

Die RVM Methode zur Beurteilung des Alterungszustandes von Öl-Papier Isolationen

Giuseppe M. Urbani

Haefely Trench AG Tettex Instruments Division, Zürich-Schweiz

1. Einleitung

Viele Transformatoren haben heutzutage ein "sehr respektables" Alter erreicht und die Anzahl ist stetig zunehmend. Die wirtschaftliche Lage und ein umweltbewusstes Denken erlauben aber nicht deren wahllosen Ersatz. Aus diesen Gründen nimmt die Isolationsdiagnose immer mehr an Bedeutung zu [1], [3]. Die Diagnose soll den Betreibern folgendes vermitteln:

- Information über den Zustand der Isolation
- die Grenzen für den weiteren Betrieb in diesem Zustand
- die benötigten Interventionen für die Zustandsverbesserung

Die Alterung und die daraus folgende Lebensdauer von Öl-Papier Isolationen sind vorwiegend vom physikalischen Verhalten des Isolationstypes, von der Design- und Herstellungsqualität und von den Betriebsbedingungen abhängig. Seit Jahren ist bekannt, dass der Wassergehalt des Isolationspapiers einen starken Einfluss auf deren Alterungsrate hat (Bild1):

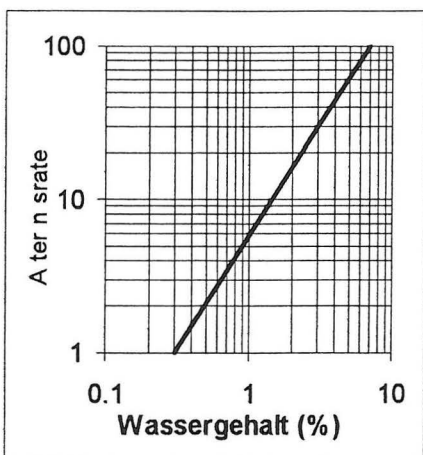


Bild 1:
Einfluss des Wassergehaltes des Isolationspapiers auf deren Alterungsrate (Fabre, CIGRE 1960).

Beispiel: Ein Isolationspapier mit 3% Wassergehalt hat eine Alterungsrate, die 30 mal höher ist als die Alterungsrate einer Isolation mit 0.3% Wassergehalt

Da Wassermoleküle und andere Alterungsprodukte eine Polarisierbarkeit aufweisen, wurde eine Testmethode entwickelt, die den Zusammenhang zwischen Alterung, Wassergehalt und Polarisationsverhalten der Isolation erfasst [2], [4].

2. Polarisation, Rückkehrspannung und das Gerät Typ RVM 5461

Eine Isolation wird durch das Anlegen einer Gleichspannung polarisiert. Mit dem nachfolgenden Kurzschliessen versucht die Isolation den ursprünglichen neutralen Zustand wieder zu erreichen. In Abhängigkeit von den nachstehenden Faktoren bleibt nach Öffnen des Kurzschlusses noch eine Restpolarisation erhalten:

- Lade- und Kurzschlusszeiten
 - Höhe der Ladespannung
 - Art und Menge der polarisierbaren Produkte
- Temperatur der Isolation
 - Design des Prüfbjektes

Diese Restpolarisation erzeugt eine Spannung, die **Rückkehrspannung** genannt wird.

Das Gerät RVM 5461[®] basiert auf dieser physikalischen Tatsache und führt die ganze Testprozedur vollkommen automatisch durch. Bis zu max. 18 verschiedene Ladezeiten sind vorgesehen (von 20ms bis 10'000s). Mit jeder Ladezeit wird ein neuer Testzyklus gestartet, der aus vier Schritten besteht:

T	E	S	T	Z	Y	K	L	U	S
Ladung		Entladung		Messung		Relaxation			

In Bild 2, das die Ersatzschaltung einer homogenen Isolation (Wasser gleichmässig verteilt) darstellt, wird dieser Zyklus gezeigt. Bei jedem Testzyklus werden folgende Werte gemessen:

- U_{rmax} = max. Rückkehrspannungswert
 - dU_r/dt = Anfangsteilheit
 - t_c = Ladezeit
 - t_{peak} = Zeit zum max. Rückkehrspannungswert

Diese gemessenen Werte sind die eindeutige Charakteristik der geprüften Isolation.

Diese Werte werden sich mit der Änderung des Isolationszustandes entsprechend verändern. Zahlreiche Prüfungen an Modellen und an reellen Transformatoren beweisen die Zusammenhänge zwischen dieser gemessenen Charakteristik und dem Alterungszustand bzw. dem Wassergehalt der Isolation [5].

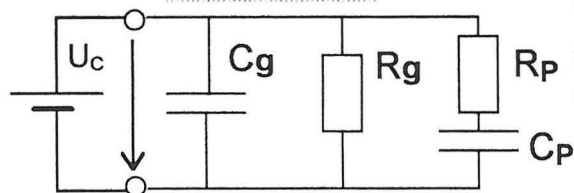
Die mit dem Gerät gelieferte Datenerfassungssoftware Typ SWRVM1 ermöglicht die Speicherung der gemessenen Werte. Die als Option gelieferte Analysesoftware Typ SWRVM2 stellt die gemessenen Punkte in Kurven dar (Interpolation) und normiert die U_{rmax} -Werte auf 20°C, so dass Vergleiche mit früheren oder späteren RVM Messungen vereinfacht werden. Durch die Interpolation aller U_{rmax} -Werte erhält man eine Kurve (Bild 3), die in den meisten Fällen nur einen globalen Maximalwert aufweist (homogene Isolation). Die oben erwähnten Prüfungen zeigen eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Zeitpunkt des Höchstwertes, dem Wassergehalt und der Temperatur der Isolation.

Diese Zeit wird „dominante Zeitkonstante τ_{CD} “ genannt.

