Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 87 (1996)

Heft: 23

Artikel: Isolier- und Kühlmedien für Leistungstransformatoren

Autor: Brechna, Habibo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902391

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: 05.08.2025

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

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein mit Mineralöl gefüllter Leistungstransformator durch einen Kurzschluss Feuer fangen kann, ist zwar sehr gering, kann aber in dichtbevölkerten städtischen Gebieten doch Befürchtungen wecken. Die Erhöhung der Zündtemperatur durch Zusätze von PCB erwies sich als Fehler. Seit einiger Zeit werden in Unterstationen vermehrt Leistungstransformatoren installiert, welche mit SF_6-Gas oder PFC-Flüssigkeiten isoliert und gekühlt sind. Die Möglichkeiten, Transformatoren mit flüssigen organischen Wärmeträgern oder mit Kryoflüssigkeiten (z. B. flüssiger Stickstoff) zu betreiben, werden auch erörtert.

Isolier- und Kühlmedien für Leistungstransformatoren

■ Habibo Brechna

Nach der Verbannung von polychlorierten Biphenolen (PCB) als Isolier- und Kühlflüssigkeit in Transformatoren (1972) sind neben der konventionellen Mineralölkühlung eine Reihe von verschiedenen Gasen und organischen Flüssigkeiten vorgeschlagen und teilweise auch mit gutem Erfolg ausprobiert worden. Unter den gasförmigen Isoliermedien zeichnet sich vor allem Schwefel-Hexafluorid (SF_6) als Isolier- und Kühlmittel aus.

Die ersten Kühlflüssigkeiten, die in Transformatoren Anwendung fanden, waren die verschiedenen Perfluorcarbon (PFC)-Gruppen. Neuerdings wurden neue organische Flüssigkeiten als stabile Isoliermittel angeboten, wie Ditolylether (DTE oder Diphyl DT) und Perfluorpolyether (PFPE), die nicht selbstzündend sind, chemisch stabil sind, und die ausgezeichnete Wärmetransport- und dielektrische Eigenschaften aufweisen. Eine Mischung von SF_6 und PFC wurde in einer Gruppe von Leistungstransformatoren auch schon verwendet, aber vom Transformatorhersteller als zu kostspielig empfunden.

In der vorliegenden Studie werden die thermodynamischen Eigenschaften von SF_6 und einigen Flüssigkeiten, die als PCB-Ersatz verwendet werden können, beschrieben. Aus der Gruppe der Fluoralkane PFC ist willkürlich der Repräsentant C_8F_{18} und aus der Gruppe der organischen Wärmeträger DT ausgesucht worden. In Tabelle I sind die thermischen und elektrischen Eigenschaften einiger Kühlmedien zusammengestellt. Mit Rücksicht auf das niederviskose Transformatoröl ist als Basis für den Vergleich eine Temperatur von 60 °C und ein Druck von 0,1 MPa gewählt worden, obwohl für einige dieser Kühlmedien die Wahl einer höheren Betriebstemperatur vorteilhafter wäre.

Obwohl sich das niederviskose Mineralöl als Transformatorisolation in tausenden von Hochleistungstransformatoren bestens bewährt hat, wird weiter nach Ersatzmöglichkeiten geforscht. Der Grund dafür ist, dass Mineralöl brennbar ist. Obwohl der moderne Öltransformator so konzipiert ist, dass die Wahrscheinlichkeit eines Brandes infolge eines elektrischen Durchschlages sehr gering ist, könnte ein brennender, schwarzen Rauch produzierender Transformator nicht nur der Presse Stoff liefern, sondern in dicht besiedelten Gebieten sogar zu Panik führen. Diese Möglichkeit führte dazu, dass zuerst die Verteiltransformatoren mit Leistungen von <30 MVA, die unterirdisch in der Nähe von Bahnhöfen, in Fabrikhallen, Spitälern und explosionsgefährdeten Gebieten oder an Orten mit grossen klimatischen Belastungen stehen, mit SF_6-Gas isoliert und gekühlt wurden. Für eine längere Zeitspanne galt als obere Leistungsgrenze der mit SF_6-Gas gekühlten Transformatoren 100 MVA. Neuerdings sind bereits gasgekühlte 300-MVA-Transformatoren in Betrieb genommen worden, und 500-MVA-Transformatorengruppen (bestehend aus drei Einphasentransformatoren) mit SF_6-Isolation befinden sich im Projektzustand [1].

Adresse des Autors
Prof. Dr. *Habibo Brechna*, ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnik, 8092 Zürich

		Transformeröl	SF_6-Gas	C_8F_{18} Liquid	DT Liquid
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK], 60 °C	0,132	0,0159	0,0605	0,127
Wärmekapazität	[kJ/kgK], 60 °C	2,01	0,665 (0,1 MPa)	1,101 (0,1 MPa)	1,70 (0,1 MPa)
Dichte	[kg/m³], 60 °C	830	5,02 (0,1 MPa)	1690	1002
Kinemat. Viskosität	[mm²/s), 60 °C	4	3,4	0,52	2,35
Prandtlzahl	60 °C; 0,1 MPa	53	1,22	16,0	31,5
Dampfdruck	[MPa], abs.	—	3,3 (40 °C)	0,22 (122 °C)	0,00045 (120 °C)
Siedetemperatur	[°C]; 0,1 MPa	>280	—	97	264
Verdampfungswärme	[kJ/kg]; 60 °C	—	34 (40 °C)	83,7 (97 °C)	97 (60 °C)
Wassergeh. n. Trockn.	[mg/kg]	<5	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<5\cdot10^{-4}$
Permittivität		2,2	1,002	1,86	3,2 (50 Hz, 500 V, 90 °C)
Durchschlagsspannung	[kV/mm), VDE 0379	23	15	16	22
Toxizität		gering	gering	nicht irritierend	irritierend
Zündtemperatur	[°C]	350	—	—	545
Anwendungsbereich T_{min}/T_{max}	[°C/°C]	–10/+320	–30/+200	–30/+200	–30/+330

Tabelle I Thermische und elektrische Eigenschaften von Isolier- und Kühlmedien für Leistungstransformatoren

In Europa dürften Transportprobleme den Bau derart grosser, mit SF_6-gekühlter Einheiten behindern. Lösungen für Transformatoren, welche mit alternativen Kühlflüssigkeiten isoliert sind, scheinen eher im Bereich der Möglichkeiten zu liegen.

