

ÜBER DEN BEITRAG DER KRAFTWIRKUNGEN EINES ELEKTRISCHEN FELDES ZUR ENTWICKLUNG DER ELEKTRISCHEN BÄUMCHEN (TREEING) WÄHREND DER DEGRADATION EINES ISOLIERSTOFFES

K. MARTON

Laboratorium für Hochspannungstechnik,
Elektrotechnische Fakultät der TH Kosice, Tschechoslowakei

Eingegangen am 1 Juni 1987
Vorgelegt von Prof. Dr. Tibor Horváth

Abstract

The paper deals with the interaction of electric field with the insulating material resp. insulating system from the main aspect of the mechanical effects. The formation mechanism of channels in the electrical treeings has been considered and discussed.

Einleitung

Ein lokal wirkendes starkes elektrisches Feld fördert die Entstehung der elektrischen Bäumchen (Treeing) mit Gas ausgefüllter Hohlräume, die ein Ergebnis von unvollständigen Entladungen im Isolierstoff sind, insbesondere, wenn die Feldstärke die Grenze von 10^7 V/m überschreitet. Die Verbreitung von diesen Deformitäten wird hervorgerufen und somit auch begleitet von extrem hohen Drücken in den mikroskopisch kleinen Volumen des Dielektrikums des untersuchten Isoliersystems, entweder bei der Wirkung der Gleichspannung oder der Wechselspannung bei der Frequenz von 50 Hz.

Die Bedingungen der Entstehung von unvollständigen Entladungen werden durch die Konfiguration des elektrischen Feldes und durch die elektrophysikalischen und chemischen Größen in dem untersuchten Teil der Isolation bestimmt. Eine der bedeutendsten Eigenartigkeiten der unvollständigen Entladungen ist die Anwesenheit einer starken Autoelektronenemission der Elektrodenoberfläche bei einer negativen Polarität der Wechselspannung von 50 Hz. Eine ähnliche Emission kann auch bei positiver Elektrodenpolarität vorkommen, jedoch ist in diesem Fall der Mechanismus der Leitfähigkeit offensichtlich lochartig.

Bei der Initiierung von elektrischen Bäumchen durch mechanische Ermüdung und Teilentladungen sowie durch Injektierung und Extraktion von Raumladungen spielt die Elektronenemission von der Spitzenelektrode bei der negativen Polarität (Halbwelle) der Wechselspannung eine große Rolle. Ein

Teil der Elektronen gelangt auf bestimmte Entfernung von der Spitze. Während der positiven Polarität gelangen sie zurück zur Spitze und im weiteren Zyklus werden sie wieder emittiert. Bei jedem Zyklus erlangen manche Elektronen eine genügende Energie um eine bestimmte Dekomposition des Polymers zu bewirken und seine Molekülmasse zu vermindern, wonach die Gasbildung folgt. Die Elektronenemission hängt beträchtlich von der Austrittsarbeit des Elektrodenmetalls ab und es besteht eine bestimmte Korrelation zwischen der Austrittsarbeit und der Initiierungsspannung des Bäumchens. Gegenüber der mobilen Elektronen in der Isolation sind die positiven „Löcher“ bzw. Ionen immobil. Daraus folgt auch, daß die Elektronenextraktion einen engen Kanal des Materialabbaus herausbilden kann, der zum ersten Schritt der Bäumchenformation führt.

Ein Teil der Energie von unvollständigen Teilentladungen wird für die Erweiterung des Kanals verbraucht, während die Zerstörung von molekularen Bildungen von dem übrigen Teil der Energie bewirkt wird. Bei der Untersuchung der Zerstörung der Isolation durch unvollständige Entladungen muß man die Bildung von neuen chemischen Zusammensetzungen auch in Betracht nehmen, da sie zur Veränderung der mechanischen Festigkeit des Dielektrikums führt. In der vorliegenden Arbeit versuchen wir auf die Gründe des lokalen Wachstums der Feldstärke bis zu den Werten von GV/m hinzuweisen, wobei die mechanischen Drücke die Werte von 10^3 MPa und mehr erreichen. Berücksichtigt wird auch die fortschreitende Verschlechterung der Isolation, die sich durch die Veränderung des Verlustfaktors bzw. der elektrischen Leitfähigkeit offenbart und wir werden den Einfluß der relativen Permittivität auf den stationären bzw. harmonischen veränderlichen Druck im Isolierstoff festlegen.

