemmen des Glättungskondensators 4k3 angenommen. Der Entladewiderstand von 4 bis 8 Ohm wird also auch nicht berücksichtigt.
- 2.12 Außerdem wird der Kurzschlußstrom bei 3-poligem Kurzschluß hinter dem Thyristorstellglied ermittelt. Dabei gelten nicht die Einschränkungen 2.03 u. 2.08.

III. 3.) Rechnung:

Gesucht wird der Laststrom I auf der 10.3 kV-Seite für den Fall, daß der Lastwiderstand R_{L50kV} auf der 50 kV-Seite gegen 0 geht. Impedanzen ohne Angabe einer Bezugsspannung im Index beziehen sich auf 10,3 kV, Impedanzen mit $*$ im Index sind auf die jeweils zugehörige Spannung bezogen. Sie müssen erst auf 10.3 kV umgerechnet werden.

Für die Reihenschaltung nach dem Ersatzschaltbild 7a gilt allgemein:

$$3.1 \quad I_{L50kV} = \frac{U_2 \ddot{u}_2 + U_4 \ddot{u}_4 - I_{L50kV} j (X_{22*} + X_{42*})}{R_{L50kV}}$$

$$3.2 \quad I_{L50kV} = \frac{I_1}{\ddot{u}_1 \ddot{u}_2} = \frac{I_3}{\ddot{u}_3 \ddot{u}_4}$$

$$3.3 \quad I = I_1 + I_3 = (\ddot{u}_1 \ddot{u}_2 + \ddot{u}_3 \ddot{u}_4) I_{L50kV}$$

$$3.4 \quad U_2 = \ddot{u}_1 [U - j X_0 I - j X_m I_1] - \frac{I_1}{\ddot{u}_1} j (X_{22*} + X_{21*})$$

$$3.5 \quad U_4 = \ddot{u}_3 [U - j X_0 I - j X_{31} I_3] - \frac{I_3}{\ddot{u}_3} (X_{32*} + X_{41*})$$

Durch Einsetzen und Auflösen nach \underline{I}_L erhält man:

$$3.6 \quad \underline{I}_{L_{\text{neu}}} = \frac{U [\underline{u}_1^* \underline{u}_2^* + \underline{u}_3^* \underline{u}_4^*]}{R_{L_{\text{neu}}} + j \left\{ X_0 (\underline{u}_1^* \underline{u}_2^* + \underline{u}_3^* \underline{u}_4^*)^2 + (X_{11} \underline{u}_1^*{}^2 + X_{22*}) \underline{u}_2^*{}^2 + X_{21*} \underline{u}_2^* \underline{u}_1^* + X_{22*} \right. \\ \left. + (X_{31} \underline{u}_3^*{}^2 + X_{32*}) \underline{u}_4^*{}^2 + X_{41*} \underline{u}_4^* \underline{u}_3^* + X_{42*} \right\}}$$

Von jetzt an muß zwischen der zu erweiternden Anlage

a) Gleichrichter für den Synchrotron-Sender
und den neu zu planenden Anlagen

b) Gleichrichter für die Speicherring-Sender
unterschieden werden. Wenn man die mit einem Stern bezeichneten
Widerstände auf die gemeinsame Versorgungsspannung umrechnet,
ergibt sich:

	a.)	b.)
3.7		
	$X_{22*} = \underline{u}_2^*{}^2 \cdot X_{22}$	$X_{22*} = \underline{u}_1^*{}^2 \underline{u}_2^*{}^2 \cdot X_{22}$
	$X_{42*} = \underline{u}_3^*{}^2 \underline{u}_4^*{}^2 \cdot X_{42}$	$X_{42*} = \underline{u}_3^*{}^2 \underline{u}_4^*{}^2 \cdot X_{42}$
	$X_{12*} = \underline{u}_1^*{}^2 \cdot X_{12}$	$X_{12*} = \underline{u}_1^*{}^2 \cdot X_{12}$
	$X_{21*} = X_{21}$	$X_{21*} = \underline{u}_1^*{}^2 \cdot X_{21}$
	$X_{32*} = \underline{u}_3^*{}^2 \cdot X_{32}$	$X_{32*} = \underline{u}_3^*{}^2 \cdot X_{32}$
	$X_{41*} = \underline{u}_3^*{}^2 \cdot X_{41}$	$X_{41*} = \underline{u}_3^*{}^2 \cdot X_{41}$
		$\underline{u}_1^* \underline{u}_2^* = \underline{u}_3^* \underline{u}_4^*$

Eingesetzt erhält man für \vec{I} mit $X_v = X_{v1} + X_{v2}$!

$$3.8a \quad \vec{I}_a = \frac{U (\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{u}_3 \dot{u}_4)^2}{R_{L_{SDUV}} + j \left\{ X_0 (\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{u}_3 \dot{u}_4)^2 + (X_1 \dot{u}_1^2 + X_2) \dot{u}_2^2 + (X_3 + X_4) \dot{u}_3^2 \dot{u}_4^2 \right\}}$$

$$3.8b \quad \vec{I}_b = \frac{U (\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{u}_3 \dot{u}_4)^2}{R_{L_{SDUV}} + j \left\{ X_0 (\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{u}_3 \dot{u}_4)^2 + (X_1 + X_2) \dot{u}_1^2 \dot{u}_2^2 + (X_3 + X_4) \dot{u}_3^2 \dot{u}_4^2 \right\}}$$

Mit $R_{L_{SDUV}} \rightarrow 0$, $|j| \rightarrow I_{kd}$, $|U| = U_{pe}$ und den Vereinfachungen unter 3.7b wird:

$$3.9a \quad I_{kda} = \frac{U_{pe}}{X_0 + (X_1 \dot{u}_1^2 + X_2) \frac{\dot{u}_2^2}{(\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{u}_3 \dot{u}_4)^2} + (X_3 + X_4) \frac{\dot{u}_3^2 \dot{u}_4^2}{(\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{u}_3 \dot{u}_4)^2}}$$

$$3.9b \quad I_{kdb} = \frac{U_{pe}}{X_0 + X_v}$$

Sollte im Kurzschlußfall bei einem der beiden Thyristorsteller nach b.) die Gittersperre versagen, so wäre von dem Zeitpunkt an, an dem die Gittersperre des einen Thyristorstellers, z.B. p1, angesprochen hat $\dot{u}_2 = 0$. Dann wirkt die Gleichrichterbrücke n1 auf der Hochspannungsseite nicht mehr als Spannungsquelle. Es ergibt sich:

$$3.10b \quad I_{kdb3} = \frac{U_{pe}}{X_0 + 2X_v}$$

Auf den ersten Blick scheint dieser Wert kleiner zu sein als der unter 3.9b. Man muß aber berücksichtigen, daß der Strom im Thyristorsteller interessiert, nicht der Gesamtstrom. I_{kd2} ist auf den Anlagennennstrom zu beziehen, I_{kd3} nur auf den halben Anlagennennstrom.

Für die Saugdrosselschaltung bzw. Parallelschaltung nach dem Ersatzschaltbild 7b kann man mit den Vereinfachungen

$$u_1 u_2 = u_3 u_4$$

$$X_v = X_1 = X_2 = X_3 = X_4$$

gleich schreiben:

$$3.11b \quad I_{kd2} = \frac{U_{ph}}{X_c + X_v}$$

Wenn eine der beiden Gittersperren versagt, dann ergeben sich wieder die Verhältnisse wie oben

$$3.11c \quad I_{kd3} = \frac{U_{ph}}{X_c + 2X_v}$$

wobei I_{kd3} ebenfalls auf den halben Anlagennennstrom zu beziehen ist.