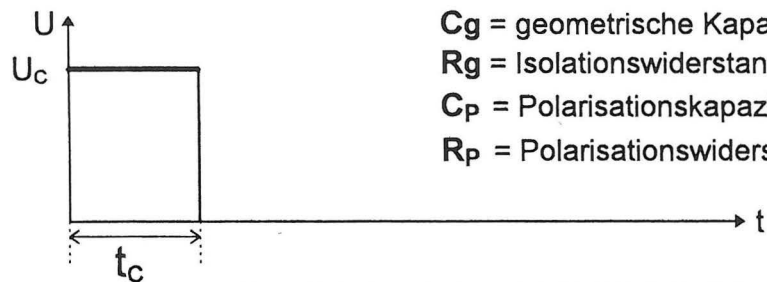
- RVM \equiv Recovery Voltage Method \equiv Rückkehrspannungsmethode

ERSTER SCHRITT

Ladung (t_c)



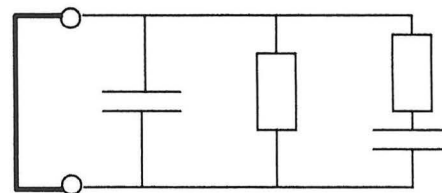
Das RVM 5461 legt eine Spannung (max. 2000V DC) über die Isolation an



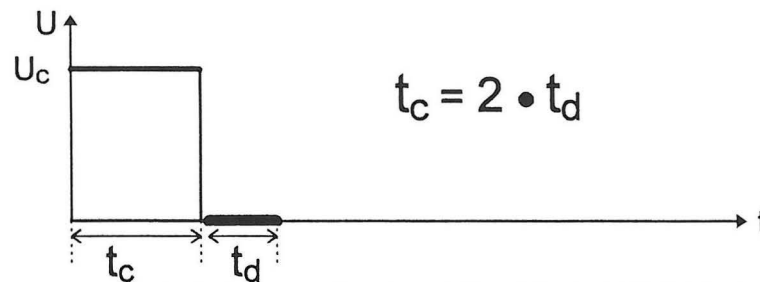
C_g = geometrische Kapazität
 R_g = Isolationswiderstand
 C_p = Polarisationskapazität
 R_p = Polarisationswiderstand

ZWEITER SCHRITT

Entladung (t_d)

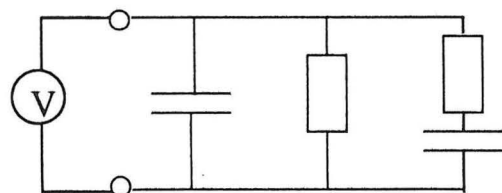


Das RVM 5461 schliesst die Isolation kurz



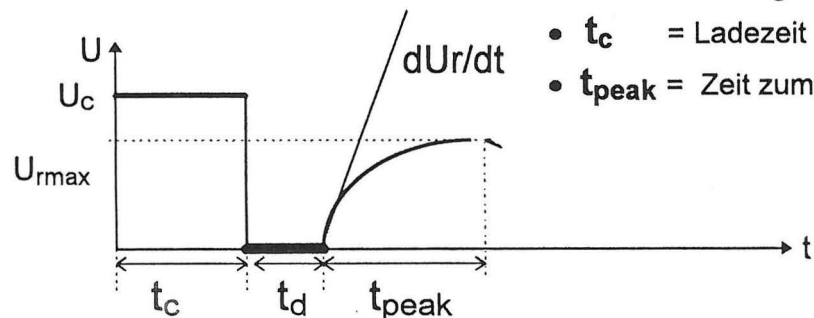
DRITTER SCHRITT

Messung



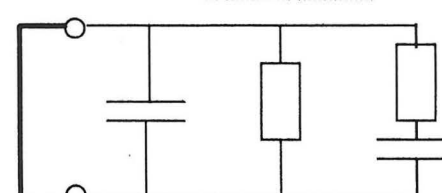
Das RVM 5461 misst und speichert folgende Werte :

- U_{rmax} = max. Rückkehrspannungswert
- dU_r/dt = Anfangssteilheit
- t_c = Ladezeit
- t_{peak} = Zeit zum U_{rmax}

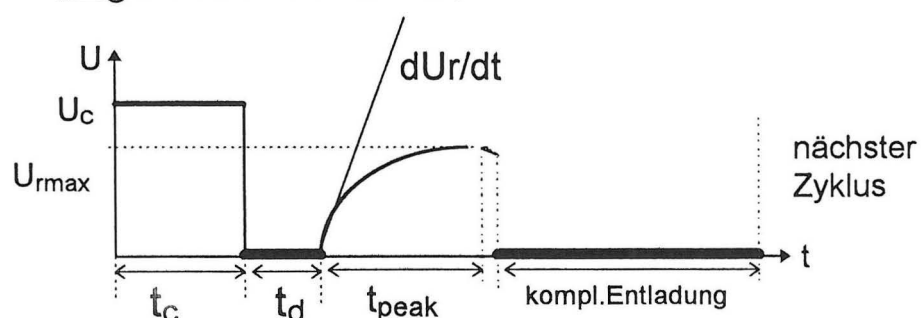


VIERTER SCHRITT

Relaxation



Das RVM 5461 schliesst die Anschlüsse kurz um die Isolation komplett zu entladen



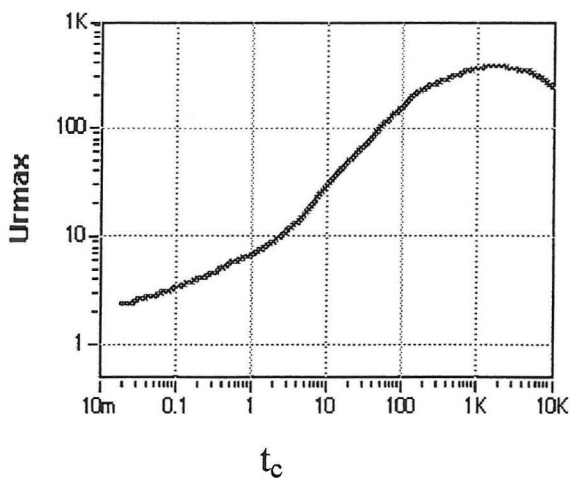


Bild 3:
RVM Testresultate eines
Transformators mit typischem
Polarisationsspektrum

3. Die qualitative Erklärung

Im folgenden Beispiel wird ersichtlich, wie die Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und dominanter Zeitkonstante entstehen kann (Bild 4).

Wir betrachten zwei homogene Papier-Isolationen, A und B, bei konstanter Temperatur und unterschiedlichem Wassergehalt, $X_A\%$ und $X_B\%$, wobei X_A grösser als X_B ist. Die Kurzschlusszeit t_d ist die Hälfte der Ladezeit t_c .

Im allgemeinen gilt für die Zeitkonstante: $\tau = R \cdot C$.

