

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 26 (1935)

Heft: 19

Artikel: Erwärmung von Oeltransformatoren bei Belastung durch Erdschluss-Spulen

Autor: Salazin, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060334>

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: 17.02.2026

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

100 000 Hertz entsprechen, die Technik gezwungenen haben, zur Fernsehübertragung die kürzesten Wellen zu verwenden, welche noch mit grosser Energie und genügender Qualität der Ausbreitung erzeugt werden können. Die medizinischen Anwendungen beziehen sich auf spezielle Arten von Diathermie und beruhen auf den Eigenschaften vieler hochmolekularer Stoffe, selektive Absorptionsmaxima im Gebiete der kürzesten Radiowellen zu besitzen. Dadurch wird es der Medizin möglich, unter Umständen besonders intensive innere Wärmewirkungen zu erzielen.

Schliesslich kann man die alte, oft gestellte Frage wiederum aufwerfen: Wodurch ist der Übergang von den kürzesten Radiowellen zu den von atomaren und molekularen Strahlern ausgesandten Lichtwellen der Optik ausgezeichnet und worin liegt der wesentliche Unterschied dieser Wellarten? Rubens und von Beyer haben schon 1911 als eine der längsten optischen Wellen die Linie von

0,343 μ Länge des Quecksilbermoleküls nachgewiesen. Das Gebiet dieser Größenordnung ist mit gedämpften elektrischen Wellen auch schon erreicht worden³⁶⁾. Im Betrage der Wellenlänge liegt der Unterschied also nicht. Er beruht vielmehr auf der Grösse des Generators, bzw. des Strahlers. Der Strahlungsmechanismus der Atome und Moleküle unterliegt den Quantengesetzen und zeichnet sich neben grösster Schärfe der beobachtbaren Erscheinungen durch ausgesprochen diskontinuierliche Gesetzmässigkeit aus. Für die Gesetzmässigkeiten der Radiostrahlen gelten aber noch die klassischen Gesetze der Makro-Physik und vor allem die Begriffe kontinuierlicher Uebergänge und Veränderbarkeiten. Mit der Abnahme der Grösse der Radiostrahler um viele Zehner-Potenzen müsste aber der Übergang zur diskontinuierlichen Physik von selbst eintreten. Denn bei jedem Objekt, wenn es nur genügend klein ist, verschwindet der Gültigkeitsbereich der klassischen Physik und beginnt schliesslich die Vorherrschaft der Physik der Quanten.

Erwärmung von Oeltransformatoren bei Belastung durch Erdschluss-Spulen

Von H. Salazin, Berlin.

In den letzten Jahren ist man mehr und mehr dazu übergegangen, Freileitungs- und Kabelnetze mit Löscheinrichtungen für den Erdschlussstrom zu versehen und benutzt in vielen Fällen die Nullpunkte vorhandener Netzentitäten zum Anschluss der Erdschluss-Spulen. Es entsteht hierbei die Frage, wie weit die Transformatoren zum Anschließen der Spulen geeignet sind und mit welcher Spulenleistung sie belastet werden können. Die nachstehenden Ausführungen sollen als Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen dienen. Es werden die Berechnungsgrundlagen für die Stromverteilung und die Erwärmung des Drehstrom-Transformators mit angeschlossener Erdschluss-Spule angegeben; Rechnungsbeispiele und Kurven erläutern diese Grundlagen.

Au cours de ces dernières années, on a de plus en plus muni les réseaux aériens et souterrains de dispositifs d'extinction du courant de court-circuit à la terre, et utilise fréquemment le neutre des transformateurs de réseau pour raccorder les bobines d'extinction. La question se pose ici de savoir jusqu'à quel point les transformateurs se prêtent à l'insertion de bobines d'extinction et avec quelle puissance de bobine on peut les charger. Dans l'article ci-dessous l'auteur essaye de donner une réponse à ces questions. Il expose les notions fondamentales qui servent au calcul de la répartition du courant et de l'échauffement d'un transformateur triphasé couplé avec une bobine d'extinction et complète ces données par des exemples numériques et des graphiques.