Ein Überschwingfaktor, der sich aus dem Einschaltaugenblick des Kurzschlußstromes ergibt, ist für den ungünstigsten Fall zu berücksichtigen. Der Überschwingfaktor hängt vom Verhältnis der im Kurzschlußkreis liegenden Induktivitäten zu den entsprechenden Vorwiderständen ab. Nach Kümmel (ETZ A, Bd. 86, 1965, H.4, S. 102-110) wird mit

$$I_{max} = \frac{X_k}{R_k} \approx 5$$

$$k = 1,5$$

Die Zeitkonstante, mit der das Gleichstromglied abklingt, ist

$$T = \frac{X_k}{\omega R_k} \approx 16 \text{ ms.}$$

Es sind also jeweils drei Werte zu berücksichtigen

- 1.) der Dauerkurzschlußstrom I_{kd} in A_{eff}
- 2.) der Anfangskurzschlußwechselstrom für $I_M'' = \kappa \cdot I_{kd}$
eine Halbwelle in A_{eff} und
- 3.) der Stoßkurzschlußstrom $I_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kd}$ in A

Für den inneren oder äußeren Kurzschluß am Thyristorsteller wird vorausgesetzt, daß

- 1.) bei den Schaltungen nach b.) nicht zufällig gleichzeitig an beiden Thyristorstellern Kurzschlüsse auftreten. Da der Fall gleichzeitiger Kurzschlüsse günstiger ist, braucht er nicht weiter betrachtet zu werden.
- 2.) der Nennstrom des anderen Anlagenteiles klein gegenüber dem Kurzschlußstrom ist und damit kaum zur Verringerung des Kurzschlußstromes beiträgt.

Dann gilt

$$3.12 \quad I_{kd} = \frac{U_{ph}}{X_c + X_{1,3}}$$

bzw. auf die Zwischenkreisspannung bezogen:

$$3.12 \quad I_{kd*} = \frac{U_{ph*}}{(X_c + X_{1,3}) \omega_{1,3}^2} .$$

4.) Zahlenwerte :

Die aus den Nenndaten der einzelnen Anlagenteile nach den Schaltungen Bild 5 und 6 errechneten Zahlenwerte sind in den Tabellen zusammengestellt.

8a) für den Gleichrichter Synchrotron-Sender

8b) für die Gleichrichter Speicherring-Sender

Die angegebenen Werte sind noch nicht alle endgültig festgelegt.

Die Tabelle 9 enthält den jeweiligen Anlagennennstrom I_n , den Dauerkurzschlußstrom I_{kd} , den Anfangskurzschlußwechselstrom I_k^N und den Stoßkurzschlußstrom I_s bei den verschiedenen möglichen Kurzschlußfällen. Die Kurzschlußströme am Thyristorsteller werden jeweils für eine Zwischenkreisspannung von $380 V_{verk}$ und $500 V_{verk}$ angegeben. Thyristoren für höhere Sperrspannungen sind teuer und Sicherungen meist nur bis zu Spannungen von $500 V$ verfügbar. Es gibt bei den in Frage kommenden Stromstärken aber Thyristoren mit zulässigen Spitzensperrspannungen bis zu $1650 V$, so daß von den Thyristoren her, mit einem Sicherheitsfaktor von $2,5$ für Überspannungen, noch $810 V_{verk}$ bei der Schaltung mit verbundenen Transformatorsternpunkten zugelassen werden können. Es muß dem Hersteller überlassen werden, ob er es vorzieht, Thyristoren mit hohen Sperrspannungen einzusetzen oder Thyristoren mit niedrigeren Sperrspannungen parallel zu schalten. Der Nachteil der letzten Lösung ist der höhere Aufwand für Steuerung und Schutz und der größere Platzbedarf.

Es zeigt sich, daß die neu zu beschaffende Strombegrenzungs-drossel $2k\Omega$ für den Gleichrichter Synchrotron-Sender so groß wie die vorhandene Drossel $1k\Omega$ werden sollte, wenn der Kurzschlußstrom auf Werte begrenzt werden muß, die denen der alten Anlage vergleichbar sind. Auch aus Ersatzhaltungsgründen ist es zweckmäßig, die Drosseln gleich groß zu machen.

Die Impedanz des Stelltransformators $1m1$ geht kaum in die Rechnung ein. Sie kann vernachlässigt werden. Dagegen muß berücksichtigt werden, daß der Transformator später fest auf das Übersetzungsverhältnis $ü_1=0,7$ eingestellt werden wird. Bei dem neuen Teil des Gleichrichters für

den Synchrotron-Sender wird kein Stelltransformator benötigt.
Es ist $\dot{u}_1 = 1$ und $x_1 = 0$ einzusetzen.

Bei den Gleichrichtern für die Speicherring-Sender erhält man den ungünstigsten Kurzschlußfall beim Versagen einer Gittersperre. Es muß dann dafür gesorgt sein, daß die Thyristoren noch durch die Sicherungen geschützt werden. Auf eine Strombegrenzungs-drossel oder entsprechend hohe Transformatorimpedanzen kann nicht verzichtet werden. Die Gleichrichter auf der 50 kV-Seite und die Thyristorsteller müßten sonst zu weit überdimensioniert werden.

5.) Überstromkennlinien

Die Firma Siemens hat den Auftrag für die Lieferung des Thyristor-Drehstromstellers für den Gleichrichter Synchrotron-Sender erhalten. Da außerdem nur von dieser Firma ausreichende Unterlagen zur Verfügung stehen, wurden in die Bilder 10 und 11 die Kennlinien von Siemens-Thyristoren und -Sicherungen als Beispiel eingetragen. Es wird wahlweise mit einem Thyristor/Zweig BStP bei $380 V_{\text{verk}}$ und $500 V_{\text{verk}}$ (Bild 10) und mit zwei parallelen Thyristoren/Zweig BStP 0260 bei $380 V_{\text{verk}}$ mit einem Parallelschaltfaktor $p = 0,8$ gerechnet (Bild 11). In dieses Bild wurde außerdem eine Kennlinie des Thyristors P 05110 eingezeichnet. Die Kurzschlußströme für die Grenzen wurden aus Tabelle 9 ($380 V_{\text{verk}}$) im Verhältnis $\frac{380 V}{810 V} = 0,47$ umgerechnet, der Belastungsfaktor wurde zu $c = 0,3$ angenommen. Bei den Gleichrichtern für die Speicherring-Sender sind die Werte nur geringfügig verschieden. Die Bilder 10 und 11 können deshalb annähernd auch auf die dort herrschenden Verhältnisse übertragen werden.

Die Auswertung der Kennlinien ergibt:

1.) 1 Thyristor P 0260 pro Zweig,

Zwischenkreisspannung $380 V_{verk}$ (Bild 10)

Der bei Kurzschlüssen auf der 50 kV-Seite maximal mögliche Anfangskurzschlußwechselstrom liegt so hoch, daß die Sicherungen schneller als Kurzschließer und Gittersperre ansprechen. Die Schaltung erfüllt damit nicht die für den Betrieb geforderten Bedingungen.