Mehr Wasser bedeutet ein kleinerer Widerstand. Demzufolge können die zwei Isolationen mit den folgenden Parametern nachgebildet werden:

Isolation	A		B
Wassergehalt	$X_A (\%)$	\gg	$X_B (\%)$
Polarisationswiderstand	R_{PA}	\ll	R_{PB}
Polarisationskonstante	τ_{PA}	\ll	τ_{PB}

Die **Isolation A (hoher Wassergehalt)** hat also, in Bezug auf das Polarisationsverhalten, eine schnelle Antwort, das heisst die Polarisationskapazität C_{PA} wird schnell geladen und entladen (τ_{PA} ist klein). Das hat zur Konsequenz, dass bei langen Ladezeiten t_c (und entsprechend langen Kurzschlusszeiten t_d) die Isolation komplett polarisiert und fast komplett depolarisiert wird. Fast keine „Restenergie“ ist vorhanden. Daher werden bei langen Ladezeiten niedrige Rückkehrspannungen bzw. kleine U_{max} -Werte gemessen. Nur bei einer der kurzen Ladezeiten wird das Verhältnis Polarisation/Depolarisation so sein, dass das Maximum der U_{max} -Werte entstehen wird.

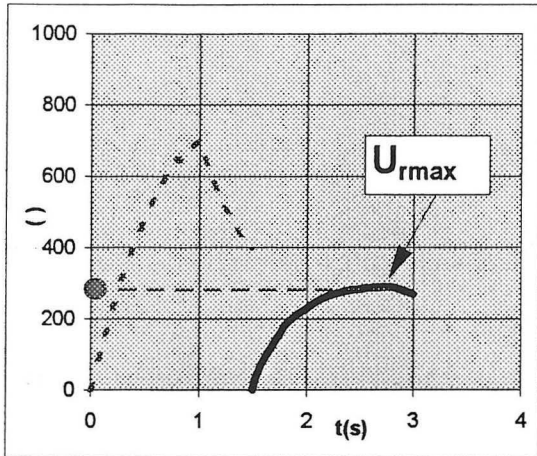
Für die **Isolation B (niedriger Wassergehalt)** gilt genau das Gegenteil. Auf grund der langsamen Polarisationsantwort (grosse Polarisationszeitkonstante, τ_{PB}), wird die Kapazität C_{PB} sehr langsam geladen und entladen. Das heisst, bei kürzeren Ladezeiten wird die Isolation fast nicht polarisiert und daher werden niedrige Rückkehrspannungen bzw. kleine U_{max} -Werte gemessen. Nur bei einer der langen Ladezeiten wird das Verhältnis Polarisation/Depolarisation so sein, dass das Maximum der U_{max} -Werte entstehen wird.

— — — — —

Ladung/Entladung Polarisationskapazität

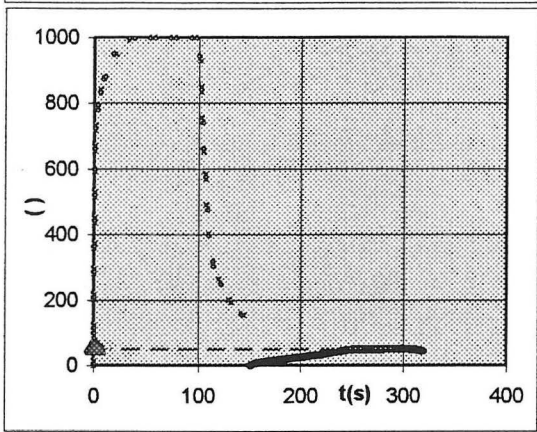
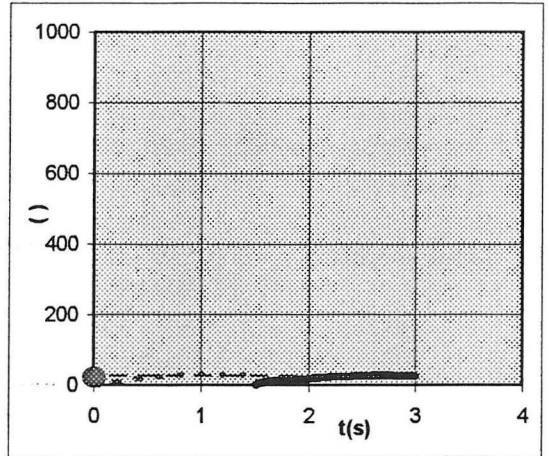
Rückkehrspannung

$X_A(\%) \gg X_B(\%)$

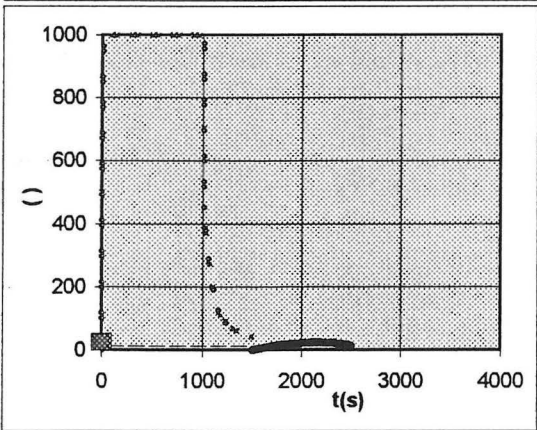
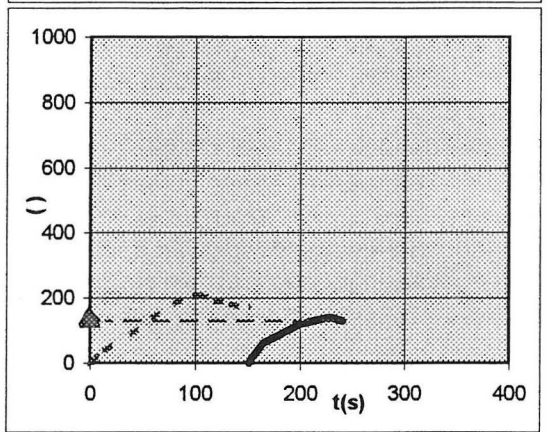