Die Wirkungsweise der Erdschluss-Spulen darf als bekannt vorausgesetzt werden¹⁾; auch der Einfluss der verschiedenen Transformatorenschaltungen findet sich in der Literatur behandelt²⁾. Der Vollständigkeit halber mögen jedoch die geeigneten Schaltungen hier Erwähnung finden. Für jeden Drehstromtransformator stellt der Erdschlussstrom eine durch den Nullpunkt tretende zusätzliche Einphasenlast dar, die sich auf die drei Phasen gleichmäßig verteilt; jeder Schenkel führt also ein Drittel des Erdschlussstromes. Ist die Wicklung, an die die Erdschluss-Spule angeschlossen ist, in Stern geschaltet und besitzt der Transformator außerdem eine Dreieck-Wicklung, so fliesst in dieser ein Ausgleichstrom, der so gross ist, dass auf jedem Schenkel des Transformators Gleichgewicht der Ampèrewindungen herrscht. Dieser Fall dürfte in der Praxis meistens in Frage kommen, zumal sich alle Ausführungen des Eisenkerns (Mantel- oder Kerntyp, Dreier- oder Fünfschenkelkern sowie 3 Einphasenkerne) dafür eignen. Die Grenze der anschliessbaren Spu-

lenleistung ist durch die thermische Beanspruchung des Transformators gegeben. Den zweiten Fall stellt der dreischenklige Kerntransformator in Stern-Stern-Schaltung ohne Ausgleichwicklung dar. Hier wirkt der Erdschlussstrom magnetisierend und erzeugt ein Jochfeld, das zu den bekannten Schwierigkeiten der Nullpunktsverlagerung sowie zusätzlicher Verluste im Kasten führt; aus diesen beiden Gründen ist die Spulenleistung wesentlich geringer zu wählen als im ersten Fall. Ferner soll noch an die Verwendung der Zickzackwicklung zum Anschluss von Erdschluss-Spulen erinnert werden. Bei dieser findet bereits innerhalb der Wicklungsteile ein magnetischer Ausgleich der Einphasenlast statt, so dass weitere Wicklungen nicht beeinflusst werden; die Schaltung ist besonders zur Bildung eines künstlichen Nullpunktes geeignet und die so geschalteten Nullpunktstransformatoren werden zuweilen mit den Erdschluss-Spulen in einen gemeinsamen Kasten eingebaut. Im folgenden sollen zunächst die Verhältnisse in einem Transformator mit Stern-Dreieck-Schaltung untersucht werden.

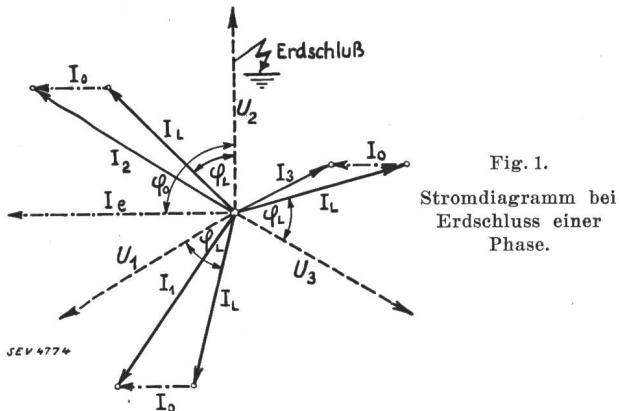
¹⁾ Van Gastel, Bull. SEV 1932, Nr. 7, S. 157; 1934, Nr. 18, S. 491.

²⁾ W. Bollmann, BBC-Nachr., Bd. 21, Nr. 3.

³⁶⁾ A. Glagolewa-Arkadiewa, Zeitschrift für Physik, Bd. 24 (1924), S. 153, Bd. 55 (1929), S. 234.

