Trockentransformatoren mit Kunstharzisolation

Autor(en): **Friedrich, M. / Tripod, J. / Faltermeier, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 11

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904975

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Trockentransformatoren mit Kunstharzisolation

M. Friedrich, J. Tripod, F. Faltermeier

621.314.213.5::678;

In den letzten Jahren hat der feststoffisolierte Trockentransformator, nicht zuletzt infolge der verbesserten Kunstharztechnologie, in Verteilnetzen eine steigende Bedeutung erfahren. In der Folge werden bestehende Grundkonzeptionen der Trockentransformatoren betrachtet. Das charakteristische thermische Verhalten wird mit dem des Öltransformators verglichen. Die für die Qualitätssicherung erforderlichen Prüfungen werden erwähnt. Der Aufsatz schliesst mit einem Hinweis auf wichtige Normen und Vorschriften, welche sich auf diese Apparate beziehen.

Depuis quelques années, le transformateur sec à isolation en matière solide a pris de l'importance pour les réseaux de distribution, notamment grâce à une technologie améliorée des résines synthétiques. Les conceptions fondamentales de ces transformateurs sont décrites, leur comportement thermique caractéristique est comparé à celui des transformateurs à huile et les essais d'assurance de la qualité sont mentionnés. Pour terminer, on indique les principales normes et prescriptions se rapportant à ce nouveau genre de transformateurs.

1. Entwicklung

Ursprünglich wurden die mit lack- oder papierisolierten Drähten gewickelten, zylindrisch oder scheibenförmig gestalteten Spulen meist in Isolierlack getränkt. Die Isolation zwischen der Hoch- und der Niederspannungswicklung bestand aus einem luftgefüllten Zwischenraum, welcher gleichzeitig die Funktion eines Kühlkanals besass. Diese Luftstrecke war eventuell durch Barrieren unterteilt. Die Hochspannungswicklung wurde grundsätzlich radial aussen angeordnet. Die erforderliche elektrische Festigkeit der Hochspannungswicklung gegen den Eisenkern erreichte man durch die Wahl einer entsprechenden Distanz zwischen der Stirnseite der Hochspannungswicklung und dem Kern. Diese Distanzierung wurde zur Erhöhung der elektrischen Festigkeit üblicherweise durch eingeschobene Schirme unterbrochen. Solche Transformatoren waren sehr empfindlich gegen Feuchtigkeit und Verstaubung, und sie waren brennbar. Das Stehvermögen gegen Kurzschlussbeanspruchungen war gering. Elektrische Stossbeanspruchungen gefährdeten die Wicklungen in hohem Masse. Aus allen diesen Gründen wurden solche Transformatoren im Netzbetrieb nur ausnahmsweise für niedrige Betriebsspannungen (z.B. 6 kV) an nicht exponierten Stellen verwendet.

Eine Verbesserung der elektrischen Spannungsfestigkeit der Hochspannungswicklung ergab sich durch die Einführung eines mit Kondensatorenbelägen gesteuerten Zylinders zwischen den beiden Wicklungen. Dabei wurden die Spulen der Hochspannungswicklung an Beläge dieses Zylinders angeschlossen (Fig. 1). Hinsichtlich der anderen Nachteile änderte diese Einführung freilich nichts. Ein Fortschritt erfolgte erst, nachdem man sich entschloss, die Hochspannungswicklung mit Kunstharz zu imprägnieren bzw. einzugiessen. Die Imprägnierung oder ein Umguss mit Kunstharz wurde, vorwiegend aus Gründen der mechanischen Festigkeit, meist auch für die Niederspannungswicklung vorgenommen.

Gestützt auf die Erfahrungen mit der schon 1947 begonnenen Herstellung von kunstharzisolierten Wandlern konnten seit 1954 teilvergossene Leistungstransformatoren geliefert werden. 195[illegible] folgten dann die ersten Apparate mit vollvergossener Hochspannungswicklung und Endbelag auf der Innenseite des Harzkörpers.

2. Konzeptionen

Bei den Grundkonzeptionen der im Handel befindlichen kunstharzisolierten Apparate kann man folgende drei Arten unterscheiden:

a) Die Hochspannungswicklung ist mit Kunstharz imprägniert oder in Kunstharz eingegossen, ebenso die Niederspannungswicklung. Der eigentliche Träger der elektrischen Beanspruchung, zwischen der Hochspannungs- und der Niederspannungswicklung und zwischen der Hochspannungswicklung und dem Eisenkern ist Luft. Figur 2a zeigt das Prinzip der Anordnung und den Verlauf der Niveaulinien des elektrischen Potentials im Betrieb oder bei der induzierten Spannungsprüfung. Infolge der geringen elektrischen Festigkeit der Luft ist es erforderlich, die Distanz zwischen den Wicklungen und gegen den Eisenkern entsprechend gross zu wählen. Dadurch ergibt sich vorteilhaft ein breiter, sehr wirksamer Kühlkanal. Gleichzeitig erhält man durch den grossen Abstand der Hochspannungswicklung von der an Erdpotential liegenden Niederspannungswicklung eine sehr günstige Spannungsverteilung bei elektrischer Stossbeanspruchung, also eine sehr gute elektrische Stoßspannungsfestigkeit der Hochspannungswicklung. Die deshalb mögliche Unterteilung der Wicklung in mehrere schmale Spulen erlaubt in den meisten Fällen die Ausführung als Bandwicklung. Die Harzdicken um die Hochspannungswicklung können klein gehalten werden, da sie nur eine untergeordnete elektrische Festigkeitsfunktion erfüllen müssen. Damit ergibt sich eine gute Wärmeabfuhr für die Wicklung. Da durch den Kunstharzumguss der Spulen infolge der hohen Dielektrizitätskonstanten die konzentrierte elektrische Spannungsbeanspruchung am Rand der Wicklung stark gemildert wird und der Spannungsabbau allgemein in die um-

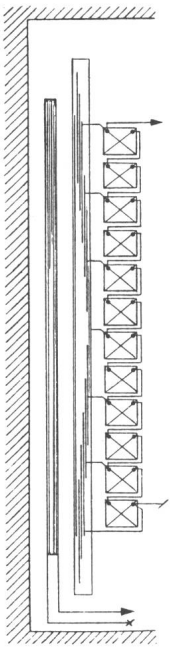

Fig. 1 Prinzip der Ausführung mit Luftisolation und gesteuertem Zylinder

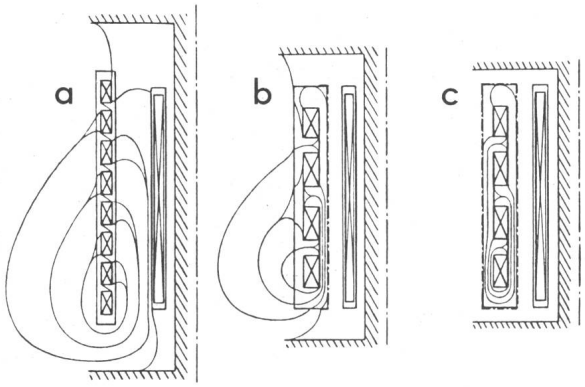

Fig. 2 Grundkonzeptionen kunstharzisolierter Transformatoren
a Kühlkanal elektrisch belastet
b Kühlkanal elektrisch unbelastet
c Harzkörper der Hochspannungswicklung mit einem geerdeten Belag umschlossen

gebende Luft verlagert ist, neigen Poren im Umguss kaum zur Ionisation. Die für den Teilentladungsverlauf bestehenden Abnahmeforderungen lassen sich daher mit dieser Konzeption erleichtert erfüllen.

Mit steigenden Betriebsspannungen wächst das Isolationsproblem stark an, da die Hauptbeanspruchung an den dielektrisch schwachen Luftstrecken liegt und die erforderlichen Luftdistanzen stärker als linear proportional mit der Spannung wachsen. Der sich ergebende grosse Streuspalt führt zu einer grossen Kurzschlußspannung. Dieser Umstand muss durch eine Vergrösserung des Eisenquerschnittes oder durch eine Verlängerung der Spulenhöhe in axialer Richtung ausgeglichen werden. Für manche Anwendungszwecke mag der elektrisch stark beanspruchte Kühlkanal ein gewisses Unbehagen bewirken, da sich bei Verstaubungen eventuell kurze Reinigungszündungen im Luftdielektrikum ergeben können.