t_c

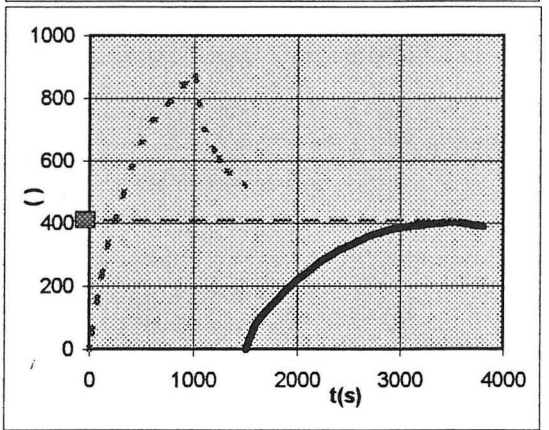
1s



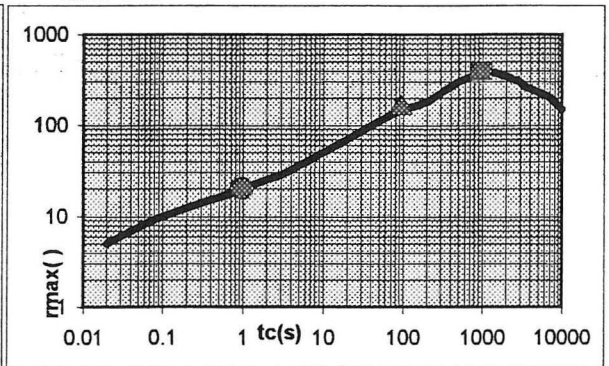
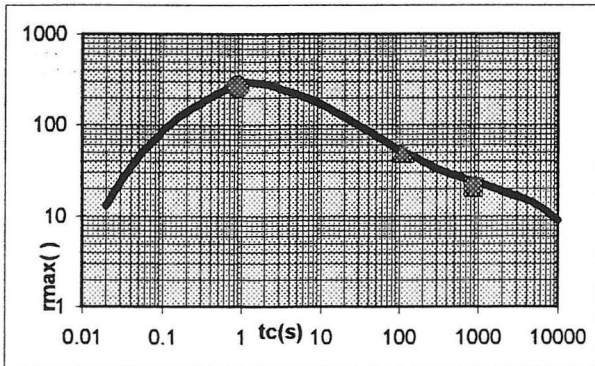
100s



1000s



RVM Testresultate : $U_{rmax}(t_c)$ Kurven



4. Die RVM Resultate

Die Resultate von RVM Prüfungen können in zwei grundsätzliche Kategorien aufgeteilt werden:

1) Standardkategorie

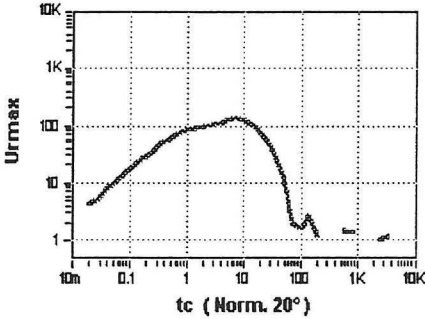
Die resultierenden U_{max} Kurven sind äquivalent zu den Kurven, die bei den Prüfungen an den Isolationsmodellen gemessen wurden. Diese Isolationsmodellen wurden speziell für die Entwicklung des RVM Gerätes aufgebaut und angewendet. Die U_{max} Kurven haben einen eindeutig globalen Maximalwert. Der durch die Analysesoftware gelieferte Wassergehaltswert kann als ausreichend genaue Abschätzung des realen Wassergehaltes betrachtet werden.

2) Nicht-Standardkategorie

Hier handelt es sich um Kurven mit mehr als einem Maximalwert oder Kurven mit „flachem“ Verlauf oder Kurven mit Verlaufsunterbrüchen, usw. Um diese Resultate korrekt auswerten zu können, werden mehr Informationen über das Prüfobjekt und die Prüfbedingungen benötigt (z.B. welche Arbeiten am Prüfobjekt durchgeführt wurden, Resultate anderer Prüfungen, usw.). Die Erfahrung aus den letzten Jahren (mehrere RVM Messungen an realen Transformatoren) ermöglicht meistens auch in solchen Fällen eine korrekte Interpretation der Resultate.

Das Beispiel im Bild 5 zeigt wie wichtig die Aufnahme der tatsächlichen Prüfbedingungen sein kann. Es handelt sich um nur eine RVM Prüfung, aber zwei Auswertungsergebnisse! Bei der ersten Auswertung wurde die Isolationstemperatur für alle Messpunkte auf 20°C gesetzt. Bei der zweiten Auswertung wurde ein geschätzter Temperaturverlauf angenommen. Auf grund der unterschiedlichen Temperaturangaben, liefert die Analysesoftware zwei eindeutig unterschiedliche Auswertungen.

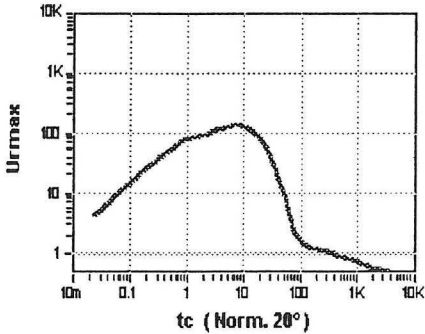
tc	U _{max}	t _{peak}	dU _r /dt	Temp.
0.02	4.24	1.2	15.4	20
0.05	9.44	1.2	29.8	20
0.1	17.5	1.2	51.6	20
0.2	31.5	1.2	90.9	20
0.5	62	1.3	171	20
1	87.8	1.38	234	20
2	101	2.19	244	20
5	126	10.2	177	20
10	125	11.1	137	20
20	76.7	11.7	82.1	20
50	10.7	15.6	10.9	20
100	1.66	137	0.27	20
200	1.22	231	0.06	20
500	0.97	347	0.03	20
1000	0.78	446	0.02	20
2000	0.62	538	0.01	20
5000	0.42	555	0	20
10000	0.36	659	0	20



tc	U _{max}	%H2O	Temp
7.39	132.38	3.35	64.9°C
132.19	2.74	1.95	87.8°C
645.81	1.73	1.17	109.0°C
3154.94	1.26	0.39	143.8°C

Bild 5: Beispiel einer RVM Prüfung mit unterschiedlicher Temperaturangabe

tc	U _{max}	t _{peak}	dU _r /dt	Temp.
0.02	4.24	1.2	15.4	21
0.05	9.44	1.2	29.8	21
0.1	17.5	1.2	51.6	21
0.2	31.5	1.2	90.9	21
0.5	62	1.3	171	21
1	87.8	1.38	234	21
2	101	2.19	244	20
5	126	10.2	177	20
10	125	11.1	137	20
20	76.7	11.7	82.1	20
50	10.7	15.6	10.9	20
100	1.66	137	0.27	19
200	1.22	231	0.06	19
500	0.97	347	0.03	19
1000	0.78	446	0.02	18
2000	0.62	538	0.01	19
5000	0.42	555	0	19
10000	0.36	659	0	20



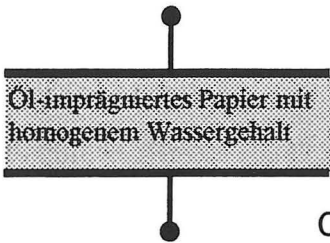
tc	U _{max}	%H2O	Temp
7.05	131.25	3.38	64.4°C

5. RVM Prüfungen an Ersatzschaltungen

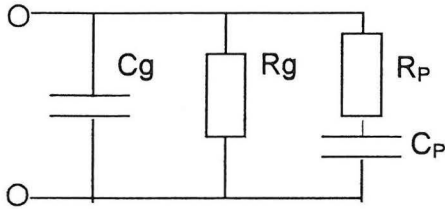
Das Ziel dieser Prüfungen ist die Untersuchung der Parameterabhängigkeit der RVM Resultate.

