

(19)



REPUBLIK  
ÖSTERREICH  
Patentamt

(10) Nummer:

**AT 407 206 B**

(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 828/98  
(22) Anmeldetag: 14.05.1998  
(42) Beginn der Patentdauer: 15.05.2000  
(45) Ausgabetag: 25.01.2001

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: **H01F 27/40**

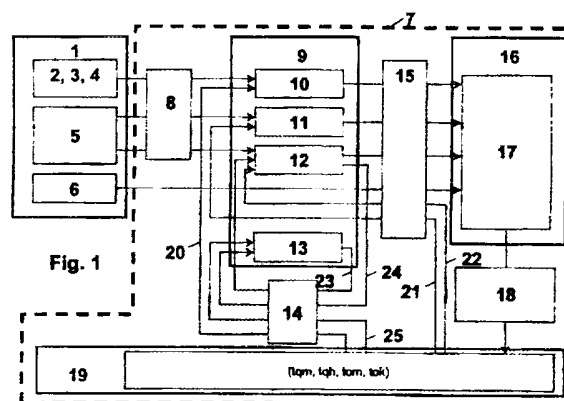
(56) Entgegenhaltungen:  
US 4623265A US 4754405A SU 1742750A  
WO 88/04488A1

(73) Patentinhaber:  
VA TECH ELIN TRANSFORMATOREN GMBH  
A-8160 WEIZ, STEIERMARK (AT).

## (54) VERFAHREN UND ANORDNUNG ZUR ERMITTLUNG VON ZUSTANDSGRÖSSEN

AT 407 206 B

(57) Bei einem Verfahren zur Ermittlung von Temperaturen (tqm, tqh, tom, tok) in einem ölgekühlten Transformator werden die Transformatorklemmenspannungen (2), die Wicklungsströme (3) und die Umgebungstemperatur (6) gemessen. Weiters wird der Status (5) von Lüftern und Pumpen und die Schalterstellung (4) eines Stufenschalters festgestellt. Die gemessenen und festgestellten Größen (2, 3, 4, 5, 6) werden einem thermohydraulischen Modell (7) zugeführt, in dem mit Hilfsgrößen (9), welche Verluste (10) im Transformator, Wärmeübergangsparameter (11), Strömungswiderstände (13) und die Ölströmung (12) sind, und einem hydraulischen Netzwerk des Ölkreislaufes, welches Zweige und Knoten aufweist, Zustandsgrößen (19) berechnet. Die Zustandsgrößen (19) sind die mittleren Temperaturen (tqm) und die Hotspot-Temperaturen (tqh) in verlustzeugenden Transformatorteilen und die mittleren Ötemperaturen in Zweigen (tom) und in Knoten (tok) des hydraulischen Netzwerkes des Ölkreislaufes. Bei einer Änderung der gemessenen und festgestellten Größen (2, 3, 4, 5, 6) werden die Hilfsgrößen (9) entsprechend angepaßt und anschließend die Änderungsgeschwindigkeit der Zustandsgrößen (19) ermittelt und damit neue Zustandsgrößen (19) berechnet. Mit diesem Verfahren werden Temperaturen (tqm, tqh, tom, tok) sowie deren Änderungen im Transformator ohne Temperaturfühler ermittelt, wodurch der optimale Betrieb des Transformators gewährleistet wird, eine Früherkennung von Fehlern und Risiken erfolgen und der optimale Zeitpunkt für Servicearbeiten festgelegt werden kann.



Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von Zustandsgrößen, insbesondere der Temperaturen, in einem ölgekühlten Transformator, bei welchem Eingabegrößen, z.B. Ströme in den Wicklungen, gemessen werden, diese Eingabegrößen einem thermohydraulischen Modell zugeführt werden, mittels unter Zuhilfenahme von Hilfsgrößen, wie z.B. Parameter für den Wärmeübergang, Zustandsgrößen, wie z.B. die Hotspot-Temperaturen in verlust erzeugenden Transformatorteilen, bestimmt werden und diese Zustandsgrößen bei Änderung der Eingangsgrößen neu bestimmt werden.

Transformatoren sind elektrotechnische Geräte, die heute bereits einen sehr hohen Grad an technischer und technologischer Reife erreicht haben. Dennoch sind immer noch Weiterentwicklungen möglich und notwendig, die aber mit entsprechend hohem Aufwand und Risiko, auch in wirtschaftlicher Hinsicht, verbunden sind.

Im derzeit entstehenden Umfeld des freien Austauschs elektrischer Energie über große Entfernungen wird die Frage, wie weit ein Transformator mit Überlast betrieben werden kann, ohne dabei signifikant an Lebensdauer zu verlieren, zunehmend an Bedeutung gewinnen. Daher ist es erforderlich geworden, die Belastung, insbesondere die thermische Belastung des Transformators genauer zu beurteilen.

Ein Verfahren der eingangs genannten Art ist beispielsweise in der US 4,623,265, der WO 88/04488 und der US 4,754,405 beschrieben. Bei diesem bekannten Verfahren wird ausgehend von der Messung des Stromes  $i$  in einzelnen Phasen und der Öltemperatur  $T$  an der Oberfläche unter Heranziehung des Zusammenhanges  $grad T \equiv \Delta T \sim i^2$  die Hot-Oil Temperatur im Inneren des Transformators ermittelt. Der oben angeführte Zusammenhang zwischen Temperatur und Strom stellt jedoch ein stark vereinfachtes thermisches Modell dar, bei welchem die Berechnung der Hot-Oil Temperatur zu sehr ungenauen Ergebnissen und somit zu einer unzureichenden Einschätzung der thermischen Belastung des Transformators führt.

Weiters wird in der SU 1742750 A eine Testeinrichtung für Transformatoren beschrieben, bei welcher Spannungen, Ströme, Frequenzen, Öl- und Umgebungstemperaturen gemessen und mit Standardwerten verglichen werden, aus der Abweichung der Meßwerte von den Standardwerten kann der Zustand des Transformators bestimmt werden. Diese bekannte Vorrichtung, welche ohne eines thermischen Modells arbeitet, kann nur bedingt Information über den Zustand des Transformators liefern und wird daher nur zu Testzwecken unmittelbar nach der Fertigung eingesetzt, um Fertigungsfehler zu erkennen. Für den laufenden Betrieb eines Transformators kann diese bekannte Vorrichtung nicht eingesetzt werden.

Die Aufgabe der Erfindung besteht nun darin, durch Verbesserung des eingangs genannten Verfahrens ein neuartiges Verfahren zu schaffen, das verbesserte Informationen über wichtige Temperaturen, z. B. die Hotspot- und Hot-Oil-Temperaturen, liefert und zusätzlich für Prognose, Simulation und Analyse genutzt werden kann.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, die Eingabegrößen insbesondere die Spannungen an den Transformatorklemmen, die Ströme in den Wicklungen und die Umgebungstemperatur umfassen, dass weiters der Status der Kühlaggregate, welche Lüfter, Pumpen usw. sind, und gegebenenfalls die Schalterstellung eines Stufenschalters od. dgl. festgestellt werden, dass diese Eingabegrößen sowie der Status der Kühlaggregate und gegebenenfalls die Schalterstellung des Stufenschalters dem thermohydraulischen Modell zugeführt werden und dass im thermohydraulischen Modell mit Hilfsgrößen, welche beispielsweise Verluste im Transformator, Parameter für den Wärmeübergang, Strömungswiderstände und die Strömung bzw. Strömungsgeschwindigkeiten im Ölkreislauf sind, und einem hydraulischen Netzwerk des Ölkreislaufes, welches Zweige und Knoten aufweist, Zustandsgrößen berechnet werden, wobei diese Zustandsgrößen vorzugsweise die mittleren Temperaturen und die Hotspot-Temperaturen in verlust erzeugenden Transformatorteilen und die mittleren Öltemperaturen in Zweigen und in Knoten des hydraulischen Netzwerkes des Ölkreislaufes sind und dass bei einer Änderung der Eingabegrößen und/oder des Status der Kühlaggregate und/oder der Schalterstellung des Stufenschalters die Hilfsgrößen entsprechend angepasst werden und anschließend die Änderungsgeschwindigkeit der Zustandsgrößen berechnet wird und damit neue Zustandsgrößen berechnet werden. Es ist mit diesem Verfahren somit erstmals möglich, die Betriebstemperaturen und auch die kritischen Temperaturen sowie deren Änderungen in Teilen des Transformators ohne Temperaturfühler zu ermitteln, wodurch der optimale Betrieb eines Transformators gewährleistet wird, eine Früherkennung von Fehlern und Risiken erfolgen

