

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 55 (1964)
Heft: 20

Artikel: Kurzschlussleistung und transitorische wiederkehrende Spannung in den schweizerischen 245-kV- und 420-kV-Netzen
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916778>

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: 04.04.2026

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)

Kurzschlussleistung und transitorische wiederkehrende Spannung in den schweizerischen 245-kV- und 420-kV-Netzen

Bericht einer Arbeitsgruppe des Fachkollegiums 17A des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees

621.316.13.012.5

Durch eine Erhebung bei den schweizerischen Elektrizitätsgesellschaften sowie angenommener Grundtypen von Netzpunkten war es möglich, Kurzschlussleistungen und Verläufe der transitorischen wiederkehrenden Spannungen für 245 und 420 kV in genügendem Umfang zu bestimmen. Die Schaltfälle wurden nach charakteristischen Merkmalen der Netzpunktanordnungen und des transienten Spannungsverlaufes gruppiert. Auf Grund der Resultate werden Vorschläge für repräsentative Eigenfrequenzen bzw. Spannungsverläufe zu Handen der schweizerischen und internationalen Schalterregeln gemacht.

A la suite d'une enquête auprès des entreprises électriques suisses et en se basant sur des types fondamentaux de points de réseaux, on a pu déterminer des puissances de court-circuit et des tensions transitoires de rétablissement sur une échelle suffisante dans des réseaux à 245 et 420 kV. Les cas examinés ont été groupés selon des caractéristiques typiques des configurations des points de réseaux et selon l'évolution de la tension transitoire. A l'aide des résultats obtenus, on soumet des propositions pour des fréquences propres et des tensions transitoires représentatives, en vue de l'établissement de Règles suisses et de Recommandations internationales pour les disjoncteurs.

1. Einleitung

Das Sous-Comité 17A der CEI hat im Jahre 1962 den Nationalkomitees neue Werte der Eigenfrequenzen der wiederkehrenden Spannung zur Stellungnahme vorgelegt. Dieser Vorschlag sieht eine Verkoppelung des Abstandkurzschlusses mit der Frage der Eigenfrequenzen der wiederkehrenden Spannung derart vor, dass entweder relativ niedrige Eigenfrequenzen bei einem zusätzlichen Versuch mit Abstandkurzschluss verwendet werden dürfen, oder dass eine wesentlich höhere Eigenfrequenz angewendet wird, um dafür auf den Abstandkurzschluss vollständig zu verzichten. Da es einerseits sehr umstritten ist, ob der Fall des Abstandkurzschlusses mit erhöhter Frequenz richtig nachgeahmt werden kann und andererseits für die Beurteilung der vorgeschlagenen Eigenfrequenzen bei einem Klemmenkurzschluss nur wenig konkrete Unterlagen in der Literatur vorliegen, wurde im Rahmen des Fachkollegiums 17A (FK 17A) des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees (CES) eine Arbeitsgruppe mit dem Studium der Kurzschlussleistungen und der transitorischen wiederkehrenden Spannung in schweizerischen Hochspannungsnetzen beauftragt. Man beschränkte sich dabei vorläufig auf 245- und 420-kV-Netze. Später sollen die Studien eventuell auf Netze kleinerer Nennspannungen ausgedehnt werden.

Ähnliche Untersuchungen wie die vorliegende, wenn auch nicht so ausgedehnt, wurden früher schon für schweizerische Netze durchgeführt und veröffentlicht [1; 2; 5]¹⁾. Auch für ausländische Netze gibt es eine Reihe namhafter Publikationen [3; 4; 6] über dieses Thema.

2. Untersuchungsmethoden

Die direkteste Methode, im Netz Kurzschlussausschaltungen durchzuführen, ist wegen der damit verbundenen Betriebs-

störungen nicht oder nur vereinzelt und nur mit beschränkten Leistungen anwendbar. Man versuchte daher, durch Umfrage bei den schweizerischen Netzgesellschaften Angaben zu erhalten, die man zu möglichst umfassenden statistischen Unterlagen (Kurzschlussleistungen und zugehörige Verläufe der transitorischen wiederkehrenden Spannung) verarbeiten konnte. Da aber die Statistik nur die heute oder in naher Zukunft bestehenden Netze erfassen kann, hat man überdies noch einige sog. Grundtypen (d. h. sinnvolle Schaltfälle in fiktiven Netzpunkten) aufgestellt und in gleicher Weise bearbeitet wie wirkliche Netzpunkte. Die Kurzschlussleistungen erhielt man direkt von den Netzgesellschaften. Die transitorische wiederkehrende Spannung hingegen musste man aus den Netzdaten (Kurzschlussimpedanzen und Kapazitäten der Generatoren, Transformatoren, Kabel, Freileitungen, Wellenwiderstände der Kabel und Leitungen) ermitteln. Die Ermittlung erfolgte teils rechnerisch durch Computer, teils durch ein Schwingungsmodell des Hochspannungs-Laboratoriums der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, sowie auch durch Messungen an Transformatoren. Die Rechnungen, Messungen und Auswertungen führte das Personal der AG Brown, Boveri & Cie., Baden, und Sprecher & Schuh AG, Fabrik elektrischer Apparate, Aarau, durch, während bei den Messungen der Transformatoreigenfrequenzen z. T. auch die Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich, und SA des Ateliers de Sécheron, Genève, mitwirkten.

3. Charakteristische Schaltfälle

Die vorkommenden Schaltfälle lassen sich hinsichtlich der transitorischen wiederkehrenden Spannung vorteilhaft in Gruppen mit je ähnlichen Merkmalen wie folgt gliedern (unter der transitorischen wiederkehrenden Spannung wird dabei stets der vom Schalter unbeeinflusste Verlauf verstanden).

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

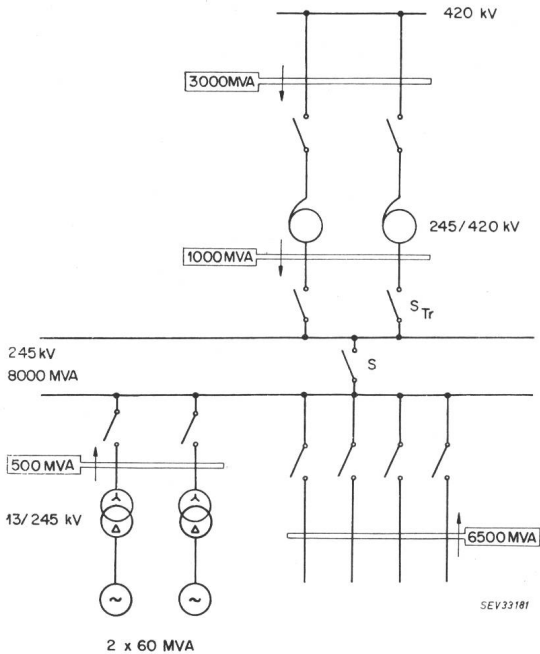


Fig. 1

Beispiel eines Netzpunktschemas

anlässlich einer Umfrage bei den schweizerischen Elektrizitätsgesellschaften
 S Sammelschienenschalter S_{Tr} Transformatorschalter

Fall a:

Vermaschter Netzpunkt mit maximaler Kurzschlussleistung (siehe z. B. Fig. 1).

Hier ist angenommen, dass sämtliche vorhandenen Freileitungen sowie die lokal speisenden Transformatoren (und Generatoren) an die Sammelschiene angeschlossen sind. Die Kurzschlussleistung an der Sammelschiene (bzw. an der Schalterklemme) ist dann die grösstmögliche in diesem Netzpunkt; sie wird mit P_{tot} bezeichnet und gleich 100% gesetzt. Die transitorische wiederkehrende Spannung hat bei all diesen Fällen einen qualitativ ähnlichen Verlauf mittlerer Steilheit (siehe z. B. Fig. 7).

Fall b:

Transformatorstation mit nur über lokale Transformatoren aufgebrachtener Kurzschlussleistung.

Freileitungen und Kabel sind an der Sammelschiene nicht angeschlossen. Dabei mögen an Hand von Beispielen nach Fig. 2 folgende Fallunterscheidungen betrachtet werden:

- Das Netz einer Nennspannung U_1 speist über Transformatoren auf einen Kurzschluss in der 245-kV-Anlage. Der Schalter S hat die lokal aufgebrachte Kurzschlussleistung $P_{lok I}$ zu unterbrechen.
- Das 245-kV-Netz speist über den Schalter S und die gleichen Transformatoren auf einen Kurzschluss auf der U_1 -Seite der Transformatoren. Die lokal aufgebrachte bzw. durch die Transformatoren begrenzte Kurzschlussleistung $P_{lok II}$ ist durch den Schalter S zu unterbrechen. $P_{lok I}$ ist im allgemeinen verschieden von $P_{lok II}$; beide sind stets kleiner als P_{tot} dieses Netzpunktes. In beiden Fällen hat die transitorische wiederkehrende Spannung einen dem speisenden Netz entsprechenden Grundverlauf mittlerer Steilheit, welchem aber eine hochfrequente durch die Transformatoren bedingte Schwingung überlagert ist. Die Amplitude dieser Schwingung beträgt nur einen Teil der Totalamplitude. Die hohe Eigenfrequenz ist in den Fällen I und II gleich gross. Die Fälle III und IV unterscheiden sich von

den Fällen I und II dadurch, dass nur ein Transformator im Kurzschlußstrang liegt. Die Kurzschlussleistungen P_{III} und P_{IV} sind kleiner als in den Fällen I bzw. II; die hohe Eigenfrequenz ist praktisch dieselbe, aber die Amplituden der hochfrequenten Schwingung sind grösser.

Fall c:

Kraftwerk mit nur von lokalen Generatoren über die zugehörigen Transformatoren aufgebrachtener Kurzschlussleistung.

Es sind weder Freileitungen noch Kabel an die Sammelschiene angeschlossen. Auch in diesem Fall ist P_{lok} nur ein Bruchteil von P_{tot} . Die transitorische wiederkehrende Spannung hat die Form einer höherfrequenten einfachen gedämpften Sinusschwingung, welche mit voller Amplitude erscheint.

Fall d:

Alle Fälle zwischen den Fällen a, b und c; d. h. mit mindestens einer Freileitung oder einem Kabel an die Sammelschiene angeschlossen, besitzen eine Kurzschlussleistung kleiner als P_{tot} und eine transitorische wiederkehrende Spannung ähnlich Fall a.

Fall e:

Abstandkurzschluss

Dieser auf einer Freileitung innerhalb weniger km vom Schalter entfernt auftretende Kurzschluss hat eine kleinere Leistung als P_{tot} der speisenden Sammelschiene. Dem Grundverlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung ist eine leicht zu berechnende hochfrequente sägezahnförmige Schwingung von kleiner Amplitude überlagert.