Die thermodynamischen Eigenschaften von Kühlmedien

SF_6-Gas

Der Hauptunterschied bei Kühlung mit SF_6, verglichen mit derjenigen durch Mineralöl, bei einem Kesseldruck von 0,1 MPa, liegt in der niedrigen Dichte und der niedrigen Wärmeleitung λ des Gases: $\lambda(SF_6) = 0{,}12\cdot\lambda(\text{Öl})$. Hieraus resultiert eine sehr niedrige dynamische Viskosität und damit zwangsweise eine kleine Prandtlzahl. Aus klassischen Modellversuchen von Nusselt für Newtonsche Flüssigkeiten und für Gase bei turbulenter Strömung resultiert die Relation für den Wärmeübergang [2, 3]:

$$\alpha = 0{,}023\cdot\frac{\lambda}{d_h}\cdot\left(\frac{v\cdot d_h}{\nu}\right)^{0,8}\cdot \mathrm{Pr}^{0,4} \qquad (1)$$

mit

- Pr Prandtlzahl $\mu\cdot d_h/\lambda$
- μ dynamische Viskosität $= \delta\cdot\nu$ (Pa · s)
- ν kinematische Viskosität (m²/s), siehe Bild 1
- d_h hydraulischer Strömungsdurchmesser (m)
- v Strömungsgeschwindigkeit des Mediums (m/s)
- λ Wärmeleitfähigkeit (W/m·K)
- δ Dichte des Mediums (kg/m³)

Die Gleichung (1) gibt für Kühlflüssigkeiten etwa 12% höhere und für Gase 8% höhere Werte, als die Messungen anzeigen. Sie ist aber einfach anzuwenden und für Berechnungen zum Vergleich verschiedener Medien sehr gut geeignet. Bei einer mittleren SF_6-Temperatur von 60 °C und einem Druck von 0,1 MPa, einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s und den Daten aus Tabelle I ergibt sich für SF_6 eine Wärmeübergangszahl (WÜZ) von α = 172 W/m²K. Sie ist zu vergleichen mit derjenigen von Öl, für welches bei v = 0,5 m/s und 60 °C eine WÜZ von α = 400 W/m²K resultiert.

Der hydraulische Strömungsdurchmesser d_h bezieht sich auf die Abmessungen des Strömungsquerschnitts. Bei einer Breite des Ölspalts von Δ sowohl bei Scheiben- als auch Lagenwicklungen ist $d_h = 2\Delta$. In den Berechnungen ist eine Strömungskanalbreite von Δ = 5 mm eingesetzt. Gleichung (1) berücksichtigt die Kanallänge nicht. Die WÜZ ist bei einer Kanallänge von 1 m etwa 3% (Maximum) höher.

Die Erhöhung des Druckes führt automatisch zu einer Erhöhung der Dichte. Da es sich bei SF_6 um ein nicht-ideales Gas handelt, ist die Veränderung des Volumens mit einem Kompressibilitätsfaktor $z(p)$ zu behaften. Die Wärmeleitfähigkeit λ und die Wärmekapazität des SF_6 sind nur schwach druckabhängig, ändern sich aber mit der Temperatur. Die kinematische Viskosität ist bis zu hohen Drucken (≤1 MPa) nahezu konstant. Die dynamische Viskosität und damit die Prandtlzahl variiert mit dem Druck. Damit kann man durch Erhöhung des Drucks bis auf 0,5 MPa und der Strömungsgeschwindigkeit die WÜZ verändern. Bild 2 veranschaulicht $\alpha = f(T)$ bei willkürlich gewählten Strömungsgeschwindigkeiten von 10 m/s und 40 m/s und Drücken von 0,1 MPa bis 0,5 MPa.

Ein innerer Druck von 0,5 MPa erfordert eine neue Kesselkonstruktion, und daher ist man zu zylindrischen Konstruktionen über-

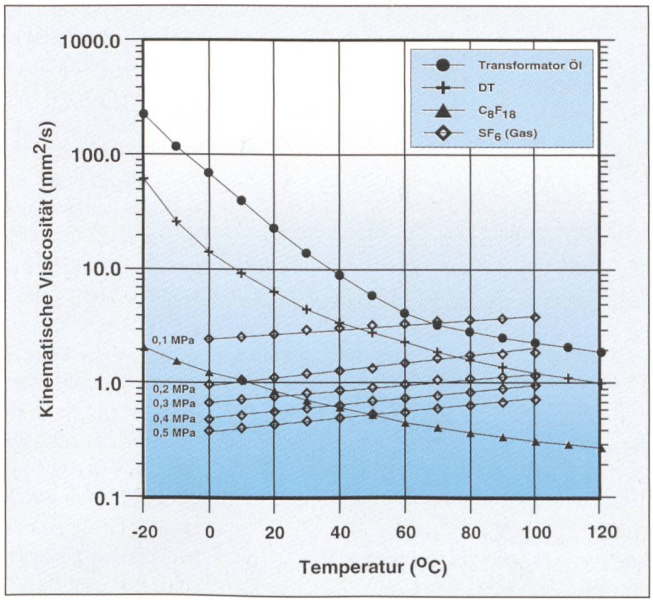

Bild 1 Kinematische Viskosität von Isolier- und Kühlmedien in Abhängigkeit von der Temperatur

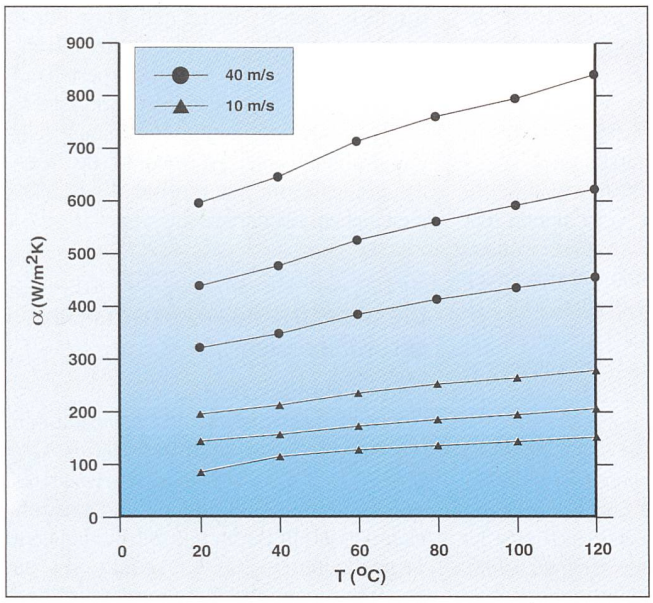

Bild 2 Wärmeübergang α von SF_6-Gas bei Strömungsgeschwindigkeiten von 10 und 40 m/s

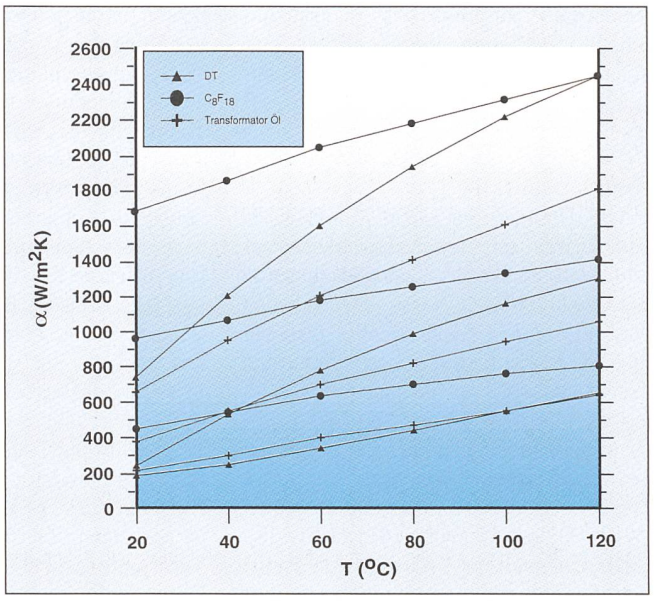

Bild 3 Wärmeübergang α von Kühlflüssigkeiten bei 0,1 MPa
Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 (untere Kurve), 1 (mittlere Kurve) und 2 m/s (obere Kurve)

gegangen [1]. Eine Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s bedingt leistungsfähige Pumpen und geeignete Ventilatoren zur Luftkühlung. Wie sich der Schallpegel bei so hohen Strömungsgeschwindigkeiten einstellt, ist hier noch nicht bekannt.