und der optimale Zeitpunkt für Servicearbeiten festgelegt werden können. Mit dem thermohydraulischen Modell des mit Öl gekühlten Transformators wird das Verhalten der Temperaturen im Kern, den Wicklungen und im Öl, sowohl bei stationären als auch transienten Vorgängen ermittelt. Der Zusatz „hydraulisch“ weist darauf hin, dass auch das hydraulische Verhalten des Öles durch das

5 Modell beschrieben wird.

Vorteilhaft ist eine Ausbildung nach Anspruch 2, da dies die zielführendste Möglichkeit ist, die Änderungsgeschwindigkeit der Zustandsgrößen zu ermitteln.

Durch die Ausbildung nach Anspruch 3 ist es möglich, auf einem Digitalrechner die Leerlaufverluste in den einzelnen Teilen des Kerns direkt aus den Klemmenspannungen zu berechnen.

10 Nach einer Ausführungsvariante gemäß Anspruch 4 werden alle durch die gemessenen Ströme verursachten Erwärmungen von Teilen im Transformator ermittelt.

Durch die Ausbildung nach Anspruch 5 und auch nach Anspruch 6 wird der Einfluss der Schalterstellung auf die Verteilung des magnetischen Hauptflusses, die Verteilung der internen Ströme und auch auf die Werte der ohmschen Widerstände einzelner Wicklungszweige berücksichtigt.

15 Nach einer Ausführungsvariante gemäß Anspruch 7 wird der Einfluss des Betriebszustandes der Lüfter auf die Kühlung beschrieben.

Vorteilhaft ist die Ausgestaltung nach Anspruch 8, da mit dieser Differentialgleichung auf einfache Weise die mittleren Temperaturen in verlust erzeugenden Teilen ermittelt werden.

20 Bei der Ausgestaltung nach Anspruch 9 ist von Vorteil, dass die an das vorbeiströmende Öl abgegebene Verlustleistung, welche in die Differentialgleichung für die mittleren Temperaturen eingeht, mit nur wenigen Rechenoperationen ermittelt wird. Diese Verlustleistung ist immer die für jenen Teil, für den gerade mit der Differentialgleichung die mittlere Temperatur berechnet wird.

Von Vorteil ist auch eine Ausbildung nach Anspruch 10, da die Differentialgleichung für die 25 Hotspot-Temperaturen in den verlust erzeugenden Teilen die gleichen Berechnungsvorgänge wie jene für die mittleren Temperaturen aufweist, können bei einer Lösung dieser Gleichungen auf einem Digitalrechner die gleichen Programmschritte verwendet werden. Die Unterschiede an der Heißstelle gegenüber den Mittelwerten hinsichtlich Verlusterzeugung, Wärmeübergang und Wärmekapazität können trotzdem über die entsprechend Parameter exakt vorgegeben werden.

30 Vorteilhaft ist auch eine Ausgestaltung nach Anspruch 11, für die äquivalent das gleiche gilt wie für die Ausbildung nach Anspruch 10. Auch hier gilt, daß die Verlustleistung immer für jenen Teil ermittelt wird, für den gerade mit der Differentialgleichung die Hotspot-Temperatur festgelegt wird.

Bei der Ausbildung gemäß Anspruch 12 werden mit einer einfachen Differentialgleichung die mittleren Ötemperaturen in Zweigen des hydraulischen Netzwerkes des Ölkreislaufes berechnet.

35 Nach einer vorteilhaften Weiterbildung gemäß Anspruch 13 wird die von jenem Zweig an die Umgebung abgegebene Wärmeleistung ermittelt, für den anschließend mit der Differentialgleichung die mittlere Ötemperatur festgelegt wird.

Von Vorteil ist auch eine Ausbildung nach Anspruch 14, nach der die mittlere Ötemperatur in einem Knoten unter Einbeziehung des Ölflusses ermittelt wird, wobei jener Ölfluß herangezogen 40 wird, der bereits bei der Berechnung der mittleren Ötemperatur durch einen der einmündenden Zweige verwendet wurde.

Die Weiterbildung nach Anspruch 15 ist wegen der vielfach auftretenden nichtlinearen Zusammenhänge und der zum Teil von der Strömungsrichtung des Öles abhängigen Berechnungsmethode der einzelnen Temperaturen unbedingt erforderlich.

45 Vorteilhaft ist auch eine Ausbildung nach Anspruch 16, wobei eine Überprüfung des hydraulischen Netzwerkes durchgeführt wird.

Bei der Weiterbildung nach Anspruch 17 wird laufend der Strömungszustand, beschrieben durch die Zweiggrößen  $p_{hz}$ , der sich im hydraulischen Netzwerk aufgrund von transienten Vorgängen ändern kann, mitberechnet.

50 Von Vorteil ist auch eine Ausbildung nach Anspruch 18 mit der die treibenden Druckdifferenzen in den Strömungszweigen und daraus die Strömungsvektoren in den einzelnen Zweigen ermittelt werden. Die Strömung des Öles im hydraulischen Netzwerk wird bestimmt durch die hydraulischen Widerstände der einzelnen Strömungszweige, durch die Verteilung der Temperaturen des Öles und, sofern vorhanden, durch die Druck- und Strömungscharakteristik von Pumpen.

55 Die Weiterbildung nach Anspruch 19 ist notwendig, da die hydraulischen Widerstände

nichtlinear sind.

Vorteilhaft ist auch eine Ausbildung nach Anspruch 20, durch welche die hydraulischen Widerstände in den Zweigen und Knoten des hydraulischen Netzwerkes bei der Ermittlung der Vektoren der Ölströmung in den Zweigen eingehen.

Die Ausgestaltung nach Anspruch 21 ermöglicht bei der Berechnung der ohmschen und der Wirbelstromverluste in einem verlusterzeugenden Teil bei gegebenem Wicklungsstrom und gegebener Streuflußverteilung auch die Einbeziehung der Temperatur dieses Teiles.

Gemäß Anspruch 22 wird die Temperaturabhängigkeit der Ölströmung im thermohydraulischen Modell berücksichtigt.

Die in Anspruch 23 gekennzeichnete Anordnung zur Durchführung des Verfahrens weist den Vorteil auf, daß dies ein gängiger Personalcomputer ist, bei dem nur die entsprechenden Schnittstellen eingebaut werden müssen. Der Computer sollte mindestens einen heutzutage üblichen Pentium-Prozessor mit sehr hoher Taktfrequenz aufweisen.

