

Beurteilung der Überlastbarkeit von Transformatoren mit online Monitoringsystemen

Von Stefan Tenbohlen, Mönchengladbach, Michael Schäfer, Stuttgart, und Hans Matthes, Lübeck

Ist die Überlastung eines Transformators im Energieversorgungsnetz notwendig, muß sichergestellt werden, daß er keine vorzeitige thermische Alterung erfährt. Um dies zu gewährleisten, kann bei einem mit einem Monitoringsystem ausgerüsteten Transformator die aktuelle Überlastbarkeit online berechnet werden. Das in der Software des Monitoringsystems implementierte thermische Modell errechnet die maximal mögliche Dauerlast bei den aktuellen Umgebungsbedingungen und die mögliche Zeit, die der Transformator bei einer vorwählbaren Überlast im Notbetrieb gefahren werden kann.

Summary of the report

Assessment of overload capacity of power transformers by use of on-line monitoring systems

Overloading of transformers can become necessary in open electricity markets due to economic reasons or simply to ensure continuous energy supply. During an overload cycle accelerated ageing and damages have to be strictly avoided. In order to control overload cycles intelligent on-line-monitoring systems are needed. In this contribution the on-line calculation of the overload capacity and the integration in the monitoring system MS 2000 based on field bus technology are described. By measurement of environmental and loading conditions it delivers continuously information on the maximum continuous and short time overload considering the actual preload of the transformer according to IEC 354.

1 Einführung

Mit der Öffnung der Strommärkte finden die Betreiber von Energieversorgungsnetzen neue Betriebsbedingungen vor. Durchleitungen und veränderte Lastzyklen können zu bisher nicht vorgesehenen Lastflüssen führen. Eine möglichst hohe Ausnutzung eines Netzes, und damit jedes Betriebsmittels, gewinnt aus Kostengründen an Bedeutung. Eine Gefährdung der Betriebsmittel soll jedoch aus Gründen der Versorgungssicherheit vermieden werden. Bei diesen Überlegungen kann die kontrollierte Überlastung von Betriebsmitteln, wie zum Beispiel von Transformatoren, einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber einem Netzausbau bringen. Ausgehend von fest definierten thermischen Grenzströmen lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Überlastungen unterscheiden [1]. Überlastungen, die mit einer höheren Leitertemperatur als dem Bemessungswert einhergehen, führen zu einer stark beschleunigten Alterung der Isolation und sollten deshalb nur in Notfällen, wie zum Beispiel zur Verhinderung eines Netzzusammenbruchs, zugelassen werden. Betriebszustände, bei denen zwar ein Strom oberhalb des thermischen Bemessungsstromes fließt, aufgrund günstiger äußerer Bedingungen je-

doch keine höhere Leitererwärmung auftritt als die bei Nennbedingungen zugelassene Temperatur, können einem Transformator zugemutet werden. Um unzulässige Betriebszustände zu vermeiden, ist in beiden Fällen jedoch eine genaue Überwachung notwendig. Überwachungseinrichtungen, die diese Aufgabe übernehmen können, stehen mit modernen Monitoringsystemen zur Verfügung [2].

2 Überlastrechnung

2.1 Einkörper-Ersatzschaltbild des Transformators

Das thermische Verhalten des gesamten Transformators läßt sich mit Hilfe eines Einkörper-Ersatzschaltbildes darstellen. Die Verluste, die im Aktivteil in Form von Wärme anfallen, werden hier als Stromquelle zusammengefaßt. Im stationären Zustand werden die anfallenden Verluste vollständig über die Kühlanlage an die Umgebung abgeführt. Treten jedoch zeitlich veränderliche Wärmeströme oder starke Schwankungen der Umgebungstemperatur auf, so muß zusätzlich die Wärmekapazität des Transformators berücksichtigt werden.