Gleichung (1) zeigt auch, dass es vorteilhaft ist, mit hohen Gastemperaturen zu arbeiten. Da SF_6 nicht brennbar ist, schlagen die japanischen Konstrukteure hohe Betriebstemperaturen vor. Bei einer mittleren SF_6-Temperatur von 120 °C dürfte der Temperaturabfall über den Leiter etwa 30 °C betragen. Damit fällt Kraftpapier (Isolationsklasse A) als Leiterisolation aus. Aramidpapier (Temperaturklasse H) würde sich thermisch gut eignen. Die elektrische Festigkeit des Kühlmediums würde aber reduziert werden, da das strömende Gas durch Reibungskräfte Fasern aus der Oberfläche der Leiter und der Hauptisolation lösen und durch den Kessel wirbeln würde. Die Fasern würden sich in Eckpartien zwischen benachbarten Leitern sammeln und könnten zu Teilentladungen führen. Daher wurde anstelle von Papier und Transformerboard Polyethylenterephtalat (PET), Temperaturklasse B, und Polyphenylensulfid (PPS), Temperaturklasse E, verwendet [4].

PFC-Flüssigkeiten

Perfluorkohlenstoff(PFC)-Flüssigkeiten sind nicht toxisch, nicht selbstzündend und altern bis zu Betriebstemperaturen von 150 °C praktisch nicht. Sie werden daher wie reine Flüssigkeiten zur Kühlung von Verteiltransformatoren herangezogen. Bei Atmosphärendruck liegt die Siedetemperatur, wie aus Tabelle I ersichtlich, leicht unter 100 °C. Bei einem Druck von 0,2 MPa kann die Betriebstemperatur auf 120 °C erhöht werden [5].

Die kinematische Viskosität von PFC-Flüssigkeiten ist verglichen mit der Viskosität von Transformatoröl niedrig. Dadurch hat man kleinere Druckabfälle bei der Strömung durch Kühlkanäle innerhalb der Wicklung. Der Druckabfall entlang der Kühlkanäle kann für Newtonsche Flüssigkeiten aus der einfachen Relation

$$\Delta p = 0{,}5 \cdot \rho_{Fl} \cdot v_{Fl}^2 \cdot \left[f \cdot \left(L / d_h \right) + C_{en} + C_{ex} \right] \quad (2)$$

berechnet werden. Mit

- f Reibungszahl, die von der Oberflächenbeschaffenheit der Isolation und der Reynoldschen Zahl abhängt
- ρ_{Fl} Dichte der Kühlflüssigkeit (kg/m³)
- v_{Fl} Strömungsgeschwindigkeit (m/s)
- L Länge des Strömungskanals (m)
- d_h hydraulischer Durchmesser des Kühlkanals $\cong 2 \cdot \Delta$ (m)
- C_{en} Druckverlustfaktor am Eingang des Kanals $\cong$ 1,0 (max.)
- C_{ex} Druckverlustfaktor am Ausgang des Kanals $\cong$ 0,5 (max.)

Für einen 2 m langen Kühlkanal, einen radialen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lagen von $\Delta = 5$ mm und eine Strömungsgeschwindigkeit von $v_{Fl} = 2$ m/s erhalten wir für die Reynoldsche Zahl $Re = v_{Fl} \cdot d_h / \nu = 4 \cdot 10^4$. Für C_8F_{18} ergibt sich bei einer absoluten Rauhigkeit von 0,7 mm für eine überlappend gewickelte Isolation die Reibzahl $f = 0{,}06$ [6]. Aus Gleichung (2) folgt $\Delta p = 4{,}9 \cdot 10^3$ N/m².

Die Wärmekapazität des C_8F_{18} ist hoch und steigt mit zunehmender Temperatur leicht an. Die Wärmeleitfähigkeit ist im Vergleich zu Öl niedrig und nimmt bei steigender Temperatur leicht ab. Die WÜZ des C_8F_{18} bei gleichen Kanalanordnungen ist in Bild 3 angegeben. Sie ist relativ zu den Werten für Öl und SF_6 sehr hoch (1400 W/m²K bei 150 °C).

Auch bei Strömungsgeschwindigkeiten von 2 m/s ist die Gefahr des elektrostatischen Ladungstransports (Elektrifikation) verglichen mit Öl sehr gering. Nachteilig für die Anwendung von PFC-Flüssigkeiten ist der hohe Preis [7].

Die organischen Wärmeträger

Eine dritte Klasse synthetischer, mit der PFC-Gruppe kompatibler Wärmeträger sind die Perfluorpolyether(PFPC)-, Ditolylether(DTE)- und DT-Gruppen. Diese Klassen der Wärmeträger sind bis Temperaturen von über 500 °C nicht selbstzündend, sind thermisch stabil und zeigen bis zu Temperaturen von gegen 150 °C keine Alterungserscheinungen. Die Wasseraufnahme von DT ist äusserst gering. Charakteristische Daten von DT sind in Tabelle I zusammengestellt. Die niedrige kinematische Viskosität des DT im Vergleich zu Mineralöl (Bild 1) macht es zu einem attraktiven Kühlmittel. Für eine Kühlkanalgeometrie, wie oben im Abschnitt über SF_6-Gas beschrieben, ist die WÜZ des DT in Bild 3 dargestellt. Dabei sind die Strömungsgeschwindigkeiten wie im Fall von PFC-Flüssigkeiten zu 0,5 m/s (untere Kurve), 1 m/s (mittlere Kurve) und 2m/s (obere Kurve), gewählt worden. Die ökonomische

obere Temperaturgrenze des DT dürfte unterhalb 150 °C sein. Damit dürften feste Isolationen für den Leiter und der Hauptisolation in der Temperaturklasse E oder H liegen.

Transformatorenöl

Seit Dekaden hat sich Mineralöl in Kombination mit festen Isolationen auf Zellulosebasis als die ideale Kombination schlechthin erwiesen. Nur in seltenen Fällen wurde die mittlere Temperatur von Öl höher als 65°C gewählt, so dass feste Leiter und Hauptisolationen der Temperaturklasse A verwendet werden können. Sowohl Kraft- als auch Aramidpapier als Leiterisolation sind ausgezeichnete Ölabsorber (bis 45%). Vorgepresstes Transformerboard absorbiert bis 12% Öl und Aramidboard etwa 10% [8].

Die kinematische Viskosität von Transformatoröl ist relativ zu den anderen, oben genannten drei Fällen hoch, so dass Strömungsgeschwindigkeiten selten die Grenze von 1 m/s überschreiten. Mit den physikalischen Daten aus Tabelle I und den bereits erwähnten Strömungskanal-Dimensionen sind die WÜZ für strömendes Öl berechnet und in Bild 3 dargestellt, so dass die drei Kühlmedien thermisch direkt verglichen werden können.

