

MODELLVERFAHREN ZUR LOKALISIERUNG DER TEILENTLADUNGEN VON TRANSFORMATOREN

Von

A. BOGNÁR und K. KARSAI*

Lehrstuhl für Elektromaschinen, Technische Universität, Budapest

Eingegangen am 13. Sept. 1980

Vorgelegt von Prof. Dr. GY. RETTER

1. Einleitung

Zur Bestimmung des Isolationszustandes von neuen und in Betrieb genommenen Transformatoren ist die Messung der Teilentladungsintensität eine neuartige wichtige Methode. Zur Messung von Teilentladungen (TE) gibt es Vorschriften in der internationalen und der ungarischen Standardfertigung, sowie quantitative Kriterien für die zulässigen TE-Intensitäten [1, 2]. Im allgemeinen kann aber zur Zeit noch die Problematik der Ortsbestimmung der Teilentladungen als nicht gelöst betrachtet werden.

2. Die Ortsbestimmung der Teilentladungen

Die Lokalisierung der Teilentladungen durch elektrische Messungen bereitet schon bei einfachen Anordnungen Schwierigkeiten, obwohl hier der Zusammenhang zwischen der an den Klemmen meßbaren scheinbaren Ladung und der Teilentladung theoretisch aufgrund eines einfachen Ersatzschaltbildes mit einfacher Näherung beschrieben werden kann.

Die Wicklungen können mit einem mathematischen Modell, das auch in dem einfachsten Fall aus Reihenkapazitäten K , Parallelkapazitäten C , Reiheninduktivitäten L sowie näherungsweise aus Gegeninduktivitäten $M_{k,1} = L_q^{(k-1)}$ besteht, beschrieben werden (Abb. 1).

Bei Transformatoren, wo auch induktive und kapazitive Verkoppelungen zwischen zwei oder mehreren Spulen berücksichtigt werden müssen, wird dieses Bild mehr kompliziert.

Teilentladungen können an qualitativ verschiedenen Stellen auftreten. In Abb. 1 sind z. B. zwei Teilentladungsstellen eingezeichnet worden, die eine ist zwischen den benachbarten Wicklungselementen, die andere bildet die Teilentladungen in der Hauptisolierung ab.

Aus den oben erwähnten folgt, daß im Falle gewickelter Anordnungen schon eine genäherte mathematische Formulierung des Zusammenhanges

* Forschungsinstitute für Elektrische Energie und für Elektrische Industrie, Ungarn

zwischen der Teilentladung und der meßbaren scheinbaren Ladung an den Klemmen außerordentlich kompliziert ist. Bei Transformatoren wird diese Problematik auch noch dadurch erschwert, daß — da sie mehrere Anschlüsse haben (primär, sekundär, gegebenenfalls weitere Ausführungen sowie die Sternpunktausführung) — zu einer einzigen Entladung an jeder Klemme jeweils eine andere scheinbare Ladung gemessen werden kann.

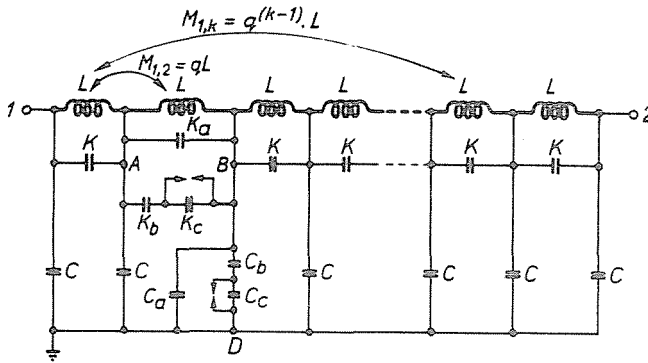


Abb. 1. Ersatzschaltbild mit verteilten Parametern der Wicklung des Transformators

Im allgemeinen kann es gesagt werden, daß die an einer gegebenen Durchführung gemessene scheinbare Ladung um so größer ist, je näher der Teilentladungsort zu dieser Durchführung liegt.