b) Bei der Konzeption nach Figur 2b und 3 ist der Luftkanal zwischen den Wicklungen elektrisch unbelastet. Die Niederspannungswicklung ist so weit an die Hochspannungswicklung herangerückt, wie es die Erfordernisse der Kühlung erlauben. Der Harzkörper der Hochspannungswicklung trägt einen elektrisch leitenden Belag, welcher an Erdpotential gelegt ist. Der Abbau der Spannung der Hochspannungswicklung in Richtung Niederspannungswicklung erfolgt nur in der Harzschicht zwischen der Hochspannungswicklung und dem geerdeten Belag. Figur 3 zeigt den Verlauf der Niveaulinien im Betrieb und bei induzierter Prüfspannung. Bei wirtschaftlicher Auslegung sind die Beanspruchungen im und am Harzkörper sehr stark. Ferner bewirkt die geringe mit Harz gefüllte Distanzierung der Hochspannungswicklung vom geerdeten Belag bei sonst gleicher Wicklungsauslegung wie in Figur 2a eine Verschlechterung bei der Verteilung der elektrischen Stoßspannung. Diesem Umstand muss dadurch begegnet werden, dass man relativ wenige Spulen mit grosser Wickelbreite ausführt; damit erhöht sich die Seriekapazität der Wicklung. Die Verbreiterung der Spulen bedingt jedoch eine Erhöhung der Lagenspannung, die beachtet werden muss, wenn die Wicklung nicht aus Band hergestellt werden kann. An sich ungefährliche Poren in der stark beanspruchten Harzpartie neigen zur Ionisation und verschandeln eventuell das äussere Gesamtbild des Ionisationsverlaufes des Transformators. Die gegenüber der Konzeption nach Figur 2a relativ starken Harzschichten erschweren trotz der guten Wärmeleitfähigkeit des Harzes (etwa 0,6 W/m · °C) die Abfuhr der Verlustwärme aus den Hochspannungsspulen. Um die Erwärmung in zulässigen Grenzen zu halten, muss die Stromdichte in der Wicklung entsprechend nieder gehalten werden. Transformatoren dieser Bauart weisen demnach geringere Kupferverluste auf als die nach a) konzipierten Apparate.

Die Erfüllung des Wunsches nach einem wirklich feststoffisolierten Transformator, der infolge der Entlastung der elektrisch schwachen Luft um eine Sicherheitsstufe höher liegt, bringt also einige Probleme mit sich, die jedoch sicher beherrscht werden können.

c) Der Trend im Anlagen- und Apparatebau nach platz- und raumsparenden Ausführungen ist auch bei der Entwicklung im Transformatorenbau fühlbar. Die Wünsche von Kunden nach derartigen Ausführungen sind im Zunehmen. In konsequenter Weiterentwicklung der unter b) beschriebenen Konzeption wird der leitende Belag auf der ganzen Oberfläche des Harzkörpers, der die Hochspannungswicklung einschliesst, aufgebracht (Fig. 2c). Wie bei der Ausführung unter b) ist die Niederspannungswicklung so weit an die Hochspannungswicklung gerückt, als es die Kühlungsverhältnisse erlauben. Das gleiche gilt in axialer Richtung zwischen dem Harzkörper und dem Eisenkern. Die die Wicklung umgebenden Harzschichten werden überall stark beansprucht. Die Zuführung der Hochspannung zur Wicklung im Harzkörper erfolgt über Anschlusskabel und Stecker, welche aussen einen geerdeten Mantel besitzen (Fig. 4). In der Abbildung ist der prinzipielle Verlauf der Niveaulinien der elektrischen Spannung eingezeichnet. Figur 5 stellt einen Transformator für Tunnelbaumaschinen dar. Auch bei komplizierteren Harzkörpern lassen sich die bei Vollverguss mit totaler Leitbelagumhüllung auftretenden Probleme bewältigen.

3. Schaltungsdetails

Wie bei Öltransformatoren kann die Hochspannungswicklung in Stern- oder in Dreieckschaltung ausgeführt werden. Bei Dreieckschaltung können die Dreieckverbindungen blank oder platzsparend vergossen sein.

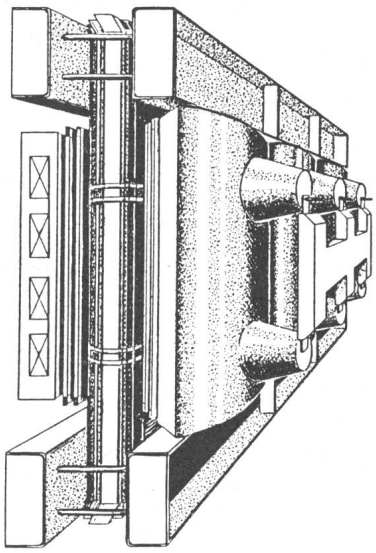

Fig. 3 Transformator mit engem elektrisch unbelastetem Kühlkanal
Konzeption nach Fig. 2b
Hochspannungswicklung im Dreieck

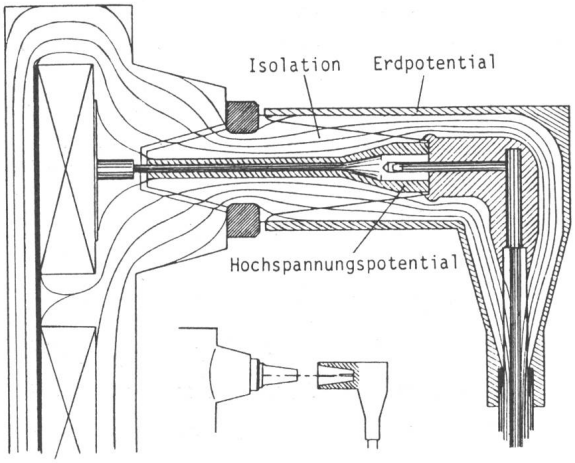

Fig. 4 Anschluss an eine Hochspannungswicklung, deren Harzkörper ganz mit einem geerdeten Belag umschlossen ist (Elastimold-Anschluss)
In der Skizze ist der Verlauf der Niveaulinien der elektrischen Spannung eingetragen