Die Erfindung wird im nachfolgenden anhand der in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 die Struktur des thermohydraulischen Modells als Blockschaltbild

Fig. 2 die Struktur des hydraulischen Netzwerkes für das thermohydraulische Modell

Einführend wird festgehalten, daß in den unterschiedlich beschriebenen Ausführungsbeispielen gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen bzw. mit gleichen Bauteilbezeichnungen versehen sind, wobei in der gesamten Beschreibung enthaltenen Offenbarungen sinngemäß auf gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen bzw. gleichen Bauteilbezeichnungen übertragen werden können. Auch sind die in der Beschreibung gewählten Lageangaben, wie z.B. oben, unten, seitlich usw. auf die unmittelbar beschriebene sowie dargestellte Figur bezogen und sind bei einer Lageänderung sinngemäß auf die neue Lage zu übertragen. Weiters können auch Einzelmerkmale oder Merkmalskombinationen aus den gezeigten und beschriebenen unterschiedlichen Ausführungsbeispielen für sich eigenständige, erfinderische oder erfindungsgemäße Lösungen darstellen.

Bei Fig. 1 sind die Eingabegrößen 1 als Block dargestellt, diese sind die Klemmenspannungen 2 am Transformator, die Ströme 3 in den Wicklungen die Schalterstellungen 4 eines Stufenschalters, der Zustand bzw. Status 5 der Kühlaggregate und die Umgebungstemperatur 6 des Transformators. Der Zustand 5 der Kühlaggregate gibt an, wieviele und welche Lüfter in Betrieb sind, sowie deren Drehzahl, wieviele und welche Pumpen eingeschaltet sind und deren Leistungsaufnahme. Im thermohydraulischen Modell 7 bedeutet der Block 8 eine Initialisierung vor einem Neustart des Ablaufes im thermohydraulischen Modell 7, welche entweder bei einer Änderung der Spannung 2, des Stromes 3, der Schalterstellung 4 des Stufenschalters und/oder des Status 5 der Kühlaggregate oder in regelmäßigen Abständen erfolgt. Im Block 9 werden die Hilfsgrößen 9 ermittelt, welche die Verluste 10 im Transformator Kern, in den Wicklungen, in den Hilfsbauteilen, wie Gehäuse, Preßbolzen, usw., die Parameter 11 für den Wärmeübergang, die Strömungswiderstände 13 im Ölkreislauf und die Ölströmung 12 selbst sind. Der Block 15 schematisiert die Berechnung der Differentialquotienten für die Temperaturen  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$ . Der Block 16 - Zustandsgrößenänderung - beschreibt die differentielle Änderung der Temperaturen  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$ . Die numerische Lösung der Differentialgleichungen stellt der Block 18 dar. Im Block 19 sind die Zustandsgrößen 19 der Temperaturen  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  abgespeichert. Der Block 14 repräsentiert eine laufende Parameteranpassung 14 über eine entsprechende Rückkopplung.

Die Rechtecke im hydraulischen Netzwerk des Transformators in Fig. 2 symbolisieren der Reihe nach den Transformator Kern 30, die Niederspannungswicklungen 31, die Stammwicklungen 32, die Grobstufenwicklungen 33, die Feinstufenwicklungen 34, den Transformator Kessel 35 und Kühler 36, 37, 38, insbesondere die Lüfter. Die Kreise und Langkreise sind die Knoten und die Verbindungen zwischen diesen sind die Zweige. Es befindet sich der Knoten 39 im Bodenteil des Transformator Kessels 35, der Knoten 40 den unteren Enden der Wicklungen 31, 32, 33, 34, der Knoten 41 an deren oberen Wicklungsenden und der Knoten 42 im Kessel 35 oberhalb des Transformators. Die Zweige 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 sind die Strömungen durch die Wicklungen 31, 32, 33, 34 mit den Sammel- und Verzweigungsknoten 51, 52, 53, 54. Der Transformator Kern 30 sowie auch der Kessel 35 sind ebenfalls in das hydraulische Netzwerk einbezogen, wobei für den Kern 30 die Zweige 55, 56, 57, 58, 59, 60 und die Knoten 61, 62, 63

und für den Kessel 35 die Zweige 64, 65, 66, 67, 68, 69 und die Knoten 70, 71, 72 vorgesehen sind. Weiters ist die Ölströmung zu und von den Kühlern 36, 37, 38 ebenfalls mit Zweigen 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81 und Knoten 82, 83, 84, 85, 86 dargestellt.

Alle Datenwerte, die im thermohydraulischen Modell 7 verarbeitet werden lassen sich in vier Kategorien einteilen:

- 1) Eingabegrößen 1, welche unter anderem erfaßte Meßwerte 2, 3 sind
- 2) Interne Hilfsgrößen 9
- 3) Zustandsgrößen 19

Dies sind Temperaturen  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$ , die den thermischen Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt vollständig beschreiben.

- 4) Änderungen der Zustandsgrößen 16

Da das Verhalten des Modells 7 durch Differentialgleichungen beschrieben wird, spielen die Änderungen der Zustandsgrößen 19 bzw. deren Änderungsgeschwindigkeit eine wesentliche Rolle.

Die Eingabegrößen 1 sind unmittelbar von Sensoren gemessene Daten, die über Meßwertumsetzer in eine für das Computerprogramm, mit dem das Verfahren realisiert ist, lesbare Form gebracht werden. Dies sind Spannungen 2 an Transformatorklemmen, Ströme 3 in Wicklungen, Schalterstellungen 4 eines Stufenschalters, der Status 5 (ein/aus) von Pumpen und Lüftern und die Umgebungstemperatur.

Die Hilfsgrößen 9 werden zur Ermittlung des Temperaturverhaltens benötigt. Sie haben zum Teil zusätzlich auch informativen Wert für den Transformatorbetreiber. Diese Größen 9 werden aus den Eingabegrößen 1 aus dem momentanen Zustand und aus festen von der Geometrie und von Materialeigenschaften bestimmten Transformatoraten errechnet.

Die Zustandsgrößen 19 bzw. Zustandsgrößenänderungen 16 beschreiben den augenblicklichen Temperaturzustand des Transformators. Dies sind die Temperatur  $t_{qm}$ , welche die mittlere Temperatur verlusterzeugender Teile, wie Kern, Wicklungen, usw., die Temperatur  $t_{qh}$ , welche die Hotspot-Temperatur in verlusterzeugenden Teilen, die Temperatur  $t_{om}$ , welche die mittlere Öltemperatur in den Zweigen z.B. 43, 44 des hydraulischen Netzwerkes und die Temperatur  $t_{ok}$ , welche die mittlere Öltemperatur in den Knoten z.B. 51, 52 des hydraulischen Netzwerkes ist.

Diese Temperaturen  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  liegen zu jedem Zeitpunkt im Modell 7 vor. Die eigentliche Rechenarbeit im Modell 7 betrifft die Änderungen dieser Temperaturen  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$ , daher liegt aus Sicht des Informationsflusses noch die Kategorie Zustandsgrößenänderung 16 zwischen den Hilfsgrößen 9 und den eigentlichen Zustandsgrößen 19.

Auch die Rechenarbeit innerhalb des Modells 7 ist in einzelne Kategorien unterteilt. Das primäre Unterscheidungsmerkmal ist die Häufigkeit, mit der ein bestimmter Algorithmus aktiviert wird. In der Struktur des thermohydraulischen Modells 7 in Fig. 1 ist diese Datenverarbeitung durch jene Rechtecke dargestellt, die von den Datenflüssen durchlaufen werden.

Am wenigsten oft aufgerufen wird die Initialisierung 8. Eine Initialisierung 8 muß prinzipiell nur dann erfolgen, wenn sich irgend ein Wert der Eingabegrößen 1 signifikant ändert.

Praktisch geschieht eine Initialisierung immer am Anfang eines Rechenvorganges, der entweder in regelmäßigen Abständen oder durch die Änderung eines Eingabeparameters 2, 3, 4, 5, 6 ausgelöst wird.

