Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 49 (1958)

Heft: 14

Artikel: Zum Problem "Steilheit und Amplitudenfaktor der transitorischen wiederkehrenden Spannung"

Autor: Baltensperger, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059735

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: 27.12.2025

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

49. Jahrgang Nr. 14 Samstag, 5. Juli 1958

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Zum Problem «Steilheit und Amplitudenfaktor der transitorischen wiederkehrenden Spannung»

Von *P. Baltensperger*, Baden

621.316.5.064.31

Die nach einer Kurzschlussausschaltung erscheinende betriebsfrequente wiederkehrende Spannung kann im ersten Augenblick wesentlich kleiner sein als ihr stationärer Wert, je nach dem vorangegangenen Abklingen der Wechselstromkomponente des Kurzschlußstromes. Daraus ergeben sich für den Schalter leichtere Ausschaltbedingungen. Der Amplitudenfaktor und die Steilheit der transitorischen wiederkehrenden Spannung sind stets auf den Anfangswert der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung zu beziehen.

La tension de rétablissement à fréquence de service qui apparait après le déclenchement d'un court-circuit, peut, aux premiers instants, être inférieure à sa valeur stationnaire, selon la décroissance de la composante alternative du courant de court-circuit pendant la durée de celui-ci. Par suite, les conditions de déclenchement du disjoncteur sont plus légères. Le facteur d'amplitude et la vitesse d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement doivent toujours se rapporter à la valeur initiale de la tension de rétablissement à fréquence de service.

Bei einem Kurzschluss im Hochspannungsnetz klingt die Wechselstromkomponente des Kurzschlußstromes mehr oder weniger stark ab, so dass der Anfangskurzschlußstrom stets grösser ist als der Ausschaltstrom. Das Abklingen hängt im wesentlichen von der subtransienten und der transienten Reaktanz der Generatoren ab und ist in der Nähe von Kraftwerken besonders ausgeprägt. Fig. 1 veranschaulicht den Verlauf des Kurzschlußstromes sowie der Spannung vor und nach dem Kurzschluss,

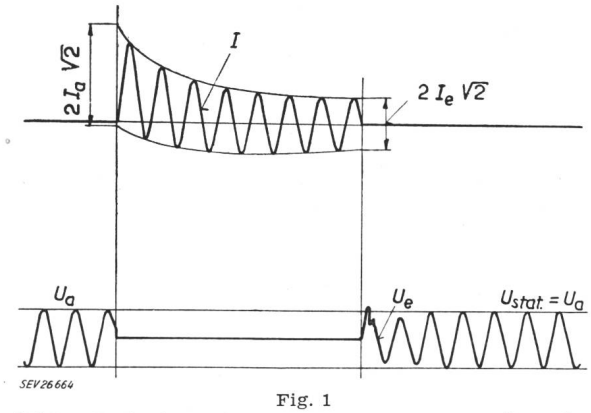


Fig. 1
Zeitlicher Verlauf von Spannung und Strom vor, während und nach einem Kurzschluss
U_a Spannung vor dem Kurzschluss; U_e Spannung nach dem Kurzschluss; $U_{stat.}$ stationäre Spannung nach dem Kurzschluss; I Kurzschlußstrom; I_a Anfangskurzschlußstrom, Wechselstrompomponente; I_e Ausschaltstrom, Wechselstromkomponente

wobei hier auf die anfängliche Asymmetrie des Stromes und das Abklingen seiner Gleichstromkomponente nicht eingetreten wird.

Zwischen den betriebsfrequenten Spannungen vor (U_a) und nach (U_e) dem Kurzschluss, dem Anfangs- (I_a) und End- (I_e) Kurzschlußstrom (Wechselstromkomponente) und der subtransienten Reaktanz x_d'' der Stromquelle bestehen im einphasigen Stromkreis folgende Beziehungen:

$$U_a = I_a x_d'' \tag{1}$$

$$U_e = I_e x_d'' = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \tag{2}$$

(d. h. bezogen auf den Moment der Stromunterbrechung; siehe Fig. 2)

woraus:

$$U_e = U_a \frac{I_e}{I_a} \tag{3}$$

Berechnet man die Ausschaltleistung

$$P_e = I_e U_e$$

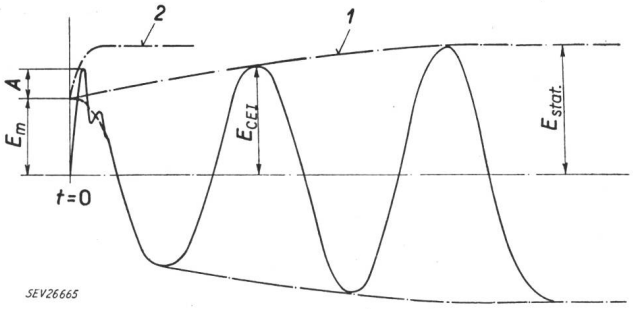


Fig. 2
Zeitlicher Verlauf der wiederkehrenden Spannung beim Ausschalten eines Generator-Kurzschlusses
E_m Scheitelwert der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung im Ausschaltmoment ($t = 0$), wenn kein Überschwingen stattfinden würde; E_{CEI} Scheitelwert der nach den CEI-Regeln auszuwertenden betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung; $E_{stat.}$ Scheitelwert der stationären betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung; $E_m + A$ grösster Scheitelwert der transitorischen wiederkehrenden Spannung;
1 Turbogeneratoren; *2* langsamlaufende Generatoren

d. h. bezogen auf den Moment der Stromunterbrechung, und die Einschaltleistung

$$P_a = I_a U_a$$

so gilt

$$P_e = P_a \left(\frac{I_e}{I_a}\right)^2 \qquad (4)$$

Wenn z. B. die Wechselstromkomponente bis zum Ausschaltmoment auf 80 % ihres Anfangswertes abklingt, so beträgt der Scheitelwert der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung im ersten Moment nur 80 % des betreffenden Wertes vor dem Kurzschluss (abgesehen davon, dass die wiederkehrende Spannung nicht sofort betriebsfrequent, sondern mit einer überlagerten gedämpften Schwingung erscheint). Die entsprechende Ausschaltleistung beträgt somit 64 % der Einschaltleistung. Nach den Definitionen der CEI[1]) ist allerdings die betriebsfrequente wiederkehrende Spannung einige Halbwellen nach der Stromunterbrechung auszuwerten, und somit grösser als $E_m/\sqrt{2}$ (siehe Fig. 2); d. h. auch die Ausschaltleistung nach CEI ist grösser als P_e.

In der heutigen Praxis wird die Ausschaltleistung meistens ohne Berücksichtigung des Abklingens der Wechselstromkomponente berechnet, und zudem als betriebsfrequente wiederkehrende Spannung die stationäre Betriebsspannung angenommen. Daher sind diese Rechnungen zu streng, bzw. die auf dieser Basis bemessenen Schalter besitzen eine entsprechende Leistungsreserve.

Fig. 2 veranschaulicht den Verlauf der wiederkehrenden Spannung und zeigt, dass ihr stationärer Wert *($E_{stat.}$)* erst nach einer gewissen Zeit erreicht wird, während die Auswertung gemäss Definition der CEI *(E_{CEI})* eventuell vor Erreichen des stationären Zustandes erfolgt. Die Charakteristik 1 entspricht vor allem schnell laufenden Generatoren (Turbomaschinen). Bei langsam laufenden Generatoren ist die stationäre betriebsfrequente Spannung oft schon in wenigen Millisekunden erreicht (Kurve 2).

Der *Amplitudenfaktor k* ist nach CEI, und mit den Bezeichnungen der Fig. 2, wie folgt definiert:

$$k_1 = \frac{E_m + A}{E_m} \qquad (5)$$

In Fig. 3 sind drei Beispiele von Kurzschluss-Ausschaltungen in Netzen angegeben. Man sieht daraus, dass der oben beschriebene Effekt sehr ausgeprägt ist, d. h. dass E_m nur 59 bis 75 % von $E_{stat.}$ beträgt. Bezieht man den Amplitudenfaktor gemäss Gl. (5) auf E_m, so erhält man in allen 3 Fällen verhältnismässig grosse Werte: $k_1 = 1{,}86$, 1,88, 1,90; bezieht man ihn auf den stationären Scheitelwert $E_{stat.}$, so wird er wesentlich kleiner, nämlich $k_2 = 1{,}39$, 1,10, 1,14. k_1 ist der sog. netzeigene Amplitudenfaktor, welcher vom Schalter, d. h. von der Lichtbogenspannung unabhängig ist. Da aber bei den genannten Direktversuchen der Schaltereinfluss vorhanden war und die Lichtbogenspannung (Löschspitze *B*), wie die Oszillogramme zeigen, beträchtliche Werte erreichte,

[1]) CEI = Commission Electrotechnique Internationale.