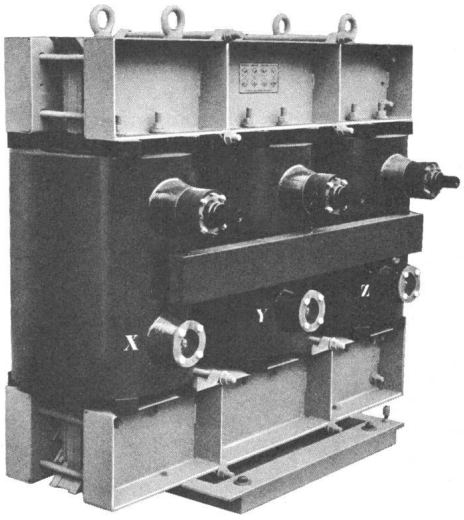

Fig. 5 Transformator für Tunnelbaumaschinen
630 kVA Dauerleistung, U_{max} = 12 kV

Bei Netztransformatoren wird eine gewisse Anpassungsmöglichkeit an die Netzspannung über Anzapfungen gefordert. Figur 6 zeigt ein solches Ausführungsbeispiel. Analog ist auch die Umschaltung in Serie- oder Parallelschaltung der Hochspannungswicklung möglich.

4. Überlastbarkeit

Kunstharzisolierte Transformatoren weisen gegenüber den Öltransformatoren in ihrem thermischen Verhalten wesentliche Unterschiede auf.

Bei den Öltransformatoren werden die Wicklungen allseitig durch Öl gekühlt; es führt die Wärme über die Kesselwand an die Umgebungsluft ab. Die Erwärmung $\Delta\vartheta_{max}$ des heissesten Punktes der Wicklung über die Umgebungsluft setzt sich aus dem Temperaturanstieg $\Delta\vartheta_ö$ von der Luft ins Öl und den Anstieg $\Delta\vartheta_i$ vom Öl bis zum heissesten Punkt der Wicklung zusammen. Dabei ist $\Delta\vartheta_ö$ wesentlich (z.B. viermal) grösser als $\Delta\vartheta_i$ (Fig. 7). Die Kesselwand ist wellenförmig ausgebildet, oder sie besitzt angeschweisste Röhren oder Radiatoren. Daher erfolgt die Wärmeabgabe an die Luft vorwiegend durch Konvektion. Der Temperatursprung Luft–Öl längs der Kesselwand (von unten nach oben) folgt deshalb einer Parabel mit überlagertem konstantem Glied (Einfluss der Strahlung). Da sich die Wicklung in ihrer axialen Ausdehnung nur über einen kleinen Bereich der Kesselwand erstreckt, besitzt die die Wicklung umgebende Ölschicht in sich nur eine geringe Temperaturdifferenz. Das Verhältnis der Erwärmung vom obersten Niveau dieser Schicht zum untersten beträgt etwa 0,9. Diesem Umstand zufolge und auch deshalb, weil der Temperaturanstieg von der Wicklungsoberfläche bis zur heissesten Zone der Wicklung im allgemeinen nur klein ist, ist die Differenz zwischen der Erwärmung des heissesten Punktes der Wicklung und ihrer mittleren Erwärmung relativ gering – in der Grössenordnung von 10 °C.

Während die Erwärmung des Öls über die Luft mit einer sehr grossen Zeitkonstanten $T_ö$ (z.B. 90 min) erfolgt, erwärmt sich die Wicklung über das Öl sehr rasch mit T_i z.B. 5 min. Vernachlässigt man den Einfluss der Eisenverluste auf den Erwärmungverlauf, ergibt sich für den heissesten Punkt der Wicklung in grober Näherung die Beziehung

$$\Delta\vartheta_t = \ddot{u}^2 \left[\Delta\vartheta_ö \left(1 - e^{-t/T_ö}\right) + \Delta\vartheta_i \left(1 - e^{-t/T_i}\right)\right]$$