Im Diagramm Fig. 1 ist dargestellt, wie zu dem normalen Laststrom I_L des Transformators sich auf jedem Schenkel ein Einphasenstrom I_0 addiert, der von dem Erdschlussstrom I_e herröhrt. Wie bereits erwähnt, ist $I_0 = \frac{1}{3} \cdot I_e$. Ist der Phasenwinkel des Laststromes φ_L und der des Erdschlussstromes φ_0 , so lassen sich die drei resultierenden Ströme I_1, I_2, I_3 wie folgt errechnen:

$$\begin{aligned} I_1^2 &= I_L^2 + I_0^2 + 2 \cdot I_L \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi_L - \varphi_0 + 120^\circ) \\ I_2^2 &= I_L^2 + I_0^2 + 2 \cdot I_L \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi_L - \varphi_0) \\ I_3^2 &= I_L^2 + I_0^2 + 2 \cdot I_L \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi_L - \varphi_0 - 120^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$



Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, fliessen in den drei Phasen verschiedene grosse resultierende Ströme und es muss bei gegebenem Phasenwinkel ihr grösster Wert ermittelt werden, um die in einem Schenkel auftretende maximale Erwärmung der Wicklung berechnen zu können. Wenn das cos-Glied den Wert 1 erhält, ist der Grösstwert des resultierenden Stromes gleich der arithmetischen Summe von I_L und I_0 . Bezeichnet man das Verhältnis der Erdschlussleistung zur Drehstromleistung mit n , so stellt, da bei einer Phasenspannung U die Erdschlussleistung $3 \cdot I_0 \cdot U$ und die Drehstromleistung $3 \cdot I_L \cdot U$ ist, n gleichzeitig das Verhältnis der Ströme I_0 zu I_L dar. Für die Erwärmung massgebend ist die bei Erdschluss auftretende Verlusterhöhung v_m ; sie ergibt sich aus den obigen drei Gleichungen, wenn der Phasenwinkel φ_0 des induktiven Spulenstromes mit 90° angenommen wird, zu

$$v_m = 1 + n^2 + x \cdot n \quad (2)$$

Betrachtet man den Verlauf des Faktors x über den Bereich von $\varphi_L = -90^\circ$ bis $\varphi_L = +90^\circ$ (voreilende bzw. nacheilende Belastung des Transformators), so besitzt er folgende Form:

Von $\varphi_L = -90^\circ$ bis $+30^\circ$ ist $x = 2 \cdot \cos(\varphi_L + 30^\circ)$ und von $\varphi_L = +30^\circ$ bis $+90^\circ$ ist $x = 2 \cdot \sin \varphi_L$; v_m bewegt sich also zwischen den Grenzen $1 + n^2 + n$ und $(1+n)^2$. Der Höchstwert tritt bei $\varphi_L = -30^\circ$ und $\varphi_L = +90^\circ$, der Kleinstwert bei $\varphi_L = -90^\circ$ und $\varphi_L = +30^\circ$ auf. Es genügt, bei der Nachrechnung auf zulässige Belastung den Bereich von $\varphi_L = +30^\circ$ bis $+90^\circ$ zu untersuchen, da diese Werte periodisch wiederkehren.

Für die Erwärmung des Oels und des Kastens sind die Gesamtverluste aller drei Schenkel mass-

gebend; durch Addition der drei Gleichungen (1) erhält man

$$I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 = 3 \cdot (I_L^2 + I_0^2),$$

oder, wenn man die Verlusterhöhung v einführt,

$$v = 1 + n^2 \quad (3)$$

Es ergibt sich also die Tatsache, dass die Gesamtverluste vom Phasenwinkel der Last unabhängig sind und dass zu ihrer Ermittlung nur die Einzelverluste bei Erdschluss- bzw. Drehstrombelastung zu addieren sind. Als Ueberschlagswerte dürfen daher die bei Stern-Dreieck-Schaltung ermittelten zulässigen Belastungen ohne weiteres auf Stern-Stern-Schaltung mit Ausgleichwicklung übertragen werden, da es auf die Gesamtverluste etwa gleich viel ausmacht, ob der Ausgleichstrom den Laststrom in der Dreieckwicklung überlagert oder ob er in einer besonderen, genügend gross bemessenen Ausgleichwicklung fliesst.