2.) 1 Thyristor P 0590 pro Zweig,

Zwischenkreisspannung $500 V_{verk}$ (Bild 10)

Die vom Betrieb her geforderten Bedingungen sind erfüllt. Die Forderung nach "doppelter Sicherheit" wird aber bei Anfangskurzschlußwechselströmen zwischen 3300 A und 3740 A nur dann erfüllt, wenn man annimmt, daß Gittersperre und Kurzschließer nach längstens 18 ms wirksam werden können. Das sollte sich durch den Einsatz schneller Relais erreichen lassen. Ein mechanischer Kurzschließer ist unbedingt erforderlich, da die Kennlinie der kalten Sicherung die Thyristorkennlinie zu früh schneidet. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß auch einmal unmittelbar nach dem Einschalten ein Kurzschluß auftritt. Die Wärmezeitkonstante der Sicherungen ist wesentlich größer als die der Thyristoren, so daß man nicht einfach davon ausgehen kann, daß kurz nach dem Einschalten auch die Thyristoren noch kalt, d.h. überlastbarer, sind. Knappe Auslegung. Verbesserung durch Vergrößern der Strombegrenzungsdrossel möglich.

3.) 2 parallele Thyristoren P 0260 pro Zweig

Zwischenkreisspannung $380 V_{verk}$ (Bild 11)

Für den Gleichrichter Synchrotron-Sender werden alle Forderungen erfüllt sofern ein mechanisch wirkender Kurzschließer vorgesehen wird. Andernfalls ist wegen der verhältnismäßig hohen Ansprechzeit der 10 kV-Leistungsschalter keine doppelte Sicherheit bei einem Versagen der Gittersperre vorhanden.

Wenn für die Gleichrichter Speicherring-Sender Niederspannungsschalter mit den entsprechend kleineren Auslösezeiten verwendet werden, dann ist für die betriebsmäßig möglichen Kurzschlüsse kein Kurzschließer nötig.

Für Kurzschlüsse am Thyristorsteller mit einem Kurzschlußstrom zwischen 3200 A und 3500 A fehlt jedoch die doppelte Sicherheit, da hier die Kennlinie der kalten Sicherung die Thyristorkennlinie zu früh schneidet. Gerade bei solchen Kurzschlüssen sollte die Gittersperre nicht als einzige Sicherheitsmaßnahme dienen. Doppelte Sicherheit ohne den Einbau von mechanischen Kurzschließern ließe sich nur erzielen, wenn man damit rechnen könnte, daß die Leistungsschalter zuverlässig nach spätestens 55 ms den Kurzschlußkreis unterbrochen haben.

- 4.) 1 Thyristor P 05110 pro Zweig,
Zwischenkreisspannung 810 V_{verk} (Bild 11)

Hier gilt ebenfalls das unter 3.) für 2 parallele Thyristoren bei 380 V_{verk} Gesagte. Der einfach geschützte Bereich erstreckt sich auf Ströme zwischen 3200 und 3600 A. Die Schalter müßten nach längstens 40 ms unterbrochen haben, wenn man auf mechanische Kurzschließer verzichten wollte. Der Einbau von Kurzschließern dürfte sich damit nicht vermeiden lassen.

Herrn Bothe danke ich für seine Unterstützung bei der Klärung kritischer Punkte.

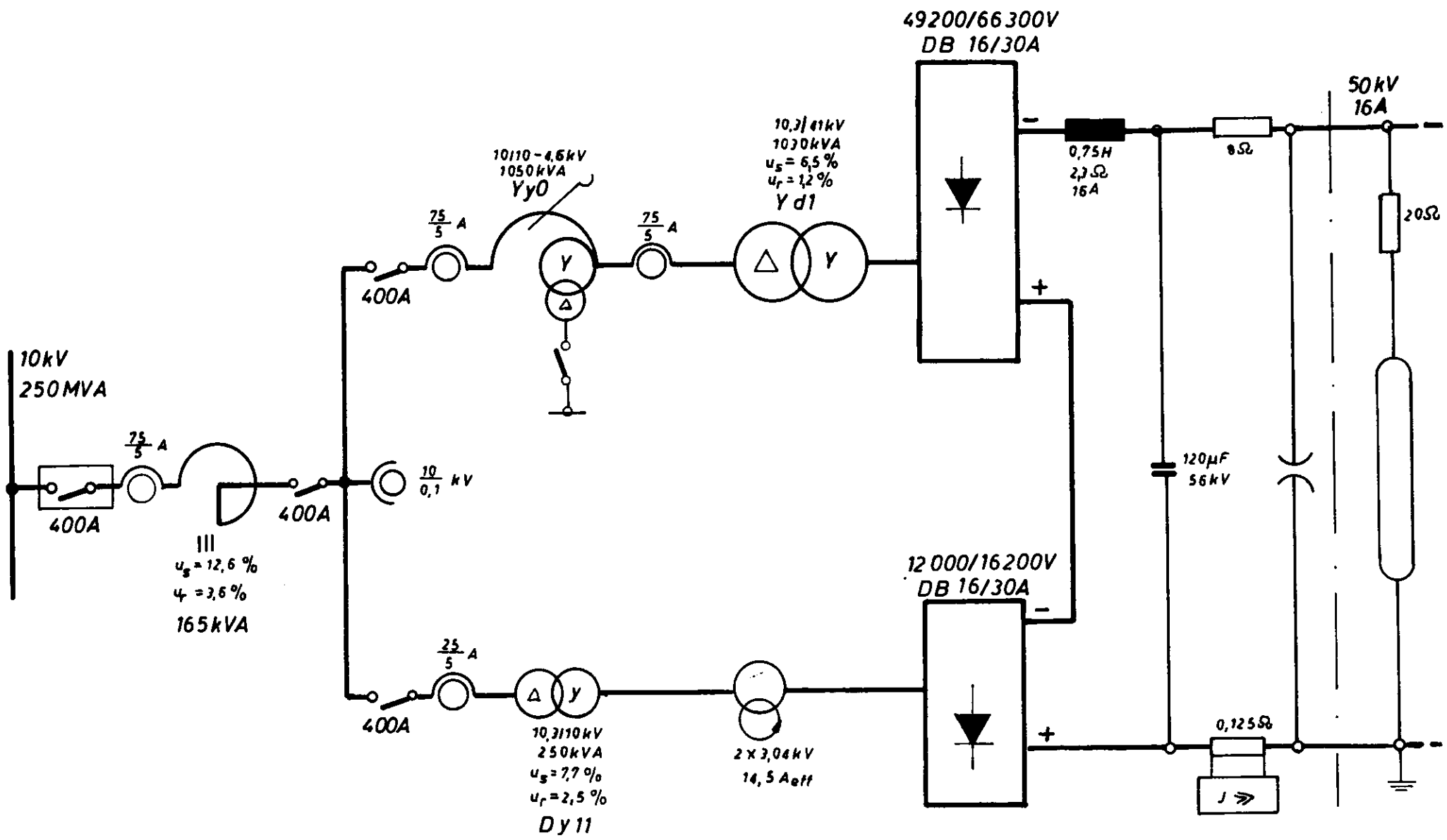


Bild 1 zu K-2, März 1969

Prinzipschaltbild Synchrotron-Sender-Gleichrichter 50kV, 16A (vorhandene Anlage)