Beispiel 1

Anordnung Platte-Platte mit homogener Isolation:



ISOLATIONSMODELL



Cg = geometrische Kapazität Rg = Isolationswiderstand
Rp = Polarisationswiderstand Cp = Polarisationskapazität

ERSATZSCHALTUNG

Acht Ersatzschaltungen wurden aufgebaut und mit dem RVM 5461 geprüft.
Die Schaltungen wurden wie folgt aufgeteilt:

- vier Schaltungen mit kleiner Polarisationskonstante (entsprechend hoher Wassergehalt):

$\tau_{PKI} = 4.7\text{nF} \cdot 1\text{G}\Omega = 4.7 \text{ s}$

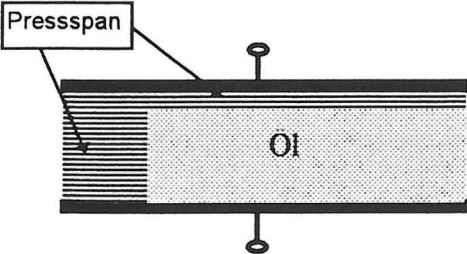
- vier Schaltungen mit grosser Polarisationskonstante (entsprechend niedrigem Wassergehalt):

$\tau_{Pgr} = 50\text{nF} \cdot 10\text{G}\Omega = 500 \text{ s}$

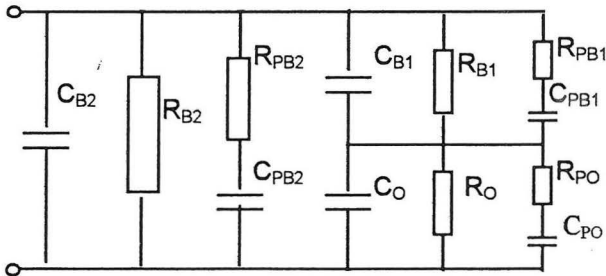
Die Resultate dieser Prüfungen (Bild 6) zeigen die Abhängigkeit der gemessenen Werte und gleichzeitig die Unabhängigkeit der dominanten Zeitkonstante τ_{CD} von der geometrischen Kapazität Cg und von dem Isolationwiderstand Rg.

Beispiel 2

Anordnung Platte-Platte mit homogener Isolation und Ölkanal:



ISOLATIONSMODELL



ERSATZSCHALTUNG

RB1 = Pressspan Seriewiderstand
CB1 = Pressspan Seriekapazität
RB2 = Pressspan Parallelwiderstand
CB2 = Pressspan Parallelkapazität
RO = Öl Seriewiderstand
CO = Öl Seriekapazität

RPB1 = Pressspan Polarisationswiderstand
CPB1 = Pressspan Polarisationskapazität
RPB2 = Pressspan Polarisationswiderstand
CPB2 = Pressspan Polarisationskapazität
RPO = Öl Polarisationswiderstand
CPO = Öl Polarisationskapazität

Folgende Annahmen wurden für den Aufbau der Ersatzschaltungen von Beispiel 2 getroffen:

- homogene Isolation ($R_{PB1} = R_{PB2}$, $C_{PB1} = C_{PB2}$), mit Pressspan-Polarisationskonstante gleich ca. 25s, entsprechend ca. 2.8% Wassergehalt.
- $C_{B2} = 4.7\text{nF}$; $R_{B2} = 100\text{G}\Omega$
- Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten Pressspan/Öl: $\epsilon_{Pr}/\epsilon_{Öl} \approx 2$
- Verhältnis der spez. Widerstände Pressspan/Öl („standard“ Öl): $\rho_{Pr}/\rho_{Öl} \approx 100$
- Verhältnis der Isolierstoffe: Pressspan ca. 40% ; Öl ca. 60%

Die gewählten Werte sind realitätsnah. Die folgende Tabelle zeigt die restlichen Annahmen für den Aufbau der Ersatzschaltungen (die Isolationswiderstände R_O des Öls sind abhängig von der Ölqualität):

Ersatzschaltung Nr.	Ölqualität	Isolationswiderstand Öl (R_o)	Polarisationskonstante Öl
5.1	gut	2 G Ω	940s
5.2	standard	0.2 G Ω	94s
5.3	schlecht	0.02 G Ω	2s

Die Resultate dieser Prüfungen zeigen, dass die dominante Zeitkonstante unabhängig von der Ölqualität ist, solange diese Qualität nicht zu schlecht wird (Bild 7).

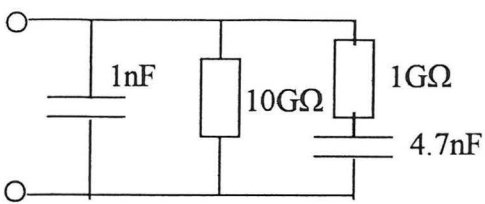
Für „gutes“ sowie „standard“ Öl (Ersatzschaltungen 5.1 und 5.2) liegen die gemessenen dominanten Zeitkonstanten nahe beim theoretischen Wert (25s):

- gemessene Werte: $\tau_{CD} = 30.8\text{s}$ für „gutes“ Öl und $\tau_{CD} = 28.2\text{s}$ für „standard“ Öl, beide entsprechend ca. 2.7% Wassergehalt
- theoretischer Wert: $\tau_{CD} = 25\text{s}$, entsprechend ca. 2.8% Wassergehalt.