4. Eigenfrequenzen von Transformatoren

Die Eigenfrequenzen der Transformatoren lassen sich durch Rechnung nicht zuverlässig bestimmen. Sie wurden daher an zahlreichen Transformatoren direkt gemessen. Die Mess-

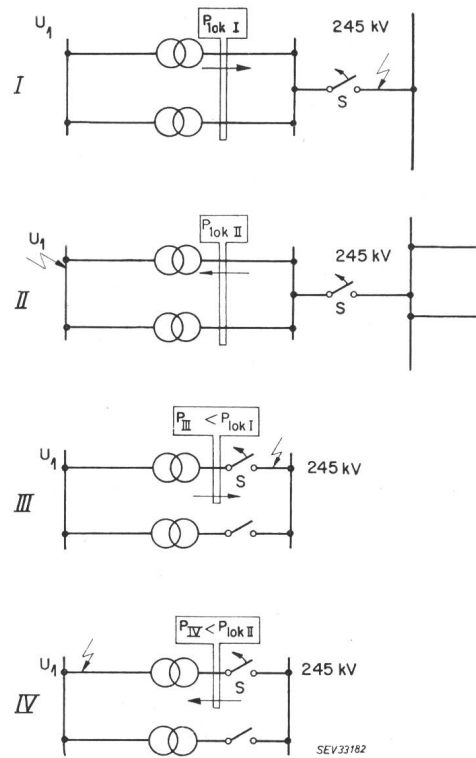


Fig. 2

Schemata einiger Transformator-Schaltfälle des Typs b
 Erklärungen siehe im Text

methode bestand darin, dass der Transformator im Versuchslokal oder im Netz mit ca. 100...200 V, 50 Hz, gespeist wurde. Der am zu untersuchenden Stromkreis eingestellte Kurzschluss wurde sodann mit einem Schalter (Thyratron) unterbrochen. Mit Kathodenstrahlzillograph mass man direkt die ähnlich verkleinert erscheinende transitorische wiederkehrende Spannung, aus welcher die Eigenfrequenz und der Amplitudenfaktor gemessen werden konnten. Durch Vergleich mit einem Versuch bei voller Kurzschlussleistung und voller Transformator-Nennspannung wurde nachgewiesen, dass sowohl Eigenfrequenz wie Dämpfung (Amplitude) genau gleich waren wie bei der Niederspannungsmethode. Um den Einfluss allfälliger zusätzlicher in Anlagen vorhandener Kapazitäten festzustellen, wurden wahlweise künstliche Kapazitäten zugeschaltet. Insgesamt wurden 21 Transformatoren, z. T. in mehreren Varianten durchgemessen (Beispiel siehe Fig. 11).

5. Umfrage bei den schweizerischen Elektrizitätsgesellschaften

Alle schweizerischen Gesellschaften, welche Netzpunkte mit 245 und 420 kV besitzen, erhielten einen Fragebogen. Pro Netzpunkt wurden ein Schema sowie eine Reihe von Daten z. B. wie in Fig. 1 und Tabelle I, verlangt. Die erhaltenen Antworten basieren auf den heute oder in naher Zukunft (vor 1970) vorhandenen Netzen. Am Beispiel der Fig. 1 möge gezeigt werden, was für Erkenntnisse für einen Schalter an der 245-kV-Sammelschiene gewonnen werden können.

Fall a:

Vermaschter Netzpunkt mit maximaler Kurzschlussleistung.

Die grösste Kurzschlussleistung P_{tot} beträgt im gewählten Beispiel 8000 MVA = 100%. Der vollständige Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung kann nur ermittelt werden, wenn man das übrige mit dieser Anlage verbundene Netz kennt. Hingegen kann man den Anfang-Spannungsverlauf berechnen, auf Grund der resultierenden Kurzschlussinduktivität der lokal vorhandenen Generatoren und Transformatoren, der resultierenden lokalen Kapazität der Anlage inkl. Kabel, sowie des resultierenden Wellenwiderstandes der angeschlossenen Leitungen. Der resultierende Wellenwiderstand der vier 245-kV-Freileitungen in Fig. 1 beträgt $Z_{res} \approx 75 \Omega$; er wirkt sich aus wie ein Ohmscher Widerstand parallel zu den

Schalterklemmen. Der so zu berechnende Spannungsverlauf stimmt nur bis zur Rückkehr der ersten an einem Freileitungsende reflektierten Welle.

Fall b:

Transformatorstation mit nur lokal aufgebrachtener Kurzschlussleistung.

Die vier Freileitungen in Fig. 1 seien nicht an die 245-kV-Sammelschiene angeschlossen. Ebenso seien die zwei lokalen Generatoren und zugehörigen Transformatoren ausser Betrieb und abgehängt. Das Beispiel in Fig. 1 entspricht dann grundsätzlich den in Fig. 2 betrachteten Fällen. Entsprechend dem ersten Fall wird die Kurzschlussleistung vom 420-kV-Netz her über die beiden Transformatoren auf die 245-kV-Sammelschiene geliefert, und beträgt dort $1000 \text{ MVA} = P_{lok} = 0,125 P_{tot}$. Wie erwähnt, ist nun beim Unterbrechen eines Kurzschlusses in der 245-kV-Anlage z. B. durch den Schalter S eine höherfrequente Teilschwingung in der transitorischen wiederkehrenden Spannung vorhanden. Dieser strengere Spannungsverlauf kommt im gewählten Beispiel indessen nur bei 12,5% der grösstmöglichen Kurzschlussleistung vor. Überdies ist die Amplitude dieser Oberschwingung (A_{HF}) nur ein Bruchteil der totalen Amplitude der transitorischen wiederkehrenden Spannung. Sie lässt sich aus der Gleichung:

$$A_{HF} = \frac{X_{Tr}}{X_{Tr} + X_S} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot k \quad (1)$$

berechnen.

Darin bedeuten:

- X_{Tr} resultierende Kurzschlussreaktanz der Transformatoren
- X_S Kurzschlussreaktanz des speisenden Netzes
- U_n verkettete effektive Nennspannung
- k Überschwingfaktor

oder in Zahlen (gemäss Tabelle I):

$$A_{HF} = \frac{40}{40 + 20} \cdot \frac{245}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot 1,85 = 248 \text{ kV (Scheitelwert)}$$

Dem gegenüber beträgt die grösste Amplitude im gesamten, niederfrequenten Spannungsverlauf ca. 350 kV (Scheitelwert).

Etwas ungünstiger wird es beim zweiten Fall der Fig. 1 bzw. 2, wenn ein Kurzschluss auf der 420-kV-Seite der Transformatoren besteht, und vom Schalter S von der 245-kV-Seite her unterbrochen werden muss. Die durch beide Transforma-

Fragebogen und Beispiel eines 245-kV-Netzpunktes anlässlich einer Umfrage bei den schweizerischen Elektrizitätsgesellschaften

Tabelle I

Ort und Name der Station	Maximale Kurzschlussleistung an der 245-kV-Sammelschiene P_{tot} MVA	Lokal aufgebrachtene Kurzschlussleistung (ohne lokale Generatoren)		Abgehende 245-kV-Leitungen		Anzahl 245-kV-Schalter	Länge eines eventl. vorhandenen Kabels auf ...-kV-Seite m/kV	Wenn Kabel zwischen Transformator und Schalter: Kabel in Transformator direkt isoliert eingeführt oder abhängig?	Generatoren			Transformatoren ¹⁾			Bemerkungen	
		über Transformator aus untergeordnetem Netz P_{lok} MVA	über Transformator aus übergeordnetem Netz P_{lok} MVA	Anzahl	Länge km				Anzahl/Nennspannung —/kV	Nennleistung pro Generator P_n MVA	Anfangsreaktanz x_d'' %	Anzahl	Nennleistung pro Generator P_{12}, P_{23}, P_{31} MVA	Nennspannungen U_1, U_2, U_3 kV		Relative Kurzschlussspannungen $\epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \epsilon_{31}$ %
(siehe Fig. 1)	8 000	—	1 000	4	50 50 110 150	9	—	—	2/13	60	14	2 2	60 45	13/245 245/420	10 6	

¹⁾ Bei Dreiwicklungstransformatoren: $\epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \epsilon_{31}$ sind die prozentualen Kurzschlussspannungen der den Indices entsprechenden Wicklungen bezogen auf die entsprechenden Nennleistungswerte P_{12}, P_{23} und P_{31} .

toren fließende und vom Schalter zu bewältigende Kurzschlussleistung beträgt dann 1230 MVA, d. h. 15,4% von P_{tot} . Die Amplitude der hochfrequenten Transformatorschwingung beträgt:

$$A_{HF} = \frac{40}{40 + 8,6} \cdot \frac{245}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot 1,85 = 305 \text{ kV (Scheitelwert)}$$

Ist nur einer der beiden Transformatoren angeschlossen und treten die erwähnten Kurzschlüsse I oder II bzw. III oder IV auf, so ist zwar die Kurzschlussleistung kleiner, aber die Amplituden der hochfrequenten Schwingung werden gemäss Gl. (1) grösser.

Fall c:

Kraftwerk mit nur lokal aufgebrachtener Kurzschlussleistung.

Die 245-kV-Freileitungen sowie die 420/245-kV-Transformatoren (Fig. 1) seien nicht angeschlossen, d. h. die beiden Generatoren arbeiten allein über ihre Transformatoren auf die 245-kV-Sammelschiene. Die lokal aufgebrachte Kurzschlussleistung beträgt 500 MVA = 6,25% von P_{tot} . Die transitorische wiederkehrende Spannung hat hier praktisch die Form einer einfachen gedämpften Sinusschwingung mit voller Amplitude [zwischen 300 und 400 kV (Scheitelwert)]. Die Eigenfrequenz dieser Schwingung lässt sich aus den Induktivitäten und Kapazitäten der Generatoren, Transformatoren und Sammelschienen angenähert berechnen. Sie ist kleiner als die Eigenfrequenz der Transformatoren, in der Regel aber grösser, d. h. strenger als im Fall a.

Fall d:

Alle Fälle zwischen den Fällen a, b und c:

Aus Fig. 1 ist ersichtlich, dass es zahlreiche Kombinationen und Teilkombinationen aus den Fällen a, b und c gibt. Diese Fälle werden in der vorliegenden Studie nicht besonders behandelt, weil sie sowohl hinsichtlich der Kurzschlussleistung als auch der transitorischen wiederkehrenden Spannung zwischen den drei erwähnten Extremfällen liegen.

Jeder durch die Umfrage erfasste Netzpunkt von 245 und 420 kV wurde nach den erwähnten Rechenmethoden und zum Teil auch durch Modellmessungen bearbeitet. Insgesamt wurden 55 Netzpunkte für 245 kV und 4 Netzpunkte für 420 kV erfasst, wobei alle wichtigen Punkte miteingeschlossen sind.

6. Stationsgrundtypen

Neben der Gewinnung von statistischen Unterlagen aus bestehenden oder auf dem Modell nachgebildeten Netzen, erweist sich ein zweiter Weg als fruchtbar. Dieser möge als die «Grundtypen-Methode» bezeichnet werden. Sie besteht darin, dass eine bestimmte Netzsituation in ihren grundsätzlichen Elementen in einfacher Art nachgebildet wird. Es sind dies:

- a) Oberspannungsseitige Leitungen und Sammelschienen;
- b) Transformator (einer oder mehrere gleicher Gesamtleistung);
- c) Unterspannungsseitige Leitungen und Sammelschienen.

Die Vorteile der Methode liegen darin, dass Schemata entstehen, die der Programmierung auf Rechenmaschinen oder der Darstellung auf Modellen leicht zugänglich sind, und vor allem, dass Netzpunkte entstehen, an denen die genormte Kurzschlussleistung des Schalters ansteht, d. h. die Leistung, bei welcher die Schalter geprüft werden müssen.

In der Anwendung lassen sich die Grundtypen-Schemata mit tatsächlichen Einbauverhältnissen vergleichen, wobei meist sehr rasch abgeschätzt werden kann, ob diese nicht strengere

Spannungsbedingungen ergeben. Sollen die Grundtypen genormte Werte für die wiederkehrende Spannung ergeben, so sind sie so auszulegen, dass verhältnismässig harte Bedingungen entstehen, die eine Mehrzahl der Anwendungsfälle decken. Dies wird erreicht durch:

- a) Einspeisung der Leitungen aus starken Netzpunkten; dadurch wenig Leitungen (kleines C).
- b) Grosse Durchgangsleistung des, oder der Transformatoren; dadurch hohe lokale Kurzschlussleistung.