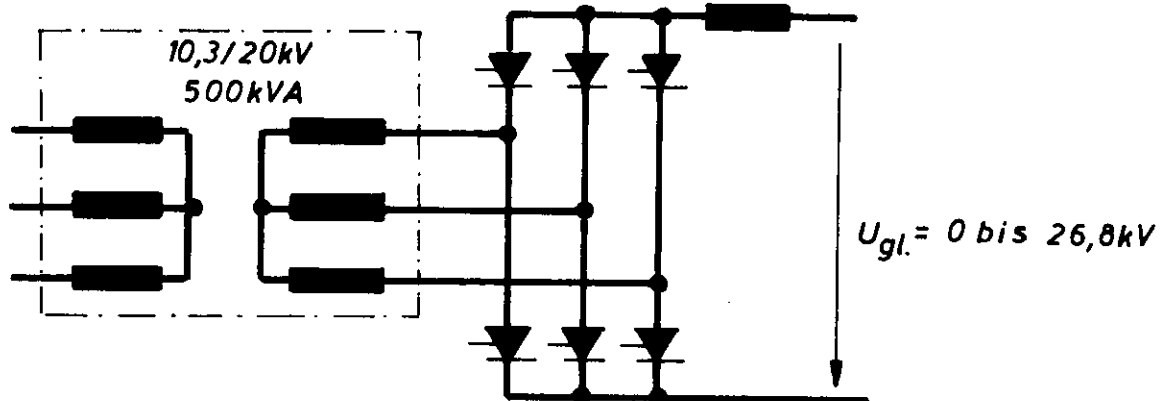


Bild 2 zu K-2, März 1969

Stellglied mit Thyristoren auf der Gleichspannungsseite

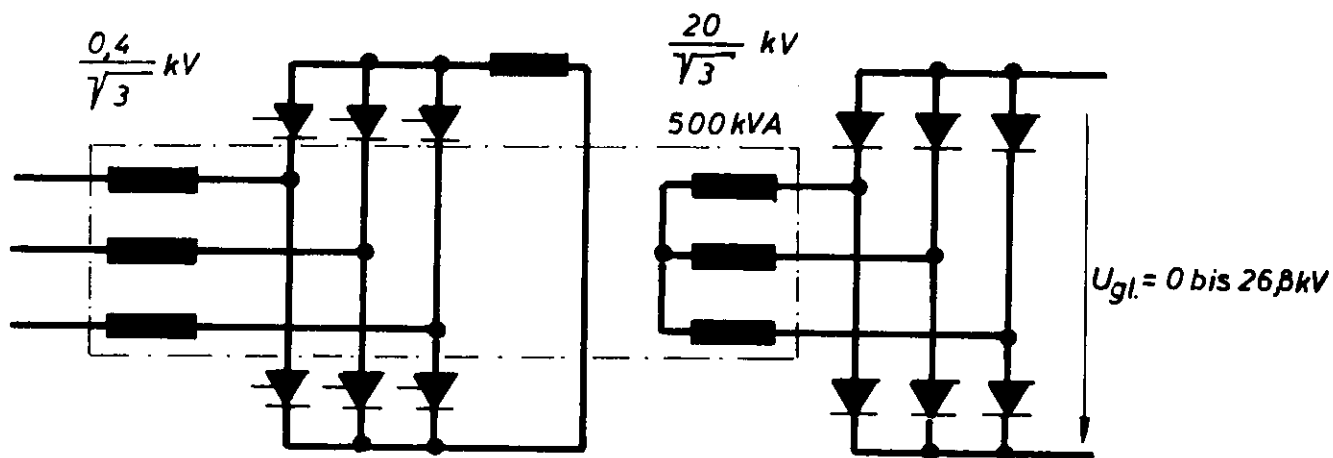


Bild 3 zu K-2, März 1969

Stellglied mit Thyristoren im Transformatorsternpunkt

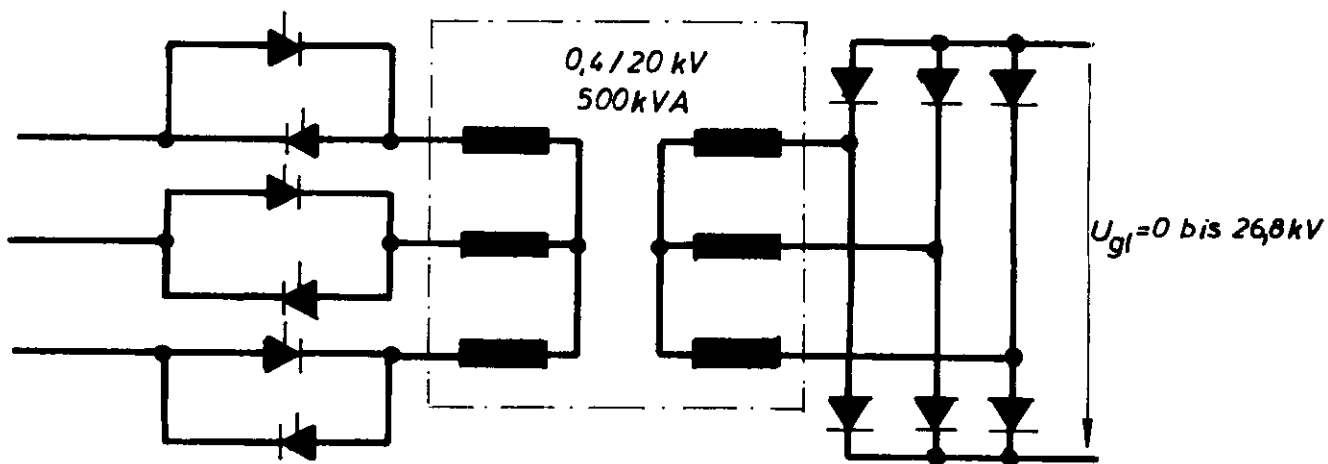


Bild 4 zu K-2, März 1969

Stellglied mit Thyristoren in Antiparallelschaltung

