

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 45 (1954)  
**Heft:** 16

**Artikel:** Neue Messmethode zur Bestimmung der Berührungsspannung und der Kurzschluss-Stromstärke in genullten Sekundärnetzen  
**Autor:** Keller, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1061189>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

## Neue Messmethode zur Bestimmung der Berührungsspannung und der Kurzschluss-Stromstärke in genullten Sekundärnetzen

Von W. Keller, Biel

621.3.014.3.001.2:621.316.13.053.24

Die im Bulletin SEV Bd. 42(1951), Nr. 21, S. 837...839, angegebene Messmethode bedingt die Verwendung eines Kondensators, während die hier gezeigte Methode die Messung ohne Kondensator gestattet.

Le procédé de mesure indiqué dans le Bulletin ASE. t. 42 (1951), No 21, p. 837...839, nécessite l'emploi d'un condensateur. La nouvelle méthode décrite dans ce travail permet d'obtenir les mêmes résultats sans condensateur.

Gemäss Art. 26 der bundesrätlichen Starkstromverordnung vom 7. Juli 1933, sind die Elektrizitätswerke verpflichtet, dafür zu sorgen, dass in Hausinstallationen bei Erdschlüssen, die vor oder nach der Hauptsicherung auftreten können, an genullten, der Berührung ausgesetzten Apparategehäusen keine Berührungsspannungen von über 50 V auftreten, bzw., dass solche Spannungen höchstens 5 s bestehen bleiben.

Damit dieser Vorschrift nachgelebt werden kann, muss vom Elektrizitätswerk ermittelt werden, ob bei einem Kurzschluss zwischen Polleiter und geerdetem Nulleiter am Ende einer Leitung die Berührungsspannung am Nulleiter und damit an den an ihm geerdeten Apparategehäusen die zulässige Grenze von 50 V überschreitet. Wird diese Grenze überschritten, so muss die Kurzschluss-Stromstärke  $I_c$  bestimmt werden. Es ist dann eine Sicherung vorzuschalten, die bei dieser Stromstärke in höchstens 5 s durchschmilzt.

Die nachfolgend angegebene Messmethode gestattet die Ermittlung der Berührungsspannung und dieser Stromstärke ohne Betriebsunterbruch in der Weise, dass man am Netzpunkt, an welchem man die Messung vornehmen will, zwischen Polleiter und Nulleiter einen bekannten Belastungswiderstand einschaltet und die dabei auftretenden Spannungsänderungen zur Berechnung der gesuchten Grössen benützt.

Bei der im Bulletin SEV Bd. 42(1951), Nr. 21, S. 837...839, angegebenen Methode wird ausser dem Belastungswiderstand ein Kondensator von etwa 15 kg Gewicht benötigt, was die Durchführung von Messungen unangenehm erschwert. Bei der im folgenden beschriebenen Methode kommt man mit einem Belastungswiderstand und einem Voltmeter aus.

Fig. 1 zeigt das Schema mit dem Transformator in der speisenden Transformatorstation, dem

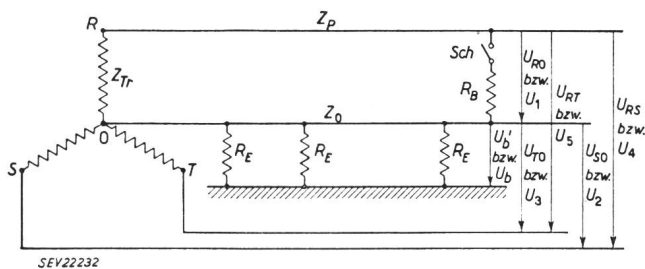


Fig. 1  
Schema der Messanordnung

$Z_{Tr}$  Impedanz des Transformators;  $Z_P, Z_0$  Impedanzen des Pol- und Nulleiters;  $Sch$  Schalter;  $R_B$  Belastungswiderstand;  $U_{R0}, U_{S0}, U_{T0}, U_{RS}, U_{RT}$  Spannungen bei geöffnetem Schalter  $Sch$ ;  $U_1, \dots, U_5$  Spannungen bei geschlossenem Schalter  $Sch$ ;  $U_b'$  Berührungsspannung bei Belastung durch  $R_B$ ;  $U_b$  Berührungsspannung bei Kurzschluss;  $R_E$  Erdübergangswiderstände