Weitere Kühlungsmöglichkeiten

Um das Mineralöl als Isolier- und Kühlflüssigkeit zu eliminieren, wurden in den 80er Jahren verschiedene strömungstechnische Möglichkeiten studiert. Die Existenz synthetischer Flüssigkeiten mit druckabhängigen Verdampfungstemperaturen und des SF_6-Gases erlaubte das Mischen von Gasen und Flüssigkeiten. Die Verdampfungswärmen der PCF- und der DTE-Flüssigkeiten sind sehr hoch. C_8F_{18} verdampft bei 97 °C (0,1 MPa). Die Wicklungstemperatur ist aber über die axiale Höhe der Wicklung verschieden. Somit müssten die Wicklungsabschnitte, die beim Eintrittsort des Kühlmediums liegen, mit niedrigerer Temperatur betrieben werden; damit ist aber eine optimale Ausnützung des Transformators in Frage gestellt. Also musste der Druck im Kühlkreislauf, oder mindestens über dem Spulenraum, erhöht werden. Hierzu wurde SF_6-Gas unter einem Druck von 0,22 MPa als Basis benützt. Die Mischung hat eine hohe dielektrische Festigkeit, und die Siedetemperatur konnte auf 120 °C erhöht werden. Die PFC-Flüssigkeit wurde über die Wicklung gesprüht; die Tropfen strömten durch die Kühlkanäle und verdampften wegen der hohen Wicklungstemperatur [9]. Die WÜZ der Verdampfung ist sehr hoch, wie man dies auch aus der Verdampfung von Wasser sehr gut kennt. Die Lösung ist bestechend, musste aber fallengelassen werden: Diese Kühlmethode bedingt, dass die Achsen der Kühlkanäle vertikal sind. Damit schieden automatisch Scheiben und Spulenwicklungen mit horizontalen Kühlkanälen aus. Nur Lagenwicklungen und Shell-Typen kamen in Frage. Bei langen Spulenzylindern für hohe Leistungen und Kühlkanalbreiten von wenigen Millimetern kann nicht garantiert werden, dass die unteren Spulenteile auch effektiv gekühlt werden [10]. Die Konstrukteure derartiger Transformatoren machten den hohen Preis und Leckagen des PCF in den SF_6-Tanks, das die WÜZ des Systems reduzierte, für den Misserfolg verantwortlich [1].

In der vorliegenden Studie sind die WÜZ für verschiedene Kühlmethoden durchgerechnet und in Bild 4 zusammengestellt. Es zeigt, dass die freie Konvektion, wie bekannt, nur als Kühlung von Transformatoren niederer Leistung in Frage kommt. Wie bereits aus den Bildern 2 und 3 ersichtlich ist, eignet sich hingegen die forcierte Kühlung mit einphasigen Systemen, bestehend entweder aus Gasen oder aus Flüssigkeiten, für Transformatoren grosser Leistung sehr gut. Kühlung unter Anwendung der Verdampfungswärme ist in Bild 4 als Vergleich ebenfalls dargestellt.

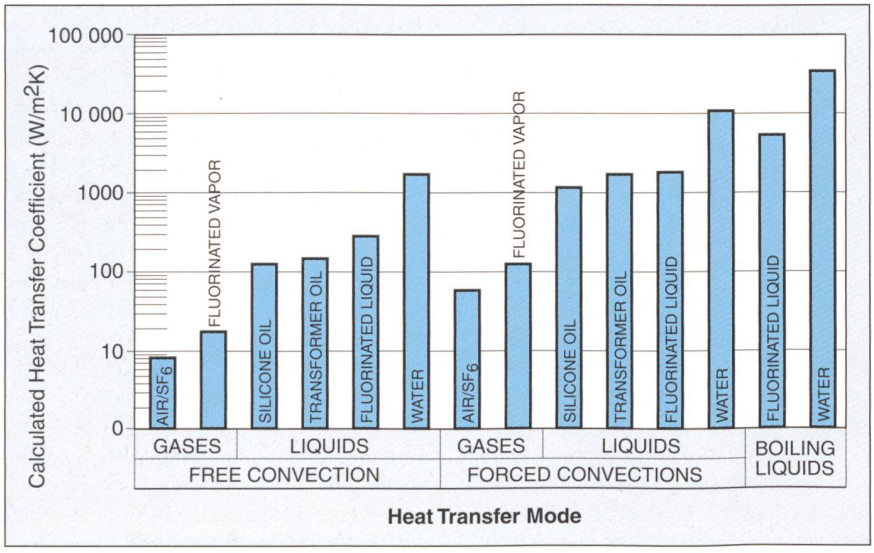

Bild 4 Berechnete Wärmeübergangskoeffizienten α für verschiedene Modi und Fluide

Die dielektrischen Eigenschaften der Kühlmedien

Schwefelhexafluorid-Gas (SF_6)

SF_6 ist inaktiv und bis zu Temperaturen von 150 °C nicht korrosiv. Dieses Gas zerfällt bei 200 °C langsam, wenn es ständig mit blankem Stahl (z. B. Transformatorkessel) in Berührung ist. Bei höheren Temperaturen (> 200 °C) zerfällt SF_6 im Dauerbetrieb in Schwefelwasserstoff und produziert Flusssäure (HF) [11].

SF_6-Gas ist geruchlos und farblos. Seine elektrische Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von Druck und Temperatur kann man einer umfassenden Literatur [12–16] entnehmen. Bild 5 zeigt die Durchschlagsfeldstärke im homogenen Feld in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand bei verschiedenen Drücken. Die Durchschlagsspannung nimmt mit steigendem Druck zu. Bei Leistungstransformatoren wählt man heute einen Gasdruck im geschlossenen Kreislauf von 0,5 MPa, hauptsächlich um die WÜZ zu verbessern und gleichzeitig von den besseren Isolierfähigkeiten des SF_6 zu profitieren [1].

SF_6 zeigt bis zu Betriebstemperaturen von 150 °C keine Alterungserscheinungen. Also betreibt man die Transformatoren im Temperaturbereich von 130 bis 150 °C. Zellulose wäre dabei als Isolation nicht geeignet. Das rasch strömende SF_6-Gas würde aus der Oberfläche der Hauptisolation Fasern wegreissen und diese an Eckpartien der Wicklung deponieren. Damit entstünden Gebiete mit einer erhöhten Feldstärkekonzentration. Auch würden die hohen Temperaturen zur raschen Alterung der Zelluloseisolation führen. Sowohl als Leiter- als auch Hauptisolation werden PET und PPS vorgezogen.

Die Permittivität von SF_6-Gas ($\cong 1$) ist niedriger als die des Öls (3–5). Daher wird das Gas stärker beansprucht als das Isolieröl. Der Keileffekt in Eckpartien der Wicklung und zwischen benachbarten Windungen ist daher auch wesentlich höher. Bei der Angabe der Haltespannung muss die höhere Beanspruchung berücksichtigt werden. Selbst bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten des SF_6 durch die Kühlkanäle ist der Elektrifikationseffekt (siehe Abschnitt «Transformatorenöl») bei Verwendung von PPS nicht eingetreten.