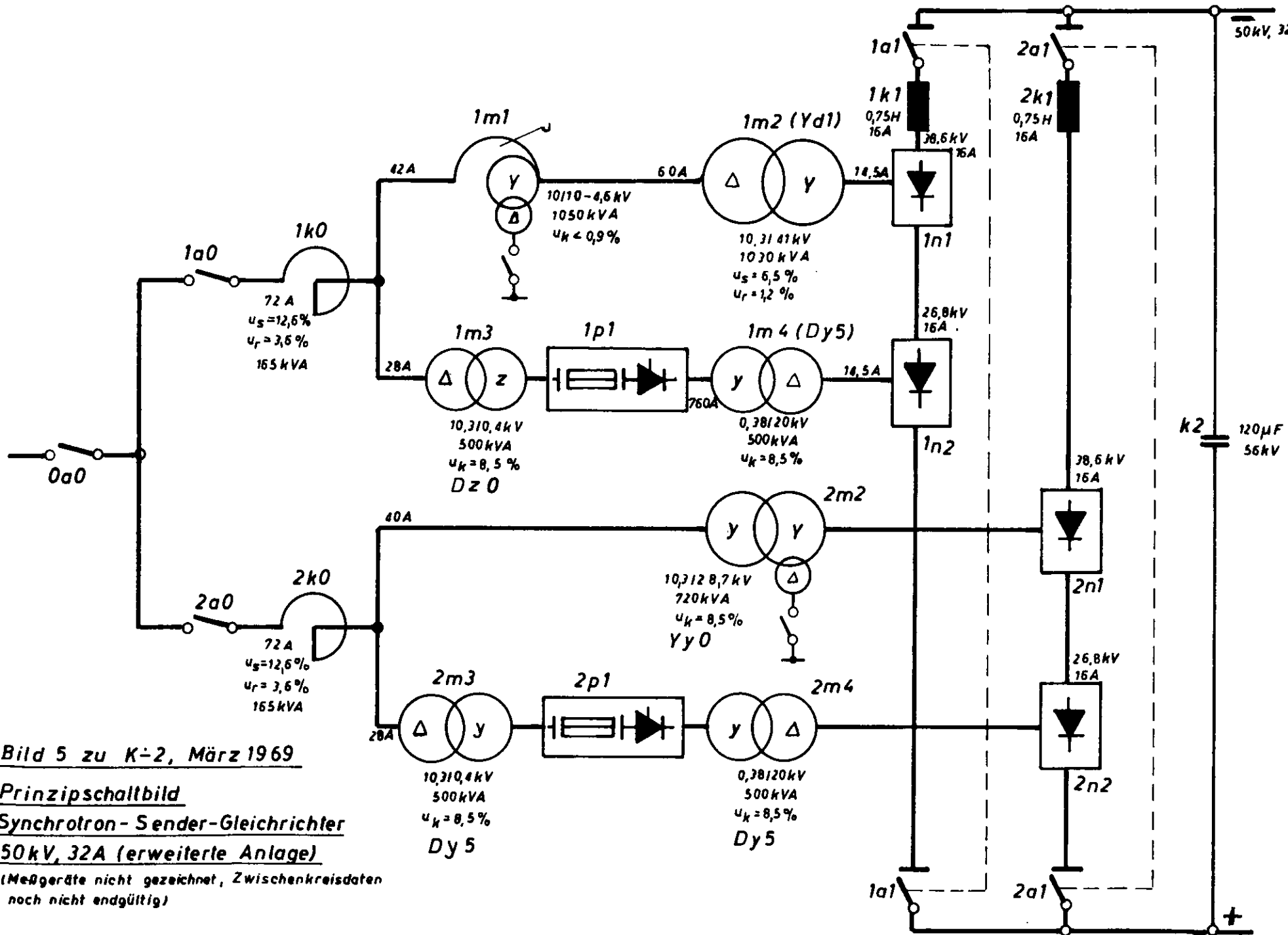


Bild 5 zu K-2, März 1969

Prinzipschaltbild

Synchrotron-Sender-Gleichrichter

50kV, 32A (erweiterte Anlage)

(Meßgeräte nicht gezeichnet, Zwischenkreisdaten noch nicht endgültig)

Bild 6a Reihenschaltung

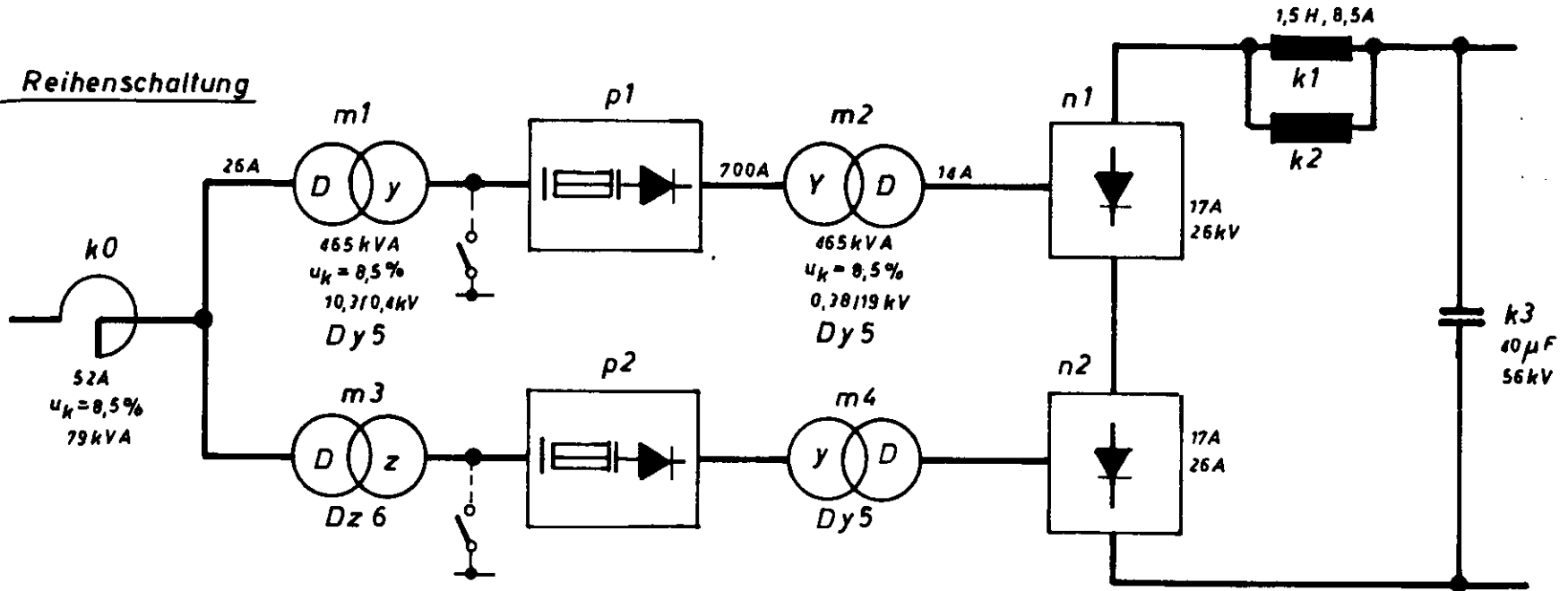
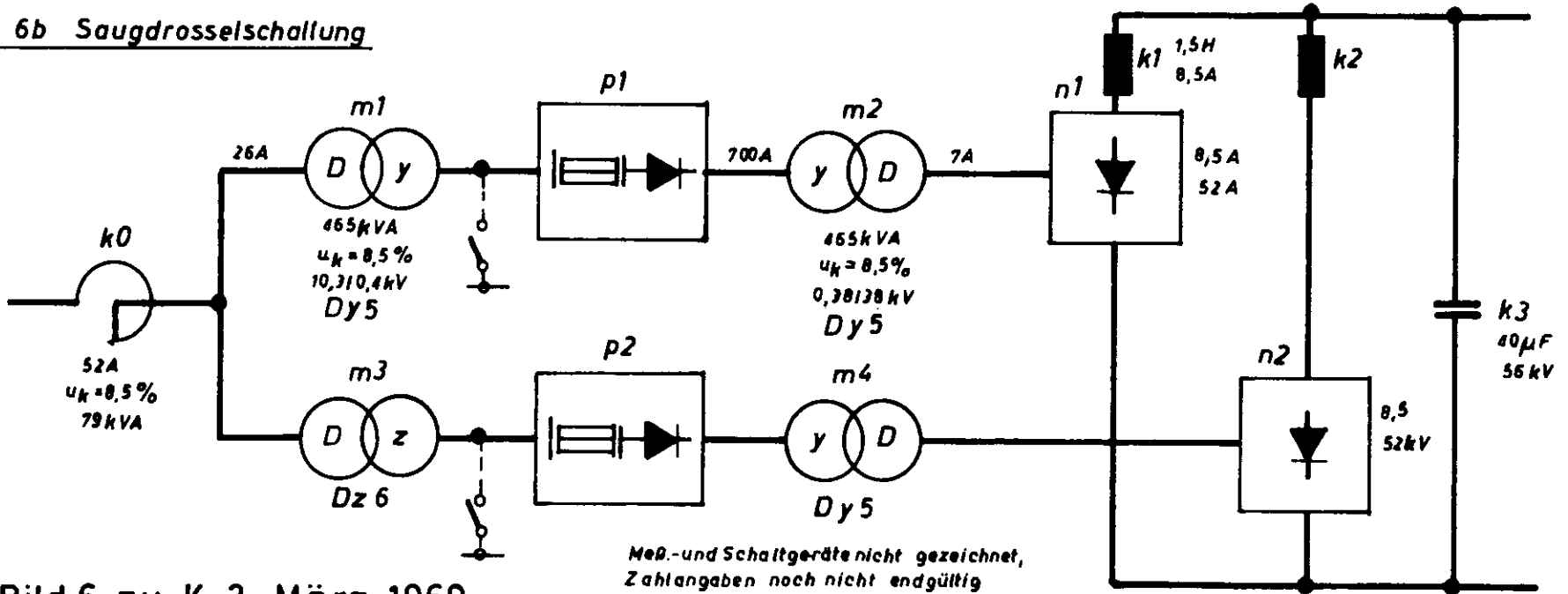