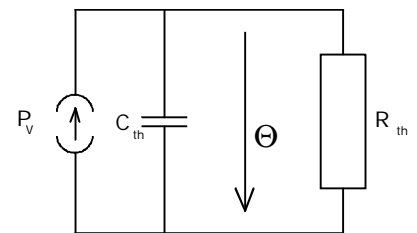


Bild 1: Einkörper-Ersatzschaltbild eines Transformators

Die an der Parallelschaltung der Kapazität C_{th} und dem Wärmewiderstand R_{th} abfallende Temperatur entspricht der Übertemperatur des Öls im Transformator. Die Neutrale der Schaltung befindet sich auf dem Potential der Umgebungstemperatur. Nach dieser Schaltung gilt für die Sprungantwort des Temperaturabfalls am Wärmewiderstand R_{th} :

$$\Theta(t) = P_v \cdot R_{th} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

*) St. Tenbohlen, Alstom Schorch Transformatoren GmbH Mönchengladbach; M. Schäfer, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart; H. Matthes, PreussenElektra Netz GmbH u. Co. KG, Lübeck

$$\text{mit } t = R_{th} \cdot C_{th} \quad (1)$$

In einem Transformator werden Materialien in unterschiedlichen Mengen und mit verschiedenen spezifischen Wärmekapazitäten verwendet. Da im vorliegenden Ersatzschaltbild der ganze Transformator als ein Körper behandelt wird, muß die Wärmekapazität des gesamten Transformators aus den Wärmekapazitäten und den Massen der einzelnen Komponenten gebildet werden.

$$C_{th} \approx c_{Cu} \cdot m_{Cu} + c_{Fe} \cdot m_{Fe} + c_{Oel} \cdot m_{Oel} \quad (2)$$

Die Kühlleistung wird vom Hersteller für einen bestimmten Betriebspunkt angegeben. Ausgehend von diesen Angaben kann die Kühlleistung für andere Umgebungstemperaturen und Öltemperaturen berechnet werden. Man erhält für den thermischen Widerstand der gesamten Kühlanlage mit Kessel:

$$R_{th} = \left[\frac{P_{kue,n}}{J_{Oel_ein,n} - J_{Luft_ein,n}} + O_K \cdot a_K \right]^{-1} \quad (3)$$

Beim Betrieb eines Transformators entstehen in den einzelnen Bauteilen Verluste, die zur Erwärmung des Aktivteils führen. Die Verluste können in stromabhängige und stromunabhängige Verluste eingeteilt werden. Die stromunabhängigen Verluste P_0 setzen sich im wesentlichen aus den Ummagnetisierungsverlusten des Eisenkerns, den magnetischen Abschirmungen und Wirbelstromverlusten im Eisen zusammen. Zu den stromabhängigen Verlusten P_k gehören die ohmschen Verluste in den Wicklungen sowie Zusatzverluste durch Wirbelströme im Wicklungskupfer.

$$P_V = P_{k,n} \left[\frac{I}{I_n} \right]^2 + P_0 \quad (4)$$

2.2 Verfahren zur Berechnung der Überlastfähigkeit

2.2.1 Dauernde Überlastung

Eine dauerhafte Überlastung bedeutet, daß die Überlastungsdauer mindestens fünf mal größer ist als die aus der Wärmekapazität und dem thermischen Widerstand der Gesamtkühlanlage bestimmte thermische Zeitkonstante des Transformators. Diese Zeitkonstante liegt bei Großtransformatoren im Bereich einiger Stunden. Gesucht ist nun der Laststrom, mit dem der Transformator belastet werden kann, damit die Heißpunkttemperatur ϑ_h 120°C beträgt [1]. Die Heißpunkttemperatur setzt sich aus der Umgebungstemperatur ϑ_{Luft} , der oberen Ölüber Temperatur und dem mit dem Faktor h gewichteten Temperaturabfall an der Wicklungsisolierung (Kupfersprung) zusammen. Die Umgebungstemperatur ϑ_{Luft} liegt als Meßwert vor. Die obere Ölüber Temperatur (gemäß Gl.1 berechnet) und der Kupfersprung Θ_{Cu_Oel} hängen dagegen vom momentanen Belastungsstrom I des Transformators ab.

$$J_h = J_{Luft} + (P_{k,n} \cdot \left[\frac{I}{I_n} \right]^2 + P_0) \cdot R_{th} + h \cdot \left[\frac{I}{I_n} \right]^y \cdot \Theta_{Cu_Oel,n} \quad (5)$$

P_0 , $P_{k,n}$, R_{th} , $\Theta_{Cu_Oel,n}$ und der Heißpunktfaktor h sind mit der Bauart des Transformators vorgegeben oder können aus der Erwärmungsmessung ermittelt werden. Der Strom I , mit dem der Transformator bei den gegebenen Umgebungsbedingungen dauernd belastet werden kann, läßt sich für OD-gekühlte Transformatoren durch Auflösen der Gleichung nach I berechnen.

$$I = I_n \cdot \sqrt{\frac{J_h - J_{Luft} - P_0 \cdot R_{th}}{P_{k,n} \cdot R_{th} + h \cdot \Theta_{Cu_Oel,n}}} \quad (6)$$

Wichtig bei dieser Form der Überlastung ist, daß hohe Belastungsphasen mit schneller Alterung durch Zeiten mit kleiner Last und langsamer Alterung langfristig ausgeglichen werden.