Der TE-Ablauf kann ähnlich dem Spannungstransienten von Transformatoren beschrieben werden. Infolge der Teilentladung erfolgt an ihrer Stelle ein Spannungssprung, der sich in der Wicklung nach einer Hyperbolfunktion verteilt, das ist die Anfangsspannungsverteilung. Auch an den Klemmen erscheint dieser Spannungssprung praktisch ohne Zeitverzögerung (sie beträgt weniger als $0,1 \mu\text{s}$).

Der Anfangsspannungsverteilung folgen aperiodische Schwingungen, deren Frequenzbereich der Eigenfrequenz der Wicklungselementen entspricht. Der Schwingvorgang kann auch als eine Reihe von Wanderwellen, die von der Teilentladungsstelle ausgehen und dann von den Wicklungsausführungen reflektiert werden, erfaßt werden.

Die an den zugänglichen Anschlüssen des Transformators meßbare Information ist die Resultierende der Anfangsspannungsverteilung und der danachfolgenden Spannungsschwingungsreihen. Um eine maximale Anzahl von Informationen gewinnen zu können, wird in der internationalen Praxis an möglichst vielen Stellen gemessen.

Anhand der gewonnen Meßergebnisse gibt es zur Ortsbestimmung der Fehlerstelle mehrere Möglichkeiten.

— Ist die Reihenkapazität gegenüber der parallelen Kapazitäten der Wicklung groß, so gestatten uns die Messungen der an den zugänglichen Stellen meßbaren kapazitiven Impulse (scheinbare Ladungen, infolge der Anfangsverteilung) gute Ergebnisse zu erreichen.

— Bei verhältnismäßig kleinen Reihenkapazitäten kann die Störstelle durch die Analyse der an den Wicklungsenden ankommenden Wanderwellen bestimmt werden [3].

— Auch die Frequenzanalyse der durch die Teilentladungen hervorgerufenen Schwingungen ist zur Lokalisation des Fehlerortes geeignet [4].

— Schließlich ist die Methode der Anfangsspannungen auch ein elektrisches Meßverfahren. Diese beruht auf der Annahme, daß die Anfangsspannung der Teilentladungen an der Fehlerstelle konstant ist. Wenn in mehreren Schaltungen dieselbe Beanspruchung der Fehlerstelle zustandegebracht wird, dann kann man so auch auf die Störstelle folgern. Die Messungen können gegebenenfalls an mehreren Ausführungen vorgenommen werden.

— Die akustische Methode schien ein viel versprechendes Verfahren zu sein. Mit diesem Verfahren kann die Fehlerstelle aufgrund des Teilentladungsrauschens lokalisiert werden [5].

Jede der hier aufgezählten Methoden kann zur Bestimmung der Störstelle nützliche Informationen geben. Ein gemeinsames Problem der elektrischen Meßmethoden ist jedoch, daß jede Methode auf die Analyse eines komplizierten, aus verteilten Parametern bestehenden mathematischen Modells zurückgeführt wird. So, daß die gewonnenen Ergebnisse eher für das Ersatzschaltbild gelten, als sie in einem dreidimensionalen Raum eine zuverlässige Ortsbestimmung ermöglichen. Das akustische Verfahren löst diese Problematik nur teilweise, da seine Empfindlichkeit bei Transformatoren mit mehrerer Größenordnung kleiner, als die der elektrischen Methoden ist [5].

Ein zusätzliches Problem bedeutet die praktische Tatsache, daß die für die Prüfung von Großtransformatoren zur Verfügung stehende Zeit begrenzt ist. So können die bei der Auswertung vorkommenden Widersprüche nicht oder nur sehr schwer klargemacht werden.

Nach der Meinung der Autoren kann aufgrund unserer derzeitigen Kenntnisse eine verlässliche gute Meßmethode kaum empfohlen werden; die Anwendung von mehreren bekannten Methoden kann aber zur Beurteilung des Isolationszustandes eines Transformators eine wirksame Hilfe leisten.