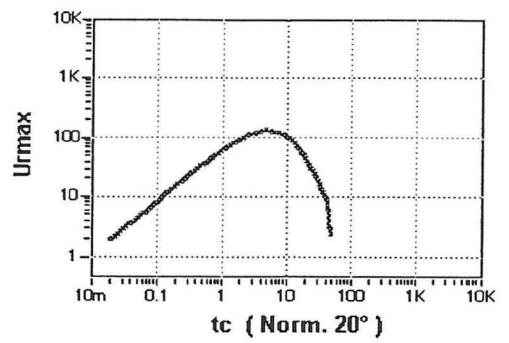
Die Situation ändert sich beim Isolieröl mit „schlechter“ Qualität, wo zwei Maximalwerte gemessen werden. Das heisst, eine hohe Ölleitfähigkeit kann das Polarisationspektrum beeinflussen. Bei praktischen Messungen kann ein solches Phänomen auch beobachtet werden. Wenn das Öl mehr Wasser enthält als das Gleichgewicht Wasser/Öl/Temperatur erlaubt, kann das Wasser vom Öl zum Papier diffundieren. Diese Diffusion bildet eine Wasserschicht auf der Papieroberfläche, die einen zweiten Urmax-Maximalwert erzeugen kann.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen:

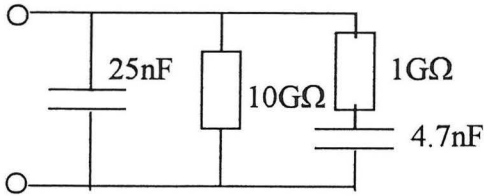
- Bei vom Standardverlauf abweichenden resultierenden Kurven, ist es nicht zulässig die berechneten Wassergehaltswerte als tatsächliche Wassergehalte der Isolation unkritisch zu interpretieren. Es ist zu überprüfen, ob die verschiedenen dominanten Zeitkonstanten tatsächlich der Inhomogenität der Isolation entsprechen.
- In solchen Fällen ist es sehr wichtig, sich für die Interpretation der Resultate Informationen über den Prüfling und die Prüfbedingungen zu beschaffen.
- Auch eine kritische Analyse der Rohdaten kann wichtige Hinweise auf eventuell durch Störungen verursachte Maximalwerte geben.
- In Zweifelsfällen sollte eine zusätzliche Messung durchgeführt werden (Überprüfung der Reproduzierbarkeit und der Stabilität der Messung)



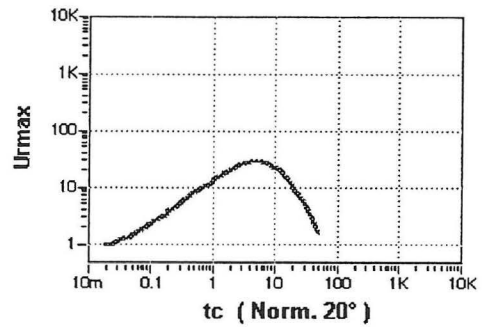
$$\tau_{CD} = 4.9s \quad U_{rmax} = 137 \text{ V}$$



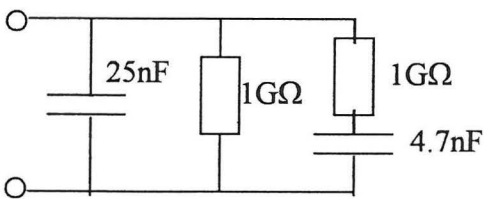
tc (s)	Urmax (V)	H2O (%)	Tkritisch (°C)
4.91	137.0	3.6	62



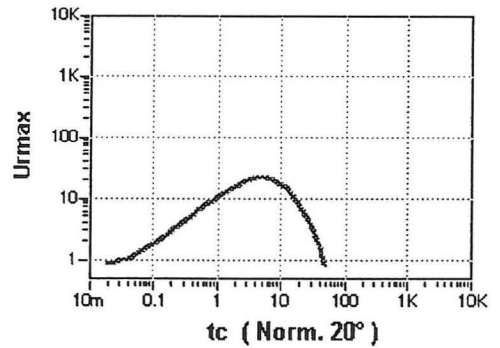
$$\tau_{CD} = 4.9s \quad U_{rmax} = 29.1 \text{ V}$$



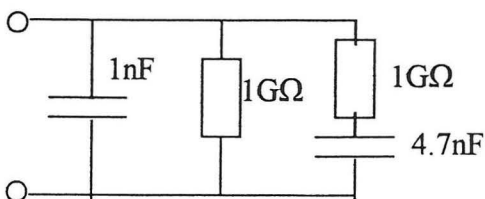
tc (s)	Urmax (V)	H2O (%)	Tkritisch (°C)
4.91	29.1	3.6	62



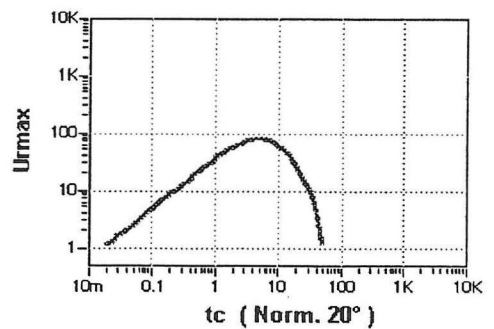
$$\tau_{CD} = 4.9s \quad U_{rmax} = 22.4 \text{ V}$$



tc (s)	Urmax (V)	H2O (%)	Tkritisch (°C)
4.91	22.4	3.6	62

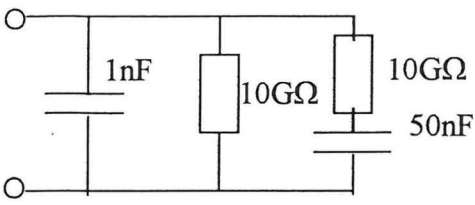


$$\tau_{CD} = 4.9s \quad U_{rmax} = 77.4 \text{ V}$$

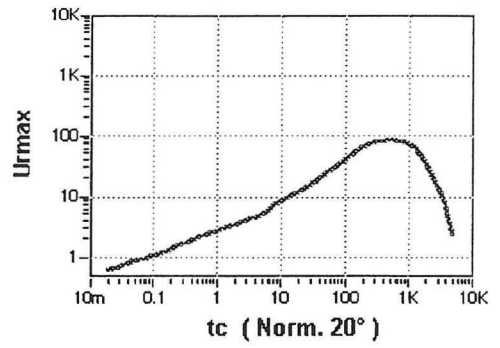


tc (s)	Urmax (V)	H2O (%)	Tkritisch (°C)
4.91	77.4	3.6	62

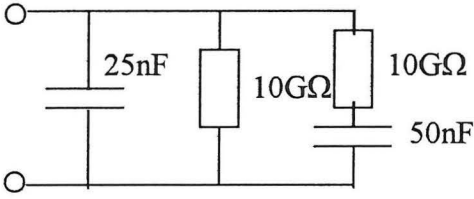
Bild 6: Ersatzschaltung von Beispiel 1



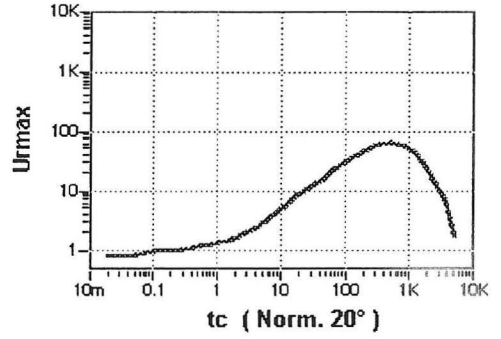
$$\tau_{CD} = 484s \quad U_{rmax} = 90.9 \text{ V}$$