Man beachte, daß sich bei der in der IEC 354 vorgeschlagenen höchsten Heißpunkttemperatur von 120°C eine Alterungsrate von 12 einstellt, so daß die kontinuierliche Überwachung des Transformators und seiner Alterung notwendig ist, um unzulässige Betriebszustände zu erkennen. Die Belastungsgrenzen, die durch Anbauteile, wie zum Beispiel den Durchführungen und dem Stufenschalter gesetzt sind, dürfen ebenfalls nicht aus dem Auge verloren werden.

2.2.2 Kurzzeitiger Notbetrieb

Der kurzzeitige Notbetrieb stellt eine ungewöhnlich schwere Belastung für den Transformator dar und wird durch das Auftreten eher unwahrscheinlicher Ereignisse verursacht. Für diesen Überlastbetrieb von maximal einer halben Stunde können Ströme bis 1,5 I_N und eine Heißpunkttemperatur von maximal 140°C bei OD-gekühlten Transformatoren zugelassen werden [3]. Um die Zeit zu ermitteln, die ein Transformator mit dieser Überlast betrieben werden kann, muß die Wärmekapazität des Gerätes in die Betrachtungen miteinbezogen werden.

Aus den bei dem gewünschten Überlastfaktor anfallenden Gesamtverlusten und dem thermischen Widerstand der Kühlanlage wird der stationäre Endwert der Heißpunkttemperatur $\vartheta_{h,\infty}$ gemäß Gleichung 5 bestimmt. Da sich das Öl innerhalb der Wicklung eher mit der Zeitkonstanten der Wicklung (einige Minuten) als mit der größeren Zeitkonstanten des gesamten Kessels ändert, muß hier die Zeitkonstante τ_h angepaßt werden (Zweikörper-Ersatzschaltbild).

$$J_h(t) \approx (J_{h,\infty} - J_{h,akt}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_h}} \right) + J_{h,akt} \quad (7)$$

Wichtige Voraussetzung für die Berechnung der Überlastzeitdauer ist die exakte Bestimmung der Heißpunkttemperatur $\vartheta_{h,akt}$ des Transformators bei Beginn der Überlastung. Dazu wird die aktuelle Heißpunkttemperatur ständig durch das Monitoringsystem iterativ mitgeführt. Die Zeit t bis zur Erhitzung des Transformators von

Umgebungstemperatur auf eine bestimmte Heißpunkttemperatur erhält man durch Auflösen von (Gl. 7) nach der Zeit.

$$t = -t_h \cdot \ln \left(1 - \frac{140^\circ\text{C} - J_{h,akt}}{J_{h,\infty} - J_{h,akt}} \right) \quad (8)$$

3 Einsatz der Überlastprognose im Monitoringsystem

Um eine zuverlässige und kostengünstige Versorgung mit elektrischer Energie zu gewährleisten, bietet sich ein modernes Betriebsmittel-Monitoring insbesondere beim Einsatz an Leistungstransformatoren an. Durch die kontinuierliche Überwachung mit einem Monitoringsystem lassen sich exakte Aussagen über den Betriebszustand des Transformators machen und so, wie hier durch die Überlastprognose beschrieben, die Betriebsführung optimieren. Weiter lassen sich durch eine frühzeitige Erkennung Fehler vermeiden und es kann dann von der zeitbezogenen zu einer zustandsbezogenen Instandhaltung übergegangen werden. Durch Kenntnis der Lebensgeschichte und des momentanen Zustandes des Transformators läßt sich eine hohe und kontrollierte Ausschöpfung der Restnutzungsdauer erreichen und im Bedarfsfall Hinweise geben, durch gezielte Eingriffe die Nutzungsdauer zu verlängern (Life-Management). Wird das Monitoringsystem auch für eine intelligente Steuerung der Kühlanlage eingesetzt, ergeben sich verschiedene weitere Vorteile:

- Durch Vorkühlung des Öls kann die kurzzeitige Überlastbarkeit erhöht werden,
- Durch Optimierung der Heißpunkttemperatur Verringerung des Lebensdauerverbrauchs (Life-Management),
- Verringerung der Atmung des Transformators durch eine konstantere Öltemperatur,
- Senkung des Schallpegels durch Einzelschaltung der Lüfter.