Es kann festgestellt werden, dass die wiederkehrende Spannung bei Vollkurzschluss auf die Veränderung einzelner Annahmen um einen Faktor 2 nur wenig reagiert; dieser Umstand kommt einerseits der Normung solcher Werte stark entgegen und gestattet weitgehend Grundtypen-Resultate in Netzen verbindlich zu verwenden.

Kritischer sind die Verhältnisse bei Kurzschlüssen direkt an der Sammelschiene, wenn keine Freileitung und Kabel angeschlossen sind.

In diesem Schaltfall spielt die hohe Eigenfrequenz des Transformators selbst die entscheidende Rolle; naturgemäss ist man damit von der genauen Kenntnis dieser abhängig. Wie schon erwähnt, ist diese aber der Messung leicht zugänglich, so dass man sich auch hier rasch ein Bild machen kann, ob ein nach Normungsvorschlag spezifizierter Schalter genügt oder nicht. Für das zweite Parameterpaar dieses Kurzschlussfalles, d. h. den vom speisenden Netz herrührenden mittelfrequenten Anteil der transitorischen wiederkehrenden Spannung gilt wiederum das für den 100%-Kurzschluss Gesagte.

Fig. 3 zeigt die für 245-kV-Netze gewählten Grundtypen. Diese wurden auf folgende Wahl der Komponenten basiert:

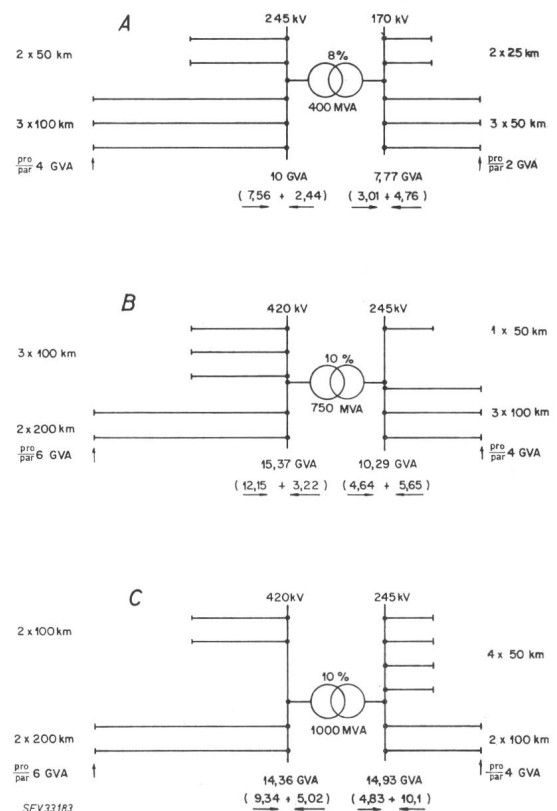


Fig. 3

Schemata von Stationsgrundtypen

Für folgende Fälle ist die transitorische wiederkehrende Spannung ermittelt worden und in den Fig. 7 und 8 dargestellt:
 Fall A 5, B 1 und C 1 bei 245 kV, Fall B 5 und C 5 bei 420 kV
 Voller Kurzschluss an der Sammelschiene

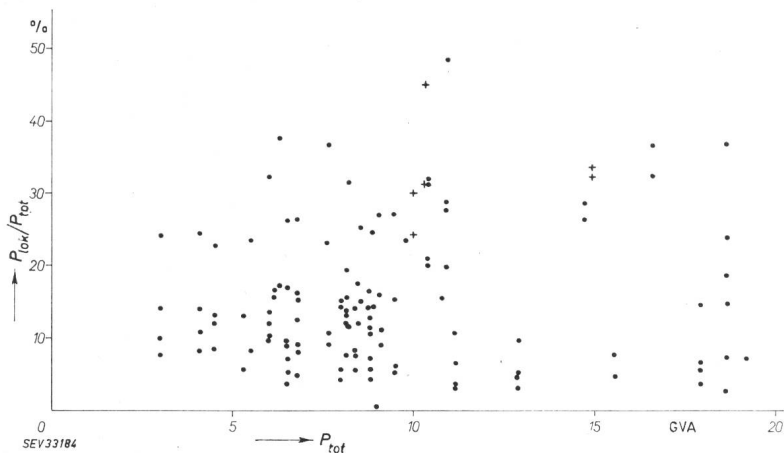


Fig. 4
Verhältnis der lokalen P_{lok} zur totalen P_{tot} Kurzschlussleistung in schweizerischen 245-kV-Netzpunkten, in Abhängigkeit von P_{tot}
• entsprechend Umfrage + entsprechend Grundtypen

- a) Die volle Kurzschlussleistung beträgt ca. 10 bzw. ca. 15 GVA;
b) Die Transformatorennennleistung entspricht ungefähr der Durchgangsleistung der unterspannungsseitigen Leitungen, Kurzschlussreaktanz 8 bzw. 10%.
c) Die Leitungslängen sind für jede Spannungsstufe in zwei Gruppen aufgestellt (kurze und mittlere Länge):

170 kV	25	und	50 km
245 kV	50	und	100 km
420 kV	100	und	200 km

7. Durchgeführte Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen lassen sich wiederum auf die verschiedenen Fälle aufteilen.

Fall a:

Vermaschter Netzpunkt mit maximaler Kurzschlussleistung.

Zunächst ist in Fig. 4 für jeden 245-kV-Netzpunkt aus der Umfrage, sowie der Grundtypen, die lokal aufgebrauchte Kurzschlussleistung P_{lok} in % der totalen Leistung P_{tot} , und in Fig. 5 das entsprechende für 420 kV dargestellt. Die Darstellungen zeigen, dass es heute oder in naher Zukunft in der Schweiz vereinzelt grösste Kurzschlussleistungen bis gegen 20 GVA gibt. Andererseits stellt man fest, dass die lokale Leistung stets weniger als 50% der totalen Leistung beträgt. Das heisst, dass die Fälle b und c nur bei Kurzschlussleistungen auftreten, die weniger als die Hälfte der totalen Kurzschlussleistung betragen. Überdies folgt aus den Darstellungen, dass sich die angenommenen Grundtypen gut in das Bild der statistisch erfassten Punkte einfügen.

Um den Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung bei 100% Kurzschlussleistung zu ermitteln, wurde folgendes unternommen:

- a) Berechnung der Anfangsverläufe für alle wichtigeren statistisch erfassten Netzpunkte, mit einem Computer.
b) Bestimmung des vollständigen Verlaufes sowohl mit Computer als auch mit Netzmodell, für die Grundtypen.
c) Messung des vollständigen Verlaufes mit dem Netzmodell für alle statistischen Punkte mit P_{tot} über 10 GVA.

Man legte stets den Schaltfall des erstlöschenden Schalterpoles eines dreipoligen Kurzschlusses mit Erdberührung im Netz mit starr geerdetem Nullpunkt zu Grunde. Da aber die Erdimpedanzen zu wenig bekannt sind, führte man die Untersuchungen für den leichter zu überblickenden isolierten Kurzschluss durch, in der berechtigten Annahme, dass der Charakter des Spannungsverlaufes, abgesehen von der Amplitude, nicht

sehr verschieden sei. Die transitorische wiederkehrende Spannung über dem erstlöschenden Schalterpol schwingt beim isolierten 3-poligen Kurzschluss auf den 1,5-fachen Scheitelwert der betriebsfrequenten Spannung Phase—Erde ein, beim geerdeten Kurzschluss hingegen auf den 1,0...1,3-fachen Wert. Die Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsschalter, Publ. 0186.1959 des SEV, sehen für Spannungen von 100 kV und mehr den Faktor 1,3 vor. (Dieser Faktor sei Erdungsfaktor genannt und mit α bezeichnet). Daher hat man in der vorliegenden Studie bei allen Fällen a die betriebsfrequente wiederkehrende Spannung des erstlöschenden Schalterpoles (nur dieser wird betrachtet) gleich der 1,3-fachen Spannung Phase—Erde angenommen und alle Spannungsverläufe als auf diesen Wert einschwingend bezogen.

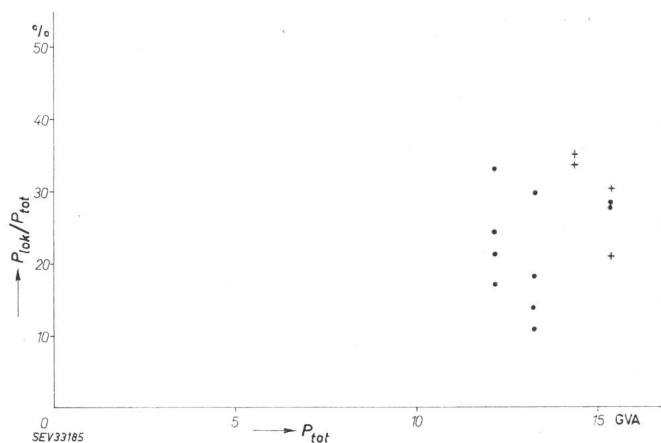


Fig. 5
Wie Fig. 4, aber für 420-kV-Netzpunkte

In Fig. 6 sind die Anfangs-Spannungsverläufe der Fälle a (statistische und Grundtypen) für 245 kV dargestellt. Die Freileitungen wurden als Zweierbündel mit einem Wellenwiderstand von 300 Ω angenommen. Der steilste Anstieg beträgt 2,0 kV/ μ s bei einer Kurzschlussleistung von 9 GVA. Das Netz wurde mit voller Maschinenleistung, aber ohne Last angenommen. Für den Anfangsverlauf der Spannung kann übrigens sehr einfach eine obere Grenze grob abgeschätzt werden. Vernachlässigt man die lokal vorhandene Kapazität, so ist die grösstmögliche Steilheit des Spannungsanstieges:

$$\frac{du}{dt} < i_{KS} \sqrt{2} \cdot \omega Z_{res} \quad (2)$$

Darin bedeuten:

- i_{KS} Effektivwert des grössten im Netzpunkt vorkommenden Kurzschlussstromes
 ω Betriebskreisfrequenz
 Z_{res} resultierender Wellenwiderstand aller an die Sammelschiene angeschlossenen Freileitungen

Berücksichtigt man die lokale Kapazität, so beginnt der Spannungsverlauf anfänglich mit der Tangente Null. Wenn die lokale Kapazität bedeutend ist (z. B. Kabel an die Sammelschiene angeschlossen), verläuft die Spannung anfänglich wesentlich harmloser als nach Gl (2).

Fig. 7 zeigt die berechneten vollständigen Spannungsverläufe für die Grundtypen mit je maximaler Kurzschlussleistung (Fig. 3, Schaltfälle A 5, B 1, C 1 der Grundtypen) für 245 kV, und Fig.