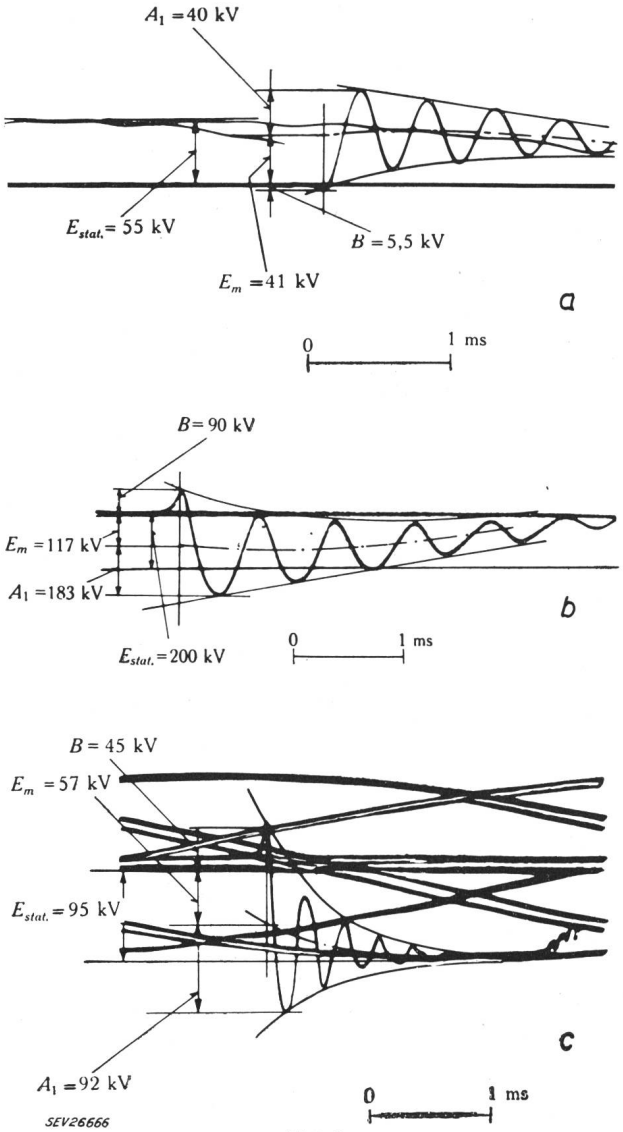


Fig. 3

Gemessene wiederkehrende Spannungen bei direkten Kurzschluss-Ausschaltungen

Bezeichnungen wie bei Fig. 2 und 4

a Kurzschluss-Versuchsanlage, einphasiger Versuch
U_{eff} = 39 kV, I_{eff} = 2,3 kA, $P = UI$ = 90 MVA
Kurzschlussdauer 0,08 s

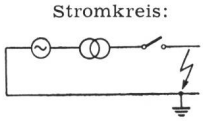
$$k_1 = \frac{A_1 + E_m + B}{E_m + B} = 1{,}86 = \text{netzeigener Amplitudenfaktor, bezogen auf } E_m$$

$$k_2 = k_1 \frac{E_m}{E_{stat.}} = 1{,}39 = \text{netzeigener Amplitudenfaktor, bezogen auf } E_{stat.}$$

b Grand Coulee Power Station, USA, 1 Generator + Transformator ohne Parallelnetz, einphasiger Versuch
141 kV, 0,98 kA, 138 MVA
k_1 = 1,88; k_2 = 1,10

c Kraftwerk Chandoline Dixence, Schweiz
Oszillogramm einer Phasenspannung von einem dreiphasigen Versuch
67 kV, 0,375 kA, 25 MVA
Kurzschlussdauer 0,14 s
k_1 = 1,90; k_2 = 1,14

Stromkreis:



Der Kurzschlußstrom war in allen 3 Fällen praktisch rein induktiv

wurde eine entsprechende Korrektur gemäss Fig. 4 vorgenommen:

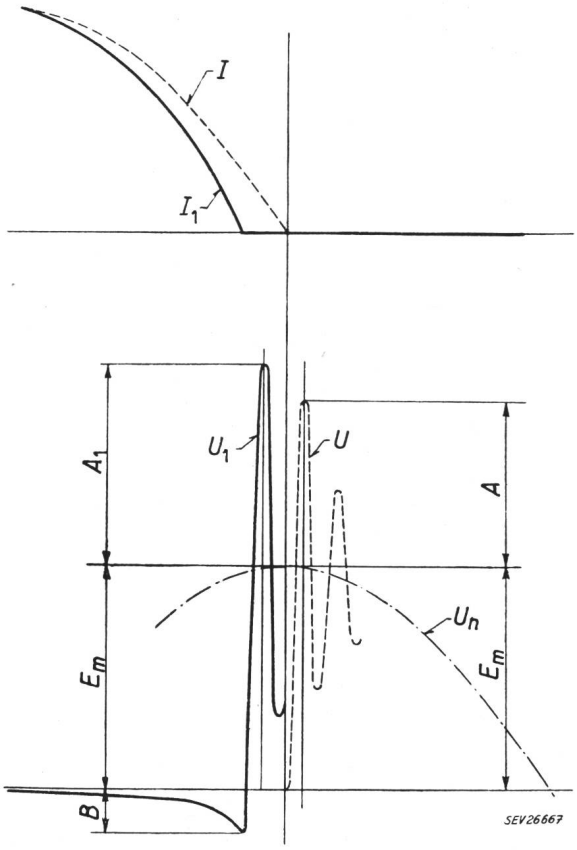


Fig. 4

Bestimmung des netzeigenen Amplitudenfaktors k_1 aus dem Oszillogramm des direkten Kurzschlussversuches