Während der Initialisierung 8 werden aus den Werten von Spannung 2 und Strom 3 die Basisparameter der Verluste 10 ermittelt, ebenso hat die Stellung 4 des Stufenschalters Einfluß auf die Verteilung der Verluste 10 auf die einzelnen Wicklungen 31, 32, 33, 34.

Eine Zu- oder Abschaltung von Lüftern oder Pumpen hat eine Änderung der Wärmeübergangsparameter 11 zur Folge, die ebenfalls im Rahmen der Initialisierung 8 berücksichtigt wird.

Eine weitere Kategorie bei der Rechenarbeit ist die laufende Anpassung 14 von Parametern. Fast alle wesentlichen Parameter des thermohydraulischen Modells 7 sind stark von der Temperatur  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  abhängig. Wenn sich die Temperatur  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  während eines Rechenvorganges ändert, müssen diese Parameter in regelmäßigen Abständen neu berechnet werden. Das betrifft vor allem Strömungswiderstände 13 und die Ölströmung 12, weiters auch die Verluste 10, da sowohl deren ohmscher als auch der Wirbelstromanteil von der Temperatur  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  abhängig ist. Dies ist durch Rückführungen 20, 21, 22, 23, 24, 25 in der Fig. 1 dargestellt.

Der zeitliche Abstand zwischen zwei Parameteranpassungen 14 ist einstellbar, wobei bei großen Systemen ein Kompromiß zwischen maximaler Genauigkeit und ausreichender Rechengeschwindigkeit zu finden ist.

Eine dritte Kategorie ist die Berechnung der Differentialquotienten 15 und die numerische Lösung der Differentialgleichungen 18.

Das ist ein Simulationsprozeß, der den höchsten Anteil an Rechenleistung erfordert. Hier wird in kleinen Zeitschritten, abhängig von den Zeitkonstanten des Modells 7, die zeitliche Änderung aller Zustandsgrößen 19, d.h. aller Temperaturen  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  im Transformator, errechnet.

Die Differentialquotienten ergeben sich aus den physikalischen Gesetzen der Wärmespeicherung und der Wärmeübertragung. Als mathematische Methode für die Lösung der Differentialgleichungen 18 wird ein bekanntes numerisches Verfahren eingesetzt, z.B. die Methode nach Runge-Kutta.

Die gemessenen Klemmenspannungen 2 werden benötigt, um über den magnetischen Hauptfluß den Anteil der Leerlaufverluste 10 in den einzelnen Teilen des Kerns 30 zu ermitteln. Dazu wird eine Zuordnungsmatrix verwendet, die den Zusammenhang zwischen den Klemmenspannungen 2 und dem magnetischen Fluß in den einzelnen Kernteilen beschreibt. Die Verluste 10 werden dann mit Hilfe einer durch wenige Parameter definierte Kennlinie in Abhängigkeit dieses Flusses ermittelt.

Die gemessenen Ströme 3 haben Einfluß auf den ohmschen Anteil der Wicklungsverluste, den Wirbelstromanteil der Wicklungsverluste, der bei der Betrachtung von Heißstellen wesentlich ist, und zusätzliche Streuverluste in inaktiven Teilen, wie Prekonstruktion und Kessel 35.

Bei der Erstellung des Modells 7 werden interne Wicklungszweige definiert, die über eine Strom-Zuordnungsmatrix mit den meßbaren Klemmenströmen 3 verknüpft werden. Grundsätzlich muß bei der Ermittlung des Einflusses der Ströme 3 die gegenseitige Phasenlage der einzelnen Wicklungsströme berücksichtigt werden, was bedeutet, das alle Ströme als Zeiger mit zwei Komponenten darzustellen sind. Das ist bei Transformatoren mit mehr als zwei Wicklungssystemen nicht trivial.

Für die ohmschen Verluste 10 wird für jeden internen Wicklungszweig der Betrag des zugehörigen Stromes ermittelt, mit dem dann über den entsprechenden ohmschen Widerstand die Verluste 10 berechnet werden.

Zur Ermittlung der Wirbelstromverluste in den Wicklungen 31, 32, 33, 34 als auch in den inaktiven Teilen des Transformators muß zunächst die Verteilung des magnetischen Streuflusses aus der Verteilung der Ströme auf die einzelnen Wicklungen 31, 32, 33, 34 abgeleitet werden. Dies erfolgt mit sogenannten Streufluß-Matrizen, die sowohl für die axialen als auch die radialen Komponenten definiert werden müssen. Auch hier ist die Berücksichtigung der Phasenlage wesentlich, weswegen wieder die Zeigerdarstellung mit zwei Komponenten erforderlich ist.

Eine Streufluß-Matrix beschreibt den Zusammenhang zwischen den Strömen in internen Wicklungszweigen und die für die einzelnen verlusterzeugenden Zweige relevanten magnetischen Streuflüsse. Sind die Beträge dieser Streuflüsse bekannt, können über entsprechende Faktoren, die sich aus der Wicklungsgeometrie ergeben, die Komponenten der Wirbelstromverluste berechnet werden.

Die Schalterstellung 4 eines Stufenschalters kann grundsätzlich Einfluß auf die Verteilung des magnetischen Hauptflusses, die Verteilung der internen Ströme und auch auf die Werte der ohmschen Widerstände einzelner Wicklungszweige haben. Dieser Einfluß wird berücksichtigt, indem die entsprechenden Komponenten der oben beschriebenen Zuordnungsmatrizen schalterstellungsabhängig gemacht werden. Zur Berücksichtigung der Änderung ohmscher Widerstände müssen auch die entsprechenden Werte der ohmschen Wicklungswiderstände abhängig von der Schalterstellung sein.

In der praktischen Abwicklung eines Initialisierungs-vorganges 8 heißt das, daß bei jeder Änderung der Schalterstellung 4 die Elemente der Zuordnungsmatrix Klemmenspannung 2 - magnetischer Fluß, der Zuordnungsmatrix Klemmenströme 3 - interne Wicklungsströme und der ohmschen Wicklungswiderstände überprüft und gegebenenfalls geändert werden müssen, bevor die oben beschriebenen Rechenoperationen zur Verlustberechnung 10 durchgeführt werden.

Eine eingeschaltete Pumpe wird berücksichtigt, indem die entsprechende Pumpencharakteristik, das ist der Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausgang der

Pumpe und der Ölströmung durch die Pumpe, in das hydraulische Netzwerk zur Beschreibung der Ölströmung 12 bzw.  $\phi$  bzw.  $phz$  eingebaut ist.

Das Zu- oder Abschalten eines Lüfters hat Einfluß auf einen der Parameter des Wärmeüberganges 11 zwischen Öl und Umgebung. Grundsätzlich enthält jeder Zweig z.B. 73, 76, 81 mit externer Kühlung eine Komponente, die vom Betriebszustand der Lüfter abhängig ist. Der entsprechende Zusammenhang wird durch eine Zuordnungsmatrix zwischen Lüftern und Kühlungszweigen z.B. 73, 76, 81 beschrieben.

Die Umgebungstemperatur 6, welche auch mehrere sein können, hat unmittelbar Einfluß auf den Wärme fluß zwischen einem Zweig z.B. 73, 76, 81 mit externer Kühlung und der Umgebung. Das ist aus der Differentialgleichung für die mittlere Temperatur  $t_{om}$  des Öles in einem Zweig z.B. 73, 76, 81 zu ersehen, wo die Temperaturdifferenz 9 zwischen mittlerer Öltemperatur im Zweig und Umgebungstemperatur unmittelbar in den Ausdruck eingeht.