Die Autoren schlagen in den folgenden die Anwendung eines elektromagnetischen Modells vor, mit dessen Hilfe die durchzuführenden Untersuchungen beschleunigt, die Meßergebnisse zuverlässiger und die Fehlersuche wirksamer werden können.

3. Die empfohlene Methode und das elektromagnetische Modell

Das empfohlene Verfahren geht von der Annahme aus, daß sowohl die Beziehung zwischen den meßbaren und den realen Ladungen (Eichung des Meßkreises), als auch die Störstelle exakt bestimmt werden könnte, wenn es über jeden Transformator ein »Duplikat« (ein Modell mit dem geometrischen und elektrischen Maßstab 1:1) zur Verfügung stände.

In dem Fall könnte bei der Anwendung beliebiger elektrischer Meßmethode im »Duplikat« die Stelle gesucht werden, wo es, wenn der entsprechende TE-Generator eingesetzt wird, an den Klemmen dieselben Meßwerte dargestellt werden könnten, die auch bei dem geprüften Transformator gemessen worden waren.

An einem derartigen Modell könnten auch die Kontrolle und die Eichung des TE-Meßkreises des zu untersuchenden Transformators durchgeführt werden.

Selbstverständlich wäre ein derartiges elektromagnetisches Modell mit dem Maßstab 1:1, aber auch mit 1:10 oder sogar 1:100 sehr kostspielig. Darüber hinaus gaben es noch auch Schwierigkeiten bei der Messung von den schwer zugänglichen Teilen des Transformators (zwischen zwei Wicklungselementen, zwischen dem Eisenkern und dem Inneren der Wicklung usw.) Die Autoren geben ein elektromagnetisches Modell an, das aus Kondensatoren und Induktivitäten leicht zusammengestellt werden kann. Die einzelnen Teile des Modells können anhand folgender Überlegungen gewählt werden.

— Jede Wicklung des Transformators — unabhängig von ihrer Anzahl — soll auf n Elemente, die unter sich die gleichen Parameter haben, zerlegt werden. Die Zahl n kann beliebig gewählt werden, sie beträgt zweckmäßigerweise 5—10.

— Die Kapazitäten sollen wahrgemäß gewählt werden. Dies heißt, daß es zwischen der resultierenden Reihenkapazität K_e und der Reihenkapazität eines Elements K die Beziehung

$$K = K_e \cdot n, \quad (1)$$

und zwischen der resultierenden Parallelkapazität der Wicklung C_e und der Parallelkapazität eines Elements C die Beziehung

$$C = \frac{C_e}{n} \quad (2)$$

bestehen sollen.

— Die Gegeninduktivitäten werden nicht abgebildet, d. h. zwischen den einzelnen Elementen des Modells besteht keine induktive Verkopplung.

— Die Gegeninduktivitäten können anhand des in Abb. 2 gezeigten mathematischen Modells folgendermaßen gewählt werden:

Die Eigeninduktivitäten der Elemente des Modells müssen so gewählt werden, daß man dabei auch die vernachlässigten Gegeninduktivitäten berücksichtigt. Zwischen der Gegeninduktivität und der Eigeninduktivität kann die Beziehung

$$M_{ik} = q^{(k-i)} L \quad (3)$$

angenommen werden, wobei die Werte von q zwischen 0 und 1 liegen.

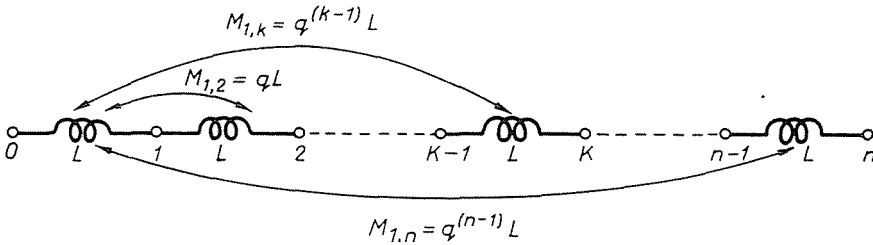


Abb. 2. Bestimmung der Gegeninduktivitäten bei einem Wicklungsmodell

Für die Spannungen, die durch den Strom $i(t)$ induziert werden, der durch die Elemente des in Abb. 2 gezeigten Modells fließt, gilt das folgende Gleichungssystem:

$$U_{0-1} = L \frac{di}{dt} (1 + q + \dots + q^{n-1})$$

$$U_{k-(k-1)} = L \frac{di}{dt} (q^{k-2} + q^{k-3} + \dots + 1 \dots + q^{n-k}) \quad (4)$$

$$U_{(n-1)-n} = L \frac{di}{dt} (q^{n-1} + q^{n-2} + \dots + 1)$$

Der resultierende Eigeninduktivitätskoeffizient der Wicklung ist

$$L_e = (n+2)L \sum_{k=1}^{n-1} (n-k) \cdot q^k \quad (5)$$

Der resultierende Eigeninduktivitätskoeffizient L_e kann in der Praxis berechnet oder gemessen werden. Legt man noch die Anzahl der Wicklungselemente des Modells n fest, so können anhand der Gleichung (5) die

Werte von L berechnet werden. Sollte die Bedingung erfüllt werden, daß in jedem Element eine Spannung von der Größe induziert werden soll, als wären auch die Gegeninduktivitäten berücksichtigt, dann müssen die Eigeninduktivitätskoeffizienten der einzelnen Elemente anhand des Gleichungssystems (4) wie folgt gewählt werden:

$$\begin{aligned} L_{0-1} &= L(1 + q + \dots + q^{n-1}) \\ &\vdots \\ L_{k-(k-1)} &= L(q^{k-2} + q^{k-3} + \dots + q^{n-2}) \\ &\vdots \\ L_{(n-1)-n} &= L(q^{n-1} + q^{n-2} + \dots + 1) \end{aligned} \quad (6)$$

Ergeben sich nicht allzu unterschiedliche Größen für die Werte $L_{0-1} \dots L_{(n-1)-n}$ bei der Nachbildung des Modells, so kann für jedes Element der Durchschnittswert

$$L_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n L_{(k-1)-k} \quad (7)$$

gewählt werden.

4. Rechenbeispiel

Abb. 3 zeigt das Schaltbild einer Phase eines 400 kV/120 kV Spartransformators mit Tertiärwicklung. Die 400 kV-Wicklung des Transformators ist in der Mitte ausgeführt. Das elektromagnetische Modell des Transformators kann der Abb. 4 entnommen werden.

Mittels den Gleichungen (1) und (2) können die Werte der in Abb. 4 veranschaulichten Kapazitäten berechnet werden, wobei $n = 6$ gewählt wurde:

$$\begin{aligned} C_1 &= 130 \text{ pF} & K_1 &= 645 \text{ pF} \\ C_2 &= 320 \text{ pF} & K_2 &= 135 \text{ pF} \\ C_3 &= 580 \text{ pF} & K_3 &= 42\,000 \text{ pF} \\ C_4 &= 780 \text{ pF} & K_4 &= 57 \text{ pF} \\ C_5 &= 680 \text{ pF} \end{aligned}$$

Die Eigeninduktivitätskoeffizienten wurden aus den angegebenen ursprünglichen Eigeninduktivitätskoeffizienten der Wicklung bestimmt, d. h. laut Gleichung (5) sind die Werte von L aus L_e berechnet worden. Der Wert des Verkoppelungsfaktors betrug 0,5, er ergibt sich aus der Struktur der Wicklung.