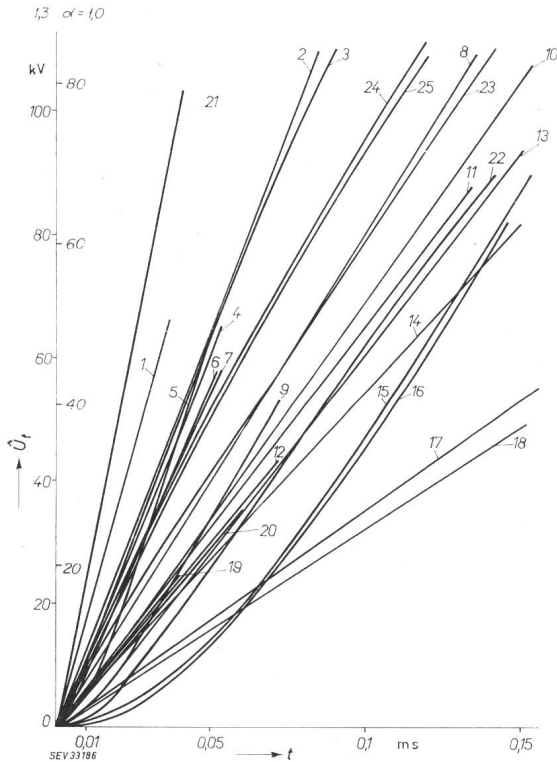


Fig. 6

Berechnete Anfangsverläufe der transitorischen wiederkehrenden Spannung \hat{U}_t in den wichtigeren statistisch erfassten Netzpunkten sowie der Grundtypen für 245 kV, bei voller Kurzschlussleistung, (Fall a)

Diese Kurven sind bis zum Zeitpunkt t gezeichnet, bei welchem die erste an einem Leitungsende reflektierte Welle zurückführt. Erdungsfaktor $\alpha = 1,3$ bzw. $1,0$. Für den Anfangsanstieg ist $\alpha = 1,0$ zutreffend. Legt man $\alpha = 1,3$ zu Grunde, so kommt dies einem Sicherheitszuschlag von 30 % gleich

Ziffer	P_{tot}	
1	9 000 MVA	} Umfrage
2	6 500 MVA	
3	10 430 MVA	
4	15 560 MVA	
5	8 000 MVA	
6	8 400 MVA	
7	14 680 MVA	
8	6 150 MVA	
9	10 970 MVA	
10	17 920 MVA	
11	8 000 MVA	
12	6 000 MVA	
13	9 500 MVA	
14	5 400 MVA	
15	4 920 MVA	
16	4 790 MVA	
17	8 130 MVA	
18	8 820 MVA	
19	19 200 MVA	
20	18 620 MVA	
21	12 900 MVA	
22	11 200 MVA	
23, Fall B 1	10 290 MVA	} Grundtypen
24, Fall C 1	14 930 MVA	
25, Fall A 5	10 000 MVA	

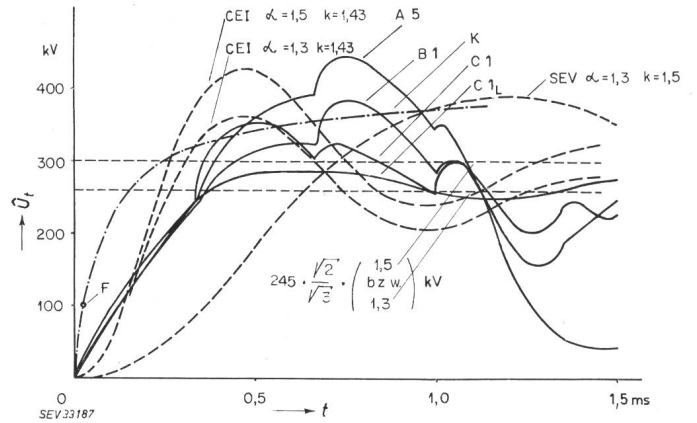


Fig. 7

Verlauf der berechneten transitorischen wiederkehrenden Spannung \hat{U}_t bei den 245-kV-Stationen-Grundtypen und bei voller Kurzschlussleistung

Vergleich mit einrequenten SEV- und CEI-Kurven
Erdungsfaktor $\alpha = 1,3$

k Amplitudenfaktor; K Hüllkurve der Spannungsspitzen bei Abstandkurzschluss, bezogen auf Klemmen-Kurzschlussleistung 14 930 MVA; F Spannungsspitze bei Abstandkurzschluss bei einem Strom entsprechend 75 % der Klemmenkurzschlussleistung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3 und im Text

8 für 420 kV (Fälle B 5 und C 5). Für die Freileitungen des 170-kV-Netzes wurden Einfachleiter mit einem Wellenwiderstand von 400Ω , und für 245 kV und 420 kV Zweierbündel mit 300Ω zu Grunde gelegt. Überdies hat man angenommen, dass ein voller Maschineneinsatz, jedoch keinerlei Netzbelastung vorhanden sei.

Eine weitere verschärfende Annahme besteht darin, dass bei den Einspeisepunkten nur Kraftwerke, d. h. nur deren Induktivität, aber weder eine Kapazität noch in anderer Richtung abgehende Leitungen berücksichtigt wurden. Um den Einfluss solcher Leitungen zu zeigen, ist beim Fall C 1 (Fig. 7) noch eine Kurve $C I_L$ gezeichnet. Diese entspricht der Annahme, dass bei jedem Einspeisepunkt einer zum Kurzschluss führenden Leitung eine gleiche Leitung in entgegengesetzter Richtung weiterführt, was im vermaschten Netz meistens noch übertroffen wird, weil dort nämlich in der Regel mehrere solcher entgegengesetzt laufender Leitungen angeschlossen sind. Für die Berechnung von $C I_L$ hat man also jede zur Kurzschlussstelle führende Leitung bei ihrem Einspeisepunkt mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen. Dies entspricht bei 245 kV einer Ohmschen Last von etwa 200 MW pro Leitung, und übrigens der natürlichen Übertragungsleistung der Leitung. Der Unterschied gegenüber der Kurve $C I$ zeigt sich vor allem in der um ca. 20 % kleineren Amplitude. Dabei ist bei $C I_L$ keine eigentliche Betriebslast berücksichtigt; diese würde eine noch harmloser verlaufende Kurve verursachen.

Vergleichsweise ist die aus der Publ. 0186.1959 des SEV entnommene 400-Hz-Einschwingkurve mit einem Erdungsfaktor von $\alpha = 1,3$ und einem Amplitudenfaktor von $k = 1,5$ eingezeichnet, ebenso eine kürzlich bei der CEI vorgeschlagene Einschwingkurve von 1000 Hz bei 245 kV, bzw. 700 Hz bei 420 kV, mit einem Erdungsfaktor von $\alpha = 1,5$ (und $1,3$) und einem Amplitudenfaktor von $k = 1,43$.

In Fig. 9 sind die vollständigen mit dem Netzmodell gemessenen transitorischen wiederkehrenden Spannungen für die aus der Umfrage erhaltenen 245-kV-Netzpunkte, deren grösste Kurzschlussleistung P_{tot} über 10 GVA beträgt, zu-

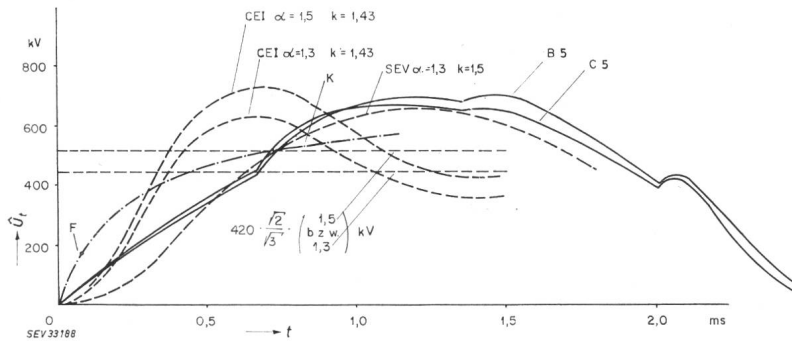


Fig. 8
Wie Fig. 7, aber bei 420-kV-Grundtypen
 Vergleich mit einfrequenter SEV- und CEI-Kurven
 Erdungsfaktor $\alpha = 1,3$; Fälle B 5 und C 5 der Fig. 3;
 K ist auf 15 370 MVA bezogen
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 7

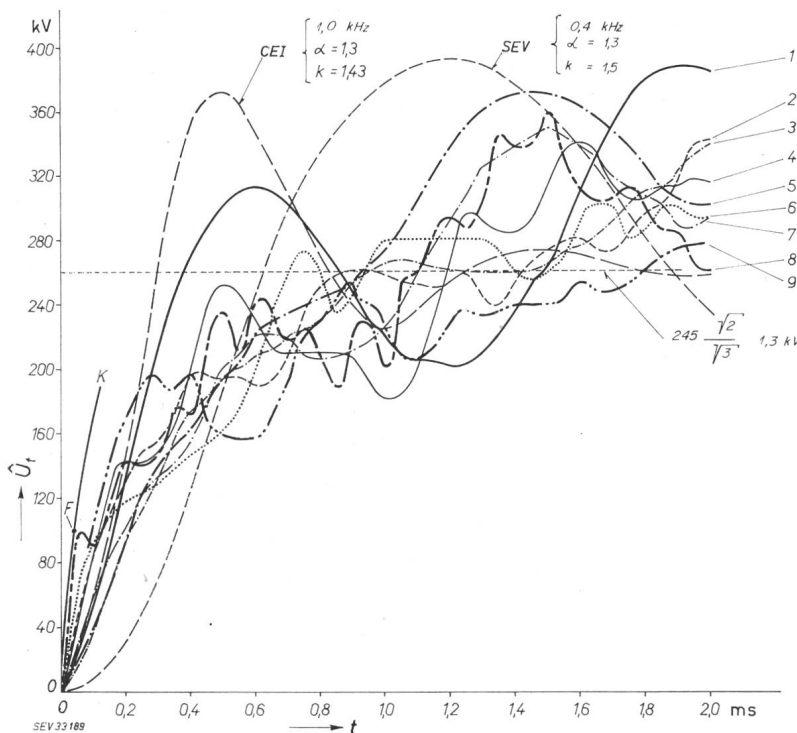
sammengestellt. Wieder sind zum Vergleich CEI- und SEV-Kurven dargestellt. Fig. 10 zeigt die analogen Darstellungen für 420-kV-Netzpunkte.

Aus den Fig. 7...10 ist ersichtlich, dass die wirklichen Kurven, sowohl der Grundtypen, als auch der Netzpunkte aus der Umfrage meistens strenger verlaufen als die SEV-Kurve. Gegenüber der CEI-Kurve hingegen ist jeweils höchstens der erste Anstieg strenger. Aus diesem Grunde wäre in den Prüfkreisen an Stelle der Paralleldämpfung die Seriedämpfung zu verwenden (siehe Fig. 17 und 19).

Fall b:

Transformatorstation mit nur lokal aufgebrachtener Kurzschlussleistung.

Wie schon erwähnt und in Fig. 4 und 5 gezeigt, ist die lokal über Transformatoren aufgebrauchte bzw. durch sie begrenzte Kurzschlussleistung immer kleiner als 50% der totalen im betreffenden Netzpunkt vorhandenen Kurzschlussleistung. Es soll noch versucht werden, die bei den Fällen b vorhandenen grossen Eigenfrequenzen und zugehörigen Amplituden zu bestimmen. Die bereits erwähnten, an zahlreichen Transformatoren durchgeführten Messungen sind in der Tabelle II zusammengestellt. In Fig. 11 ist die Eigenfrequenz eines Autotransformators in Funktion der künstlichen Zusatzkapazität gezeigt. Fig. 12 stellt ein Oszillogramm der transitorischen wiederkehrenden Schalterspannung, bezogen auf diesen Trans-



formator ohne künstliche Zusatzkapazität dar. Man erkennt den Verlauf einer einfach gedämpften Sinusschwingung, wie es übrigens bei fast allen Transformatoren und Varianten der Fall

war. In wenigen Fällen waren zwei Schwingungen bzw. ein komplizierterer durch den Transformator bedingter Verlauf gemessen worden. Die gemessenen Eigenfrequenzen erreichten bei 245 kV im Maximum ca. 13 kHz, nämlich bei einem Autotransformator von 200 MVA pro Phase. Auf der 420-kV-Seite wurde ein Maximum von 8,75 kHz gemessen. Die Amplitudenfaktoren lagen zwischen 1,8 und 1,9. In der vorliegenden Arbeit wurde hierfür einheitlich 1,85 eingesetzt.