Korrektur des Einfluses der Lichtbogenspannung

U_n betriebsfrequente wiederkehrende Spannung (als konstant angenommen); U netzeigene transitorische wiederkehrende Spannung; U_1 oszillographisch gemessene transitorische wiederkehrende Spannung; E_m Scheitelwert der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung; B Spannungsspitze beim Löschen des Lichtbogens; $A + E_m$ netzeigene grösste Amplitude der transitorischen wiederkehrenden Spannung; $A_1 + E_m$ oszillographisch gemessene grösste Amplitude der transitorischen wiederkehrenden Spannung; I Kurzschlußstrom bei geschlossenen Kontakten; I_1 Lichtbogenstrom;

$$k_1 = \frac{A_1 + E_m + B}{E_m + B} = \frac{A + E_m}{E_m} = \text{netzeigener Amplitudenfaktor}$$

$$k_1 = \frac{A + E_m}{E_m} = \frac{A_1 + E_m + B}{E_m + B} \qquad (6)$$

Diese Korrektur ist von der CEI bereits diskutiert und grundsätzlich gutgeheissen worden.

Diese Darlegungen können zum grossen Teil den Unterschied zwischen den grossen Amplitudenfaktoren aus Modellversuchen, Berechnungen, Stromimpuls-Injektor-Messungen usw. einerseits, und Kurzschlussversuchen anderseits erklären. Der beschriebene von der subtransienten Reaktanz abhängige Effekt ist nur bei direkten Kurzschlüssen im Hochspannungsnetz vorhanden. Daher ist bei allen Methoden zur Ermittlung der transitorischen wiederkehrenden Spannung mit Ausnahme des Direktversuches (Netzmodell, Rechnung, Stromimpuls, Einschalten eines Transformators im Leerlauf) eine entsprechende Korrektur zu machen. Oder umgekehrt, wenn ein Amplitudenfaktor nach einer anderen als der direkten Methode ermittelt worden ist, und bei einer Schalterprüfung nach der direkten Methode reproduziert werden soll, so ist dieser Faktor aus dem Oszillogramm auf der Basis der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung E_m im Moment der Stromunterbrechung auszuwerten. Dabei kann E_m bei einfrequent einschwingender Spannung aus dem Kathodenstrahloszillogramm als Mittelwert zwischen der oberen und unteren Hüllkurve der transitorischen wiederkehrenden Spannung, bezogen auf den Moment der Stromunterbrechung, ermittelt werden.

Was hier für den Amplitudenfaktor gesagt wurde, gilt sinngemäss auch für die Steilheit des Spannungsanstieges, da die Steilheit dem Amplitudenfaktor proportional ist.

Der beschriebene Effekt ist weniger bedeutend in Netzpunkten, die von Kraftwerken weit entfernt sind. Jedoch sind dort bekanntlich andere Faktoren vorhanden, welche die transitorische wiederkehrende Spannung harmlos machen, wie z. B. kleine Eigenfrequenz infolge der grossen Leitungskapazitäten, Dämpfung des Amplitudenfaktors durch die Wellenwiderstände der Leitungen usw.

Adresse des Autors:

Dr. sc. math. *P. Baltensperger*, A.-G. Brown Boveri & Cie., Baden (AG).

CERN — Recherches fondamentales dans un cadre international

Conférence donnée à la 73e Assemblée générale de l'ASE, le 29 septembre 1957, à Genève,

par *F. Iselin*, Genève

061.1(4) CERN : 539.14.001.5

I. Introduction

L'intérêt manifesté par l'Association Suisse des Electriciens et l'Union des Centrales Suisses à l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) démontre éloquemment que dans l'avenir proche ou lointain les routes de la science et de la technique vont se rejoindre dans le domaine nucléaire.

Si nous nous permettons en ce moment de marquer une légère différence entre science et technique, c'est déjà pour indiquer que le CERN — comme nous le verrons encore plus loin — n'a pas pour mission de réaliser quoi que ce soit qui utilise l'Energie nucléaire comme base d'un système, que ce soit la fabrication de générateurs d'énergie ou de perfectionnements de piles existantes.

Le but du CERN peut se définir en un mot bien simple: *comprendre*. Il s'agit en effet d'expliquer, de comprendre le jeu mystérieux des forces qui lient les constituants de l'atome et d'établir les lois exactes de ces forces.