In der kontinuierlichen Anpassung 14 von Rechenparametern werden im wesentlichen zwei Abhängigkeiten von Hilfsgrößen 9 abgebildet, nämlich die Abhängigkeit der Verluste 10 und der Ölströmung 12 von der Temperatur  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$ . Dies ist durch die Rückführungen 20 und 22 in Fig. 1 dargestellt. Zusätzlich wird das nichtlineare Verhalten der Ölströmung 12 bzw.  $\phi$  bzw.  $phz$  hinsichtlich Druckabfall und Strömungsgeschwindigkeit durch eine entsprechende Rückkopplung 23, 24 von der Ölströmung 12 auf die Hilfsgröße 9 hydraulische Strömungswiderstände 13 nachgebildet.

Sowohl die ohmschen als auch die Wirbelstromverluste sind bei gegebenem Wicklungsstrom und gegebener Streuflußverteilung von der Temperatur  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  der Verlustquelle abhängig. In beiden Fällen ist die Ursache die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes des Leitermaterials, der normalerweise mit zunehmender Temperatur ebenfalls zunimmt. Für die ohmschen Verluste heißt das, daß sie mit zunehmender Temperatur  $t_{qm}$  zunehmen, während die Wirbelstromverluste mit zunehmender Temperatur  $t_{qm}$  abnehmen. In einer Rückführung 20 der Zustandsgrößen 19 Temperatur  $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$  auf die Hilfsgrößen 9 Verluste 10 wird diese Abhängigkeit berücksichtigt.

Die Strömung 12 bzw.  $\phi$  bzw.  $phz$  des Öles in einem gegebenen hydraulischen Netzwerk wird bestimmt durch die hydraulischen Widerstände 13 der einzelnen Strömungszweige z.B. 43, 44, durch die Verteilung der Temperaturen des Öles, und sofern vorhanden durch die Druck-/Strömungscharakteristik von Pumpen.

Im thermohydraulischen Modell 7 erfolgt dies konkret durch die folgende Methode:

Im ersten Schritt wird für jeden Strömungszweig z.B. 43, 44 eine virtuelle treibende Druckdifferenz  $f$  ermittelt. Mit dem ermittelten Vektor  $f$  der treibenden Druckdifferenzen wird dann mit einer Matrixgleichung der Vektor  $\phi$  bzw.  $phz$  der Strömung in den einzelnen Zweigen z.B. 43, 44 berechnet. Die Matrix zur Berechnung des Vektors  $\phi$  bzw.  $phz$  enthält die Information über die hydraulischen Widerstände 13 aller Zweige z.B. 43, 44 und über die Struktur des hydraulischen Netzwerkes.

Es gibt unterschiedliche Typen für hydraulische Widerstände, abhängig von der konkreten Geometrie. So haben z.B. Rohrleitungen eine andere Charakteristik als Strömungsverzweigungen oder Umlenkungen. Unabhängig davon gilt in vielen Fällen, daß der hydraulische Widerstand 13 abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist. Das bedeutet, daß das Ergebnis der Auswertung der Matrixgleichung zur Berechnung des Vektors  $\phi$  bzw.  $phz$  der Strömung, Einfluß auf die dabei verwendete Matrix hat, da darin die Momentanwerte der hydraulischen Widerstände 13 stecken. In weiterer Folge heißt das, daß die Ermittlung der Ölströmungen  $\phi$  bzw.  $phz$  in einem iterativen Prozeß erfolgen muß. Ausgehend von einem Anfangswert  $\phi_0$  für den Vektor  $\phi$  werden hydraulische Widerstände 13 berechnet und damit ein neuer Vektor  $\phi_1$ . Die Differenz zwischen  $\phi_0$  und  $\phi_1$  wird dazu benutzt, einen neuen, verbesserten Wert für  $\phi$  zu berechnen. Dieses Verfahren wird solange fortgesetzt, bis Ausgangswert und Ergebnis mit ausreichender Genauigkeit übereinstimmen.

Die Gesamtheit aller Ölströmungen, dargestellt durch den Vektor  $\phi$ , ist in zweifacher Weise temperaturabhängig:

1) Im Ausdruck für die treibende Druckdifferenz  $f$  ist unmittelbar die mittlere Temperatur  $T$  bzw.  $t_{om}$  des Kühlmediums im Strömungszweig z.B. 43, 44 enthalten.

2) Die Viskosität von Öl, und damit der hydraulische Widerstand 13 eines Strömungszweiges z.B. 43, 44, ist sehr stark von der Temperatur abhängig. In Form einer geeigneten Rückführung 25

der Zustandsgrößen Temperatur tom, tok auf die hydraulischen Widerstände 13 bzw. die Ölströmung 12 sind die beiden obigen Gesetzmäßigkeiten im thermohydraulischen Modell 7 enthalten.

5 Dieses Verfahren zur Ermittlung von Temperaturen und Temperaturänderungen in einem ölgekühlten Transformator, der meistens ein Drehstromtransformator ist, ist ein wesentlicher Teil eines "Transformator-Monitoring"-Systems.

Die den eigenständigen erfinderischen Lösungen zugrundeliegende Aufgabe kann der obigen Beschreibung entnommen werden.

# BEZUGSZEICHENLISTE

10

- |    |   |
|----|---|
| 1  | Eingabegrößen   |
| 2  | Klemmenspannungen am Transformator  |
| 3  | Ströme in den Wicklungen  |
| 15 | 4 Schalterstellungen eines Stufenschalters  |
|    | 5 Status der Kühlaggregate (Lüfter und Pumpen)  |
|    | 6 Umgebungstemperatur des Transformators  |
|    | 7 Thermohydraulisches Modell  |
|    | 8 Initialisierung   |
| 20 | 9 Hilfsgrößen   |
|    | 10 Verluste im Transformatorkern  |
|    | 11 Wärmeübergang bzw. Wärmeübergangsparameter   |
|    | 12 Ölströmung bzw. Strömungsgeschwindigkeiten   |
|    | 13 Strömungswiderstände bzw. hydraulische Widerstände   |
| 25 | 14 Laufende Parameteranpassung  |
|    | 15 Berechnung der Differentialquotienten für die Temperaturen tqm, tqh, tom, tok                    |
|    | 16 Zustandsgrößenänderung   |
|    | 17 Differentielle Änderungen der Temperaturen tqm, tqh, tom, tok                                    |
|    | 18 Numerische Lösung der Differentialgleichungen für die Temperaturen tqm, tqh, tom, tok            |
| 30 | 19 Zustandsgrößen (Temperaturen tqm, tqh, tom, tok)   |
|    | 20, 21, 22, 23, 24, 25 Rückführungen bzw. Rückkopplungen  |
|    | tqm Mittlere Temperatur in verlust erzeugenden Teilen   |
|    | tqh Hotspot-Temperatur in verlust erzeugenden Teilen  |
|    | tom Mittlere Öltemperatur in den Zweigen des hydraulischen Netzwerkes                               |
| 35 | tok Mittlere Öltemperatur in den Knoten des hydraulischen Netzwerkes                                |
|    | 30 Transformatorkern bzw. Kern  |
|    | 31 Niederspannungswicklungen  |
|    | 32 Stammwicklungen  |
| 40 | 33 Grobstufenwicklungen   |
|    | 34 Feinstufenwicklungen   |
|    | 35 Transformatorkessel bzw. Kessel  |
|    | 36, 37, 38 Kühler (Lüfter)  |
|    | 39, 40, 41, 42, 51, 52, 53, 54, 61, 62, 63, 70, 71, 72, 82, 83, 84, 85, 86 Knoten im hydrau-        |
| 45 | lischen Netzwerk  |
|    | 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, |
|    | 78, 79, 80, 81 Zweige im hydraulischen Netzwerk   |

## PATENTANSPRÜCHE:

50

1. Verfahren zur Ermittlung von Zustandsgrößen, insbesondere der Temperaturen, in einem ölgekühlten Transformator, bei welchem Eingabegrößen (1), z.B: Ströme in den Wicklungen, gemessen werden, diese Eingabegrößen einem thermohydraulischen Modell

