Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 12 (1921)
Heft: 4

Artikel: Zur Bestimmung der Eigenkapazität von Transformatoren
Autor: Goldstein, J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057106

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

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

Wie bereits bemerkt, scheint es uns unrichtig, dass die viel vorkommenden und hohen technisch-wirtschaftlichen Wert besitzenden Spannungen von 8 und 45 kV auf den Aussterbeetat gesetzt werden sollen, und dass anderseits die Möglichkeit der Verwendung der praktisch höchsten Generatorspannung von ungefähr 15 kV als Normal ausgeschlossen sein soll. Daher:

Frage 4: *Ist es nicht vorzuziehen, gegenüber dem Vorschlag A des VSM nach dem Vorschlage des Generalsekretariats in der Hauptsache die* ***Reihe II*** *als Normal einzuführen, welche die wichtigen Spannungen von 8, 15 und 45 kV enthält, unter gleichzeitiger Aufnahme der Werte von ca.* ***6,*** *ca.* ***10*** *(und eventuell* ca. ***60*** und *ca.* ***100)*** *kV als* ***Nebennormal?***

Bessere Belehrung vorbehalten, will uns diese Lösung als die passendste erscheinen. Sie entspricht dem Vorhandenen; sie lässt ferner die technisch höchstmögliche Ausnützung der direkten Generatorenspeisung sowie des Freileitungstypus mit stehenden Isolatoren zu und gibt mit den 45 kV eine Spannung, die voraussichtlich in absehbarer Zeit auch als höchste Kabelspannung in Betracht kommen kann; sie enthält endlich auch nur solche Spannungen, die vermutlich internationales Normal werden können.

Nach Erledigung dieser *Hauptfragen* wären dann noch folgende *Nebenfragen* zu erledigen:

Frage 5: *Welches prozentuale Intervall zwischen minimalem und maximalem Wert einer Normalspannung ist festzusetzen?*

Frage 6: *Welche Werte des Intervalls einer Normalspannung sind als „Nennspannung" zu wählen?*

Wir hoffen, dass die Interessenten sich nunmehr lebhaft an der Diskussion dieser Fragen beteiligen werden. Das Generalsekretariat erwartet Meinungsäusserungen und nimmt in Aussicht, geeignete derartige Mitteilungen im Bulletin zu veröffentlichen. Sowohl bei den Werken wie bei den Fabrikationsfirmen besteht der Wunsch und für einige Fälle ist es dringende Notwendigkeit, dass die Frage *rasch* erledigt werde. Es werden daher bald dem V.S.E. und dem S.E.V. definitive Anträge zur Beschlussfassung vorgelegt werden müssen, für welche das Generalsekretariat auf die zu erwartenden Aeusserungen der Mitglieder abstellen muss.

Zur Bestimmung der Eigenkapazität von Transformatoren.

Von Dr. *J. Goldstein,* Dipl.-Ing., Zürich.

1. Kritische Bemerkungen zum Aufsatz von Paul Joye und Marius Besson: „Note sur la capacité répartie des transformateurs ou des bobines d'induction". [1])

Im obigen Aufsatz entwickeln die Verfasser eine Näherungsmethode zur Bestimmung der Eigenkapazität von Transformatoren. Auf Grund der Formeln, die für ein magnetisch gekoppeltes System gelten, wird aus der Bedingung für die Resonanz eine Formel zur Bestimmung der Eigenkapazität hergeleitet. Der Resonanzzustand wird erreicht, indem man durch Regulierung der Frequenz ein Strommaximum im offenen Sekundärkreis erhält. Die Verfasser bemerken richtig, dass dieses Verfahren nur eine Annäherung ist. Die Vorgänge sind derart kompliziert, dass es nicht leicht gelingen dürfte eine exakte mathematische Fassung für das physikalische Wesen der Sache zu finden. Wenn es auch klar ist, dass nur durch Einführung der verteilten Kapazität und des Ladestromes und durch die Auflösung der partiellen Differentialgleichungen des Stromkreises mit verteilter Induktivität und Kapazität unter Berück-

[1]) Bulletin No. 2, 1921.

sichtigung der Randwerte für diesen speziellen Fall die Aufgabe zu bewältigen ist, so haben die Verfasser des obigen Aufsatzes bei ihrem Näherungsverfahren eine Tatsache unberücksichtigt gelassen, die gerade bei diesem Problem wegen der Versuchsbedingungen von ausserordentlicher Wichtigkeit ist. Ich meine die Kurvenform.