Netz bis zum Verbraucher und der Messanordnung beim Verbraucher, bei dem Berührungsspannung und Kurzschluss-Stromstärke ermittelt werden sollen. Die Messung beruht auf folgenden Überlegungen:

Schliesst man den Schalter  $Sch$ , so verursachen die Impedanzen  $Z_{Tr}, Z_P$  und  $Z_0$  zusammen mit dem bekannten Belastungswiderstand  $R_B$  einen Spannungsabfall. Die Spannung am Widerstand  $R_B$  sei bei geöffnetem Schalter  $U_{R0}$ , bei geschlossenem Schalter  $U_1$ . Wird das Verhältnis  $U_1/U_{R0}$  mit 100 multipliziert, so erhält man die Spannung am Widerstand  $R_B$  in Prozenten der Spannung  $U_{R0}$ . Diese Zahl 100  $U_1/U_{R0}$  soll der Einfachheit halber mit  $\epsilon_1$  bezeichnet werden. Analog ergibt sich dann  $\epsilon_2 = 100 U_2/U_{S0}$ ,  $\epsilon_3 = 100 U_3/U_{T0}$ ,  $\epsilon_4 = 100 U_4/U_{RS}$  und  $\epsilon_5 = 100 U_5/U_{RT}$ .

Die Zahlen  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_5$  sind nur abhängig vom prozentualen Spannungsrückgang, welcher durch das Einschalten des Belastungswiderstandes  $R_B$  verursacht wird. Die auf der betreffenden Leitung infolge anderer Belastungen schon vorhandenen Spannungsverluste haben deshalb auf die Messung keinen Einfluss. Wird das Voltmeter mit einer entsprechenden Skala versehen und der Zeiger bei geöffnetem Schalter  $Sch$  mit einem vorgeschalteten Regulierungswiderstand auf den Wert 100 einreguliert ( $U_{R0} = 100\%$ ), so kann nach Schliessen des Schalters der betreffende Wert  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_5$  direkt abgelesen werden. Besonders vorteilhaft ist dabei die Verwendung eines geeigneten Umschalters, der in 6 Schalterstellungen gestattet, die Spannungen  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_5$  und die Spannung  $U_b'$ , von der noch die Rede sein wird, nacheinander auf das Instrument zu schalten.

Im Spannungsdiagramm Fig. 2, das die weiteren Überlegungen erleichtern hilft, betragen die Strecken  $\overline{RO} = 100, \overline{SO} = 100, \overline{TO} = 100, \overline{RS} = 100/\sqrt{3}$  und  $\overline{RT} = 100/\sqrt{3}$ .  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_5$  sind die am Voltmeter abgelesenen Werte, welche im Diagramm im gleichen Maßstab als Strecken aufgetragen worden sind.  $\epsilon_Z$  ist die Spannung an der Impedanz  $Z = |\overline{Z}_{Tr} + \overline{Z}_P + \overline{Z}_0|$  bei geschlossenem Schalter, ausgedrückt in Prozenten der Spannung  $U_{R0}$  bei geöffnetem Schalter. Da sich in einem geschlossenen Stromkreis die Spannungen zueinander verhalten wie die entsprechenden Impedanzen, ist

$$\epsilon_Z/\epsilon_1 = Z/R_B \text{ und } Z = \epsilon_Z R_B/\epsilon_1 \quad (1)$$

Die graphische Lösung erfolgt also einfach durch Aufzeichnen des Spannungsdiagramms Fig. 2, in welchem die für die weitere Auswertung interessierende Grösse  $\epsilon_Z$  abgemessen werden kann.

Die rechnerische Lösung ist ebenfalls verhältnismässig einfach, gibt aber genauere Werte.