Diese Formulierung schliesst auch die sehr vereinfachende Annahme ein, dass sich die Zunahme der Kupferverluste und der Wärmeabfuhr bei steigender Erwärmung kompensieren. $\Delta\vartheta_ö$ und $\Delta\vartheta_i$ sind die dem Beharrungszustand bei Dauerbetrieb mit Nennlast entsprechenden Werte. $\ddot{u}$ bedeutet das Vielfache

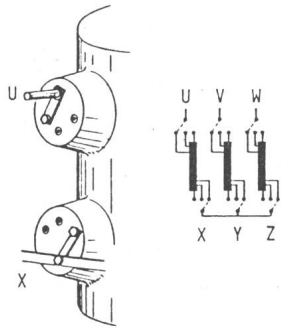

Fig. 6 Harzkörper einer Hochspannungswicklung mit Anzapfungen

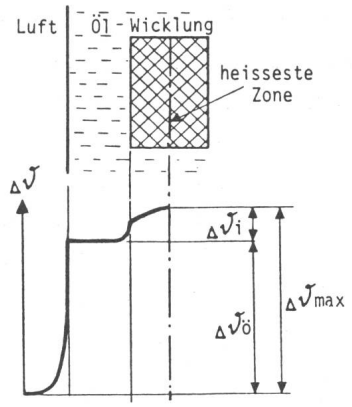

Fig. 7 Wärmegefälle im Öltransformator

der Nennlast, mit welcher der Transformator belastet wird, t die Belastungsdauer in min. Die Formel gilt für Belastung vom kalten Zustand aus. Sie zeigt, dass der Summand $\Delta\vartheta_i$ bei Kurzbelastung entscheidend ist, da sein Exponentialglied wegen kleinem T_i rasch verschwindet.

Von der Hochspannungsspule eines Transformators mit Kunstharzisolation wird die Wärme an der Aussenfläche durch Konvektion und Strahlung abgeführt. Die der Niederspannungswicklung zugewandte Innenseite des Harzkörpers wird nur durch Konvektion gekühlt. Die Erwärmung $\Delta\vartheta_{max}$ des heissesten Punktes der Wicklung über die Umgebungsluft setzt sich aus dem Temperatursprung zwischen Luft und Harzkörperoberfläche, dem Temperaturanstieg von der Harzkörperoberfläche zur Wicklungsoberfläche und der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche der Wicklung und dem heissesten Punkt zusammen (Fig. 8). Der Temperatursprung von der Luft zur Harzkörperoberfläche ist anteilmässig am grössten (z.B. 75 % von $\Delta\vartheta_{max}$). Er folgt im vertikalen Verlauf, analog zum Ölkessel, einer Parabel, der eine Konstante überlagert ist (Einfluss der Strahlung). Die mittlere Oberflächenerwärmung an der Aussenfläche beträgt etwa 83 % von deren maximaler Erwärmung, auf der Innenfläche ungefähr 67 %. Dies und die Tatsache, dass der Temperaturanstieg zwischen der Oberfläche der Wicklung und ihrer heissesten Zone im allgemeinen wesentlich grösser ist als beim Öltransformator, bewirken, dass die Differenz zwischen der maximalen Erwärmung der Wicklung und ihrer mittleren Erwärmung wesentlich grösser ist als beim Öltransformator. Bei der zwischen Hochspannungsspule und Kern liegenden Niederspannungswicklung, deren Wärmeabfuhr nur durch Konvektion erfolgt, wäre der Unterschied noch ausgeprägter. Diese Temperaturdifferenz wird jedoch durch den Temperaturausgleich innerhalb der Wicklung gemildert. Besonders bei Bandwicklungen ist die Differenz durch diesen Umstand erheblich kleiner.

Die Zeitkonstante eines beheizten Körpers ist allgemein durch das Verhältnis

$$T = \frac{\text{Erforderliche Energie, um den Körper um 1 }^0\text{C zu erwärmen}}{\text{Leistungsabgabe an die Umgebung pro }^0\text{C Körpererwärmung}}$$

gegeben (Zeitkonstante). Wegen der Isolation ist der Zähler der Hochspannungswicklung des Trockentransformators grösser als derjenige der Niederspannungswicklung. Da die Wärmeabgabe der Hochspannungswicklung aber durch Konvektion und Strahlung erfolgt, während die Niederspannungswicklung nur durch Konvektion gekühlt ist, liegen die Zeitkonstanten trotzdem in der gleichen Grössenordnung (z.B. 90 min).