Die Amplitude der hochfrequenten Transformatorschwingung lässt sich nach Gl. (1) berechnen, sofern die Daten des Netzpunktes bekannt sind. In den Fig. 13 und 14 sind alle durch die Umfrage und die Grundtypen erfassten und nach Gl. (1) berechneten Amplituden, für 245 bzw. 420 kV in Funktion von P_{tok} zusammengestellt. Pro Netzpunkt wurden entsprechend Fig. 2 die Fälle I, II, III und IV nur soweit ausgewertet und berücksichtigt, als entsprechende Schalter vorhanden sind, und die Fälle grundsätzlich vorkommen können.

Man betrachte nun bei den in der Umfrage erhaltenen Netzpunkten jene Transformatoren, deren Eigenfrequenzen gemessen und in Tabelle II angegeben wurden. Man kann dann mit Hilfe der in Fig. 13 und 14 gezeigten zugehörigen Amplituden die Verläufe der transitorischen wiederkehrenden Spannung zeichnen. Dies wurde in Fig. 15 für 245 kV und in Fig. 16 für 420 kV getan. Der Vergleich mit den CEI- und SEV-Kurven zeigt, dass einige wirkliche Kurven strenger verlaufen. In Fig. 15 und 16 ist ferner eine Kurve M gezeichnet, welche ungefähr repräsentativ wäre. Ihre Eigenfrequenz beträgt 5 bzw. 3,5 kHz bei einer Amplitude entsprechend $\alpha = 1,3$; $k = 1,43$; $P_{tok}/P_{tot} = 50\%$.

Fig. 9
 Mit Netzmodell gemessene Verläufe der transitorischen wiederkehrenden Spannung U_t bei P_{tot} für jene aus der Umfrage erhaltenen 245-kV-Netzpunkte, deren P_{tot} grösser als 10 GVA ist

Vergleich mit SEV- und CEI-Kurven

Ziffer	Kurzschlussleistung MVA
1	11 200
2	18 600
3	17 900
4	11 000
5	19 200
6	10 500
7	14 700
8	12 900
9	15 500

K ist auf 12 900 MVA bezogen
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 7

Fall Nr.	Transformator-Nenndaten							Stufenschalterstellung	Eigenfrequenz f und Überschwingfaktor k		Messanordnung				Messung durchgeführt im ...	Bemerkungen
	Leistung 3-phasig MVA	Spannungen			Relative Kurzschluss-Spannungen						Meßseite	Speise-seite	Offene Seite	Kurzgeschlossene Seite		
		U_1 kV	U_2 kV	U_3 kV	ϵ_{12} %	ϵ_{13} %	ϵ_{23} %		f kHz	k						
T 1	660	$400/\sqrt{3}$	$231/\sqrt{3}$	30	11,3	14,2	9,5	14 1 1 27 27 14 1 1	8,12 7,5 7,32 6,9 9,15 8,20 7,86 10,02	1,88 1,89 1,87 1,88 1,87 1,88 1,87 1,90	U_1 U_1 U_1 U_1 U_2 U_2 U_2 U_2	U_2 U_2 U_2 U_2 U_1 U_1 U_1 U_1	— — — U_3 — — — —	U_3 U_3 — — U_3 U_3 — U_3	VL	3 Einphasen-Autotransformatoren mit Regelstufe
T 2	600	$400/\sqrt{3}$	$242/\sqrt{3}$	16	$\approx 8,0$	$\approx 9,0$	$\approx 10,0$	14 2 17 14 2 17 17 2 2 2	8,55 8,54 8,42 8,75 8,40 8,45 12,5 13,3 10,5	1,89 1,89 1,88 1,90 1,88 1,89 1,88 1,87 1,83	U_1 U_1 U_1 U_1 U_1 U_1 U_2 U_2 U_2	U_2 U_2 U_2 U_2 U_2 U_2 U_1 U_1 U_1	— — — U_3 — — — — U_3	U_3 U_3 U_3 — — — U_3 U_3 —	VL	3 Einphasen-Autotransformatoren, pro Phase je 1 Leistungs- und 1 Regulierpol.
T 3	400	$410/\sqrt{3}$	$248/\sqrt{3}$	2×13	6,43	8,36	11,78	Mitte Mitte Mitte Mitte	5,45 0,93 2,34 8,56	1,87 1,86 1,90 1,85	U_1 U_1 U_2 U_2	U_2 U_3 U_1 U_1	U_3 U_2 U_3 U_3	— — — —	Netz	3 Einphasen-Autotransformatoren, pro Phase je 1 Leistungs- und 1 Regulierpol, Kabel auf Seite U_2 ! Letzte Messung Seite U_2 ohne Kabel. (Kabel abgehängt).
T 4	400	$420/\sqrt{3}$	$250/\sqrt{3}$	$2 \times 10,5$	$\approx 9,5$	(total mit Regulierpol)		Oben Oben ($U_2 = 365/\sqrt{3}$ kV)	5,2 5,15	1,88 1,89	U_1 U_1	U_2 U_2	— U_3	U_3 —	Netz	3 Einphasen-Autotransformatoren, pro Phase je 1 Leistungs- und 1 Regulierpol. Kabel auf Seite U_2 .
T 5	140	$245/\sqrt{3}$	$140/\sqrt{3}$	11,65	9,6	—	—	Mitte Mitte	2,5 11,8	1,85 1,90	U_1 U_2	U_2 U_1	U_3 U_3	— —	Netz	3 Einphasentransformatoren Kabel auf Seite U_1
T 6	125	$253/\sqrt{3}$	$163/\sqrt{3}$	—	7,5	—	—	9	6,7	1,90	U_2	U_1	—	—	Netz	3 Einphasen-Autotransformatoren
T 7	100	$250/\sqrt{3}$	$150/\sqrt{3}$	—	8,67	—	—	9 1	7,1 6,4	1,86 1,90	U_1 U_1	U_2 U_2	— —	— —	Netz	3 Einphasen-Autotransformatoren
T 8	100	$251,5/\sqrt{3}$	13	—	11,69	—	—	Mitte	1,05	1,87	U_1	U_1	—	—	Netz	3-Phasentransformator, Kabel auf Seite U_1

T 9	100	$276/\sqrt{3}$	$135/\sqrt{3}$	—	9,5	—	—	11 32 11	4,53 7,0 4,5	1,87 1,88 1,87	U_1 U_1 U_1	U_2 U_2 U_1	— — —	— — U_2	Netz	3 Einphasentransformatoren
T 10	100	$280/\sqrt{3}$	$50/\sqrt{3}$	12,6	12,0	9,0	6,3	Mitte	9,6 8,8	1,87 1,87	U_1 U_1	U_2 U_3	U_3 U_2	— —	VL	3-Phasentransformator
T 11	10	$240/\sqrt{3}$	$56,2/\sqrt{3}$	16,6	13,5	12,3	7,0	31 31	6,4 9,0	1,83 —	U_1 U_2	U_2 U_1	U_3 U_3	— —	VL	3 Einphasentransformatoren
T 12	65	$252/\sqrt{3}$	53	—	13,08	—	—	1 12 24	3,5 3,94 4,18	1,81 1,85 1,82	U_1 U_1 U_1	U_2 U_2 U_2	— — —	— — —	Netz	3 Einphasentransformatoren
T 13	65	$252/\sqrt{3}$	53	—	14,3	—	—	Oben	4,5	1,90	U_1	U_2	— —	— —	VL	3 Einphasentransformatoren
T 14	60	$220/\sqrt{3}$	13,5	—	11,4	—	—	Mitte	0,70	1,91	U_1	U_2	— —	— —	Netz	3 Einphasentransformatoren Kabel auf Seite U_1
T 15	60	$160/\sqrt{3}$	$135/\sqrt{3}$	12,5	16,0	6,8	13,4	Oben	7,2 10,5	1,85 1,88	U_1 U_2	U_2 U_1	U_3 U_3	— —	VL	3 Einphasentransformatoren
T 16	40	$250/\sqrt{3}$	$74/\sqrt{3}$	16	12,5	12,4	7,5	35 35 17 1 35	5,3 6,2 7,5 7,8 10,0	1,79 1,79 1,80 1,80 1,81	U_1 U_1 U_2 U_2 U_2	U_3 U_2 U_3 U_3 U_1	U_2 U_3 U_1 U_1 U_3	— — — — —	VL	3 Einphasentransformatoren
T 17	33	$246/\sqrt{3}$	$170/\sqrt{3}$	8,8	9,7	—	—	15	3,69 3,40 8,0	1,89 1,88 1,90	U_1 U_1 U_2	U_2 U_2 U_1	— U_3 —	U_3 — U_3	VL	3 Einphasentransformatoren
T 18	30	$243/\sqrt{3}$	11	—	11,3	—	—	Unten Mitte Oben	3,18 3,05 2,71	1,88 1,86 1,82	U_1 U_1 U_1	U_2 U_2 U_2	— — —	— — —	Netz	3-Phasentransformator
T 19	30	$122/\sqrt{3}$	18,0	—	10,4	—	—	12	10,7	1,87	U_1	U_2	— —	— —	VL	3-Phasentransformator
T 20	25	$167/\sqrt{3}$	6,85	—	12,8	—	—	Unten Mitte Oben	4,8 3,45 2,40	1,83 1,82 1,84	U_1 U_1 U_1	U_2 U_2 U_2	— — —	— — —	VL	3-Phasentransformator
T 21	4,33 (1-ph.)	50,6	45	—	12,5	—	—	—	7,6 8,33	1,86 1,88	U_1 U_2	U_2 U_1	— —	— —	Netz	Einphasentransformator in Netzversuchsstation

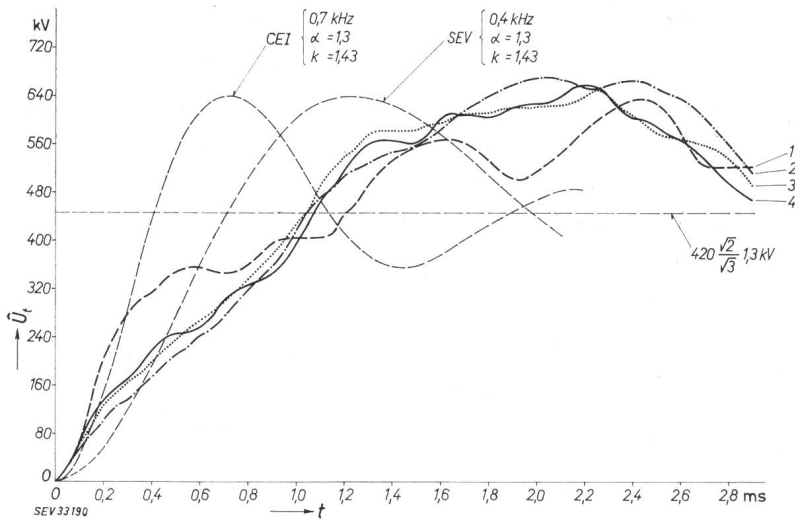


Fig. 10
Wie Fig. 9, aber für 420-kV-Netzkpunkte

Ziffer	Kurzschlussleistung MVA
1	16 800
2	15 350
3	13 350
4	12 150

berechnet; diese sind in Tabelle III zusammengestellt. Die Eigenfrequenzen überstiegen nirgends 3000 Hz. (Es handelt sich durchwegs um Wasserkraftwerke.) Die Amplitude dürfte mit $\alpha = 1,3$ und $k = 1,5$ reichlich angenommen sein.