Bei den bisherigen Ueberlegungen wurde angenommen, dass der Transformator mit seiner Nennleistung belastet ist. Häufig ist er niedriger belastet, und es soll das Verhältnis der Teillast zur Nennlast mit p bezeichnet werden. Für diesen Fall lassen sich die Formeln (2) und (3) unter Einführung von p wie folgt erweitern. Es wird

$$v_m = p^2 + n^2 + x \cdot p \cdot n \quad (2a)$$

$$v = p^2 + n^2 \quad (3a)$$

Für die Berechnung der Temperaturen werden die von dem Verfasser in seinem Aufsatz «Ueberlastung von Oeltransformatoren mit Selbstkühlung»³⁾ angegebenen Formeln benutzt. Es sei noch einmal besonders darauf hingewiesen, dass bei Selbstkühlung (natürlicher Konvektion) die Temperaturen mit der 0,8ten Potenz der Verluste zunehmen. Es wird bezeichnet mit

ϑ_m die maximale Oelübertemperatur über dem Kühlmittel,
 ϑ die mittlere Oelübertemperatur über dem Kühlmittel,
 d der Temperatursprung zwischen Wicklung und Oel,
 ϑ_w die Wicklungsübertemperatur über dem Kühlmittel.

Dabei ist ϑ_m etwa gleich $1,2 \cdot \vartheta$ und $\vartheta_w = \vartheta + d$. Die stationären Temperaturen erhalten für den Anfangszustand den Index a , für den Endzustand den Index e und für den Betrieb mit Nennlast den Index 1 . Die Wicklungsübertemperatur des maximal belasteten Schenkels über Oel ist bei zusätzlichen Erdschlussbetrieb

$$d_e = d_1 \cdot v_m^{0,8} \quad (4)$$

Bei den für den Erdschlussbetrieb üblichen Zeiten von etwa $\frac{1}{2}$ Stunde aufwärts kann die Endtemperatur der Wicklung als erreicht angenommen werden. Bei der Berechnung der Oeltemperaturen muss der konstante Anteil der Eisenverluste berücksichtigt werden; bezeichnet man die Anteile der Eisen- bzw. Wicklungsverluste an den Gesamtverlusten bei Nennbetrieb mit w_0 und w_1 , so erhält man als Enderwärmung des Oels:

³⁾ ETZ 1930, H. 38, S. 1317.

$$\vartheta_e = \vartheta_1 \cdot (v \cdot w_1 + w_0)^{0,8} \quad (5)$$

bei zusätzlicher Erdschlussbelastung. Die Anfangstemperatur des Oels beträgt bei einer beliebigen Teilbelastung p :

$$\vartheta_a = \vartheta_1 \cdot (p^2 \cdot w_1 + w_0)^{0,8} \quad (6)$$

Die angegebenen Formeln (4) bis (6) gelten für den selbstgekühlten Transformator; bei künstlicher Kühlung ist dagegen nicht die 0,8te, sondern die erste Potenz einzusetzen.

Für den Fall, dass die Enderwärmung des Oels noch nicht erreicht ist, beträgt die Temperatur ϑ nach der Zeit t

$$\vartheta = \vartheta_a + (\vartheta_e - \vartheta_a) \cdot (1 - e^{-t/T}) \quad (7)$$

Hierbei ist T die Zeitkonstante des Transfornators.

Die angegebenen Formeln mögen nun durch einige Beispiele erläutert werden. Es werde ein Transformator in Stern-Dreieck-Schaltung zugrundegelegt, dessen Daten etwa einem Mittelwert gebräuchlicher Typen entsprechen. Die Verlustaufteilung sei $w_0 = 0,3$ und $w_1 = 0,7$, die Zeitkonstante $T = 3$ Stunden. Die Temperaturen sollen den Vorschriften des SEV entsprechen, also $\vartheta_{m1} = 50^\circ$ und $\vartheta_{w1} = 60^\circ$. Die mittlere Oelübertemperatur wird dann $50^\circ : 1,2$, also etwa 42° sein, die Differenz zwischen ϑ_{w1} und ϑ_1 $d_1 = 18^\circ$. Selbstverständlich würde bei Einhaltung der Erwärmungsvorschriften der voll belastete Transformator keine zusätzliche Erdschlussleistung mehr aufnehmen können; diese muss daher als Ueberlastung betrachtet werden. Es sollen für den Erdschlussfall beispielsweise diejenigen Erwärmungen zugelassen werden, die in den deutschen Vorschriften (RET/1930) für den landwirtschaftlichen Betrieb angegeben sind, d. h. $\vartheta_{m1} = 70^\circ$ und $\vartheta_{w1} = 80^\circ$. Da jedoch die Raumtemperatur beider Vorschriften um 5° differiert — sie beträgt nach den Normen des SEV 40° und nach den RET/1930 35° —, kann nicht die ganze Spanne von 60° bis 80° Wicklungserwärmung, d. h. 20° für den Erdschlussbetrieb in Anspruch genommen werden, sondern nur 15° . Gegen die Zulassung dieser höheren Temperatur dürften angesichts des im Vergleich zum normalen Betrieb seltener eintretenden Erdschlussfalls keine Bedenken vorliegen, zumal die höchste Belastung ja meist nur in einem Schenkel auftritt, während sie in den beiden andern Schenkeln geringer ist.