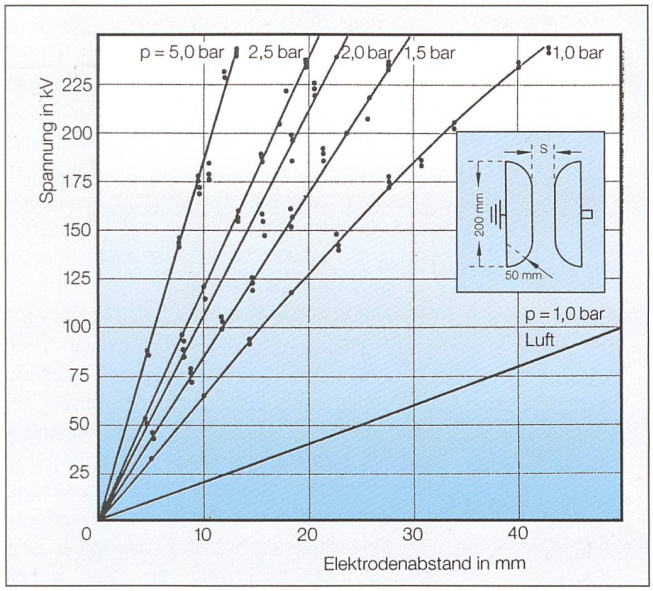

Bild 5 50-Hz-Durchschlagsspannung von SF_6 im homogenen Feld in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand und bei verschiedenen Gasdrücken [12]

Fluorkohlenstoff (PFC)

Die Fluorkohlenstoff-Flüssigkeiten (PFC) werden in letzter Zeit vermehrt im Transformerbau eingesetzt [17]. Dank ihrer niedrigen Viskosität, verglichen mit Öl, sind sie ausgezeichnete Wärmeträger und weisen zusätzlich noch eine hohe dielektrische Festigkeit auf. In Bild 6 ist die Durchschlagsfeldstärke E_d in Abhängigkeit von der Schlagweite aufgezeichnet und wird mit E_d-Werten von Mineralöl verglichen. Die dielektrische Festigkeit des PFC nimmt mit steigendem Druck zu. Die Permittivität von PFC (1,86) unterscheidet sich nur wenig vom Wert für Öl. PFC absorbiert nur kleine Mengen Wasser, was sich in einer nur leichten Reduktion der Durchschlagsfeldstärke E_d auswirkt. C_8F_{18} hat in trockenem Zustand einen E_d-Wert von 16 kV/mm, gemessen im homogenen elektrischen Feld.

PFC sind farb- und geruchlos. Sie sind nicht selbstzündend. Die einzelnen Mitglieder der PFC-Klasse differieren in den Siede- und Fliesstemperaturen voneinander. C_8F_{18} hat bei 0,1 MPa eine Siedetemperatur von 97 °C und eine Fliesstemperatur von –110 °C. PFC-Flüssigkeiten sind nicht korrosiv. Sie zeigen bei Betriebstemperaturen bis 150 °C keine Alterung. PFC ist seit langem als Isolier- und Kühlflüssigkeit bekannt, hat sich aber im Transformerbau nur schwer durchsetzen können. Ein Grund dürfte der hohe Preis der Flüssigkeit sein.

Die PFC-Flüssigkeiten werden im geschlossenen Kühlkreis bei 0,1–0,3 MPa (abs) betrieben. Eine ideale Kombination mit dem PFC dürfte die Anwendung von Aramidpapier und Aramidboard sein, was den Betrieb des Transformators bis zu Temperaturen von 170 °C gestatten würde.

Ditolylether-Flüssigkeiten (DT und DTE)

Die Gruppe der Ditolylether-Flüssigkeiten (DT und DTE) oder die PFPC haben sich trotz niedrigem Preis, hoher Zündtemperatur (545 °C) und guten dielektrischen Eigenschaften (Bild 7) bisher im Transformatorbau nicht durchsetzen können [18, 19]. Die Siedetemperatur des DT bei 0,1 MPa liegt bei 290 °C. DT nimmt im Vergleich zu Mineralöl nur geringe Mengen Wasser auf. Die Durchschlagsfestigkeit sinkt mit zunehmendem Wassergehalt sehr stark ab und beträgt bei 100 ppm Wasser nur 80% von jener der getrockneten Flüssigkeit mit 5 ppm Wassergehalt. DT muss vor dem Füllen im Kessel gut getrocknet werden. Die Spulen werden unter Vakuum imprägniert. Ein schwerwiegender Nachteil des DT ist, dass die Flüssigkeit oberhalb einer Temperatur von 100 °C mit dem Luftsauerstoff organische Säuren bildet, welche den Dichtungsgummi zerstören. Also müssten zum Beispiel Fluoroelastomere (Viton) benützt werden.

DT entwickelt auch bei kleinen Konzentrationen einen starken, unangenehmen Geruch. Ein Einatmen in grösseren Mengen ist daher nicht zu befürchten. Ein mit DT vernebelter Raum darf nur mit einer Schutzmaske des Filtertyps *A* betreten werden.

Transformatorenöl

Das niederviskose Mineralöl dient in Transformatoren nicht nur zur Abführung der Eisen- und Wicklungsverluste, sondern auch seine dielektrischen Eigenschaften

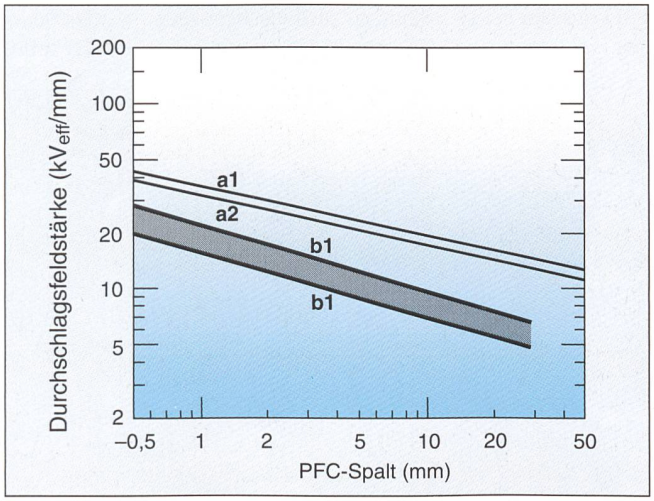

Bild 6 Durchschlagsfestigkeit U_d von PCF in Abhängigkeit der Spaltbreite [17]

a1: Durchschlagsfestigkeit von PCF bei 0,3 MPa Druck
a2: Durchschlagsfestigkeit von PCF bei 0,1 MPa Druck
b1: Durchschlagsfestigkeit von Transformatoröl nicht inhibiert, getrocknet (5 ppm Wassergehalt)
b2: Durchschlagsfestigkeit von Transformatoröl 30 ppm Wassergehalt

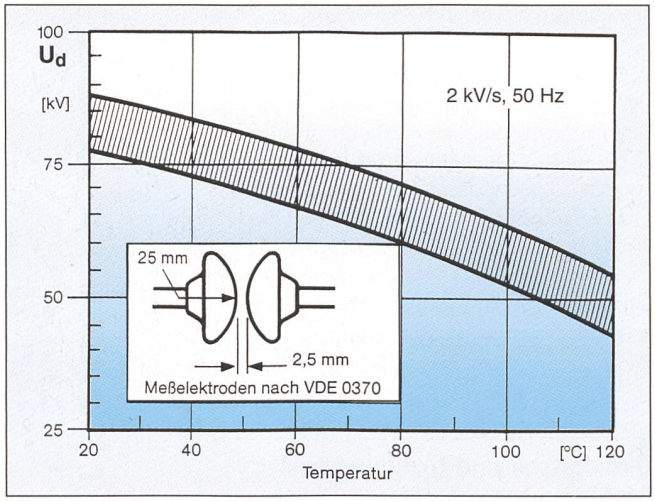

Bild 7 Durchschlagsspannung U_d von DT in Abhängigkeit von der Temperatur T [19]