Bild 6b Saugdrosselschaltung



Meß- und Schaltgeräte nicht gezeichnet,
Zahlangaben noch nicht endgültig
festgelegt.

Bild 6 zu K-2, März 1969

Prinzipschaltbild Speicherring - Sender - Gleichrichter 45kV, 17A

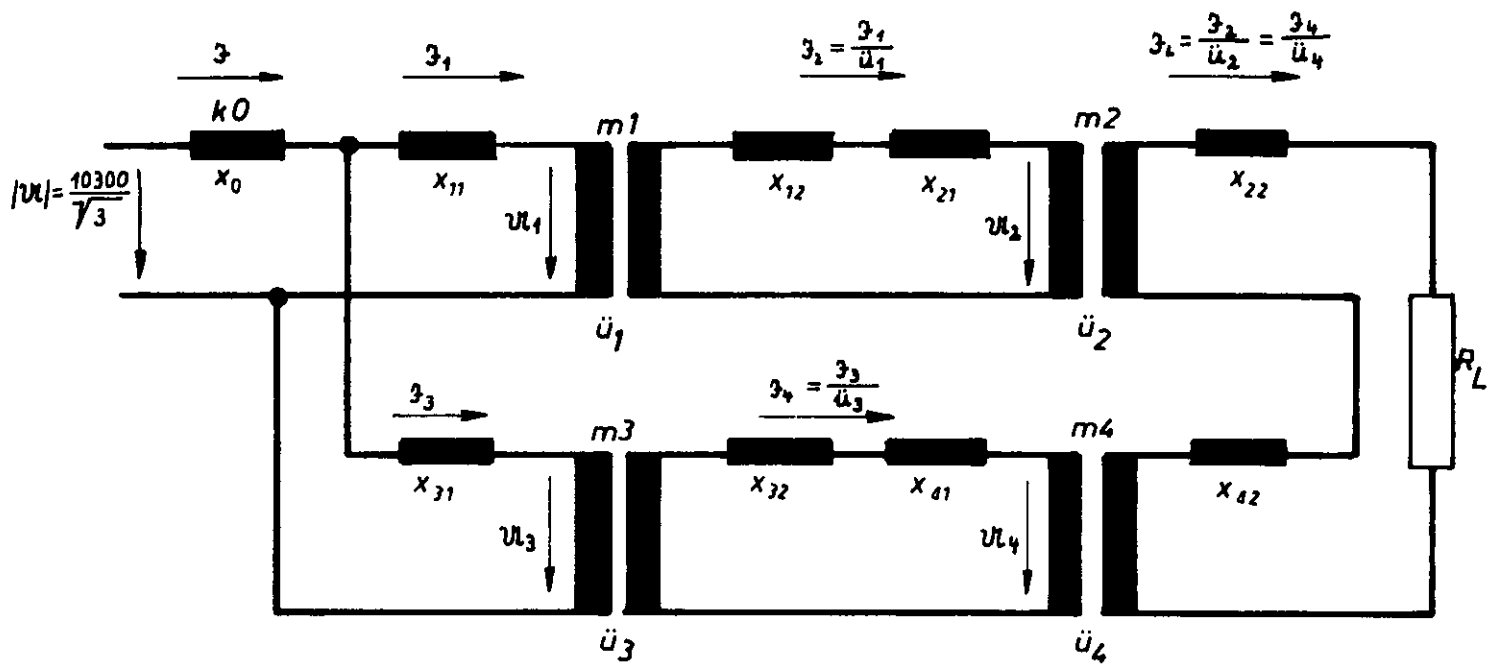


Bild 7a Saugdrosselschaltung (Reihenschaltung)