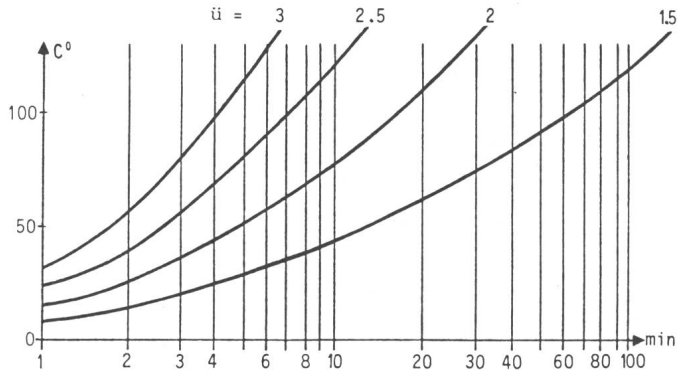

Fig. 9 Erwärmung eines Öltransformators in Funktion der Zeit bei Überlast

Für die Erwärmung des heissesten Punktes der Wicklungen vom kalten Zustand aus ergibt sich in erster Näherung

$$\Delta\vartheta_t = \ddot{u}^2\,\Delta\vartheta_{max}\,(1 - e^{-t/T})$$

$\Delta\vartheta_{max}$ ist die Erwärmung des heissesten Punktes der Wicklung im Beharrungszustand bei Betrieb mit Nennleistung.

Figur 9 zeigt Erwärmungskurven eines Öltransformators. In Figur 10 findet sich eine ähnliche Darstellung für einen Trockentransformator. Im Vergleich der Figuren erkennt man, dass das Verhalten des Trockentransformators bei kurzdauernden Belastungen günstiger ist.

Überlast nach Dauerbetrieb

Unterliegt der Transformator einer Dauerbelastung der ν-fachen Nennleistung, so erreicht die Erwärmung des heissesten Punktes der Wicklung annähernd den Wert

$$\Delta\vartheta_{max\nu} = \nu^2\,\Delta\vartheta_{max} \qquad (\nu < 1)$$

Dabei bedeutet $\Delta\vartheta_{max}$ die Erwärmung des heissesten Punktes bei Dauerbetrieb mit Nennlast. Analog gilt dies bei Überlast um den Faktor $\ddot{u}$.

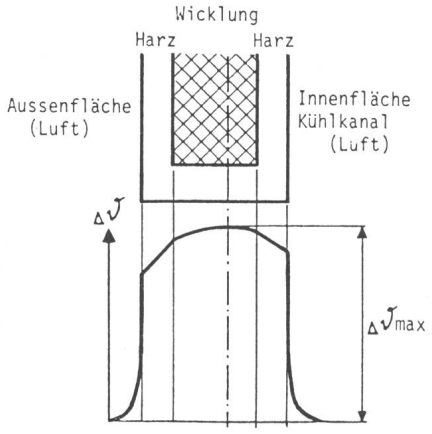

Fig. 8 Temperaturverlauf in einer kunstharzisolierten Wicklung

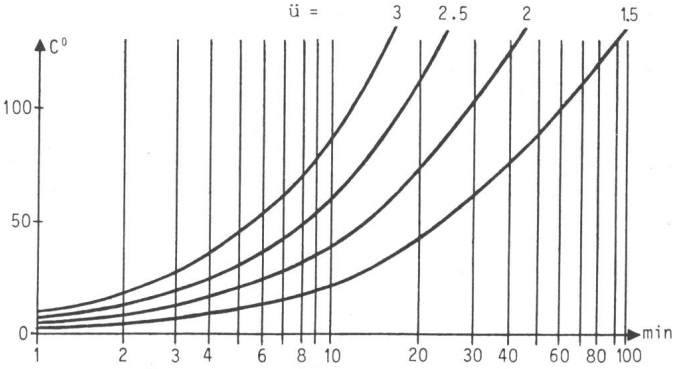

Fig. 10 Erwärmung eines kunstharzisolierten Transformators in Funktion der Zeit bei Überlast

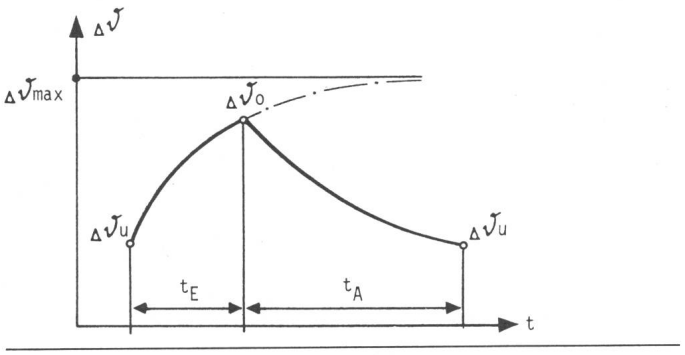

Fig. 11 Erwärmungsverlauf bei aussetzendem Betrieb

Bei kurzzeitigem Betrieb beträgt die höchste Erwärmung

$$\Delta\vartheta_{\max v} = \Delta\vartheta_{\max ü} \cdot (1 - e^{-t'/T})$$

Ist diese Erwärmung vorgegeben, so folgt daraus die entsprechende Einschaltdauer mit Überlast

$$t' = T \ln [ü^2/(ü^2 - v^2)]$$

Bei kurzzeitiger Belastung darf die für den Dauerbetrieb mit Nennlast zugelassene Temperatur des heissesten Punktes um den Betrag δ überschritten werden. Für die Erwärmung nach einer Vorbelastung ($\Delta\vartheta_{\max v}$) gilt die Beziehung

$$\Delta\vartheta_{\max} + \delta = ü^2 \Delta\vartheta_{\max} [1 - e^{-(t+t')/T}]$$