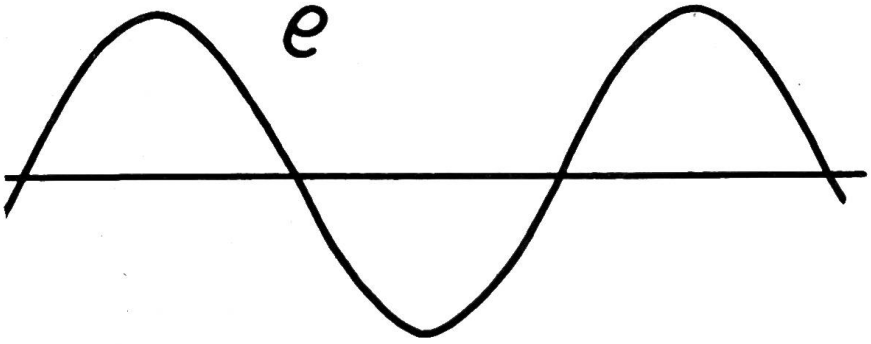

Fig. 1

Eine Anzahl Versuche, die ich im Auftrage des Oberingenieurs der Technischen Prüfanstalten des S. E. V., des Herrn F. Tobler, ausgeführt habe, zeigten, dass ein Hochspannungstransformator mit grosser Wickellänge (und um einen solchen wird es sich nach den Angaben des obigen Aufsatzes gehandelt haben) eine äusserst ungünstige Belastung für Maschinen und Induktionsregler darstellt, ungünstig in dem Sinne, dass die beste Kurvenform stark entstellt und verzerrt wird. Man muss annehmen, dass diese Erscheinung bei derartigen Untersuchungen, allgemein auftreten wird. In einem Versuchslokal oder Laboratorium wird man kaum über Einheiten mit regulierbarem Spannungs- und Frequenzbereich von derart grosser Leistung verfügen, dass die Aenderung der Kurvenform ausser acht gelassen werden kann. Vielmehr weisen alle Verfasser, die sich mit derartigen Versuchen abgegeben haben, auf die Kurvendeformation hin. [1]) Die bei unseren Versuchen verwendete Maschine von ca. 20 kVA gibt im Leerlauf die Spannungskurve nach Fig. 1. Bei einer Belastung auf einen Transformator (200 auf 4000 Volt) übt die Eigenkapazität des Transformators noch keine wesentliche Rückwirkung auf die Maschine aus, wie dies aus der Spannungskurve Fig. 2