Aus den L -Werten der Gleichung (5) wurden laut Gleichungen (6) und (7) die folgenden Durchschnittswerte berechnet (die Bezeichnungen entsprechen der Abb. 4):

$$L_1 = 105 \text{ mH}, \quad L_2 = 9,1 \text{ mH}, \quad L_3 = 0,45 \text{ mH}, \quad L_4 = 0,6 \text{ mH}.$$

In den Transformator und in das elektromagnetische Modell wurde an verschiedenen Stellen eine Ladung von 50 pC injiziert und gleichzeitig auch an verschiedenen Stellen die Intensität der Teilentladung gemessen. Die Meßergebnisse sind den Tafeln 1 und 2 zu entnehmen.

Beim Vergleich der in den zwei Tafeln angegebenen Meßwerte kann es festgestellt werden, daß es zwischen den am Transformator und am Modell

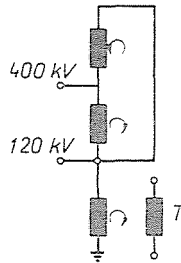


Abb. 3. Schaltbild einer Phase des geprüften Transformators

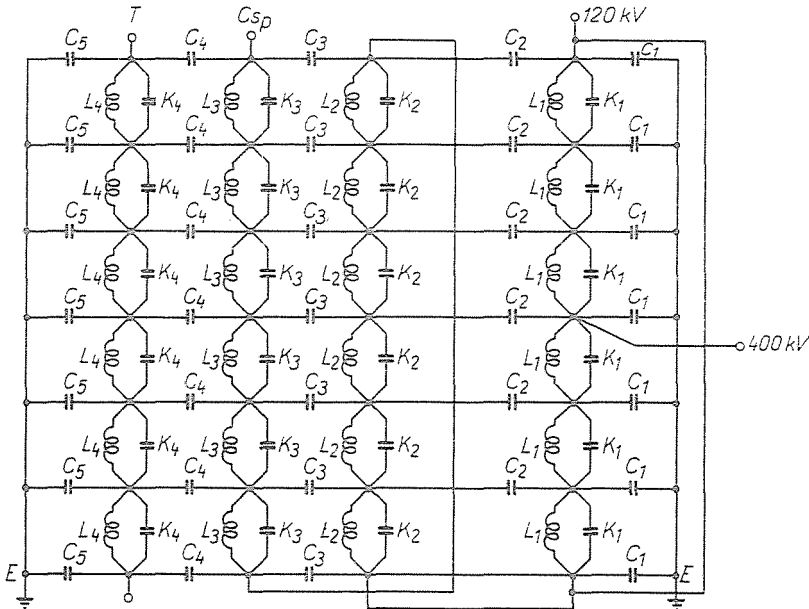


Abb. 4. Ersatzschaltbild der Wicklung des geprüften Transformators

Tafel 1

Eichtabelle des 400/132/18 kV — Transformators, erstellt aufgrund der am Transformator durchgeführten Messungen

Bezeichnung	Eingabe der Ladung*	Die an den Meßpunkten gemessenen Ergebnisse [pC]				
		400 kV Durchführung	400 kV Koppelkondensator	120 kV Durchführung	120 kV Koppelkondensator	Sternpunkt- Koppelkondensator
<i>a</i>	400 kV Durchf.-Erde	9	17	4,5	9,75	4,8
<i>b</i>	120 kV Durchf.-Erde	1,4	3	2,6	21	3,75
<i>c</i>	Sternpunkt-Erde	0,75	1,5	0,26	1,87	8,25
<i>d</i>	400 kV Durchführung Folien- anzapfung der Durchführung	39	20	0,82	6,75	2,1
<i>e</i>	120 kV Durchführung Folien- anzapfung der Durchführung	1,8	4,5	22,5	16,5	2,25
<i>f</i>	120 kV Durchführung Stern- punkt	1,1	2,2	2,92	17,2	4,5

* Die Größe der Ladung beträgt überwiegend 50 pC, im Falle einer Abweichung von diesem Wert wurde die Indikation auf 50 pC umgerechnet.