Daraus folgt

$$t = T \ln \frac{(ü^2 - v^2)\,\Delta\vartheta_{\max}}{(ü^2 - 1)\,\Delta\vartheta_{\max} - \delta}$$

t ist die Zeit, während der der Transformator nach vorhergehender Dauerbelastung mit v-facher Nennlast mit dem $ü$-fachen der Nennlast betrieben werden kann, bis der heisseste Punkt der Wicklung die Erwärmung $\Delta\vartheta_{\max} + \delta$ erreicht. δ kann für praktische Verhältnisse mit etwa 10 °C angenommen werden.

Beim Öltransformator ist eine derart vereinfachte Durchführung der Rechnung unzulässig, weil bei diesem zwei ausgeprägte Erwärmungsvorgänge mit stark verschiedenen Zeitkonstanten überlagert sind. Das gleiche gilt grundsätzlich auch bei aussetzendem Betrieb.

Aussetzender Betrieb

Der aussetzende Betrieb erfolgt in Intervallen, wobei in jedem Intervall (Lastspiel) auf eine Einschaltdauer t_E eine Ausschaltzeit t_A folgt. Den Verlauf der Erwärmung und der Abkühlung während des Lastspieles zeigt Figur 11. Im Temperaturgleichgewicht beträgt

$$\Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta_{\max} \frac{1 - e^{-t_E/T}}{1 - e^{-(t_A+t_E)/T}}$$

Künstliche Belüftung

Die Belastbarkeit des Transformators kann man mit Hilfe von Ventilatoren kräftig erhöhen. Die Dauerbelastbarkeit kann beispielsweise bis zum 1,4fachen der Nennlast gebracht werden.

5. Kapitalisierung

Trockentransformatoren weisen andere Verlustwerte auf als Öltransformatoren gleicher Leistung. Auch Trockentransformatoren verschiedener Konzeptionen oder Fabrikate weichen in ihren Verlusten voneinander ab. So haben z. B. Transformatoren des Aufbaues nach Figur 2b geringere Kupferverluste als Apparate nach Figur 2a. Es ist zweckmässig, die Verluste in den Preisvergleich einzubeziehen.

Allgemein gilt bei einem vorhandenen Anfangskapital K_0, einer jährlichen Amortisation R und einem Zinsfuss p (%) die Beziehung

$$K_n = K_0\, q^n - R\, \frac{q^n - 1}{q - 1} \qquad (q = 1 + p/100)$$

wobei K_n das Kapital nach n Jahren darstellt. Nach n Jahren soll das Kapital vollständig abgeschrieben sein ($K_n = 0$):

$$K_0 = R\, \frac{q^n - 1}{q^n\,(q - 1)}$$

Diese Formel zeigt also umgekehrt, durch welches Anfangskapital jährlich Kosten abgelöst werden können.

Die jährlichen Verlustkosten des Transformators betragen

$$K_v = e\, t\, (V_E + m^2\, V_K)$$

e Kosten der kWh
t Betriebsdauer pro Jahr
V_E Eisenverluste des Transformators
V_K Kupferverluste des Transformators bei Nennlast
m Mittelwert der Belastung des Transformators (m-fache Nennleistung)

Damit ergibt sich der die Kapitalisierung der Verluste berücksichtigende Preis des Transformators mit

$$K_{tot} = K_T + \frac{q^n - 1}{q^n\,(q - 1)}\, e\, t\, (V_E + m^2\, V_K)$$

K_T ist der Preis für den Transformator selbst. Für n werden meistens 25 Jahre gewählt. An einem konkreten Beispiel soll die Bedeutung der Kapitalisierung der Verlustkosten gezeigt werden:

Ein kunstharzisolierter Transformator für 400 kVA wird zu einem Preis von 18350 Fr. gekauft. Seine Eisenverluste bei Nennspannung betragen $V_E = 1{,}1$ kW, die Kupferverluste bei Nennleistung $V_K = 3$ kW. Ferner sei $e = 0{,}07$ Fr., $t = 8000$ Betriebsstunden, $m = 0{,}6$ und $p = 5$ %. Somit beträgt $q = 1{,}05$, und $K_{tot} = 18350 + 17213 = 35563$ Fr.