Die lokal vom Kraftwerk erzeugte Kurzschlussleistung P_{lok} betrug stets weniger als 25% der totalen Kurzschlussleistung P_{tot} . Alles in allem genommen sind diese Fälle eher harmloser als die Fälle b.

Fall d:

Alle Fälle zwischen den Fällen a, b und c.

Trotz der Vielzahl dieser Fälle ist über deren transitorische wiederkehrende Spannung nichts besonderes zu berichten; diese verläuft, wenn mindestens eine Freileitung an die Sammelschiene angeschlossen ist, ähnlich wie bei Fall a. Wenn ein Schalter die Fälle a, b und c beherrscht, kann angenommen werden, dass er auch die Kombinationen von diesen beherrscht.

Bei dieser Gelegenheit sei noch besonders darauf hingewiesen, dass die Netzmodellnachbildung und die Computerberechnung der Grundtypen praktisch gleiche Resultate ergaben, so dass inskünftig bei weiteren Untersuchungen mit dem einen oder anderen auszukommen ist.

In Fig. 15 und 16 ist nur je der hochfrequente Teil des Spannungsverlaufes gezeichnet. Der restliche Verlauf ist jeweils harmlos.

Fall c:

Kraftwerk mit nur lokal aufgebrachtener Kurzschlussleistung.

Für insgesamt 8 schweizerische 245-kV-Netzkpunkte, in welchen Kraftwerke vorhanden sind, wurden Eigenfrequenzen

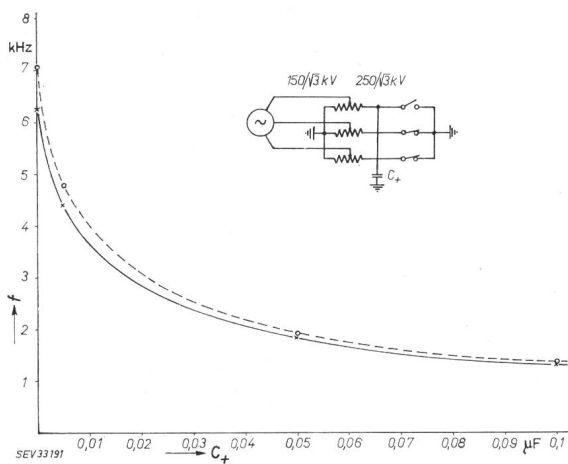


Fig. 11

Eigenfrequenz eines Dreiphasen-125-MVA-Autotransformators in Funktion künstlicher Zusatzkapazitäten C_+ (Fall Nr. T 7 der Tabelle II)
— Stufe 9, $\tilde{u} = 1,55$ - - - Stufe 1, $\tilde{u} = 1,80$

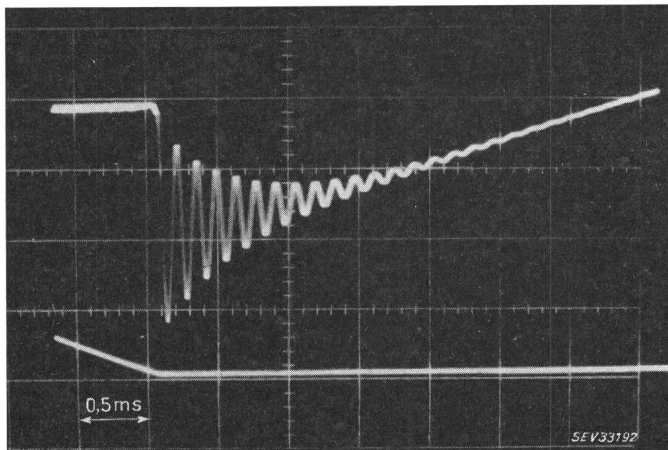


Fig. 12

Oszillogramm der transitorischen wiederkehrenden Schalterspannung bei Ausschalten des Transformators von Fig. 11, ohne Zusatzkapazitäten

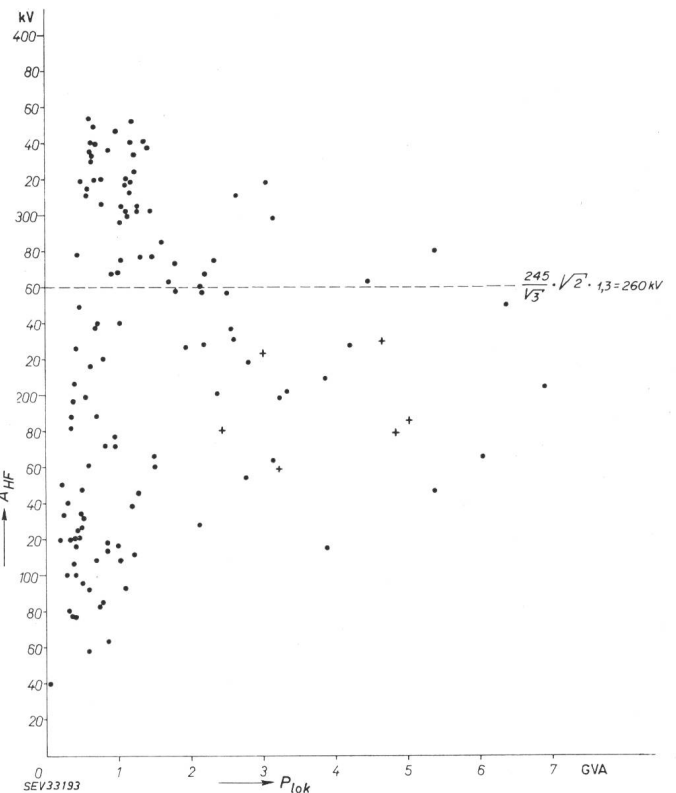


Fig. 13

Amplituden der hochfrequenten Transformatorschwingungen \hat{A}_{HF} (Fälle b) in Funktion der lokal aufbrachten Leistung P_{lok} in den schweizerischen Netzknoten und für die Grundtypen bei 245 kV

• Netzknoten der Umfrage + Grundtypen

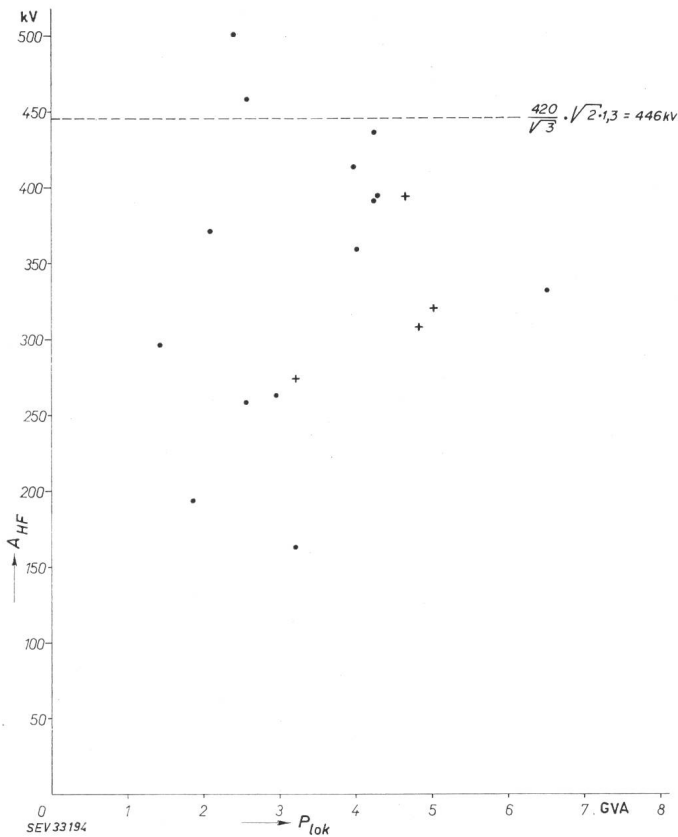
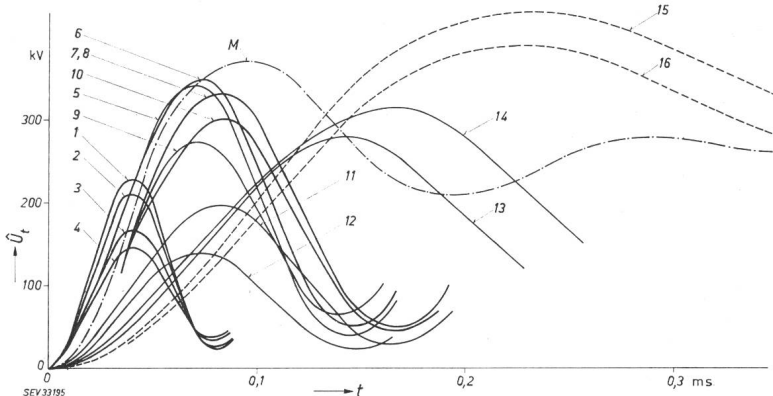


Fig. 14
Wie Fig. 13, aber für 420 kV

8. Darstellung mit 4-Parametermethode

Um gegebenenfalls Grundlagen für die Darstellung der transitorischen wiederkehrenden Spannung nach der 4-Parametermethode zu besitzen, wurden alle Spannungsverläufe der Netzpunkte und Grundtypen bei voller Kurzschlussleistung bei 245 und 420 kV nach dieser Methode ausgewertet. Die Resultate sind in den Fig. 17 und 19 für die beiden Spannungen dargestellt. Es fällt auf, dass die Amplitudenfaktoren bei den Grundtypen etwas höher liegen als bei den Netzpunkten. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bei den Grundtypen die Gegenstationen keine weiterführenden Leitungen aufweisen im Gegensatz zu der bei den Netzpunkten getroffenen Darstellung. Im übrigen zeigen die eingezeichneten Hüllkurven aller Parameterpaare, dass die Übereinstimmung zwischen Netzpunkten und Grundtypen eine sehr gute ist. Die Hüllkurven können als repräsentative Spannungsverläufe angesehen und mit den unter Abschnitt 9 gemachten Prüfvorschlägen, nämlich 1000 Hz mit Seriedämpfung bei 245 kV und 700 Hz



mit Seriedämpfung bei 420 kV, verglichen werden. Man erkennt, dass die Prüfvorschläge den Hüllkurven, die jedoch im ansteigenden Teil keine zusätzliche Sicherheit aufweisen, gut folgen und somit den Anforderungen entsprechen. Weiter ist ersichtlich, dass die gleichen Prüffrequenzen bei Parallel-dämpfung ungenügend sind, da die auftretenden Anfangsteilheiten damit gar nicht gedeckt werden.

Die 4-Parameterauswertung gestattet weiter einen Vergleich mit den Prüfvorschlägen der Edison Illuminating Companies (New York 1963) die ebenfalls in den Fig. 17 und 18 eingezeichnet sind (für 420 kV interpoliert). Auffallend ist die gute Übereinstimmung trotz anderer Grundlagen der amerikanischen Studiengruppe.

Als Ergänzung enthalten die Fig. 17 und 19 je den ersten Scheitelpunkt der für 50% und 25% Leistung vorgeschlagenen einfrequenzen wiederkehrenden Spannung sowie den ersten Scheitelpunkt der wiederkehrenden Spannung beim Abstandkurzschluss mit 75% Leistung (100% entspricht 40 kA).

Die Fig. 17 und 19 gestatten so einen umfassenden Überblick über die bei allen zur Prüfung vorgeschlagenen Schaltfällen auftretenden Spannungsbeanspruchungen.