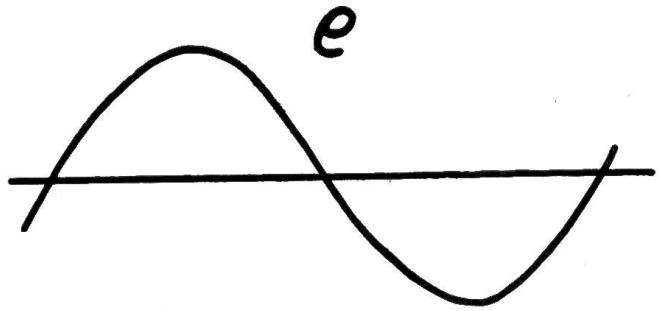

Fig. 2

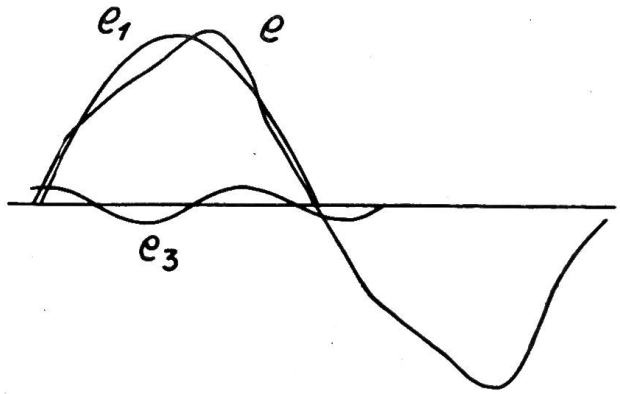

Fig. 3

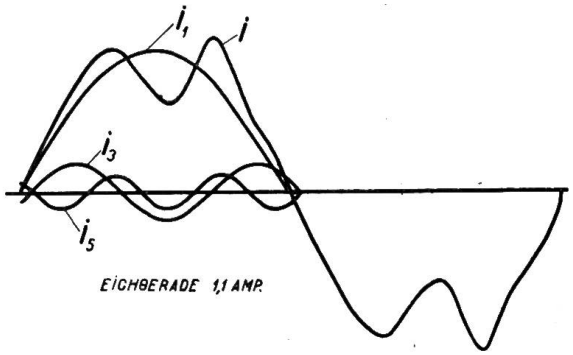

Fig. 4

hervorgeht. Hingegen ist die Deformation bedeutend bei der Belastung auf einen Hochspannungstransformator 400 auf 100 000 Volt, 20 kVA. Siehe hierzu Fig. 3. Die Kurve des vom Transformator aufgenommenen Stromes ist in Fig. 4 abgebildet.

[1]) Petersen, Hochspannungstechnik; Weicker, Zur Beurteilung von Hochspannungsfreileitungsisolatoren Seiten 8 ÷ 10.

Die Analyse dieser Kurve ergab für den Strom folgende Fourier'sche Entwicklung

$$i = 1{,}852 \sin \omega t + 0{,}356 \sin (3\,\omega t - 7^0\,10') - 0{,}194 \sin (5\,\omega t - 8^0\,10') \ldots .$$

Für die Bestimmung der Eigenkapazität nach der Resonanzmethode von Joye und Besson hat das Auftreten ausgeprägter höherer Harmonischen in der Stromkurve folgende Konsequenzen:

Die im Aufsatze angeführten Formeln [1]) haben ihre Gültigkeit für die einzelnen Harmonischen. So wird, wenn die primär aufgedrückte Spannung durch die Reihe

$$e_1 = \sum_{\nu=1}^{\nu=\nu} E_{1\nu} \sin (\nu\,\omega t + \varphi_\nu)$$

gegeben ist, der Sekundärstrom der ν-ten durch folgenden Ausdruck

$$J_{2\nu} = \frac{M\,E_{1\nu}}{L_1 \sqrt{\varrho_2^2 + \lambda_{2\nu}^2\,\nu^2\,\omega^2}}$$

dargestellt.

Hier und in der weiteren Betrachtung wird der primäre Widerstand R_1 gegen $L_1^2\,\omega^2$ vernachlässigt. Alle Bezeichnungen entsprechen denjenigen im Aufsatze von Joye und Besson.

Für die Resonanz muss $\lambda_{2\nu} = 0$ sein. Nun ist $\lambda_{2\nu}$ selbst von der Frequenz abhängig. Die Bedingung für die Resonanz der ν-ten Harmonischen lautet:

$$\lambda_{2\nu} = L_2 - \frac{1}{C\,\nu^2\,\omega^2} - \frac{M^2}{L_1} = 0$$

Hieraus ergibt sich, wenn

$$\frac{M^2}{L_1\,L_2} = \varkappa^2 \text{ (Kopplungsfaktor) und}$$

$$\frac{L_1\,L_2 - M^2}{L_1\,L_2} = 1 - \varkappa^2 = \sigma \text{ (Streuungskoeffizient)}$$

$$C = \frac{1}{\nu^2\,\omega^2\,\sigma\,L_2} \quad \text{und} \quad \omega = \frac{1}{\nu\sqrt{\sigma\,L_2\,C}}\,.$$

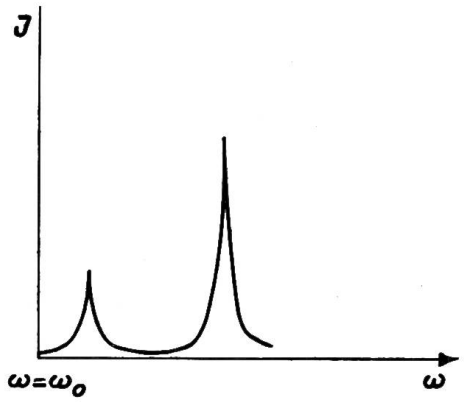

Fig. 5

Reguliert man die Frequenz von unten beginnend, so treten zuerst die höheren Harmonischen in Resonanz. Die Stromkurve J_2 wird in Funktion der Frequenz eine Anzahl relativer Maxima aufweisen, etwa nach Fig. 5.