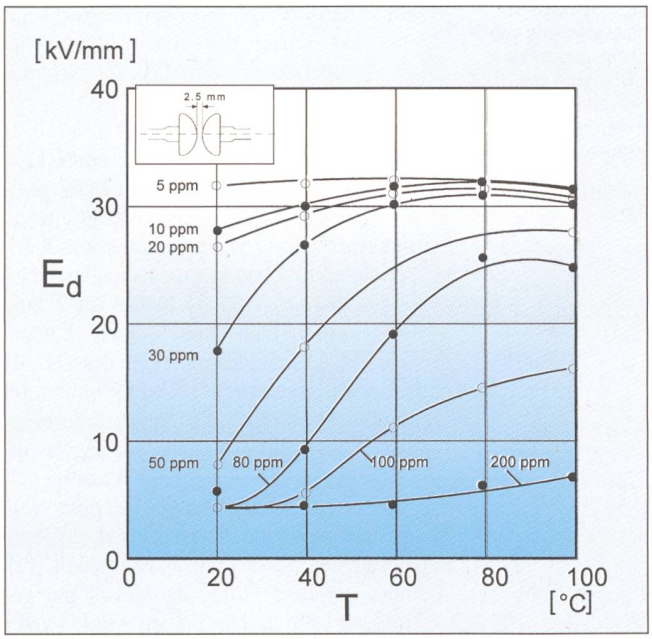

Bild 8 Die elektrische Durchschlagsspannung in Öl in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Feuchten [20]

sind von höchster Bedeutung. Reines Mineralöl ohne Verunreinigungen hat, wie aus Bild 8 zu entnehmen ist, eine sehr hohe elektrische Festigkeit. Im Öl aufgelöste Gas- und Wasserreste andererseits reduzieren die dielektrische Festigkeit erheblich und können zu einem frühzeitigen Durchschlag führen [20].

Die Permittivität von Öl ist etwa 2,2 und die der verwendeten Zelluloseisolation zwischen 3 und 4,5. Also wird das Öl stärker beansprucht als die feste Isolation der Wicklungen und die feste Isolation. Da das Öl Staub und Fasern aus der Oberfläche der festen Isolationen ablöst und in den Hauptstrom einschwemmt, können sich die Fasern an Orten stehenden Öls sammeln und in Winkelpartien zum gefürchteten «Wedge effect» führen [21]. Der Effekt der Verunreinigungen auf die 1-%-Haltespannung ist schematisch in Bild 9 veranschaulicht.

Mit der Steigerung der Einheitsleistung der Transformatoren musste die Ölströmungsgeschwindigkeit erhöht werden. Dies führte zur gefürchteten elektrostatischen Ladungstrennung (Electrostatic Charging Tendency ECT) an der Oberfläche der Zelluloseisolation [22, 23], die im normalen Transformatorenbetrieb zu Durchschlägen und eventuell zur Zerstörung der Transformatorisolation führen kann.

Ökologische und toxikologische Probleme

SF_6-Isolation

Mit SF_6 gefüllte Transformatoren niedriger Leistung (<10 MVA) sind in Japan und Südostasien, also in Ländern mit hohen Bevölkerungsdichten, weitgehend etabliert. Auch in Europa werden mit SF_6 isolierte Transformatoren in Spitälern, Bahnhöfen und in Fabrikhallen installiert.

Während SF_6-Schaltanlagen weltweit im Betrieb sind, werden SF_6-Hochleistungstransformatoren in Europa und den USA bisher nur zögernd eingesetzt. SF_6 ist eine sehr stabile Verbindung. Zerfallsprodukte entstehen erst bei 175 °C Dauerbetriebstemperatur und nur in sehr geringen Mengen (<1%). Bei höheren Temperaturen, hauptsächlich über 550 °C, steigt die Menge der Zerfallsprodukte stark an [24]. Lichtbogenentwicklung im SF_6-Gas führt zur Bildung toxischer Nebenprodukte. Eine Zusammenstellung solcher Substanzen kann man der Tabelle II entnehmen [25].

Die Jahresproduktionsrate von SF_6 ist steigend. Man schätzt, dass bis zum Jahr 2000 rund 8000 Tonnen SF_6 pro Jahr hergestellt werden [26]. Von der Elektroindustrie werden 70–80% in GIS- und GIT-Anlagen eingesetzt. Beim Transportieren, Umlagern, Füllen und Entleeren gehen immer kleinere Mengen SF_6 an die Luftatmosphäre verloren. Die Transformatorenkessel hingegen sind so dicht, dass man Leckagen kaum befürchten muss, speziell, da das Expansionsgefäss, wie es bei Öltransformatoren notwendig ist, bei SF_6-isolierten Transformatoren wegfällt.

Die in der Atmosphäre gemessenen SF_6-Konzentrationen sind bisher gering: 1990 wurden SF_6-Konzentrationen von ungefähr 2,5 pptv (Parts per trillion by volume) gemessen [27], 1995 betrug die Konzentration in der Luft 3,2 pptv [28]. Dies reflektiert die Tatsache, dass durch die Handhabung offenbar grössere Quantitäten SF_6 verloren gegangen waren. Sensibilisierung des Personals hat im letzten Jahr aber bereits Früchte getragen. Die Verlustrate von SF_6 in die Luft konnte durch bessere und sorgfältigere Handhabung und Eliminierung von Leckagen reduziert werden. Die internationale Norm schreibt vor, dass Leckagen von SF_6-Behältern und -Installationen 1% des Füllvolumens pro Jahr nicht überschreiten dürfen.

Der Hauptgrund für diese Vorsichtsmassnahmen ist damit begründet, dass die Lebensdauer von SF_6 in der Atmosphäre rund 3200 Jahre beträgt, bevor es durch die Sonnenstrahlen über eine photochemische Reaktion abgebaut wird. SF_6 ist ein Infrarotabsorber im Wellenlängenbereich des atmosphärischen Fensters. Daher könnte eine Akkumulation von SF_6 in der Atmosphäre zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts führen. Werden die vorgeschriebenen Vorsichtsmassnahmen aber implementiert, dann bleibt der Beitrag des SF_6 zum Treibhauseffekt vernachlässigbar klein. Es konnte auch nachgewiesen werden, dass sich praktisch kein Chlor im SF_6-Gas befin-

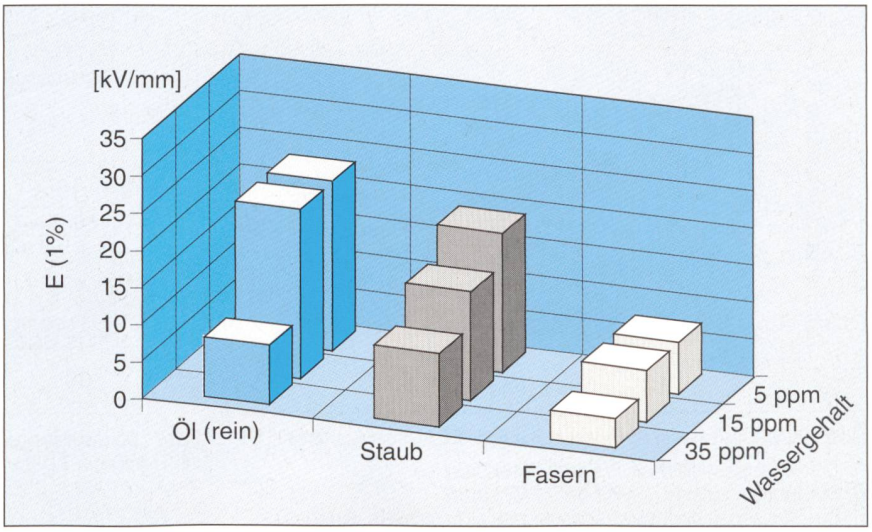

Bild 9 Dielektrische (1%-)Haltespannung in Öl bei homogenem Feld, mit verschiedenen Verunreinigungen [21]