Nach Fig. 2 ist:

$$\begin{aligned} d^2 + a^2 &= \varepsilon_2^2 \\ d^2 + b^2 &= \varepsilon_3^2 \\ a + b &= 100\sqrt{3} \end{aligned}$$

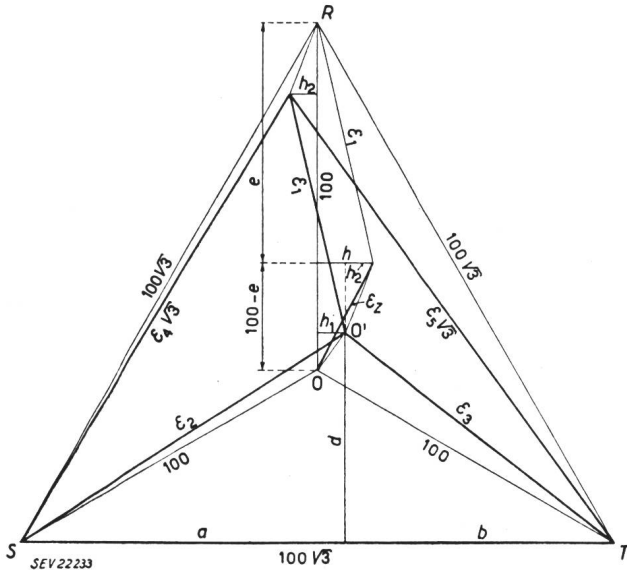


Fig. 2  
Spannungsdiagramm  
Erklärungen siehe im Text

Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned} a^2 - b^2 &= \varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2 \\ b &= \frac{3 \cdot 10^4 - \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}{200\sqrt{3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= 50\sqrt{3} - b = 50\sqrt{3} - \\ &\quad - \frac{3 \cdot 10^4 - \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}{200\sqrt{3}} = \frac{\varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2}{200\sqrt{3}} \end{aligned}$$

Für das Rechnen mit dem Rechenschieber ist die Darstellung

$$h_1 = \frac{(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{200\sqrt{3}}$$

vorteilhafter. Auf analoge Weise ergibt sich:

$$h_2 = \frac{(\varepsilon_5 + \varepsilon_4)(\varepsilon_5 - \varepsilon_4)\sqrt{3}}{200}$$

und nach Fig. 2 gilt:

$$h = h_1 + h_2 \tag{2}$$

Aus Fig. 2 folgt ferner:

$$\begin{aligned} e &= \sqrt{\varepsilon_1^2 - h^2} \\ \varepsilon_Z &= \sqrt{(100 - e)^2 + h^2} = \sqrt{100^2 + e^2 - 200e + h^2} \\ \varepsilon_Z &= \sqrt{100^2 + \varepsilon_1^2 - h^2 - 200\sqrt{\varepsilon_1^2 - h^2} + h^2} \end{aligned}$$

$$\sqrt{\varepsilon_1^2 - h^2} = \varepsilon_1 \sqrt{1 - \frac{h^2}{\varepsilon_1^2}}$$

Da  $\frac{h^2}{\varepsilon_1^2} \ll 1$ , kann geschrieben werden:

$$\sqrt{\varepsilon_1^2 - h^2} = \varepsilon_1 \left(1 - \frac{h^2}{2\varepsilon_1^2}\right) = \varepsilon_1 - \frac{h^2}{2\varepsilon_1}$$

und

$$\varepsilon_Z = \sqrt{100^2 + \varepsilon_1^2 - 200\varepsilon_1 + \frac{100}{\varepsilon_1}h^2}$$

$$\varepsilon_Z = \sqrt{(100 - \varepsilon_1)^2 + \frac{100}{\varepsilon_1}h^2} \tag{3}$$