55

zugeführt werden, mittels unter Zuhilfenahme von Hilfsgrößen, wie z.B. Parameter für den



Wärmeübergang, Zustandsgrößen, wie z.B. die Hotspot-Temperaturen in verlust-  
 zeugenden Transformatorteilen, bestimmt werden und diese Zustandsgrößen bei  
 Änderung der Eingangsgrößen neu bestimmt werden, **dadurch gekennzeichnet, dass** die  
 Eingabegrößen (1) insbesondere die Spannungen (2) an den Transformatorklemmen, die  
 Ströme (3) in den Wicklungen und die Umgebungstemperatur (6) umfassen, **dass** weiters  
 der Status (5) der Kühlaggregate, welche Lüfter, Pumpen usw. sind, und gegebenenfalls  
 die Schalterstellung (4) eines Stufenschalters od. dgl. festgestellt werden, **dass** diese  
 Eingabegrößen (1) sowie der Status (5) der Kühlaggregate und gegebenenfalls die  
 Schalterstellung (4) des Stufenschalters dem thermohydraulischen Modell (7) zugeführt  
 werden **und dass** im thermohydraulischen Modell (7) mit Hilfsgrößen (9), welche  
 beispielsweise Verluste (10) im Transformator, Parameter für den Wärmeübergang (11),  
 Strömungswiderstände (13) und die Strömung bzw. Strömungsgeschwindigkeiten (12) im  
 Ölkreislauf sind, und einem hydraulischen Netzwerk des Ölkreislaufes, welches Zweige  
 (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76,  
 77, 78, 79, 80, 81) und Knoten (39, 40, 41, 42, 51, 52, 53, 54, 61, 62, 63, 70, 71, 72, 82,  
 83, 84, 85, 86) aufweist, Zustandsgrößen (19) berechnet werden, wobei diese Zustands-  
 größen (19) vorzugsweise die mittleren Temperaturen (tqm) und die Hotspot-Tempera-  
 turen (tqh) in verlustzeugenden Transformatorteilen und die mittleren Öltemperaturen in  
 Zweigen (tom) und in Knoten (tok) des hydraulischen Netzwerkes des Ölkreislaufes sind  
 und dass bei einer Änderung der Eingabegrößen (1) und/oder des Status (5) der  
 Kühlaggregate und/oder der Schalterstellung (4) des Stufenschalters die Hilfsgrößen (9)  
 entsprechend angepasst werden und anschließend die Änderungsgeschwindigkeit der  
 Zustandsgrößen (19) berechnet wird und damit neue Zustandsgrößen (19) berechnet  
 werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Änderungsgeschwindig-  
 keit der Zustandsgrößen (19) und die Zustandsgrößen (19) mit Differentialgleichungen  
 berechnet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß mit den gemessenen  
 Spannungen (2) durch eine Zuordnungsmatrix der Zusammenhang zwischen diesen  
 Spannungen (2) und dem magnetischen Fluß in den einzelnen Kernteilen des Transfor-  
 mators ermittelt wird, und daß anschließend mit einer durch Parameter definierten Kenn-  
 linie in Abhängigkeit dieses magnetischen Flusses die Leerlaufverluste ermittelt werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß transforma-  
 torinterne Wicklungszweige definiert werden, die über eine Strom-Zuordnungsmatrix mit  
 den gemessenen Strömen (3), vorzugsweise den Klemmenströmen, verknüpft werden,  
 wobei wegen der Notwendigkeit die Phasenlage zu berücksichtigen alle Ströme (3) als  
 Zeiger mit zwei Komponenten dargestellt werden, und daß für jeden internen Wicklungs-  
 zweig der Betrag des Stromes ermittelt wird, mit dem über den entsprechenden Wider-  
 stand die ohmschen Verluste berechnet werden, und daß mit Matrizen, welche sowohl für  
 axiale als auch für radiale Komponenten definiert werden, aus der Verteilung der Ströme  
 (3) auf die einzelnen Wicklungen (31, 32, 33, 34) die Verteilung des magnetischen  
 Streuflusses und daraus die Wirbelstromverluste in den Wicklungen (31, 32, 33, 34) und  
 den inaktiven Teilen des Transformators ermittelt werden, und daß durch eine Matrix der  
 Zusammenhang zwischen den Strömen in Wicklungszweigen und dem für die verlust-  
 erzeugenden Zweige relevanten magnetischen Streufluß ermittelt wird, und mit Faktoren,  
 die aus der Wicklungsgeometrie ermittelt werden, die Wirbelstromverluste berechnet  
 werden.
5. Verfahren nach den Ansprüchen 3 und 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Matrizen und  
 die relevante Zuordnungsmatrix und ohmschen Wicklungswiderstände schalterstellungs-  
 abhängig ausgeführt sind.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei jeder  
 Änderung der Schalterstellung (4) des Stufenschalters ein Initialisierungsvorgang (8)  
 durchgeführt wird, wobei die Zuordnungsmatrix Spannung - magnetischer Fluß, die Matrix  
 Ströme - interne Wicklungsströme und die ohmschen Wicklungswiderstände überprüft und  
 gegebenenfalls geändert werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Status (5) der Kühlaggregate auf mindestens einen der Parameter des Wärmeüberganges (11) zwischen Öl und Umgebung einfließt und der entsprechende Zusammenhang zwischen Lüftern (36, 37, 38) und Kühlungszeigen (73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) in einer Zuordnungsmatrix ausgedrückt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die mittleren Temperaturen in verlust erzeugenden Transformatorteilen mit der Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} t_{qm} = \frac{V_{ges} - w_{im}}{c_{qg}}$$

berechnet wird, wobei

$t_{qm}$  (°C) die mittlere Temperatur eines verlust erzeugenden Transformatorteiles,

$V_{ges}$  (kW) die Gesamtverluste des verlust erzeugenden Transformatorteiles,

$c_{qg}$  (kWmin/K) die Wärmekapazität des verlust erzeugenden Transformatorteiles und

$w_{im}$  (kW) die von dem verlust erzeugenden Transformatorteil an das vorbeiströmende Öl abgegebene Verlustleistung ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß die an das vorbeiströmende Öl abgegebene Verlustleistung  $w_{im}$  mit der Formel

$$w_{im} = V_{0g} \cdot \left( \frac{g}{g_0} \right)^{xg}$$

berechnet wird, wobei

$V_{0g}$  (kW) Referenzverluste sind,

$g$  (K) die Differenz zwischen der mittleren Temperatur des verlust erzeugenden Transformatorteiles und der mittleren Temperatur des anliegenden Öles, als mittlerer Sprung bezeichnet,

$g_0$  der mittlere Sprung bei stationärem Zustand und den Referenzverlusten und

$xg$  der Exponent für Wärmeübergang zwischen dem verlust erzeugenden Transformatorteil und dem Öl, in Abhängigkeit von Öltemperatur und Ölgeschwindigkeit, ist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Hotspot-Temperaturen in verlust erzeugenden Transformatorteilen mit der Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} t_{qh} = \frac{V_{hot} - w_{ih}}{c_{qh}}$$

berechnet wird, wobei

$t_{qh}$  (°C) die Hotspot-Temperatur eines verlust erzeugenden Transformatorteiles,

$V_{hot}$  (kW) die mit einem „Hotspot-Faktor“ multiplizierten Gesamtverluste des verlust erzeugenden Transformatorteiles,

$c_{qh}$  (kWmin/K) die Wärmekapazität des verlust erzeugenden Transformatorteiles umgerechnet auf die Verhältnisse an der Stelle der maximalen Temperatur und