Compound	TLV	Geruch
SF_6	1000 ppmv[2)]	geruchlos
SF_4	0,1 ppmv[2)]	stechend, ätzend
SOF_2	1,6 ppmv[1)]	faule Eier
SO_2	2 ppmv[1)]	stechend
SOF_4	–	wie HF
SO_2F_2	5 ppmv[1)]	keinen
S_2F_{10}	0,01 ppmv[2)]	?
S_2FO_{10}	–	?
$S_2O_2F_{10}$	–	?
HF	3 ppmv[2)]	ätzend
SiF_4	0,5 ppmv[1)]	wie HF
WF_6	0,1 ppmv[1)]	wie HF
AlF_3	2,5 mg/m³	–
CuF_2	2,5 mg/m³	–
FeF_2	2,5 mg/m³	–

Tabelle II Toxizität der wichtigsten SF_6-Spaltprodukte [25]

1) Threshold Limit Value-Time Weighted Average (TLV-TWA): Ist die mittlere Konzentration für einen normalen 8-Stunden-Werktag und 40 Wochenstunden; während dieser Zeit können alle Arbeiter, die mit SF_6 in Berührung kommen, ständig den Spaltprodukten ohne nachteilige Effekte exponiert werden.

2) Threshold Limit Value-Concentration (TLV-C): Ist eine Konzentration, die nie während der Arbeitsphase überschritten werden darf.

det, so dass von da her auch keine Zerstörung der Ozonschicht der Stratosphäre zu befürchten ist.

Selbstverständlich muss dem Recycling des SF_6 Aufmerksamkeit geschenkt werden. Leider sind in der Schweiz noch keine Entsorgungsanlagen vorhanden, so dass das gebrauchte SF_6 über die Grenze an die Herstellerfirma zurückgeschickt werden müsste.

PFC-Flüssigkeiten

Die Perfluorcarbon-Verbindungen sind flüchtige, lineare oder zyklische Fluorverbindungen. Sie zeichnen sich durch eine hohe biologische, chemische und physikalische Stabilität aus. Ihre Wasserlöslichkeit ist äusserst gering, und sie weisen eine niedrige Toxizität auf. Bei Atmosphärendruck beträgt die Siedetemperatur von C_8F_{18} etwa 97 °C. Will man PFC bei höheren Temperaturen und etwa 0,225 MPa einsetzen, dann könnte infolge Leckagen der Druck abnehmen und PFC-Gas in die Luftatmosphäre gelangen. Bleibt das PFC im geschlossenen Kreislauf flüssig, dann kann es, wie das Öl bei den Öltransformatoren, in einem Becken unter dem Kessel aufgefangen werden. Die Flüssigkeit kann gereinigt und zum Kessel zurückgeführt werden. Über Effekte von Teilentladungen, Erzeugung von schädlichen Zerfallsprodukten und Alterung des PFC ist vorläufig nichts bekannt. Der Produzent weist allerdings darauf hin, dass eine Umwandlung in die Gasphase vermieden werden muss.

DT-Flüssigkeiten

DT nimmt im Vergleich zu Transformatorenöl sehr wenig Wasser auf. Bei einer Temperatur von 30 °C und 100% relativer Feuchte beträgt die Löslichkeit von Wasser 0,07 Gew.-%. Der penetrante Geruch des DT erfordert, dass man die Kühlflüssigkeit in geschlossenen Räumen aufbewahrt, und dass die Berührung mit dem Luftsauerstoff verhindert werden muss. Im geschlossenen Kühlkreislauf des Transformators ist die chemische und physikalische Stabilität des DT gewährleistet. Als Isolierflüssigkeit für Hochspannungskondensatoren hat DT sich bereits bewährt. Welche Schadstoffe bei einer Erwärmung bis in die Nähe von 545 °C entstehen können und welche Auswirkungen Teilentladungen und Lichtbogen in solchen Transformatoren haben, wird sicherlich Gegenstand von weiteren Untersuchungen sein [29, 30].

Transformatorenöl

Der Versuch, die Zündtemperatur der heute verwendeten Paraffinöle durch Zusätze zu erhöhen, ist bisher gescheitert. Die Selbstzündtemperatur von Paraffinöl liegt knapp über 300 °C. Bei der Verbrennung von Öl entsteht das Treibhausgas CO_2. Global betrachtet ist jedoch der Beitrag, den die Transformatoren liefern könnten, äusserst gering und fällt nicht ins Gewicht.

Das Öl ist im Betrieb einem Alterungsprozess unterworfen, der durch eine regelmässige Messung des tanδ kontrolliert wird. Sind Teilentladungen vorhanden, dann entstehen im Öl die Spaltgase Wasserstoff und Methan. Die Zunahme des Wassergehalts im Öl führt zur Reduktion der Durchschlagsfestigkeit. Auch aus diesem Grund muss das Öl einer ständigen Kontrolle unterworfen werden. Ist der Alterungsprozess fortgeschritten, wird das Öl ausgewechselt. Das neue, getrocknete und filtrierte Öl wird in den Transformator unter Vakuum eingezogen. Das alte Öl wird rezykliert.

Andere Isolierflüssigkeiten oder -gase

Wie sieht die Situation beim Einsatz von anderen Isoliergasen wie zum Beispiel N_2 oder von Gasgemischen unter Druck aus? Die Durchschlagsfestigkeit von Stickstoffgas ist im Vergleich zu SF_6 relativ niedrig, aber höher als jene von getrockneter Luft. Flüssiger Stickstoff (Siedetemperatur 77,3 K) ist eine ausgezeichnete Isolierflüssigkeit, benötigt aber eine Kälteanlage, um den verdampften Stickstoff wieder zu verflüssigen. Da in diesem Fall jeder Leistungstransformator auch einen Kälteapparat mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad (≅ 30%) benötigen würde, dürfte der Gesamtwirkungsgrad der Transformatoranlage unter Vollast gering sein. Vergessen wir dabei aber nicht, dass ein Leistungstransformator nur während wenigen Stunden des Tages im Vollastbetrieb ist und die Flüssig-N_2-Anlage in der übrigen Zeit nur die Leerlauf- und Zusatz- sowie die niedrigen Kupferverluste abführen muss.

Zusammenfassung

Bei der Suche nach Kühlmedien als Ersatz für Paraffinöle konnte gezeigt werden, dass SF_6, das sich in zahlreichen GIS-Anlagen bereits bestens bewährt hat, auch im Transformatorenbau verwendet werden kann. Bis zu einer Betriebstemperatur von 150 °C altert SF_6-Gas nicht, es hat keine obere Zündgrenze und ist farb- und geruchlos. SF_6 ist im Frequenzbereich des atmosphärischen Fensters ein Infrarotabsorber. Befürchtungen, dass die lange Zerfallszeitkonstante des SF_6 von 3200 Jahren bei dem ständig wachsenden Jahresbedarf zu einer nennenswerten Verstärkung des Treibhauseffekts führen könnte, haben sich nach neuesten Messungen nicht bestätigt.

Um die durch Verluste im Transformator entstandene Wärme abzuführen, muss SF_6 mit sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten durch die Kühlkanäle der Wicklung geführt werden. Bei einem 300-MVA/275-kV-Transformator beträgt der notwendige Durchsatz bei 0,5 MPa rund 120 m³ pro Minute. Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten des SF_6-Gases und der damit verbundene hohe Geräuschpegel geben allerdings noch zu Bedenken Anlass.