Nach (3) und (2) kann also  $\varepsilon_Z$  auf einfache Weise ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Berührungsspannung  $U_b$  bei Kurzschluss, wird vorerst die Berührungsspannung  $U_b'$  bei Belastung durch den Widerstand  $R_B$ , wie dies in Fig. 1 gezeigt wird, also bei geschlossenem Schalter *Sch* gemessen. Der Strom, welcher dabei durch den Widerstand  $R_B$  fließt, beträgt

$$I_1 = \frac{U_1}{R_B} \tag{4}$$

Bei Kurzschluss (Berührungsspannung  $U_b$ ) beträgt der Strom

$$I_c = \frac{U_{R0}}{Z} \tag{5}$$

und weil sich die Berührungsspannungen zueinander verhalten wie die Ströme, ist

$$U_b/U_b' = I_c/I_1$$

und

$$U_b = \frac{U_b' I_c}{I_1} \tag{6}$$

Nach (1), (4), (5) und (6) ergibt sich:

$$U_b = \frac{U_b' U_{R0} R_B}{Z U_1} = \frac{U_b' U_{R0} \varepsilon_1}{\varepsilon_Z U_1}$$

Nach Früherem ist:

$$\frac{U_{R0}}{U_1} = \frac{100}{\varepsilon_1}$$

Die Berührungsspannung bei Kurzschluss ergibt sich demnach zu:

$$U_b = \frac{100 U_b'}{\varepsilon_Z} \tag{7}$$

Übersteigt  $U_b$  den Wert von 50 V, so muss aus der Spannung  $U_{R0}$  am Transformator und aus der Kurzschlussimpedanz  $Z$  die Kurzschluss-Stromstärke  $I_c$  bestimmt werden. Nimmt man  $U_{R0}$  z. B. zu 230 V an, so ist nach (1) und (5)

$$I_c = \frac{U_{R0}}{Z} = \frac{230 \varepsilon_1}{R_B \varepsilon_Z} \tag{8}$$

Bei bekannter Abschmelzcharakteristik kann nun die Nennstromstärke der Sicherung, welche bei Kurzschluss in der nach der Starkstromverordnung vorgeschriebenen Zeit von höchstens 5 s durchschmilzt, bestimmt werden.

Überschreitet die Berührungsspannung  $U_b$  die Grenze von 50 V nicht, so können die Sicherungen beliebig gewählt werden, soweit dies die Grösse des Transformators und die vorgeschalteten Hochspannungssicherungen gestatten.

Oft kann durch Verbesserung der Erdungsverhältnisse am äussersten Punkt der Leitung eine Überschreitung der zulässigen Spannung von 50 V

bei einem Kurzschluss Polleiter—Nulleiter vermieden werden.

Zahlreiche Vergleichsmessungen haben ergeben, dass die hier dargelegte Methode dieselben Messresultate ergibt, wie die früher beschriebene Methode mit Kondensator.

Adresse des Autors:

W. Keller, Elektrotechniker, Höhweg 3, Biel.

## Verhalten der Synchronmaschinen bei Störungen der Stabilität

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 25. März 1954 in Zürich,  
von Th. Laible, Zürich

621.3.016.35:621.313.32

An einem Beispiel wird der Verlauf der wichtigsten Grössen einer Synchronmaschine während einer Störung gezeigt. Die verschiedenen Anteile des Drehmoments werden erklärt und die Möglichkeiten zu ihrer Beeinflussung erörtert.

Un exemple montre la tenue des grandeurs les plus importantes d'une machine synchrone lors d'une perturbation. Les différents composants du couple sont expliqués et les possibilités de les influencer sont discutées.

### Einleitung

Um einen Einblick in das Verhalten der Synchronmaschinen zu bekommen, wollen wir einige Kurven betrachten, die für einen konkreten Fall den Verlauf der wichtigsten Grössen darstellen. Der Übersichtlichkeit halber wurde ein verhältnismässig einfaches Beispiel gewählt.

Ein Kraftwerk mit 400 MVA installierter Maschinenleistung arbeite über eine 250 km lange Doppelleitung auf ein grosses Netz. Die Übertragungsspannung soll 220 kV betragen und die natürliche Leistung der Doppelleitung 264 MW. Die Ge-

neratoren sollen mässige Reaktanzen ( $X_d = 0,94$ ;  $X_q = 0,66$ ;  $X_d' = 0,37$ ;  $X_d'' = X_q'' = 0,23$ ) haben und ein ziemlich kleines Trägheitsmoment ( $H = 2,5$  kWs/kVA). Sie seien mit besonders raschen Erregern (Erregungsgeschwindigkeit 3,5) und Stösserregung, sowie mit einer kräftigen kompletten Dämpferwicklung ausgerüstet.