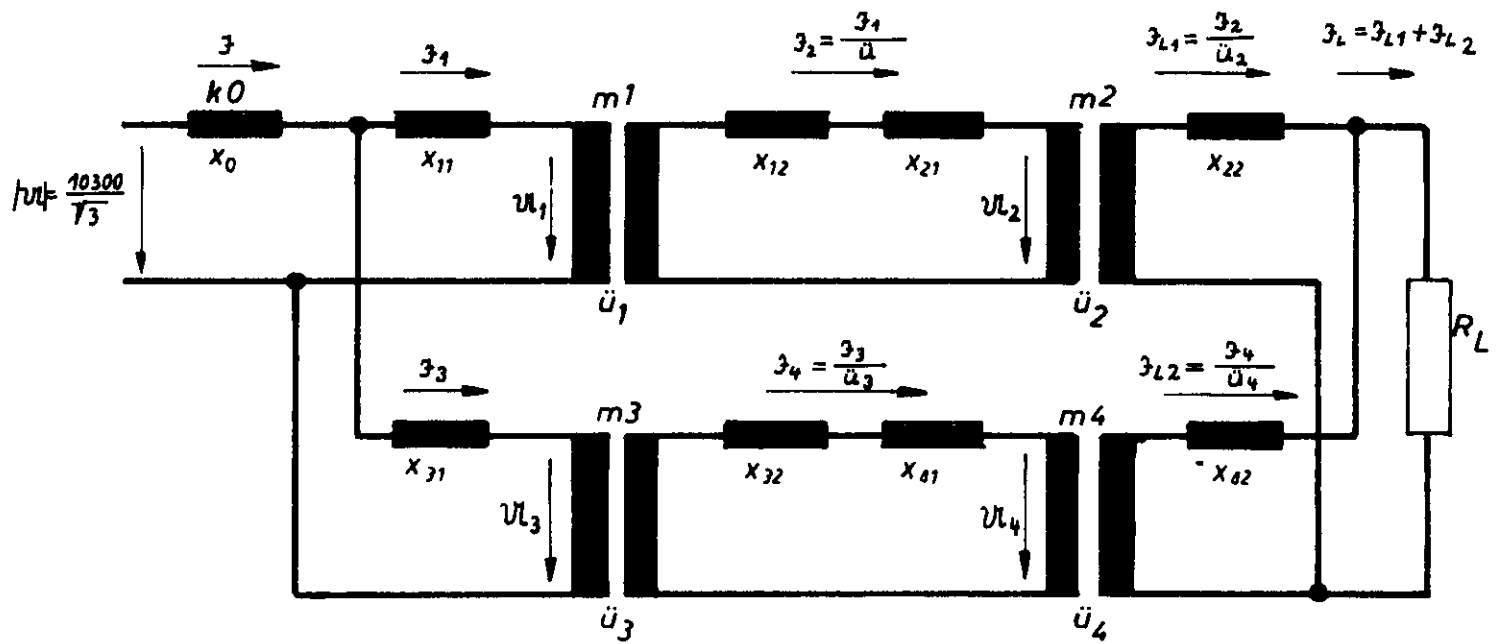


Bild 7b Saugdrosselschaltung (Parallelschaltung)

Bild 7 zu K-2, März 1969

Ersatzschaltbild für Sender-Gleichrichter (einpolig)

(Vereinfachungen nach III.2 beachten)

Tabelle 8 a.)

Gerät	Leistung [kVA]	u_k [%]	$J_{n,10,3kV}$ [A]	U_{n1} [kV]	U_{n2} [kV]	u_y	x_y [Ω]
Drossel 1k0	165	13,1	72	—	—	—	10,8
Stelltrafo 1m1	1050	< 0,9	60	10,3	7,0	0,7	< 0,9
Haupttrafo 1m2	1030	6,6	60	10,3	41,0	4,0	6,5
Schwenktr. 1m3	500	8,5	28	10,3	0,4	0,04	18,0
Anpassungstr. 1m4	500	8,5	28	0,38	20,0	52,6	18,0
J_n -Anlage			70				
Drossel 2k0	165	13,1	72	—	—	—	10,8
Haupttrafo 2m2	720	8,5	40	10,3	28,7	2,8	12,7
Schwenktr. 2m3	500	8,5	28	10,3	0,4	0,04	18,0
Anpassungstr. 2m4	500	8,5	28	0,38	20,0	52,6	18,0
J_n -Anlage			68				

Tabelle 8 b.)

Gerät	Leistung [kVA]	u_k [%]	$J_{n,10,3kV}$ [A]	U_{n1} [kV]	U_{n2} [kV]	u_y	x_y [Ω]
Schwenktrafo m1, m2	465	8,5	26	10,3	0,4	0,04	19,5
Anpassungstr. m2, m4	465	8,5	26	0,38	38,0	100,0	19,5
	465	8,5	26	0,38	19,0	50,0	19,5
Drossel k0	79	8,5	52	—	—	—	9,7

Bild 8 zu K-2, März 1969

Gerätedaten für: a.) Gleichrichter Synchrotron-Sender
b.) Gleichrichter Speicherring-Sender

Kurzschlußströme
Gesamtanlage

		U_{verk} [kV]	J_n [A _{eff}]	J_{kd} [A _{eff}]	J_k'' [A _{eff}]	J_s [A]	$\frac{J_{kd}}{J_n}$	$\frac{J_k''}{J_n}$	$\frac{J_s}{J_n}$	
a.1	Gleichrichter Synchrotron, Erweit.	10,3	70	270	405	572	3,9	5,8	8,2	
a.2	Gleichrichter Synchrotron Neuer Teil	10,3	68	276	414	586	4,0	6,0	8,5	
a.3	Kurzschließer am Thyristorsteller	10,3	28	206	309	437	7,4	11,1	15,7	*

b.1	Gleichrichter Speicherring	10,3	52	204	306	432	3,9	5,8	8,2	
b.2	Gittersperre versagt	10,3	26	122	183	258	4,7	7,0	9,9	*
b.3	Kurzschluß am Thyristorsteller	10,3	26	204	306	432	7,8	11,6	16,4	*

Kurzschlußströme am Thyristorsteller.

a.2	Kurzschluß auf 50kV-Seite, <u>Strang</u>	0,38	760	3040	4560	6450	4,0	6,0	8,5	
a.2	Kurzschluß auf 50kV-Seite, <u>Zweig</u>	0,38	540	2160	4560	6450	4,0	8,4	11,9	
a.3	Kurzschluß am Thyristor, <u>Zweig</u>	0,38	540	4000	8470	12000	7,4	15,7	22,2	*
a.2	Kurzschluß auf 50kV-Seite, <u>Strang</u>	0,50	580	2310	3470	4900	4,0	6,0	8,5	
a.2	Kurzschluß auf 50kV-Seite, <u>Zweig</u>	0,50	410	1640	3470	4900	4,0	8,4	11,9	
a.3	Kurzschluß am Thyristor, <u>Zweig</u>	0,50	410	3040	6440	9110	7,4	15,7	22,2	*

b.1	Kurzschluß auf 45kV-Seite, <u>Strang</u>	0,38	707	2760	4100	5800	3,9	5,8	8,2	
b.1	Kurzschluß auf 45kV-Seite, <u>Zweig</u>	0,38	500	1950	4100	5800	3,9	8,2	11,6	
b.2	Gittersperre versagt, <u>Zweig</u>	0,38	500	2350	4950	7000	4,7	9,9	14,0	*
b.3	Kurzschluß am Thyristor, <u>Zweig</u>	0,38	500	3900	8200	11600	7,8	16,4	23,2	*
b.1	Kurzschluß auf 45kV-Seite, <u>Strang</u>	0,50	537	2100	3120	4410	3,9	5,8	8,2	
b.1	Kurzschluß auf 45kV-Seite, <u>Zweig</u>	0,50	380	1480	3120	4410	3,9	8,2	11,6	
b.2	Gittersperre versagt, <u>Zweig</u>	0,50	380	1790	3760	5320	4,7	9,9	14,0	*
b.3	Kurzschluß am Thyristor <u>Zweig</u>	0,50	380	2960	6240	8820	7,8	16,4	23,2	*