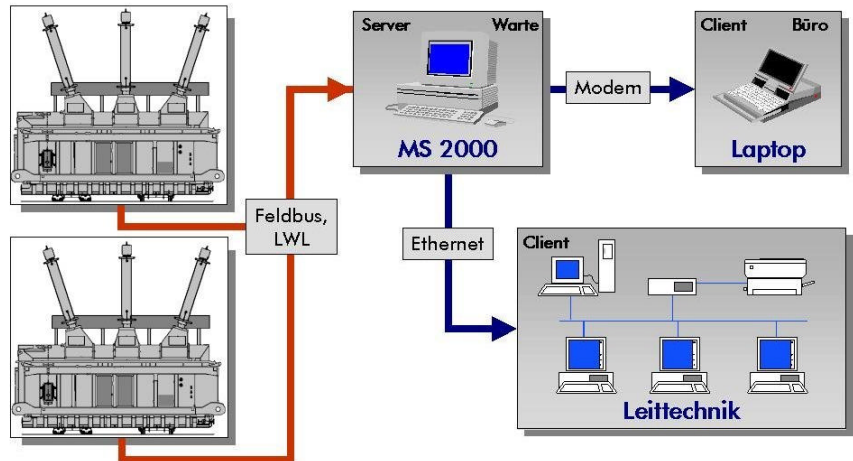


Bild 2: Architektur des Monitoringsystems MS 2000

3.1 Systembeschreibung

Kennzeichen für die Güte eines Monitoringsystems sind hohe Modularität und Flexibilität, da die unterschiedlichen Typen und Aufstellungsarten von Transformatoren immer eine Adaption des System auf die projektspezifischen Anforderungen notwendig macht. Wegen seiner Flexibilität kann das Monitoringsystem MS 2000 einfach auf die Notwendigkeiten des zu überwachenden Transformators und die Wünsche des Nutzers zugeschnitten werden. Zur online Überwachung können eine Vielzahl von Meßgrößen erfaßt wer-

den. Das gesamte Spektrum in vollem Umfang an einem Transformator einzusetzen ist jedoch sehr aufwendig und nur in Einzelfällen sinnvoll. Daher muß die Sensorik an die speziellen Erfordernisse eines bestimmten Transformators abhängig von dessen Alter, Zustand und Wichtigkeit angepaßt werden [4].

Durch den Einsatz der Feldbustechnik läßt sich eine hohe Flexibilität der Architektur des Monitoringsystems erreichen [2]. So wird einerseits der Verdrahtungsaufwand am einzelnen Transformator minimiert, da anstatt vieler Einzelleitungen nur ein Buskabel verlegt werden muß. Dies ist ganz besonders für die schnelle und einfa-

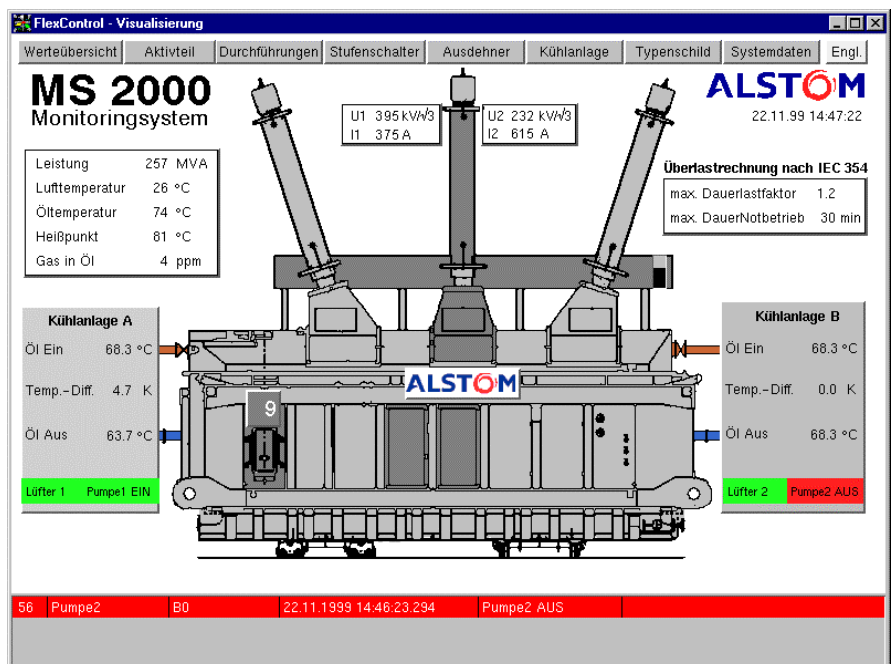


Bild 3: Online - Übersichtsbild des Transformators mit Angabe der aktuellen Überlastbarkeit