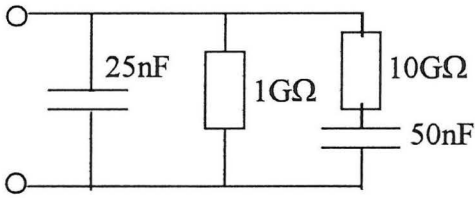
$\tau_c (s)$	$U_{rmax} (V)$	H2O ($\%$)	Tkritisch ($^{\circ}C$)
484.00	90.9	1.3	104



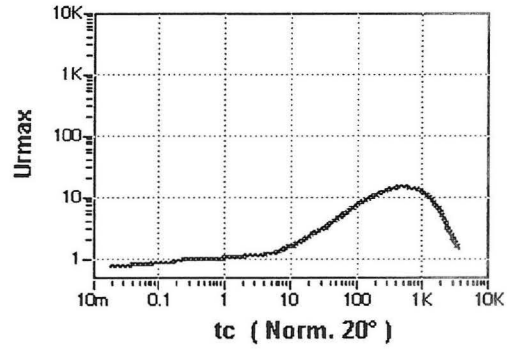
$$\tau_{CD} = 490s \quad U_{rmax} = 64.7 \text{ V}$$



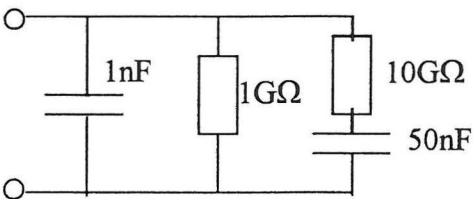
$\tau_c (s)$	$U_{rmax} (V)$	H2O ($\%$)	Tkritisch ($^{\circ}C$)
490.41	64.7	1.3	104



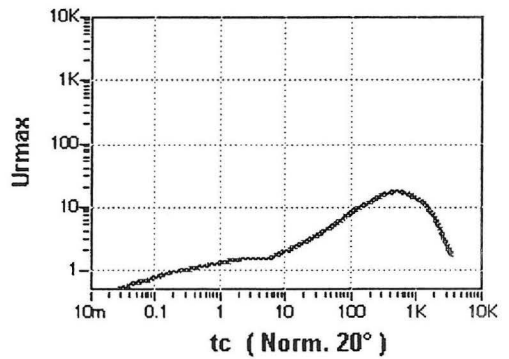
$$\tau_{CD} = 484s \quad U_{rmax} = 15.6 \text{ V}$$



$\tau_c (s)$	$U_{rmax} (V)$	H2O ($\%$)	Tkritisch ($^{\circ}C$)
484.00	15.6	1.3	104



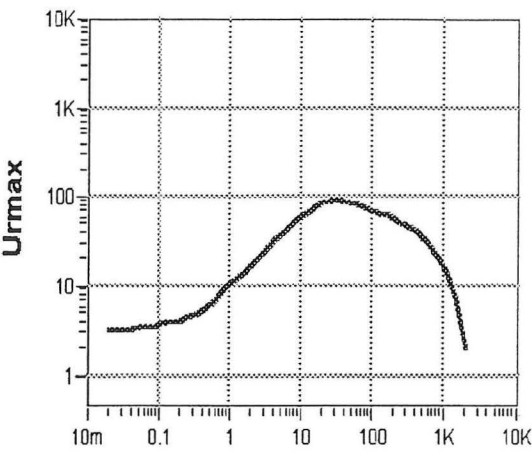
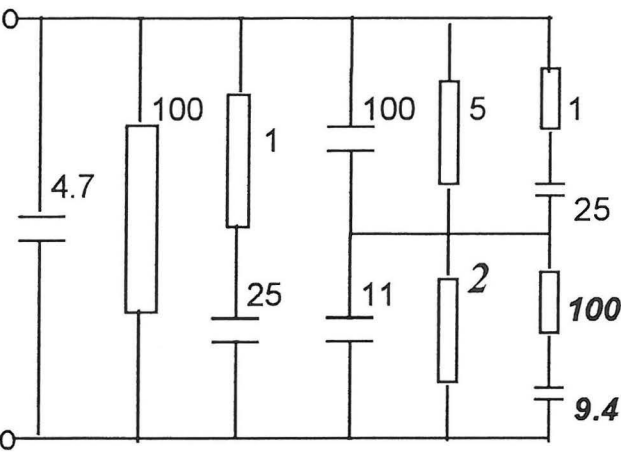
$$\tau_{CD} = 484s \quad U_{rmax} = 17.7 \text{ V}$$



$\tau_c (s)$	$U_{rmax} (V)$	H2O ($\%$)	Tkritisch ($^{\circ}C$)
484.00	17.7	1.3	104