Es sollen nun einige angenommene Ueberlastungen bezüglich der auftretenden Temperaturen nachgerechnet werden. Zunächst sollen sie bei einer dauernden Erdschlussbelastung von 40 % der Transformator-Nennleistung bei Vollast und $\cos \varphi_L = 1$ ermittelt werden. Man berechnet die Oelwärzung nach Gl. (3) und (5) unter Zugrundelegung der Werte: $n = 0,4$, $\vartheta_1 = 42^\circ$, $d_1 = 18^\circ$, $w_1 = 0,7$, $w_0 = 0,3$ und erhält:

$$v = 1 + 0,4^2 = 1,16; \\ \vartheta_e = 42 \cdot (1,16 \cdot 0,7 + 0,3)^{0,8} = 45,8^\circ.$$

Die maximale Oelübertemperatur ist $\vartheta_m = 1,2 \cdot \vartheta_e = 55^\circ$; sie liegt bei allen diesen Rechnungen unter-

halb der für die Ueberlastung zugelassenen Grenze, da die Wicklungserwärmung die massgebende Rolle spielt. Für die Wicklungserwärmung ist zunächst die Verlusterhöhung nach Gl. (2) zu bestimmen; es ist

$$x = 2 \cdot \cos (\varphi_L + 30^\circ) = \sqrt{3} \text{ und} \\ v_m = 1 + 0,4^2 + 0,4 \cdot \sqrt{3} = 1,852.$$

Ferner wird nach Gl. (4) $d_e = 18 \cdot 1,852^{0,8} = 29,4^\circ$. Die Wicklungsübertemperatur wird $\vartheta_w = \vartheta_e + d_e = 75,2^\circ$.

Weiter soll die thermische Nachrechnung erfolgen für einstündigen Erdschlussbetrieb mit $n = 0,55$ bei nacheilendem $\cos \varphi_L = 0,8$ der Drehstromvollast. Die Oelwärzung berechnet sich wie oben und nach Gl. (7). Es ist $v = 1 + 0,55^2 = 1,303$; $\vartheta_e = 42 \cdot (1,303 \cdot 0,7 + 0,3)^{0,8} = 49,1^\circ$ und $\vartheta = 42 + 7,1 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{3}})$, wobei die Zeit $t = 1$ und die Zeitkonstante $T = 3$ in Stunden eingesetzt sind. Die Funktion $f = 1 - e^{-t/T}$ legt man für Erwärmungsrechnungen zweckmäßig in Tabellen- oder Kurvenform fest. Für $t/T = \frac{1}{3}$ ist $f = 0,285$ und es wird $\vartheta = 44^\circ$. Die Wicklungserwärmung wird:

$$x = 2 \cdot \sin \varphi_L = 1,2; \\ v_m = 1 + 0,55^2 + 0,55 \cdot 1,2 = 1,963; \\ d_e = 18 \cdot 1,963^{0,8} = 30,9^\circ; \\ \vartheta_w = 44^\circ + 30,9^\circ = 74,9^\circ.$$

Wenn der Transformator nur mit $\frac{3}{4}$ -Last betrieben wird, soll bei einer zweistündigen Erdschlussleistung von $n = 0,8$ die grösstmögliche Erwärmung ermittelt werden. Für die Belastung $p = 0,75$ ist nach Gl. (3a) $v = 0,75^2 + 0,8^2 = 1,202$, ferner nach Gl. (6) $\vartheta_a = 42 \cdot (0,75^2 \cdot 0,7 + 0,3)^{0,8} = 31,3^\circ$ und nach Gl. (5) $\vartheta_e = 42 \cdot (1,202 \cdot 0,7 + 0,3)^{0,8} = 46,7^\circ$. Für $t/T = 2/3$ wird $f = 0,49$ und demnach $\vartheta = 31,3 +$