In den Tabellen IV und V für 245 und 420 kV sind die Hüllkurven für 100% Leistung in 4-Parameterdarstellung angegeben sowie je die ersten Scheitelpunkte der wiederkehrenden Spannung bei 75% Leistung sowie bei 50% und 25% Leistung gemäss Prüfvorschlägen nach Abschnitt 9.

9. Vorschläge

Die Spannungsverläufe gemäss Tabelle V werden als repräsentativ und für die Schalterprüfung anwendbar vorgeschlagen:

10. Begründung

Bei der vollen Klemmenkurzschlussleistung wäre es an sich sinnvoller, einen repräsentativen Spannungsverlauf auf der Basis von 4 statt nur 2 Parametern zu empfehlen. Dies leuchtet z. B. bei Betrachtung der Fig. 7...10 ein. Indessen sind die bestehenden Prüfanlagen kaum in der Lage, einen genügend grossen Bereich von 4-Parameter-Kurvenzügen zu verwirklichen. Es scheint daher mindestens für den Augenblick und die nahe Zukunft angezeigt, Prüfkreise mit einer einzigen Eigenfrequenz bzw. mit 2-Parametern vorzusehen.

Fig. 15

Transitorische wiederkehrende Spannung \hat{U}_t beim Unterbrechen von über Transformatoren gespeisten Kurzschlüssen (Fälle b) in einigen schweizerischen 245-kV-Netzpunkten gezeichnet auf Grund gemessener Transformator-Eigenfrequenzen Vergleich mit den SEV- und CEI-Vorschlägen

Ziffer	P_{lok}/P_{tot} MVA	%
1	4200 / 14 700	28,6
2	3870 / 14 700	26,3
3	6100 / 16 610	36,7
4	5390 / 16 610	32,5
5	634 / 8 130	7,8
6	990 / 17 920	5,5
7	618 / 6 800	9,1
8	621 / 6 500	9,5
9	960 / 6 150	15,6
10	1120 / 6 800	16,5
11	290 / 8 800	3,3
12	1180 / 17 920	6,6
13	422 / 3 000	14,1
14	265 / 5 400	4,9
15	CEI 2000 Hz, $\alpha = 1,5, k = 1,43$	} $P_{lok}/P_{tot} = 50\%$
16	SEV 2000 Hz, $\alpha = 1,3, k = 1,5$	
M	Vorschlag 5000 Hz, $\alpha = 1,3, k = 1,43$	

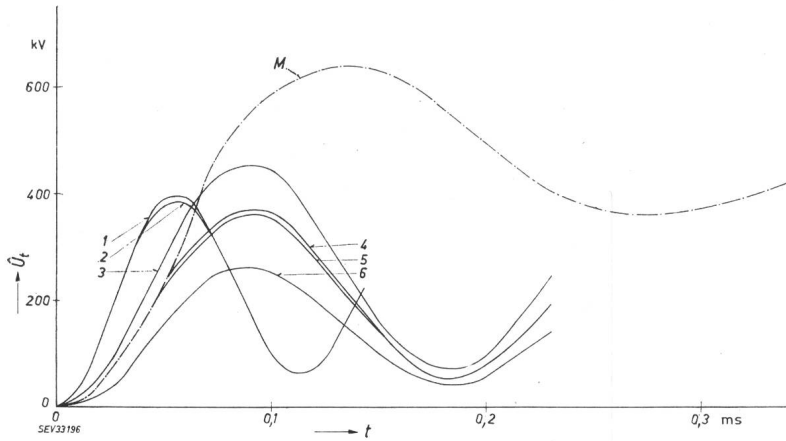


Fig. 16
Wie Fig. 15, aber für 420-kV-Netzpunkte

Ziffer	P_{lok} / P_{tot}	MVA	%
1		4280 / 15 340	27,9
2		4240 / 15 340	27,6
3		2560 / 12 130	21,1
4		2080 / 12 130	17,3
5		4000 / 12 130	33,0
6		2950 / 12 130	24,3
M Vorschlag 3500 Hz, $\alpha = 1,3$; $k = 1,43$;			
$P_{lok} / P_{tot} = 50\%$			

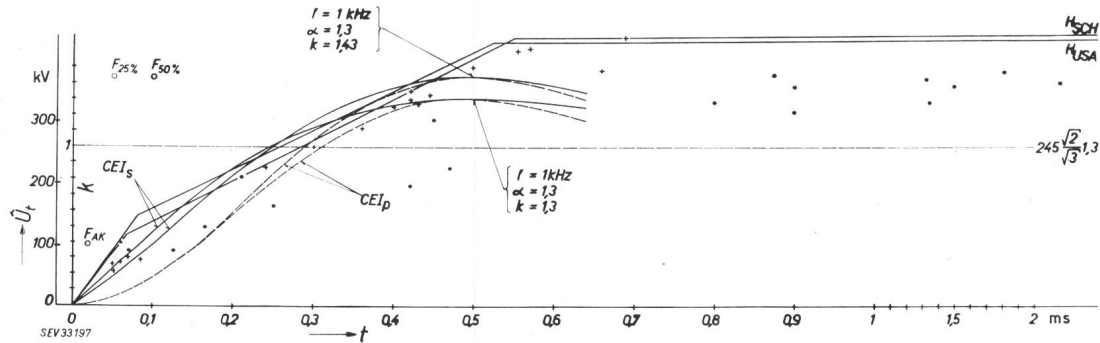


Fig. 17

Repräsentative Darstellungen und CEI-Kurven für 245-kV-Netze

- CEI_p einfach gedämpfte Sinuskurve bei Verwendung des Prüfkreises Fig. 18a
- CEI_s Kurve bei Verwendung des Prüfkreises gemäss Fig. 18b
- H_{Sch} 4-Parameterkurve, welche alle Spannungsverläufe, bezogen auf die schweizerischen 245-kV-Netzpunkte und die Grundtypen, umhüllt
- H_{USA} 4-Parametervorschlag einer amerikanischen Studiengruppe für 245-kV-Netze [8]
- F_{AK} erster Scheitel bei der vorgeschlagenen Abstandkurzschlussprüfung, $P = 75\%$ ($0,75 \cdot 40$ kA, $Z_w = 400 \Omega$)
- $F_{50\%}$ Scheitel bei der vorgeschlagenen Prüfung mit $P = 50\%$ (5000 Hz)
- $F_{25\%}$ Scheitel bei $P = 25\%$ (10 000 Hz)

• Netzpunkte der Umfrage + Grundtypen

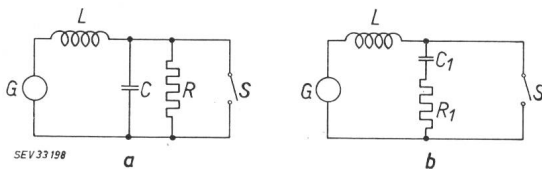


Fig. 18

Einpolige Prüfkreise

a Dämpfungswiderstand parallel zur Kapazität; b Dämpfungswiderstand in Reihe zur Kapazität; G Stromquelle; L Induktivität zur Einstellung des Prüfstromes; C, C_1 , R, R_1 künstliche Kapazitäten und Widerstände zur Einstellung der Einschwingspannung; S Prüfschalter

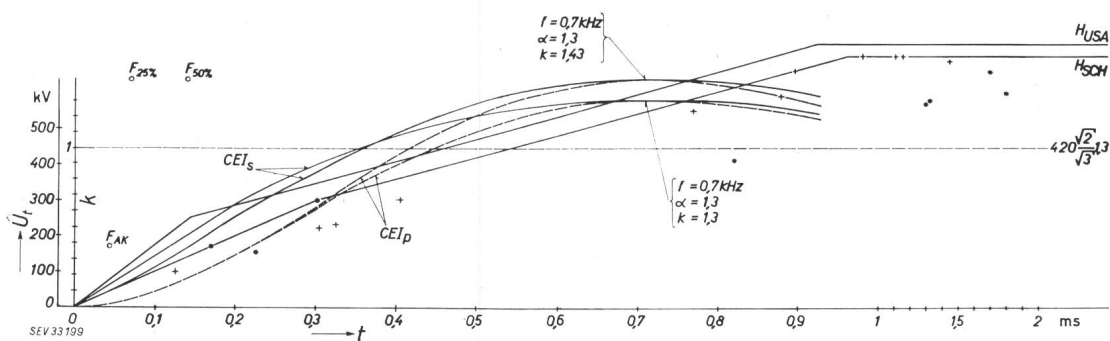


Fig. 19

Repräsentative Darstellungen und CEI-Kurven für 420-kV-Netze

- CEI_p einfach gedämpfte Sinuskurve bei Verwendung des Prüfkreises Fig. 18a
- CEI_s Kurve bei Verwendung des Prüfkreises gemäss Fig. 18b
- H_{Sch} 4-Parameterkurve, welche alle Spannungsverläufe, bezogen auf die schweizerischen 420-kV-Netzpunkte und Grundtypen, umhüllt
- H_{USA} 4-Parametervorschlag einer amerikanischen Studiengruppe für 420-kV-Netze [8], interpoliert zwischen 362 kV und 550 kV
- F_{AK} erster Scheitel bei der vorgeschlagenen Abstandkurzschlussprüfung, $P = 75\%$ ($0,75 \cdot 40$ kA, $Z_w = 300 \Omega$, ohne Dämpfung)
- $F_{50\%}$ Scheitel bei der vorgeschlagenen Prüfung mit $P = 50\%$ (3500 Hz)
- $F_{25\%}$ Scheitel bei $P = 25\%$ (7000 Hz)

• Netzpunkte der Umfrage + Grundtypen

Wie schon erwähnt, sind in den Fig. 17 und 19 Kurven CEI_p und CEI_s mit einer Schwingungszahl von 1000 Hz bzw. 700 Hz gezeichnet. Die Kurve CEI_p entsteht, wenn man den

Prüfkreis gemäss Schema von Fig. 18a einrichtet, wobei der Dämpfungswiderstand parallel zur Kapazität geschaltet wird. Demgegenüber entspricht die Kurve CEI_s dem Prüfkreis von

Berechnete Eigenfrequenzen an der 245-kV-Sammelschiene von Kraftwerken bei nur durch lokale Generatoren erzeugter Kurzschlussleistung (Fälle c)

Tabelle III

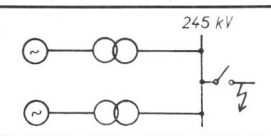
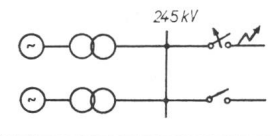
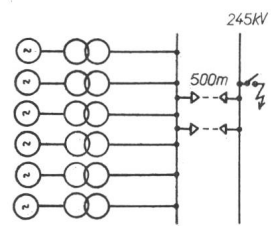
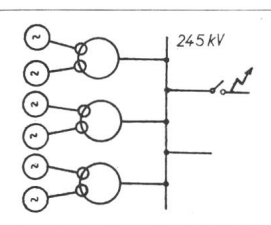
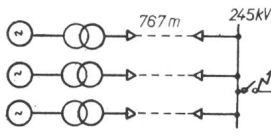
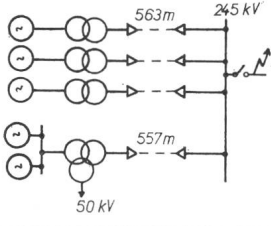
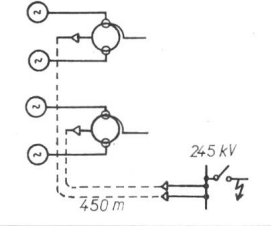
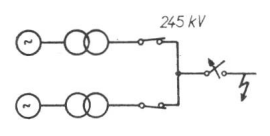
Station Nr.	Schema	Lokale Kurzschlussleistung P_{lok} GVA	Totale Kurzschlussleistung P_{tot} GVA	$\frac{P_{lok}}{P_{tot}}$	Eigenfrequenz f kHz
				%	
K 1		0,336	2,5	13,4	2,8
K 2		0,86	8,6	10	2,8
K 3		2,14	19,2	11,2	0,86
K 4		0,75	7,5	10	1,95
K 5		0,3	4,79	6,3	0,39
K 6		1,19	4,79	25	0,5
K 7		0,74	10,97	6,75	1,0
K 8		0,2	5,4	3,7	2,7

Fig. 18b (Kapazität und Widerstand in Serie). Diese Kurve deckt den Anfangsverlauf der wirklichen Spannungskurven besser; sie wird daher zur Anwendung empfohlen.