che Nachrüstung von in Betrieb befindlichen Transformatoren wichtig. Andererseits wird die Überwachung einer kompletten Transformatorbank mit einem Monitoringsystem ermöglicht, indem die verschiedenen Überwachungsmodule an den einzelnen Transformatoren durch einen Lichtwellenleiter miteinander verbunden werden (**Bild 2**). Über einen Steuerungs-PC können so mehrere Transformatoren überwacht werden, was einen verringerten Aufwand an Hard- und Software bedeutet. Wird der Steuerungs-PC in einem Betriebsgebäude der Schaltanlage aufgestellt, kann der aufwendige Schaltschrank mit Klimatisierung entfallen.

Zur einfachen Zustandsdiagnose werden in einem Übersichtsbild die wichtigsten Kenndaten des Transformators dargestellt (**Bild 3**). Durch Anwahl der verschiedenen Baugruppen des Transformators, wie Aktivteil, Durchführungen, Kühlanlage, Ausdehner und Stufenschalter, erhält der Nutzer detailliertere Informationen zum aktuellen Zustand der Baugruppe gemäß den Empfehlungen der DVG [5].

Für die Erweiterung des Monitoringsystems um die beschriebene Überlastrechnung und einer intelligenten Kühlanlagensteuerung wird ein in der Software enthaltener Rechenserver (Soft-SPS) eingesetzt. So können komplexe Berechnungen und Steuerungsabläufe in einer nach IEC1131-3 standardisierten Programmiersprache implementiert werden. Als trafospezifische Konstanten werden die Konstruktionsdaten (Wärmekapazität und thermischer Widerstand) und die im Prüffeld ermittelten Werte für Kupfersprung, Leerlauf- und Kurzschlußverluste eingegeben. Verändern sich die der Berechnung zugrunde gelegten Eingangsgrößen, (Umgebungstemperatur, Öltemperatur oder Laststrom), werden die Ausgangsgrößen neu berechnet. Visualisiert werden die maximal zulässige Dauerlast bei einer höchsten Öltemperatur von 105°C und einer Heißpunkttemperatur von 120°C, als auch die maximale Zeitdauer für den Notbetrieb bei einer Last von 1,5, 115°C Öltemperatur und 140°C Heißpunkttemperatur. Es können zusätzlich die aktuelle, relative

Alterungsrate und die über 30 Tage gemittelte Alterungsrate zur Information über den Lebensdauerverbrauch abgelesen werden.

3.2 Überlastrechnung an einem 250 MVA Netzkuppeltransformator

Das oben beschriebene Verfahren wurde beispielhaft an einem 250 MVA Netzkuppelumspanner angewendet. Die maximal mögliche Dauerlast des Umspanners bei Nennbetrieb der Kühlanlage wurde in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur gemäß dem oben beschriebenen Verfahren bestimmt und ist in **Bild 4** dargestellt. Durch die niedrige Umgebungstemperatur erreicht der maximale Dauerlastfaktor die vorgegebene Grenze von 1,3. Hier wäre also unter Beachtung der oben gemachten Anmerkungen eine dauernde Überlastung möglich.

Die gemäß Gleichung 1 und Berücksichtigung der thermischen Zeitkonstante berechnete Öltemperatur zeigt eine gute Übereinstimmung mit der im Deckel gemessenen Öltemperatur. Nur in Bereichen mit starker Schwankung von Umgebungstemperatur oder Belastung kommt es auf Grund des dynamischen Temperaturverhaltens zu geringen Abweichungen von etwa 2 Kelvin. So ist das beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Öltemperatur für OD-gekühlte Transformatoren bestätigt.

Im vorliegenden Fall würde die Zeit bis zum Erreichen der Grenzwerte bei einem Lastfaktor von 1,5 (Notbetrieb) erheblich größer als die erlaubten 30 Minuten sein. Hier ist aber zu berücksichtigen, daß im Notbetriebsfall die Ausgangstemperatur des Transformators wahrscheinlich erheblich größer und daher die Notbetriebsdauer verkürzt ist.