Das Verfahren von Joye und Besson muss also unbedingt durch eine Analyse der Kurven ergänzt werden, da man sonst nicht weiss, ob es sich um die Resonanz der Grundharmonischen handelt, oder ob eine höhere das beobachtete Strommaximum bedingt hat. Es ist anzunehmen, dass allgemein letzteres der Fall sein wird. Welchen Fehler man begeht, wenn obiges nicht beachtet wird, geht aus der Formel für die Kapazität $C = \frac{1}{\nu^2\,\omega^2\,\sigma\,L_2}$ hervor.

Es sei noch hier auf das Oszillogramm Fig. 6 hingewiesen, in welchem die Strom- und Spannungskurve bei Belastung des Generators auf den Hochspannungstransformator wiedergegeben ist, wobei eine Drosselspule parallel zur Primärwicklung

[1]) Bulletin 1921, Heft 2, S. 38, 39.

des Transformators geschaltet war. Es ist aber zu bemerken, dass auch der Transformator allein bei schwacher Sättigung ähnliche Deformationen in der Kurvenform hervorruft. Aus Fig. 6 ist die Wirkung der Kapazität des Transformators am besten ersichtlich, indem eben durch die Kapazität in der Stromkurve i alle möglichen höheren Harmonischen ausgelöst wurden. Dass man bei solchen Kurvenformen durch Messung der Effektivwerte allein zu ganz falschen Resultaten kommen kann, liegt auf der Hand.

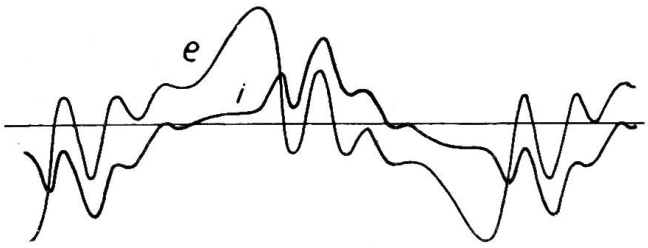

Fig. 6

2. Eine Näherungsmethode zur Bestimmung der Eigenkapazität von Transformatoren unter Berücksichtigung der Kurvenform.

Schon aus dem Gesagten geht hervor, dass man im Oszillographen ein Mittel besitzt Anhaltspunkte zur Bestimmung der Eigenkapazität und zur Klärung der aus dieser resultierenden Erscheinungen zu gewinnen. Es sind vom zu untersuchenden Transformator im Leerlauf die primäre Spannungskurve und die sekundäre Stromkurve aufzunehmen. Zur Aufnahme der Stromkurve ist die Schleife des Oszillographen in die Verbindung beider Spulenschenkel der Hochspannungswicklung zu legen. Ist der Strom nicht grösser als 10 mA, so wird man direkt messen. Mit einer für Strommessung geeichten Schleife kann der Strom in der Hochspannungswicklung zugleich auch gemessen werden. Die beiden aufgenommenen Kurven werden einer Analyse unterzogen, was bei Verwendung eines geeigneten Verfahrens mit nicht allzugrossem Zeitaufwand geschehen kann. Man benötigt für die Rechnung zunächst nur die Grundharmonischen, bestimmt aber zur Kontrolle auch die dritten Harmonischen.

Und nun die auszuführende Rechnung. Wir bedienen uns der Formeln, die im Aufsatze von Joye und Besson angeführt sind. Die Ableitung und Verifikation dieser Formeln kann leicht anhand meiner Arbeit: „Eine neue Methode zur Herleitung der Transformatorendiagramme“,[1]) vorgenommen werden. Die Rechnung ist dort für Sinusform der aufgedrückten Spannung durchgeführt. Es ist aber klar, dass man bei der verzerrten Kurvenform vermöge der Beziehungen

$$e_1 = \sum_{\nu=1}^{\nu=\nu} E_{1\nu} \sin(\nu\,\omega\,t + \varphi_\nu) \text{ und}$$

$$i = i_1 + i_3 + i_5 + i_7 + \ldots \quad \text{(für beide Ströme)}$$

zu gleichen Ausdrücken kommt, mit dem Unterschied allerdings, dass für die Frequenz jeweilen der ν-fache Wert zu setzen ist. Für die ν-te Harmonische des Sekundärstromes erhalten wir

$$J_{2\nu} = \frac{E_{1\nu}\,M}{L_1\sqrt{\varrho_2^{\,2} + \lambda_{2\nu}^{\,2}\,\nu^2\,\omega^2}} \tag{1}$$

wo

$$\varrho_2 = R_2 + R_1\frac{M^2}{L_1^{\,2}}$$

$$\lambda_{2\nu} = L_2 - \frac{1}{C\,\nu^2\,\omega^2} - \frac{M^2}{L_1} \tag{2}$$