Die zusätzliche Prüfung bei Abstandkurzschluss (75%) ergibt einen steileren Anfangsverlauf der Spannung, wie die Hüllkurven K in den Fig. 7...9 zeigen. Diese Prüfung bedeutet

eine Ergänzung in jenen Fällen, wo die Kurve CEI_s anfänglich nicht voll decken sollte.

Die folgende Betrachtung möge noch zeigen, dass beim obigen Vorschlag einige Reserven eingerechnet sind:

a) Man nimmt an, dass die volle Kurzschlussleistung wirklich auftritt.

b) Der Erdungsfaktor $\alpha = 1,3$ wird zusammen mit der vollen Klemmenkurzschlussleistung kombiniert, während er in Wirklichkeit bei diesem Schaltfall meistens kleiner ist.

c) Die weitaus grösste Zahl der Schaltfälle bzw. der Spannungsverläufe liegt vollständig innerhalb der CEI-Sinuskurve, insbesondere bei kleineren Kurzschlussleistungen.

d) Der unwahrscheinliche Fall der vollen Maschinenleistung ohne Last wurde zu Grunde gelegt.

e) Die grosse Amplitude der repräsentativen Kurve wird praktisch nie nach so kurzer Zeit, sondern erst wesentlich später erreicht.

Die Vorschläge basieren vor allem auf Untersuchungen in 245-kV- und 420-kV-Netzen. Sie stimmen für 100% Leistung und 245...420 kV mit den Vorschlägen des CEI-Dokumentes 17A(Secrétariat)32, Reihe A, $\alpha = 1,3$ überein, wobei jedoch Seriedämpfung empfohlen wird. Für die kleineren Nennspannungen von 72,5...170 kV sind noch Studien im Gange.

Bei den Kraftwerkfällen c (siehe Tabelle III) ist die Eigenfrequenz stets kleiner als beim obigen Vorschlag für 50% Leistung. Zudem beträgt die lokale Kurzschlussleistung bei Kraftwerken immer weniger als 25% der vollen Kurzschlussleistung. Dieser Fall ist somit durch die Reihe bei 50% Leistung reichlich gedeckt.

Strengere Verhältnisse sind bei den Transformatorfällen b möglich, wie die Fig. 15 und 16 zeigen. Auch hier wäre ein repräsentativer Kurvenzug mit 4-Parametern passend, während aus praktischen Gründen, wie schon erwähnt, bis auf weiteres eher einfrequente Prüfkreise in Frage kommen. Wieder ist zu bemerken, dass in fast allen praktischen Fällen die transitorische wiederkehrende Spannung vollständig innerhalb der vorgeschlagenen repräsentativen Sinuskurve M liegt. Indessen stellt man bei den Autotransformatoren sehr grosser Nennleistung verhältnismässig grosse Eigenfrequenz fest (siehe Fälle $T 1, T 2, T 3$ der Tabelle II). In diesen Fällen mag die Spannung anfänglich die Kurve M übersteigen, wie z. B. in Fig. 15 und 16 ersichtlich. Doch beträgt die zugehörige lokale Leistung P_{lok} nicht 50%, sondern höchstens ca. 37% von P_{tot} . Es wäre aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu verantworten, noch strengere repräsentative Kurven vorzuschreiben. Es empfiehlt sich eher, bei sehr grossen Autotransformatoren die Eigenfrequenzen, Amplituden und Kurzschlussleistungen besonders zu untersuchen, und falls nötig besondere Prüfbedingungen zwischen Hersteller und Besteller zu vereinbaren. Übrigens wurden auch bei den untersuchten Transformatorfällen strenge Annahmen zu Grunde gelegt. In Wirklichkeit sind meistens dämpfende Elemente vorhanden, wie z. B. Sammelschienen, Strom- und Spannungswandler u. a. m.

Bei Transformatoren kleiner Nennleistung und ganz allgemein in jenen Fällen b , wo die lokale Leistung klein ist gegenüber P_{tot} , z. B. kleiner als 25% von P_{tot} , wird die Amplitude der hochfrequenten Schwingung grösser, während die Eigenfrequenz gleich bleibt. Man kann sich fragen, ob es sinnvoll sei, für diese Fälle noch eine weitere repräsentative Kurve bzw. Prüfung, z. B. bei 245 kV eine gedämpfte Sinuskurve von 10 kHz bei $P_{lok} = 0,25 P_{tot}$ einzuführen. Gegen dies spricht, abgesehen von wirtschaftlichen Erwägungen, der Umstand, dass die heute handelsüblichen Schalter diesen Schaltfall beherrschen, sofern sie die vorgeschlagenen Klemmenkurzschlüsse bei 100% und 50% beherrschen.

Nennspannung	Leistung	P = 100 %	P = 75 % ¹⁾	P = 50 %	P = 25 %
245 kV	k ₁	0,45	0,385	1,43	1,43
	u ₁	177 kV	100 kV	372 kV	372 kV
	t ₁	0,067 ms	0,0188 ms	0,1 ms	0,05 ms
	s ₁	1,75 kV/μs	5,33 kV/μs	3,72 kV/μs	7,44 kV/μs
	k ₂	1,68	1,68	Kein 2. Parameterpaar	
	u ₂	437 kV	437 kV		
	t ₂	0,55 ms	0,55 ms		
	s ₂	0,795 kV/μs	0,795 kV/μs		
420 kV	k ₁	0,675	0,385	1,43	1,43
	u ₁	300 kV	172 kV	637 kV	637 kV
	t ₁	0,3 ms	0,043 ms	0,143 ms	0,0715 ms
	s ₁	1,0 kV/μs	3,99 kV/μs	4,45 kV/μs	8,9 kV/μs
	k ₂	1,58	1,58	Kein 2. Parameterpaar	
	u ₂	704 kV	704 kV		
	t ₂	0,96 ms	0,96 ms		
	s ₂	0,734 kV/μs	0,734 kV/μs		

Amplitudenfaktoren k₁ und k₂ bezogen auf $U \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ 1,3

¹⁾ Abstandkurzschluss 0,75 · 40 kA, Z_w = 400 Ω bei 245 kV bzw. 300 Ω bei 420 kV

Spannungsverläufe

Tabelle V

Nennspannung U _n kV	Prüfvorschlag			informativ
	P = 100 % KK ^{1) 2)} f kHz	P = 75 % AK	P = 50 % KK ²⁾ f kHz	P = 25 % KK ²⁾ f kHz
72,5...170	im Studium	natürliche oder künstliche Leitung	im Studium	im Studium
245	1,0		5,0	10,0
300	0,8		4,0	8,0
420	0,7		3,5	7,0

KK Klemmenkurzschluss; AK Abstandkurzschluss

¹⁾ Bei 100% Leistung wird empfohlen, einen einfach gedämpften Schwingkreis nach Fig. 18b zu verwenden. Da die Eigenfrequenz bei dieser Schwingung jedoch nicht konstant ist, sollen die Stromkreisstanten so eingestellt werden, dass der Scheitelwert nach 1/2 f erreicht wird.

²⁾ Erdungsfaktor bei 1-poliger Schalterprüfung α = 1,3; wobei der Schalterpol entsprechend einer betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung von $\frac{U_n}{\sqrt{3}}$ α geprüft wird; U_n bedeutet die obere Nennspannung. Der Amplitudenfaktor beträgt 1,3 ± 10%

Durch die Prüfung bei Abstandkurzschluss soll einerseits das Schaltvermögen des Schalters bei diesem Schaltfall nachgewiesen werden. Andererseits stellt die Prüfung, wie erwähnt, eine Ergänzung zur Prüfung bei 100-%-Klemmenkurzschlussleistung dar, in jenen Fällen, wo die wirkliche Kurve anfänglich oberhalb der repräsentativen Kurve verläuft.

Das vorgeschlagene Prüfkonzept entspricht bei Klemmenkurzschluss ungefähr den bisherigen Regeln für Wechselstrom Hochspannungsschalter, Publ. 0186.1959 des SEV, jedoch mit 2,5mal höheren Eigenfrequenzwerten. Dazu kommt neu eine Prüfung bei Abstandkurzschluss.

Literatur

- [1] H. Schiller und H. Meyer: Les conditions rencontrées dans les réseaux suisses à 50 kV relatives aux puissances de court-circuit et aux fréquences propres. Bull. SEV 45(1954)13, S. 526...530.
- [2] H. Schiller und P. Baltensperger: Les conditions rencontrées dans les réseaux suisses à 150 kV relatives aux puissances de court-circuit et aux fréquences propres. Bull. SEV 46(1955)22, S. 1065...1067.
- [3] P. Hammarlund: Transient Recovery Voltage Subsequent to Short-Circuit Interruption with Special Reference to Swedish Power Systems. Inge.-Vetens.-Akad. Handl. (1946) 189.
- [4] P. Baltensperger: Statistische Untersuchung über Eigenfrequenzverhältnisse in möglichst vielen Netzen. Bull. SEV 46(1955)11, S. 505...516.
- [5] A. M. el-Arabaty: Untersuchung der transitorischen wiederkehrenden Spannungen in zwei Hauptabschnitten des schweizerischen Hochspannungsnetzes, gemessen mit einem Netzanalysator. Mitteilung aus dem Hochspannungslaboratorium der ETH, Zürich.
- [6] H. P. Saint-Clair und J. A. Adams: Transient Recovery Voltage Characteristics of Electric-Power Systems. Trans. AIEE 61(1942) Sept. S. 666...669.
- [7] P. Baltensperger: Dernières connaissances acquises dans le domaine des phénomènes de coupure et de l'essai des disjoncteurs. Revue Brown Boveri 49(1962)9/10, S. 381...397.
- [8] Association of Edison Illuminating Companies: Transient recovery voltages on power systems. Prepared by a subject committee of the committee on electric switching and switchgear, New York, N. Y., August 1963.

Adresse der Autoren:

H. Bader, Suiselectra, Basel; Dr. P. Baltensperger, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG); H. Hartmann, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden (AG); A. W. Roth, Sprecher & Schuh AG, Aarau.

Besondere Eigenschaften und Anwendungen von Nickel und Nickel-Legierungen für die Elektrotechnik

Magnetische Eigenschaften

Von A. Mager, Hanau

621.315.54

Nach einer kurzen Betrachtung der Grunderscheinungen des Magnetismus (Bezirksstruktur, magnetische Kristalleigenschaften u. a.) wird ein Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der nickelhaltigen Legierungen sowohl für den weichmagnetischen als auch für den hartmagnetischen Anwendungsfall gegeben. Die

Après un bref aperçu des phénomènes fondamentaux du magnétisme (structure locale, propriétés magnétiques des cristaux, etc.), l'auteur traite des propriétés les plus importantes des alliages renfermant du nickel, aussi bien pour aimantation faible, que pour aimantation forte. Il examine ensuite les différentes