4 Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung spezifischer Transformator Kenndaten kann die Überlastbarkeit von OD-gekühlten Großtransformatoren flexibler als in den Notbetriebsblättern bestimmt werden. In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie in Verbindung mit einem Monitoringsystem ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Überlastbarkeit des überwachten Trafos online mitlaufen und über freie Übertragungskapazitäten informieren kann. Im Überlastfall ist durch das Monitoringsystem die besonders wichtige Überwachung von Öltemperatur, Gas-in-Öl Gehalt und Alterung des Aktivteils gewährleistet. Bei der Anwendung der in IEC 354 empfohlenen Überlastspiele müssen jedoch die trafospezifischen Gegebenheiten, wie Alter, Zustand und Auslegung, in enger Abstimmung zwischen Hersteller und Betreiber berücksichtigt werden. Neben der Fehlerfrüherkennung und der Übergang zur bedarfsorientierten Wartungsplanung liegt der

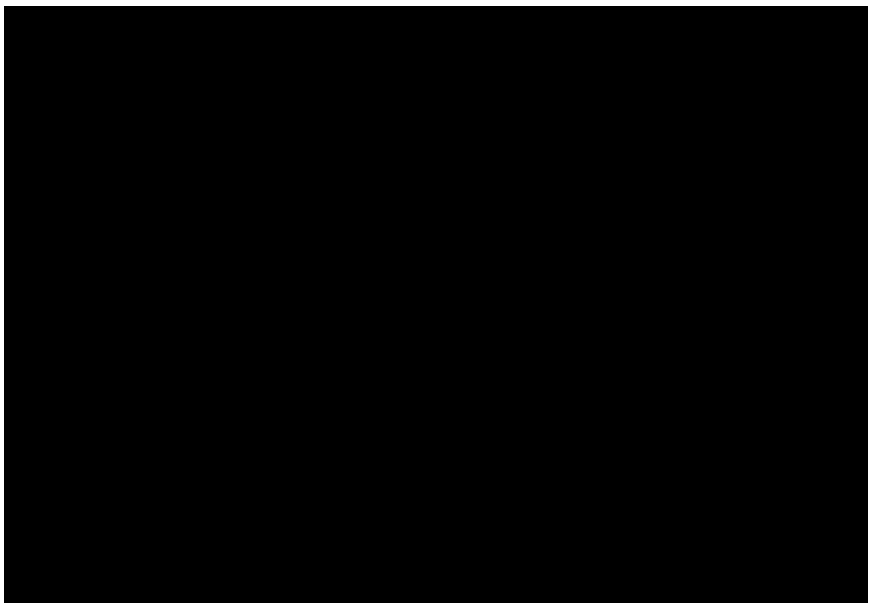


Bild 4: Überlastrechnung an einem 250 MVA Netzkuppelungstransformator

langfristige Nutzen des beschriebenen Monitoringsystems in der Möglichkeit Grenzsituationen im Netzbetrieb, einhergehend mit der Überlastung von Betriebsmitteln, sicher zu beherrschen.

5 Literatur

[1] **IEC 354:** Loading guide for oil immersed power Transformers, IEC 1991

[2] **S. Tenbohlen, L. Wendrich, T. Rappenecker:** Mit Felddbus und Prozeßleittechnik Transformatoren überwachen, etz Elektrotechnik + Automation 22/1998, S. 26-30

[3] **H. Vosen:** Kühlung und Belastbarkeit von Transformatoren, VDE-Schriftenreihe 72, VDE-Verlag 1997, S. 133

[4] **U. Sundermann, S. Tenbohlen:** Der intelligente Transformator - Zu-

standserfassung und Diagnose von Leistungstransformatoren, Elektrizitätswirtschaft Jg. 97 (1998), H. 10, S. 48-56

[5] **Deutsche Verbundgesellschaft:** Empfehlungen der Verbundunternehmen für Monitoringsysteme an Großtransformatoren, Heidelberg, 1998



TRANSMISSION & DISTRIBUTION ALSTOM Schorch Transformatoren GmbH
Rheinstr. 73, D-41065 Mönchengladbach, Tel: +49(0)2161-944-0, Fax: +49(0)2161-944-591, email:schorch.alstom@tde.alstom.com