In Kraftwerknahe trete auf einer der beiden Leitungen ein zweipoliger Erdschluss auf. Nach 0,15 s wird die betroffene Leitung an beiden Enden allpolig abgeschaltet und nach einer Pause von 0,30 s wiedereingeschaltet.

### Bewegung des Generators während der Störung

In Fig. 1 ist die Bewegung eines Polrades während der Störung dargestellt. Die oberen Kurven zeigen den zeitlichen Verlauf des Polradwinkels  $\vartheta$ , d. h. des elektrischen Winkels zwischen der Polachse eines Generators und der festen Spannung  $U$  des grossen Netzes. Die unteren Kurven zeigen die Änderungsgeschwindigkeit des Winkels, d. h. den Schlupf  $s$ . Dieser ist hier, im Gegensatz zu dem beim Induktionsmotor Üblichen, für übersynchrone Drehzahlen positiv gezählt. Die Kurven  $a$  gelten für eine übertragene Leistung von 297 MW, bei der die Anlage gerade noch stabil ist; die Kurven  $b$  hingegen für die bereits etwas über der Stabilitätsgrenze liegende Leistung von 314 MW. Die genaue Stabilitätsgrenze liegt knapp unter 310 MW.

### Leistungsverlauf

Fig. 2 zeigt die Änderung der Leistung an der Generatorwelle in Abhängigkeit vom Polradwinkel, für den stabilen (A) und für den labilen (B) Fall. Bei Eintritt der Störung fällt die elektrische Leistung des Generators auf einen kleinen Wert. Die Turbinenleistung hingegen bleibt bestehen, da während der kurzen in Frage kommenden Zeit der Turbinenregler nicht wirksam eingreifen kann. Die Maschine wird daher beschleunigt bis der Fehler abgeschaltet wird. Der Schlupf und der Polradwinkel wachsen daher. Nach der Abschaltung kann die Maschine über die noch bestehende zweite Leitung wieder Leistung abgeben. Infolge des grösseren Pol-

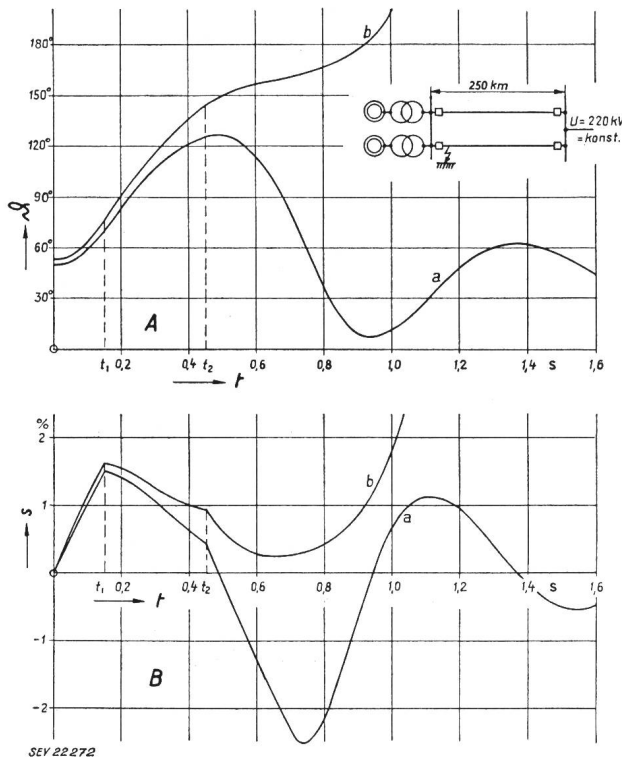


Fig. 1

Änderung des Polradwinkels (A) und des Schlupfes (B) bei zweipoligem Erdschluss

$a$  übertragene Leistung 297 MW;  $b$  übertragene Leistung 314 MW

Die betroffene Leitung wurde im Zeitpunkt  $t_1$  ab- und in  $t_2$  wiedereingeschaltet

$\vartheta$  Polradwinkel;  $t$  Zeit;  $s$  Schlupf