Neue Möglichkeiten, langsam strömende organische Flüssigkeiten auf PFC- und DT-Basis als Ölersatz zu verwenden, werden untersucht. PFC konnte bereits in einem Prototyptransformator von 100 MVA/275 kV erprobt werden [17]. DT hat eine hohe Zündtemperatur von 545 °C und eine niedrige kinematische Viskosität, kombiniert mit hohen Wärmeleitzahlen. Sie ist unter Luftausschluss stabil, altert bis 150 °C nicht, hat aber einen unangenehmen Geruch, so dass DT in hermetisch geschlossenen Räumen und Behältern gespeichert werden muss. Selbstzündung infolge Kurzschlüssen kommt nicht vor. Die beschriebenen organischen Wärmeträger eignen sich vortrefflich als Ersatz für Mineralöle.

Literatur

[1] *E. Takahashi* et al.: Development of Large Capacity Gas Insulated Transformers. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 895 to 901.

[2] *D. van Leyen:* Wärmeübertragung. Siemens Publ. 1971.

[3] *W. H. McAdams:* Heat Transmission. McGraw Hill, 3rd ed., 1954, New York.

[4] Transformer Research Subcommittee Japan: Current State and Future Trends of Nonflammable and Flame Resisting Transformers. Technical Report IEE of Japan, No. 459, 1991.

[5] PCF Manual: Fluorinert Liquids Chemical Products. 3M Publication, 1994, St-Paul MN.

[6] *H. Brechna:* Aspects of Modern Transformer Insulation. Seminar Lecture Yunan, China, Jan. 17 to 18, 1996.

[7] *K. Mizuno* et al: Commercialization of an Extra High Voltage Non Flammable Transformer. IEE Vol. 116, No. 5, 1996, pp. 97–106.

[8] *H. P. Moser* und *V. Dahinden:* Transformerboard II. Styria, Graz, 1987.

[9] *Y. Mukayama* et al.: Development of a Perfluorocarbon Liquid Imersed Prototype Large Power Transformer with Compressed SF_6 Gas Insulation. IEEE PWRD, Vol. 6, No. 3, 1991, pp. 1108–1116.

[10] VDI Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 4. Auflage, 1984. Ha.1-Hbd.12.

[11] *M. Nagata* et al.: Breakdown Characteristics of SF_6 at High Temperatures. IEE Conf. Publ. 189, pp. 78–81, 1980.

[12] Solvay: Fluor und Derivate, GmbH. Hannover, Germany, 1990.

[13] *A. Hartwig:* 50-Hz-Durchschlagsspannung von SF_6 im homogenen Feld. ETZ-Beiheft 3, 1966.

[14] *G. Biasiutti* und *W. Zaengl:* Neue Isoliergase für die Hochspannungstechnik, Untersuchungen im homogenen Feld. Bull. SEV/VSE 74(1983)3, S. 140 bis 147.

[15] *G. Biasiutti:* Neue Isoliergase für gekapselte Hochspannungsanlagen. Diss. ETH, 7683, 1985. Huber Druck AG, Entlebuch.

[16] *T. Aschwanden:* Die Ermittlung physikalischer Entladungsparameter in Isoliergasen und Isoliergasgemischen mit einer verbesserten Swarm-Methode. Diss. ETH, No. 7931, 1985, Huber Druck AG, Entlebuch.

[17] *I. Tokagaki* et al.: Basic Characteristics of Per Fluor Carbon for Large Power Transformers. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 8, pp. 1809–1825, Oct. 1988.

[18] *M. Pompili* et al.: A New Familiy of Electrical Insulating Fluids: Per Fluorinated Polyethers. ETEP, Vol. 4, No. 2, March/April 1994, pp. 163–168.

[19] Bayer AG Product Information: Diphyl DT. Organischer Wärmeträger für ein breites Temperatur-Spektrum. OC. 21866, Bayer AG, Leverkusen, 1996.

[20] *J. Samat* and *D. Lacaze:* Micro Particles in Transformer Oil and Dielectric Withstand Effects. Alsthom Rev. No. 11, 1988, pp. 47–57.

[21] *P. J. Sintz:* Der Einfluss von Feuchte und Partikeln auf die elektrische Festigkeit von Isolierölen. Diss. TU., Graz, 1990.

[22] *A. Sierota* and *J. Rungis:* Electrostatic Charging in Transformer Oils. Testing and Assessment. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulations, Vol. 1, No. 5, Oct. 1994, pp. 840–870.

[23] *G. L. Lamesh* and *G. Praxl:* Measurement of the Electrostatic Charging Tendency of Solid/Liquid Insulation Materials. 9th International Symposium of High Voltage Engineering, Graz, Aug./Sept. 1995, pp. 1006-1–1006-4.

[24] *L. G. Christopherou:* High Voltage Research of Gases and Environmental Effects of Dielectric Gases. ORNL./TM 6902, 1979.

[25] *M. Piemontesi:* Private communication. Electric Power Transmission and High Voltage Laboratory, ETH Zurich, Sept. 1996.

[26] *L. G. Christopherou* et al.: SF_6/N_2 Mixtures: Basic and H. V. Insulation Properties. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulations, Vol. 2, No. 5, pp. 952–1015, 1995.

[27] *M. K. W. Ko* et al.: Atmospheric Sulfur Hexafluoride: Sources, Sinks and Greenhousewarming. J. Geophys. Res. 98, 10. 499–10.057 (1993).

[28] *J. Elkins:* US Environmental Protection Agency's Sulfur Hexafluoride Conference. Washington D.C., 9–10 August 1995.

[29] *W. Bender* und *K. Elgeti:* Berechnung der Lebensdauer organischer Wärmeträger in technischen Anlagen. Chem. Ing. Techn. 46, No. 5, 213, 1974.

[30] *J. Singh:* Selecting Heat Transfer Fluids for High Temperature Service. Chem. Engineer, pp. 52–58, June 1, 1981.

Fluides isolants et réfrigérants pour transformateurs de puissance

Le risque qu'un court-circuit provoque un incendie dans un transformateur de puissance rempli d'huile minérale est certes minime, il peut cependant éveiller des inquiétudes dans des zones urbaines à dense population. L'utilisation du PCB en vue d'élever la température d'inflammation s'est révélée être une erreur. Depuis quelque temps, on installe de plus en plus souvent, dans les sous-stations, des transformateurs de puissance isolés et refroidis aux gaz SF_6 ou aux liquides PFC. L'article donne un aperçu des fluides isolants et réfrigérants entrant en considération pour les transformateurs de puissance et en examine les avantages et les inconvénients. Il présente également les possibilités d'utilisation des liquides caloporteurs organiques ou cryogéniques (azote liquide) dans les transformateurs.

ETG SEV/ASE

Kennen Sie die ETG?

Die Energietechnische Gesellschaft des SEV (ETG) ist ein *nationales Forum* zur Behandlung aktueller Probleme der elektrischen Energietechnik im Gesamtrahmen aller Energieformen. Als *Fachgesellschaft des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins* (SEV) steht sie allen interessierten Fachleuten und Anwendern aus dem Gebiet der Energietechnik offen.

Auskünfte und Unterlagen erhalten Sie beim Schweizerischen Elektrotechnischen Verein, Luppmenstrasse 1, 8320 Fehraltorf, Telefon 01 956 11 11.