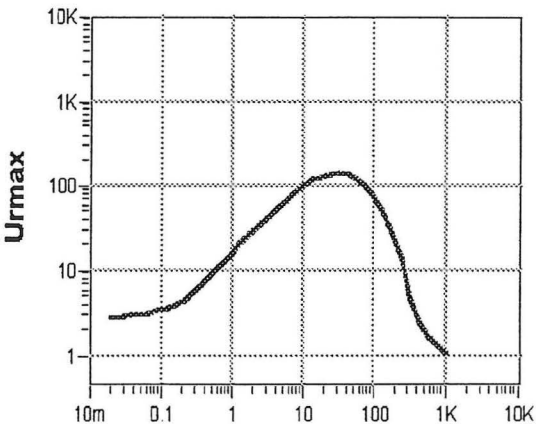
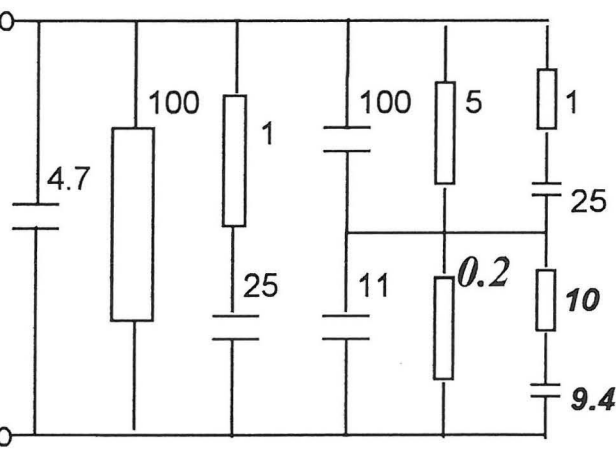
Bild 6 (Folge)

Ersatzschaltung 5.1 : „gutes“ Öl



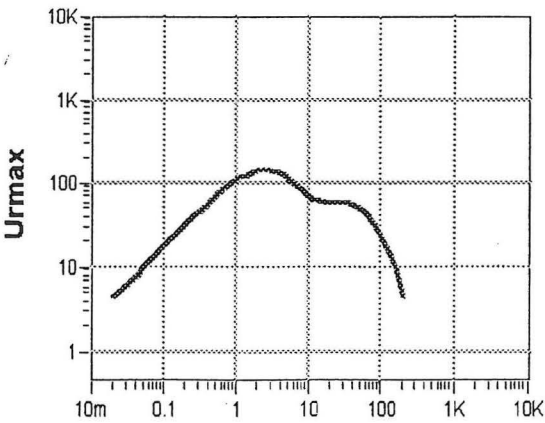
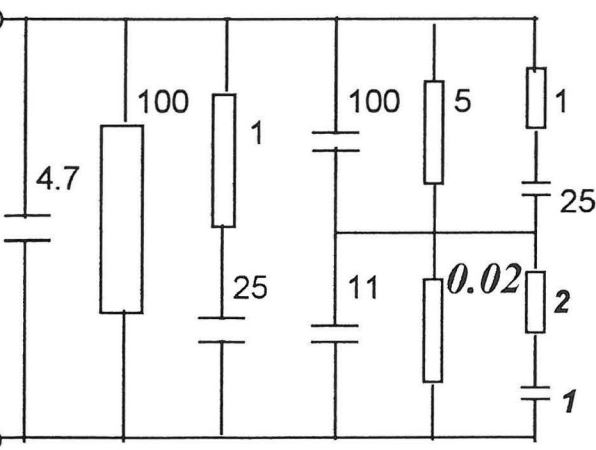
$\tau_{CD} = 30.8s \quad U_{rmax} = 94V \quad H_2O = 2.7\%$

Ersatzschaltung 5.2 : „standard“ Öl



$\tau_{CD} = 28.2s \quad U_{rmax} = 148V \quad H_2O = 2.7\%$

Ersatzschaltung 5.3 : schlechtes Öl



$t_c = 2.3s \quad U_{rmax} = 151V \quad H_2O = 3.9\%$
 $t_c = 21.6s \quad U_{rmax} = 62V \quad H_2O = 2.8\%$

Widerstandswerte in GΩ Kapazitätswerte in nF

Bild 7: Ersatzschaltungen von Beispiel 2

6. Schlussfolgerungen

Die Rückkehrspannungsmethode liefert eine ausführliche Information über den Alterungszustand einer Öl-Papier Isolation. Regelmässige RVM Prüfungen (z.B. alle 1, 2 oder 3 Jahren) erlauben:

- das Alterungsverhalten des gemessenen Transformators zu verfolgen
- Vergleiche zwischen Transformatoren zu ziehen
- Hinweise über die Bedingungen für den weiteren Betrieb und über die Wartungsarbeiten zu erhalten

Die gemessenen Werte einer RVM Prüfung stellen die definierte Charakteristik der Isolation im aktuellen Zustand dar, unabhängig davon, ob es Standardkurven oder Nicht-Standardkurven sind. Die korrekte Interpretation der Resultate hingegen, ist vom Kurvenverlauf abhängig und verlangt bei keinen Standardresultaten mehr Kenntnisse und Erfahrung.

Absolute Voraussetzung für eine korrekte Analyse ist eine einwandfreie RVM-Prüfung.

Damit ist gemeint, dass die gemessenen Werte nur das Resultat des Polarisationsverhaltens der Isolation sind. Es ist sicher zu stellen, dass keine Beeinflussung durch eventuelle Restladungen oder Störungen vorliegt. Das Gerät RVM 5461 bietet die Möglichkeit solche Phänomene abzuchecken. Die neue Analysensoftware Typ SWRVM2 enthält einen Plausibilitätscheck, sodass eine Warnung automatisch im Kommentar erscheint, falls die resultierenden Kurven vom Standardverlauf abweichen.

Basierend auf Praxiserfahrungen und den oben beschriebenen Erkenntnissen, wurden zwei neue Dokumente erstellt („Fragebogen“ und „Richtlinien“ zum Einsatz des RVM 5461). Diese zwei Dokumente sind gleichzeitig als Hilfe und Wegleitung für den optimalen und korrekten Einsatz des RVM 5461 zu betrachten.

Schrifttum

- [1] O.Cohard, P.Guunic, C.Legrand, P.Luccioni, G.Sanchis: Power transformer diagnostic. A on-site evaluation programme, using four methods for a new inspection policy. CIGRE, 1993, 110-18
- [2] A.Bognàr, L.Kalocsai, G.Csépes, E.Németh, J.Schmidt: Diagnostic tests of high voltage oil-paper insulating systems using DC dielectrometrics. CIGRE, 1990, 15/33-08
- [3] C.Boisdon, M.Carballeira, P.Guunic, L.Latil, J.Poittevin: Le conditionnement sur site des transformateurs, son contrôle et son impact sur la tenue diélectrique. CIGRE, 1994, 12-101
- [4] E.Ildstad, U.Gäfvert, P.Thärning: Relation Between Return Voltage and Others Methods for Measurement of Dielectric Response. IEEE Int'l Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, June 5-8, 1994
- [5] A.Bognàr, I.Hamos, I.Kispal, G.Csépes, J.Schmidt: A DC expert system (RVM) for checking the refurbishment of high voltage oil-paper insulating system using polarization spectrum analysis in range of long-time constants. CIGRE, 1994, 12-206