$w_{ih}$  (kW) die von der heißesten Stelle des verlust erzeugenden Transformatorteiles an das vorbeiströmende Öl abgegebene Verlustleistung ist.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß die von einer Heißstelle an das vorbeiströmende Öl abgegebene Verlustleistung  $w_{ih}$  mit der Formel

$$w_{ih} = V_{0h} \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^{xh}$$

berechnet wird, wobei

$V_{0h}$  (kW) Referenzverluste für die Heißstelle sind,

$h$  (K) die Differenz zwischen der maximalen Temperatur des verlust erzeugenden Transformatorteiles und der Öltemperatur an der heißesten Stelle des Transformatorteiles, als Hotspot-Sprung bezeichnet,

$h_0$  der Hotspot-Sprung bei stationärem Zustand und den Referenzverlusten für die Heißstelle und

xh der Exponent für Wärmeübergang zwischen dem verlustzeugenden Transformatorteil und dem Öl, in Abhängigkeit von Öltemperatur und Ölgeschwindigkeit, ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß die mittleren Öltemperaturen in Zweigen (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) des hydraulischen Netzwerkes des Ölkreislaufes mit der Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} tom = \frac{wim - wam - phz \cdot D}{coel_z}$$

berechnet wird, wobei

tom (°C) die mittlere Öltemperatur in einem Ölströmungszweig,

wim (kW) die von dem verlustzeugenden Transformatorteil an das vorbeiströmende Öl abgegebene Verlustleistung,

wam (kW) die von einem Zweig an die Umgebung abgegebene Wärmeleistung,

phz (kW/K) der Ölfluß durch den Zweig, ausgedrückt in transponierte Wärmeleistung je Grad Temperaturdifferenz zwischen der Öltemperatur von Zweiganfang und Zweigende,

D (K) die Temperaturdifferenz zwischen der Öltemperatur von Zweiganfang und Zweigende und

coel<sub>z</sub> (kWmin/K) die Wärmekapazität des Öles im Strömungszweig ist.

13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß die von einem Zweig (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) an die Umgebung abgegebene Wärmeleistung wam mit der Formel

$$wam = wam0 \cdot \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_0} \right)^{x\vartheta} \cdot fup - VK - sun$$

berechnet wird, wobei

wam0 (kW) der Referenzwert der abgegebenen Wärmeleistung ist,

ϑ (K) die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Öltemperatur im Zweig und der Umgebungstemperatur,

ϑ<sub>0</sub> (K) der Referenzwert für die Temperaturdifferenz ϑ, für den der Wert wam0 definiert ist,

xϑ der Exponent für den Wärmeübergang zwischen dem Öl und der Umgebung, in Abhängigkeit von der Kühlungsart,

fup ein Faktor für den Einfluß der Umgebungstemperatur (6) und gegebenenfalls des Luftdruckes,

VK (kW) die Streuverlustleistung im Kessel, und gegebenenfalls eines Kühlerzweiges, der eine Kesseloberfläche darstellt, und

sun (kW) die Leistung der Sonneneinstrahlung ist.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die mittleren Öltemperaturen in Knoten (39, 40, 41, 42, 51, 52, 53, 54, 61, 62, 63, 70, 71, 72, 82, 83, 84, 85, 86) des hydraulischen Netzwerkes des Ölkreislaufes mit der Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} tok = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} phz_i \cdot T_{eff}}{coel_K}$$

berechnet wird, wobei

tok (°C) die mittlere Öltemperatur in einem Knoten,

n<sub>z</sub> die Anzahl der Zweige, die an diesem Knoten einmünden,

phz (kW/K) der Ölfluß (12) durch einen der einmündenden Zweige,

T<sub>eff</sub> (°C) die Temperatur des Öles an dem mit dem Knoten verbundenen Ende des Zweiges, welche wesentlich von der Strömungsrichtung abhängig ist, und

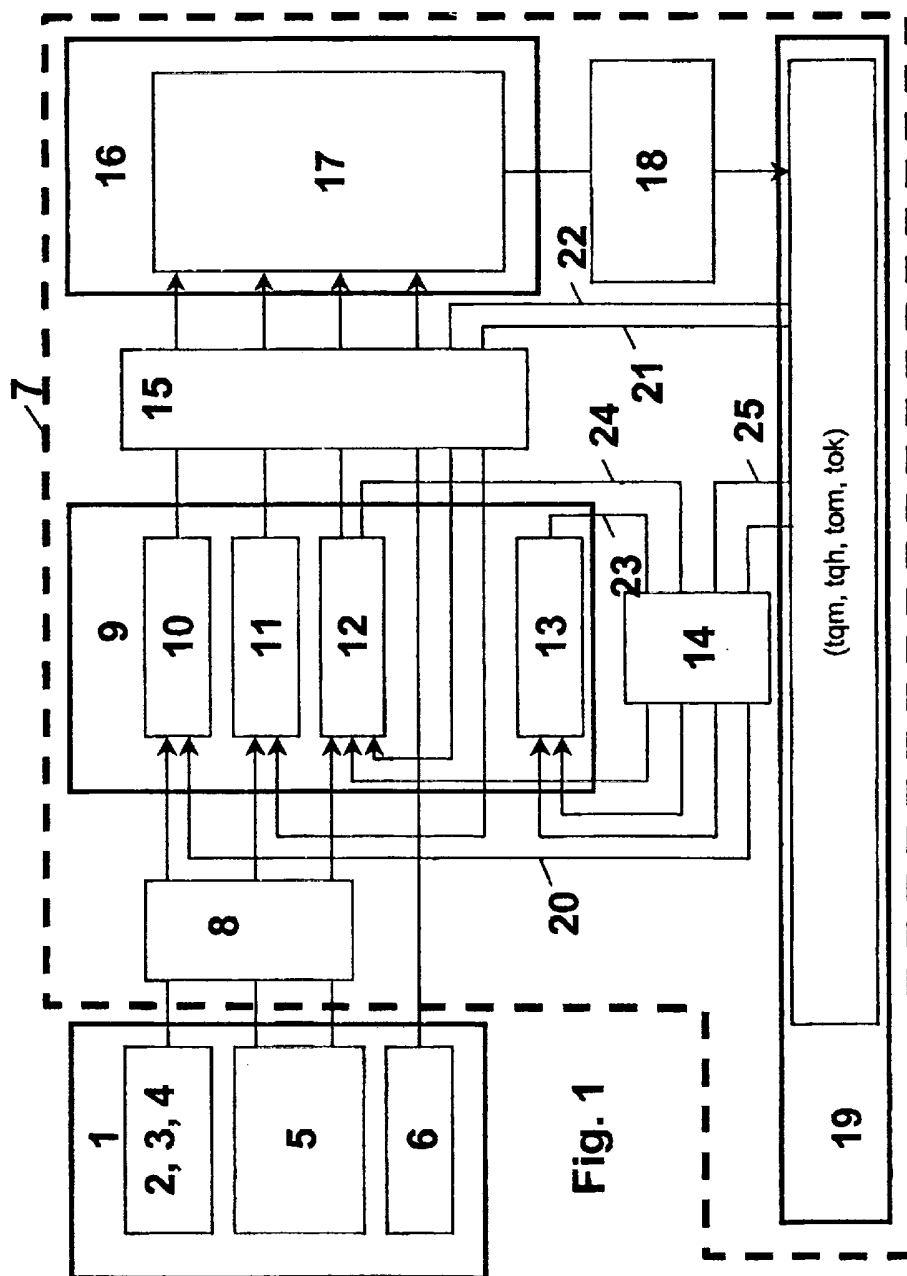
coel<sub>K</sub> (kWmin/K) die Wärmekapazität des Öles in diesem Knoten ist.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Differentialgleichungen mit einem bekannten numerischen Verfahren, z.B. der Methode nach Runge-Kutta, gelöst werden.
- 5 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, daß den Zweigen (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) und auch den Knoten (39, 40, 41, 42, 51, 52, 53, 54, 61, 62, 63, 70, 71, 72, 82, 83, 84, 85, 86) ein bestimmtes Ölvolumen zugeordnet wird, welches in der Summe dem Gesamt-Ölvolumen entspricht.
- 10 17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei der Lösung der Differentialgleichungen für die mittleren Öltemperaturen (tom) in den Zweigen (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) und in den Knoten (39, 40, 41, 42, 51, 52, 53, 54, 61, 62, 63, 70, 71, 72, 82, 83, 84, 85, 86) des hydraulischen Netzwerkes des Ölkreislaufes kontinuierlich der Strömungszustand durch ein Gleichungssystem für die Druckabfälle in allen Zweigen (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) des gesamten hydraulischen Netzwerkes mitberechnet wird.
- 15 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, daß für jeden Zweig (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) im hydraulischen Netzwerk der Vektor für eine virtuelle treibende Druckdifferenz f  
20 
$$f = g \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta H \cdot T + pd$$
 ermittelt wird, wobei  
f (N/m<sup>2</sup>) die treibende Druckdifferenz,  
g (m/s<sup>2</sup>) die Erdbeschleunigung,  
25  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) die Dichte des Öles  
 $\beta$  der Ausdehnungskoeffizient des Öles  
 $\Delta H$  (m) die Höhendifferenz zwischen Anfangs- und Endpunkt des Zweiges  
T (°C) die mittlere Temperatur des Öles im Zweig und  
pd (N/m<sup>2</sup>), sofern vorhanden, die durch eine Pumpe verursachte Druckdifferenz im Zweig  
30 ist, und daß mit der Matrixgleichung  
$$\varphi = TTRTT \cdot f$$
 der Vektor  $\varphi$  der Ölströmung (12) in den einzelnen Zweigen (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) berechnet wird, wobei TTRTT eine Matrix ist, welche die Information über die hydraulischen  
35 Widerstände (13) in allen Zweigen (43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81) und über die Struktur des hydraulischen Netzwerkes enthält.
- 40 19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Vektoren  $\varphi$  der Ölströmung (12) in einem iterativen Prozeß ermittelt werden, wobei dieser Prozeß solange fortgesetzt wird, bis Ausgangswert und Ergebnis mit ausreichender Genauigkeit übereinstimmen.
- 45 20. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine laufende Anpassung von Parametern mit zwei Hilfsgrößen (9) durchgeführt wird, wobei eine Hilfsgröße (9) die Abhängigkeit der Verluste (10) von der Temperatur (tqm, tqh, tom, tok) und die zweite Hilfsgröße (9) die Abhängigkeit der Ölströmung (12) von der Temperatur (tqm, tqh, tom, tok) berücksichtigt, und daß das nichtlineare Verhalten der Ölströmung (12) hinsichtlich Druckabfall und Strömungsgeschwindigkeit durch eine Rückkopplung (23, 24) von der Ölströmung (12) über die hydraulischen Widerstände (13) nachgebildet wird.
- 50 21. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, daß in einer Rückführung (20) der Zustandsgrößen (19) Temperaturen (tqm, tqh, tom, tok) auf die Hilfsgrößen Verluste (10) die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes des Leitermaterials berücksichtigt wird.
- 55 22. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, daß im thermo-hydraulischen Modell (7) eine Rückkopplung (22, 25) der Zustandsgrößen (19) Tempera-