Zur Ablösung der gesamten Verlustkosten darf man somit fast den doppelten Transformatorpreis bezahlen. Entsprechend ist für jede Verminderung der Verluste ein massgeblicher Mehrpreis gerechtfertigt.

6. Prüfungen

Als Typenprüfungen sind im allgemeinen Erwärmungsmessungen, Geräuschprüfungen, auf besondere Vereinbarung dynamische Kurzschlussprüfungen und meist auch elektrische Stossprüfungen vorgesehen. Die Stückprüfung besteht in der Regel aus Übersetzungsmessung, Schaltgruppenprüfung, Messung des Leerlaufstroms und der Leerlaufverluste, Bestimmung der Kupferverluste und der Kurzschlußspannung, Fremdspannungsprüfung, Prüfung mit induzierter Spannung und Teilentladungsmessung.

Kunstharzisolierte Transformatoren sind der gleichen elektrischen Beanspruchbarkeit wie Öltransformatoren zuge-

ordnet. Nach CEI, SEV und VDE gelten für die Spannungsprüfungen der Apparate mit den maximalen Betriebsspannungen von 12 bis 36 kV die Werte der Tabelle I. Gemäss CEI 71–1 und VDE 0111 dürfen Betriebsmittel, welche infolge der gegebenen Anlageverhältnisse gegen Stoss besonders geschützt sind (Reihe S), mit reduzierten Werten geprüft werden (Klammerwerte der Tabelle).

Bei den Stückprüfungen wird in den letzten Jahren bei den kunstharzisolierten Transformatoren immer häufiger die hinsichtlich der Interpretation der Messwerte umstrittene Teilentladungsmessung gefordert. Bei dieser Messung werden eventuelle Ionisationen an überbeanspruchten Stellen im Dielektrikum bei induzierter Spannung oder bei Fremdspannung erfasst. Über den Grad der Schädlichkeit der angezeigten Ionisation oder über die Lage des Störherdes sagt das Messergebnis an sich nichts aus. Immerhin ist in manchen Fällen durch die Anzeige der Lage der Störimpulse innerhalb der Wechselspannungsperiode auf einem Bildschirm eine Lokalisierung der Störherde möglich.

7. Normen und Vorschriften

Allgemeine Vorschriften finden sich in der CEI-Publikation Nr. 76 (1967), Transformateurs de puissance. Diese Publikation wird auch in den «Bestimmungen für Transformatoren und Drosselspulen», VDE 0532 Teil 1/11.71 (Transformatoren), und in der SEV-Publikation 3156.1972, «Regeln für Leistungstransformatoren», weitgehend übernommen. Eine Zusammenstellung genormter Verlustwerte für Giessharztransformatoren bietet das Blatt «Giessharztransformatoren», DIN 42523 – 1973. In den Vereinigten Staaten gelten meist die Regeln des American National Standards Institute (ANSI), im gegebenen Fall ANSI/IEEE C 57.12.01–1979, IEEE Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers.

Tabelle I

Maximale Betriebsspannung kV (eff)	Prüfung mit Fremdspannung kV (eff)	Prüfung mit Stoßspannung Vollwelle 1,2/50 kV (SW)
12	28	75 (60)
24	50	125 (95)
36	70	170 (145)

Regeln für die elektrischen Prüfungen findet man in der Publikation CEI 71–1 (1976), Coordination de l'isolement, und in den diese Vorschriften berücksichtigenden Spezifikationen VDE 0111/Teil 1/10.79 (Isolationskoordination für Betriebsmittel in Drehstromnetzen über 1 kV) und in SEV 3327–1.1979, Koordination der Isolation. Entsprechende Angaben über die Forderungen in den Vereinigten Staaten gibt es in ANSI/IEEE C 57.12.91–1979, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers. Speziell mit der Durchführung der elektrischen Prüfungen befassen sich die CEI-Publikation 60–2, Techniques des essais à haute tension, und VDE 0432, Teil 2/10.78 (Hochspannungs-Prüftechnik).

Richtlinien für die Teilentladungsmessung enthalten CEI 270 (1981), Mesure des décharges partielles, und VDE 0533/3.68, Richtlinien für die Durchführung von Teilentladungsmessungen an Transformatoren. Werte über die Geräuschstärken von Transformatoren findet man auf dem Blatt «Geräuschstärken von Transformatoren», DIN 42540–1965.

Adresse der Autoren
M. Friedrich, J. Tripod, F. Faltermeier, Moser-Glaser & Co. AG, 4132 Muttenz.