Sind die Konstanten des Transformators R_1 und R_2; L_1 L_2 und M (letztere sind von der Sättigung abhängig) bekannt, so kann man aus der Gleichung (1) für $\nu = 1$ λ_{21} bestimmen und aus der Beziehung (2) den unbekannten Wert der substituierten Kapazität C berechnen. Sind ferner aus der Kurvenanalyse die Scheitelwerte der

[1]) Bulletin 1920, Heft 1.

dritten Harmonischen bekannt, so kann man mittels folgender beiden Gleichungen für die dritte Harmonische

$$J_{23} = \frac{E_{13}\, M}{L_1 \sqrt{\varrho_2{}^2 + 9\, \lambda_{23}{}^2\, \omega^2}} \quad \text{und} \quad \lambda_{23} = L_2 - \frac{1}{9\, C\, \omega^2} - \frac{M^2}{L_1}$$

den obigen Wert C kontrollieren.

Wie aus der oben angeführten Reihe zu Fig. 4 für den Primärstrom hervorgeht, betragen die Scheitelwerte der dritten und fünften Harmonischen ca. 20 resp. 10% des Scheitelwertes der Grundharmonischen, ein Verhalten, das für die Rechnung sehr günstig ist. Ist die Grösse der Eigenkapazität nach obigem Verfahren bestimmt, so kann man die Resonanzfrequenzen zum voraus berechnen. Die Bestätigung durch den Versuch liefert auch ein Kriterium für die Richtigkeit und Zulässigkeit der dem ganzen Verfahren zugrundegelegten Annahme, nämlich der Zurückführung der Eigenkapazität auf einen den Sekundärklemmen parallel geschalteten äquivalenten Kondensator von der Kapazität C.

3. Schlussbemerkung.

Die hier entwickelte Methode zur Bestimmung der Eigenkapazität von Transformatoren scheint mir die Resonanzmethode von Joye und Besson vorteilhaft zu ergänzen und zu unterstützen. Die Zuhilfenahme der Kurvenformen eröffnet eine Kontrollmöglichkeit des Verfahrens und lässt unbedingt tiefer blicken in das komplizierte Wesen der Eigenkapazität eines Hochspannungstransformators. Es sei noch bemerkt, dass auf dem Gebiete der Hochspannungsversuche, wo gerade solche Transformatoren Verwendung finden, der Frage ihrer Eigenkapazität eine nicht zu unterschätzende Bedeutung zukommt.

Berichtigungen

1. zum Aufsatz:

Die kritischen Drehzahlen der Kurbelgetriebe elektrischer Lokomotiven.

Von *A. Wichert,* Mannheim, Bulletin 1921, Seite 42 u. folgende.

Der Autor dieses Aufsatzes ersucht uns mit Schreiben vom 30./31. März folgende Berichtigungen aufzunehmen:

Auf Seite 45, dritte Zeile von unten soll es heissen „Planetenbewegungen" anstatt Planetenberechnungen; in der Fussnote 3 auf derselben Seite „Bezirksverein" anstatt Bergwerksverein; auf Seite 46 zweitletzte Zeile der Besprechung 5 muss es heissen vier – zwei – und einfache Frequenz; ferner ist in der Tabelle Seite 47 die zweite Zeile der Spalte Frequenz: Drehzahl zu ändern in 4–2 (anstatt 4–2–1).

Wir konstatieren auf Wunsch des Verfassers ferner, dass diese Korrekturen uns vor dem Erscheinen der Entgegnung von Prof. Dr. Kummer zugekommen ist, von dessen Inhalt Herr Wichert vor der Drucklegung keine Kenntnis hatte.

Die Redaktion.

2. zum Aufsatz:

Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter.

Bearbeitet von *A. Jobin,* Bulletin No. 7, Juli 1919.

In dem oben genannten Aufsatz ist mir folgender Unachtsamkeitsfehler entgangen, den aufmerksame Leser schon korrigiert haben werden.