turen ( $t_{qm}$ ,  $t_{qh}$ ,  $t_{om}$ ,  $t_{ok}$ ) auf die hydraulischen Widerstände (13) bzw. auf die Ölströmung (12) durchgeführt wird, wobei die Gesamtheit aller Ölströmungen (12), repräsentiert durch den Vektor  $\varphi$ , in zweifacher Weise temperaturabhängig sind, nämlich einerseits von der treibenden Druckdifferenz und andererseits von der Viskosität des Öles und damit der hydraulischen Widerstände (13).

23. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Digitalrechner, der das thermohydraulische Modell (7) ermittelt mit Speichereinheiten, in denen die Algorithmen für das thermohydraulische Modell (7) abgelegt sind, vorgesehen ist, an den mindestens eine Eingabetastatur, mindestens eine Anzeigeeinrichtung, insbesondere ein Bildschirm, und Schnittstellen für die Aufbereitung der Eingabegrößen (1) angeschlossen ist bzw. sind.

## HIEZU 2 BLATT ZEICHNUNGEN



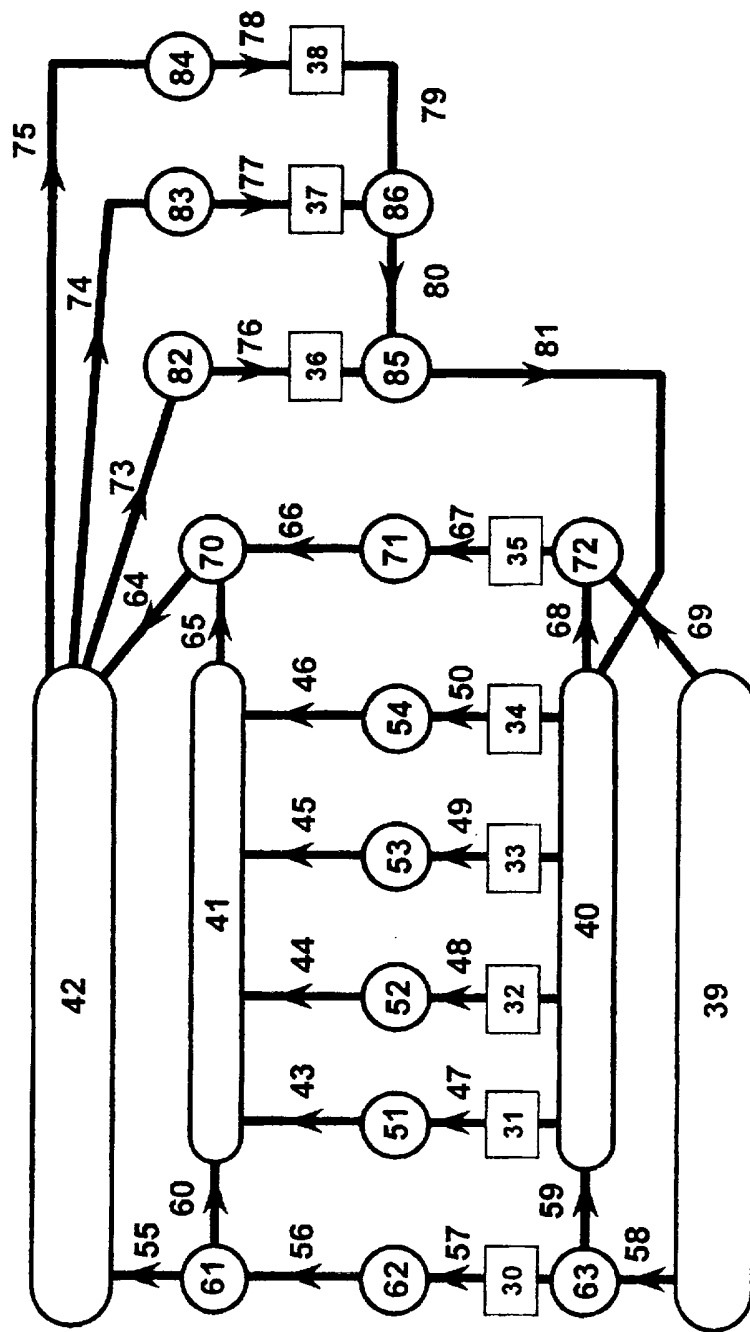


Fig. 2