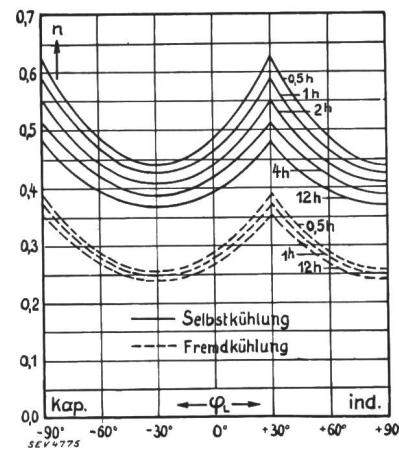


Fig. 2.
Zulässige Erdschlussleistung als Funktion des Phasenwinkels der Drehstrombelastung eines normalen Transformators.

$(46,7 - 31,3) \cdot 0,49 = 38,8^\circ$. Die höchste Beanspruchung der Wicklung tritt bei $\varphi_L = -30^\circ$ bzw. $+90^\circ$ auf, d. h. bei $\cos \varphi_L = 0,866$ vor-, bzw. $\cos \varphi_L = 0$ nacheilend. Hierfür ist nach Gl. (2a) $v_m = (0,75 + 0,8)^2 = 2,4$; $d_e = 18 \cdot 2,4^{0,8} = 36,2^\circ$;

$$\vartheta_w = 38,8^\circ + 36,2^\circ = 75,0^\circ.$$

Zu den angegebenen Beispielen für den selbstgekühlten Transformator möge schliesslich noch eine Nachrechnung für Fremdkühlung erfolgen. Es sei hierbei $\vartheta_1 = 35^\circ$, $d_1 = 25^\circ$ und $T = 1$ Stunde; die Verlustaufteilung bleibe die gleiche. Ein einstündiger Erdchlussbelastung von $n = 0,34$ werde bei Vollast, $\cos \varphi_L = 0,8$ (ind.) vorgesehen. Es wird im Oel:

$$\begin{aligned}v &= 1 + 0,34^2 = 1,116; \\ \vartheta_e &= 35 \cdot (1,116 \cdot 0,7 + 0,3) = 37,8^\circ; \\ \text{für } t/T &= 1, f = 0,63; \\ \vartheta &= 35 + 2,8 \cdot 0,63 = 36,8^\circ.\end{aligned}$$

In der Wicklung:

$$\begin{aligned}x &= 1,2; \quad v_m = 1 + 0,34^2 + 1,2 \cdot 0,34 = 1,524; \\ d_e &= 25 \cdot 1,524 = 38,1^\circ; \quad \vartheta_w = 36,8^\circ + 38,1^\circ = 74,9^\circ.\end{aligned}$$

Sämtliche Beispiele entsprechen also der zugrundegelegten Erhöhung der Uebertemperatur um

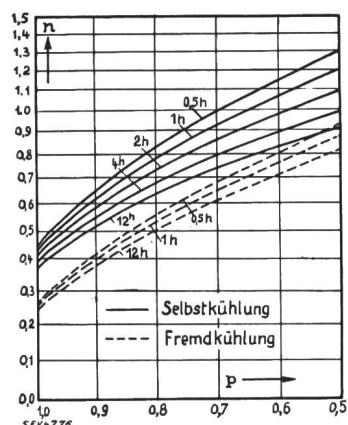


Fig. 3.
Zulässige Erdschlussleistung als Funktion der Drehstrombelastung eines normalen Transformatoren.

maximal 15° , d. h. auf 75° in der Wicklung. In Fig. 2 sind die in gleicher Weise ermittelten Grenzwerte für n als Funktion des Phasenwinkels der Drehstrom-Vollast dargestellt, und zwar unter Annahme der bereits genannten Mittelwerte für normale Transformatoren. Die Stundenziffern geben jeweils die zulässige Dauer der Erdchlussbelastung an.