* Sicherungen dürfen ansprechen

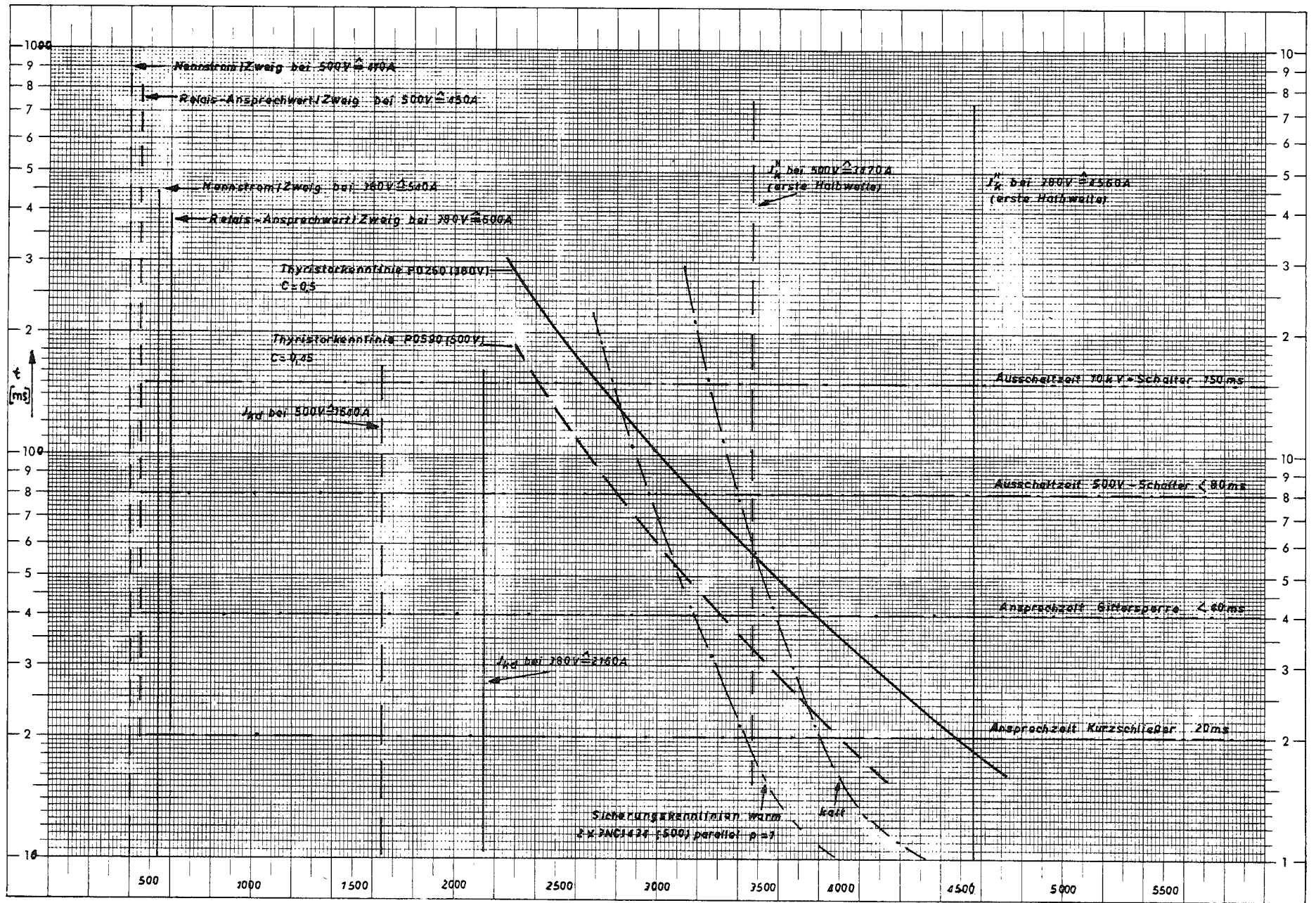
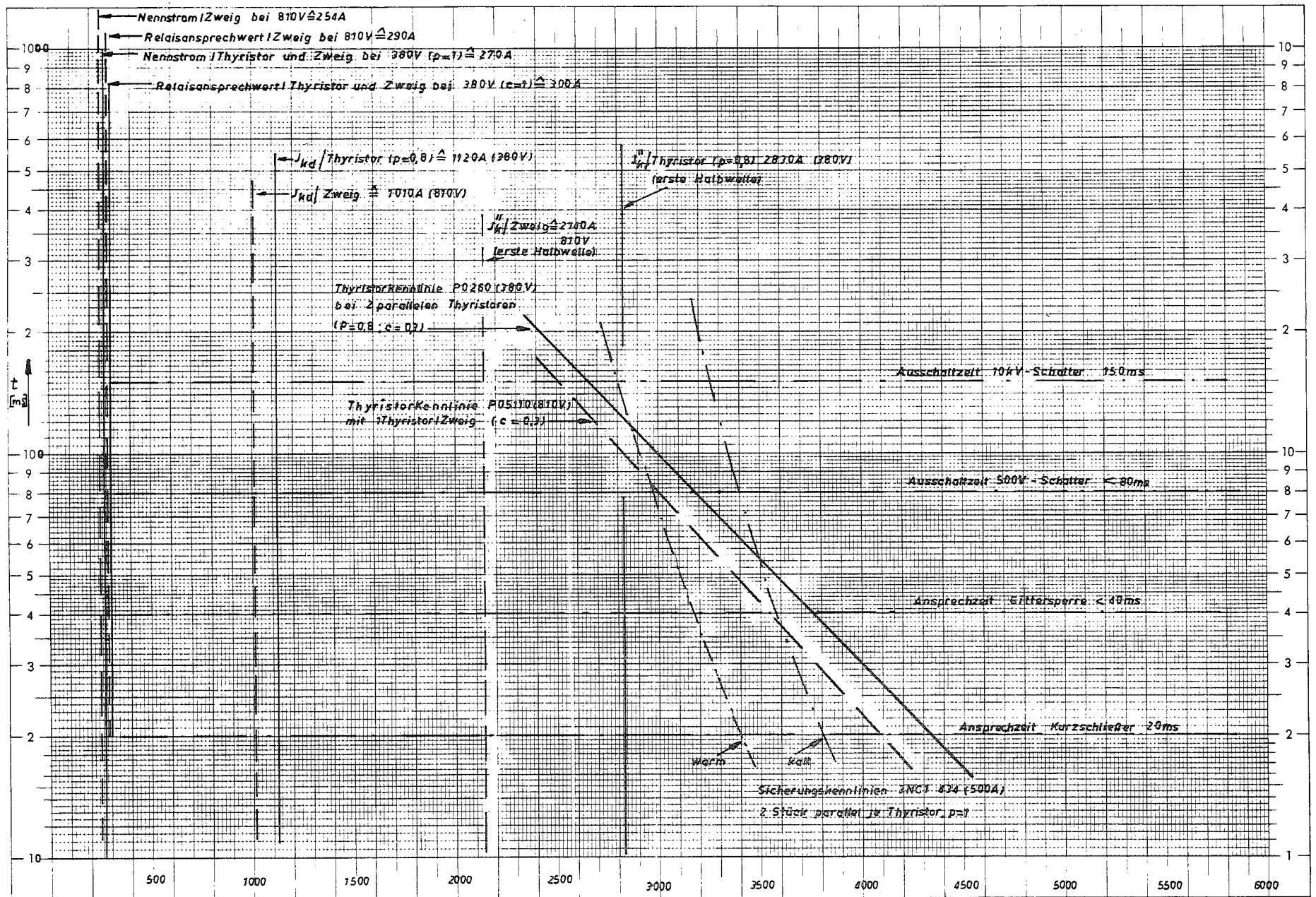


Bild 10 zu K-2, März 1969

Überstromkennlinien für Gleichrichter-Synchrotron-Sender
bei Zwischenkreisspannung 380V und 500V bei einem Thyristor/Zweig



SELÉCOX COPYRIGHT 1966 Nr. 376 1/2

J [A] Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 100, Einheit 100 mm, die andere in mm

Bild 11 zu K-2, März 1969

Überstromkennlinien für Gleichrichter Synchrotron-Sender bei Zwischenkreisspannung 380V (2 Thyristoren parallel) und 810V (1 Thyristor).