Tafel 2

Eichtabelle des 400/132/18/ kV-Transformators, erstellt aufgrund der an einem zu einer Phase gehörenden Spulenmodell durchgeführten Messungen

Bezeichnung	Eingabe der Ladung*	Die an den Meßpunkten gemessenen Ergebnisse [pC]				
		400 kV Durchführung	400 kV Koppelkondensator	120 kV Durchführung	120 kV Koppelkondensator	Sternpunkt-Koppelkondensator
<i>a</i>	400 kV Durchf.-Erde	16	30	0,7	4	3,8
<i>b</i>	120 kV Durchf.-Erde	1,5	3	3,2	18	5
<i>c</i>	Sternpunkt-Erde	0,8	1,5	0,25	2,4	10
<i>d</i>	400 kV Durchführung Folienanzapfung der Durchführung	35	25	0,4	2,3	2,8
<i>e</i>	120 kV Durchführung Folienanzapfung der Durchführung	2,8	3,8	18	14	4
<i>f</i>	120 kV Durchführung Sternpunkt	1,6	2,2	2,8	16	4,5

* Die Größe der Ladung beträgt überwiegend 50 pC, im Falle einer Abweichung von diesem Wert wurde die Indikation auf 50 pC umgerechnet.

gemessenen Werten — abgesehen von einigen signifikanten Abweichungen (Reihe *a*) — eine qualitative Übereinstimmung besteht. Als Ursache der Abweichungen können — neben den bei einer Nachbildung immer selbstverständlichen Vernachlässigungen — die Meßfehler, die an gewissen Meßpunkten des Transformators, die schwer zugänglich und voneinander weit entfernt sind, auftreten können, nicht ausgeschlossen werden.

Es soll hier bemerkt werden, daß die für die Prüfung des Transformators zur Verfügung stehende Zeit recht kurz ist, da die schnelle Inbetriebnahme durch ernste wirtschaftliche Interessen gefordert werden kann. Ein großer Vorteil des Modells liegt eben darin, daß es sowohl vor der Messung des Transformators als auch danach, zeitlich unbegrenzt zur Verfügung steht. Das Modell ermöglicht uns die optimalen Varianten des Prüfstromkreises vorher auszuwählen, so, daß bei der Messung des Transformators nur eine Eichung durchgeführt werden muß.

Die Anzahl der angenommenen Fehlerstellen (hier $a-f$) kann praktisch beliebig erhöht werden; es können selbstverständlich auch die Fehler innerhalb der Wicklung nachgebildet werden. Dies bedeutet, daß die Anzahl der Reihen der Eichmatrix erhöht werden kann, was eine bedeutende Hilfe bei der schon genannten Verarbeitung der Meßwerte bzw. bei der Ortsbestimmung der Fehler bedeuten kann.

Zusammenfassung

Bei der Teilentladungsmessung von Großtransformatoren sind zahlreiche Probleme noch nicht geklärt. Diese Arbeit gibt einen Überblick der meßtechnischen Probleme. Sie beschäftigt sich mit der Analyse der an den Durchführungen des Transformators meßbaren Teilentladungsgrößen sowohl an echten Transformatoren als auch am Modell der Transformatorenwicklung. Es werden TE-Prüfstromkreise von Transformatoren bezüglich ihrer Empfindlichkeit diskutiert und die Eichmatrix für den geprüften Transformator bestimmt.

Literaturverzeichnis

1. IEC 14 (Central Office) 39. Jan. 1977.
2. MSZ 9230/3 Transformers — Special tests.
3. HICKLING, S. H.—HAWLEY, R.: Measuring and locating partial discharges. *Electrical Times*, p. 443—444, 29th September 1964.
4. VEVERKA, A.—HON, A.: New method of location of internal discharges in transformers. *CIGRE Rep.* 109. 1966.
5. HARROLD, R. T.: The relationship between ultrasonic and electrical measurements of under oil corona sources. *Conf. Publ. IEE No 94*. pp. 59—64, 1973.

Alajos BOGNÁR	Forschungsinstitut für Elektrische Industrie H-1158 Cservenka u. 86.
dr. Károly KARSAI	Forschungsinstitut für Elektrische Energie H-1368 P.O.B. 233