Die Abhängigkeit von der Belastung des Transformatoren ersieht man aus Fig. 3, hier ist n als Funktion der Drehstrombelastung bei dem für die Erwärmung ungünstigsten Phasenwinkel dargestellt. Die Kurven für Fremdkühlung gelten für den Fall, dass die Kühlanlage bei allen Belastungen gleichmäßig arbeitet; diese Annahme trifft allerdings in der Praxis nicht immer zu. Wird der Transformator bei Vollast mit Fremdkühlung, bei Teillasten aber selbstkühlend betrieben, so ist für jede der beiden Kühlungsarten die Berechnung entsprechend durchzuführen.

Der eingangs erwähnte dreischenklige Transformator mit Stern-Stern-Schaltung ohne Ausgleichwicklung ist bei der Belastung durch eine Erdschlußspule wegen des auftretenden Jochfeldes einer einfachen Berechnung weniger zugänglich;

zum mindesten müssen eine Anzahl Konstruktionsdaten bekannt sein. Es soll daher die Erwärmungsfrage nur als grobe Näherungsrechnung behandelt werden. Die Größenordnung der zulässigen Erdschlussbelastung liegt bei etwa 10 %, bei Anordnung von Stirnbändern bis 15 %, hierbei spielen die durch I_0 verursachten Verluste gegenüber den durch das Jochfeld hervorgerufenen Kastenverlusten für die Oelerwärmung keine Rolle; für die Wicklungs erwärmung müssen sie dagegen berücksichtigt werden. Die Berechnung der Zusatzverluste nach Richter⁴⁾ ergab beispielsweise für einen 250 kVA-Transformator bei $n = 0,1$ Kastenverluste von 10 % der Normalverluste bei Drehstrombetrieb; für einen 2500 kVA-Transformator ergaben sich etwa 30 %. Aus einer einfachen Ueberlegung folgt, dass diese relativen Verluste mit der Quadratwurzel aus der Leistung zunehmen. Berücksichtigt man die Verschlechterung der Konvektion durch eine den Verlusten proportionale Zunahme der Oeltemperatur, so erhält man bei 250 kVA: $\vartheta_e = 42 \cdot 1,1 = 46^\circ$ bzw. bei 2500 kVA: $\vartheta_e = 42 \cdot 1,3 = 54,5^\circ$. Für die Wicklung wird der ungünstigste Phasenwinkel φ_L zugrundegelegt, es wird also $d_e = 18 \cdot 1,1^{1,6} = 21^\circ$. Die Wicklungsüber temperatur beträgt demnach bei 250 kVA: $\vartheta_w = 46^\circ + 21^\circ = 67^\circ$ und bei 2500 kVA: $\vartheta_w = 54,5^\circ + 21^\circ = 75,5^\circ$. Diese kurze Ueberlegung zeigt, wie bei wachsender Transformatorengrösse die zulässige Erdschlussbelastung sehr vorsichtig abgeschätzt werden muss; allerdings wird bei Grosstransformatoren meistens eine Dreieck-Wicklung vorhanden sein. Bekanntlich ist außer der thermischen Nachrechnung noch die Verlagerung des Nullpunktes durch die Jochreaktanz für die mögliche Leistung der Erdschlußspule massgebend.

Bei Anschluss einer Löschspule an eine in Zickzack geschaltete Wicklung sind, falls der Transformator ausserdem noch zur Leistungsübertragung verwandt wird, hinsichtlich der Erwärmung die gleichen Formeln anzuwenden wie bei der Stern-Dreieck-Schaltung, jedoch ist zu beachten, dass der Verlustzuwachs v für die Oelerwärmung nur von der Zickzack-Wicklung herführt, da ja kein Ausgleichstrom fliesst. Diese Berechnung kommt hauptsächlich für die Auslegung von Nullpunktstransformatoren in Frage, die eine besondere Wicklung zur Leistungsabgabe für örtliche Zwecke besitzen.

Berichtigung zum Artikel Ueber Strommessung mit Braunschen Kathodenstrahlröhren. Von W. Holzer, Wien. (Bull. SEV 1935, Nr. 12, S. 322.)

Auf Seite 323 muss die zweite Formel richtig heiessen:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{300 \cdot m}} = 0,6 \cdot 10^8 \sqrt{U} \text{ cm/s.}$$

⁴⁾ R. Richter, Elektr. Maschinen, Bd. III, S. 34.