Mechanische Wirkungen des stark inhomogenen elektrischen Feldes auf den Isolierstoff in der Umgebung der Elektrode mit kleinem Krümmungsradius

In den stark inhomogenen — ionisierenden Feldern, wo die Feldstärke nach dem Überschreiten des kritischen Wertes von 10^7 V/m erreicht (Krümmungsradius: $1-10^3$ μ m), entsteht im Zwischenelektrodenraum eine Raumladung. Wenn gleichzeitig auf der Grenzfläche zwischen der Spitze (Stab, Nadel, usw.) und dem Dielektrikum Oberflächenladungen vorkommen, dann kann die Energie des elektrischen Feldes W_e folgenderweise ausgedrückt werden [2]:

$$W_e = \int_V \frac{U\rho}{2} dV + \oint_S \frac{U\sigma}{2} dS = \int_V \frac{ED}{2} dV \quad (1)$$

wobei ρ die Volumen und σ -die Oberflächenladungen des vorausgesetzten Systems sind.

Die Dichte der elektrischen Energie kann in der isotropen Umgebung von relativer Permittivität ϵ_r in der Lage x durch folgende Beziehung ausgedrückt werden:

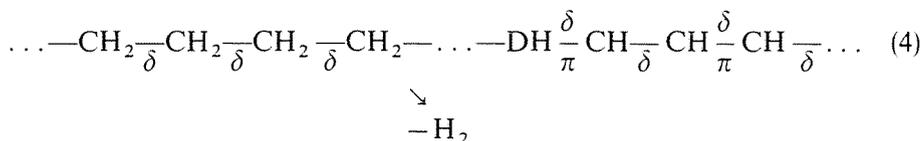
$$w(x) = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r(x) E^2(x) \quad (2)$$

und in der anisotropen Umgebung:

$$w(x) = \frac{1}{2} D(x) E(x) \quad (3)$$

In der Arbeiten [4], [5] haben wir eine Hypothese ausgesprochen, nach welcher bei der Herausbildung von elektrischen Bäumchen das starke elektrische Feld eine dominante Wirkung hat, bedeutsam beeinflussend die chemische Struktur der Bindungen in der organischen Substanz.

Auf Grund der bei der Beobachtung gewonnenen Ergebnisse des Einflusses des starken elektrischen Feldes auf Polyäthylen zwischen dem Elektrodensystem Spitze-Spitze ist es möglich eine Konjugation vorauszusetzen. In einem starken elektrischen Feld kommt es zur Entstehung der Doppelbindungen (wahrscheinlich durch Abspaltung des Wasserstoffes vom PE):



Schrittweise nahm die Konjugation der Ketten zu (das Verdunkeln des Stoffes), wobei es wahrscheinlich auch zur Entstehung von kondensierten aromatischen Kernen bis zum graphitischen Charakter kam, die schon eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen.

Unsere Beobachtungen haben unabhängig von dem verwendeten Isolierstoff (PE, Epoxyd, Silikon) gezeigt, daß mit Wachstum und Verbreitung des elektrischen Bäumchens zeitabhängig es zu lokalen Veränderungen der relativen Permittivität in der Umgebung, sowie zu Veränderungen der Materialdichte γ_D kommt.

Insofern $\epsilon_r = f(x, y, z)$ und $\gamma_D = \varphi(x, y, z)$, können wir schreiben: $\epsilon_r = F(\gamma_D)$ und

$$\frac{\partial \epsilon_{r1}}{\partial \gamma_{D1}} \neq \frac{\partial \epsilon_{r2}}{\partial \gamma_{D2}} \neq \frac{\partial \epsilon_{rn}}{\partial \gamma_{Dn}} > 0$$

Im Dielektrikum besteht laut [3]:

$$f = \rho_0 E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial \gamma_D} \gamma_D \right) \quad (5)$$

Nach dieser Gleichung können die Änderungen des physikalischen Vorgangs während des Älterungsprozesses erklärt werden, das sich mit Abb. 1 ergänzen läßt.

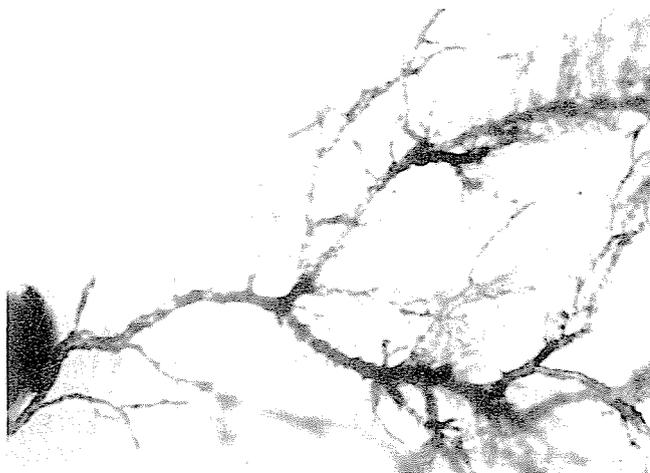


Abb. 1

Analysiert man die Zustände in der Umgebung, die infolge der Wirkung von extrem hohen Drücken von dem elektrischen Feld auf den Isolierstoff (Polyäthylen, Epoxyd, Silikon) entstehen, so stellt man auf Grund der Experimente fest, daß von der Spitze ausgehend die entstehenden Bäumchen durch Kanälchen mit Innendurchmessern von einigen Zehnteln Mikrometer bis zu einigen Zehnten und Hunderten von Mikrometern dargestellt sind. In der Abhängigkeit von der Lage zwischen den Elektroden ist auch die Frage der Druckzustände zu lösen, wobei zwei Fälle vorkommen können:

a) Der Kanal verfolgt ungefähr die Form der fiktiven Kraftlinien und bildet die Grenzlinie Gas-Isolierstoff, in der Richtung der Kraftlinien. Die Verschiebungsdichte ist die gleiche ($D_1 = D_2$), aber die Feldstärke ist unterschiedlich. In der Abhängigkeit von dem Wert der relativen Permittivität der Umgebung wird $E_1 \neq E_2$. Dann ist der resultierende spezifische Zug (Druck) auf das Dielektrikum in allgemeinen Fall:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2\varepsilon_0} \left(\frac{1}{\varepsilon_{r1}} - \frac{1}{\varepsilon_{r2}} \right) D^2 \quad (6)$$

Es ist jedoch notwendig den Wert der rel. Permittivität des ionisierten Gases im Kanal in Betracht ziehen, dessen ε , die Höhe 500 und mehr erreichen kann. Das Verhältnis $\varepsilon_{r1}/\varepsilon_{r2}$ ändert sich ziemlich stark, das die Bildung von weiteren Kanälchen in der Richtung von fiktiven Kraftlinien bedingt (Abb. 2.).

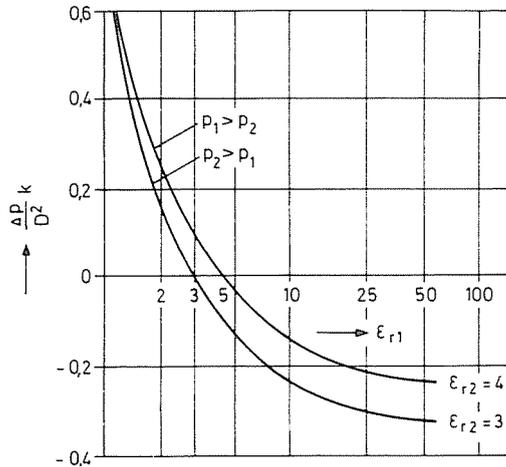


Abb. 2

b) Der Kanal befindet sich ungefähr in der Richtung der fiktiven Kraftlinien, jedoch die Zustände werden vertikal auf die Grenzlinie verfolgt. Die Feldstärke auf der Grenzfläche beträgt: Kanal (ε_{r1}) — Dielektrikum (ε_{r2}) ist gleich ($E_1 = E_2$). Der resultierende spezifische Zug auf das Dielektrikum ist (wenn $\varepsilon_{r1} < \varepsilon_{r2}$, dann $p_1 > p_2$):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2}) E^2 \quad (7)$$

Diese Beziehung gilt solange es nicht zur Ionisierung des Gases oder zur Bildung von karbonisierten Fasern in dem Kanal kommt, dann wird $p_2 > p_1$, die Richtung der Zugbeanspruchung verändert sich und das verursacht die Bildung von neuen Kanälen meistens vertikal zu den mit Gas ausgefüllten Röhren, deren Wände am Anfang nicht abgebaut sind durch elektrochemische Prozesse. Später vermindern diese Wände während des Abbauprozesses ihre Oberflächeresistenz und übernehmen dadurch die Funktion der Spitze (Abb. 3).

Unter der Voraussetzung, daß der Isolierstoff durch ein Wechselfeld von großer Stärke und von einer Frequenz von 50 Hz beansprucht wird, kann man

die Energiedichte für isotrope Media ausdrückende Gleichung in folgender Form ableiten:

$$\frac{dW_e}{dV} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 m \left(\cos^2 \omega t \cos \delta + \frac{\sin 2\omega t}{2} \sin \delta \right) \quad (8)$$

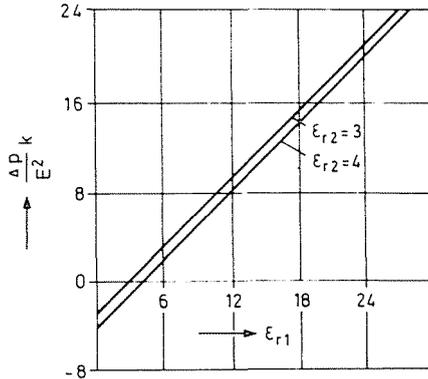


Abb. 3

Wählen wir den Verlauf der Feldstärke nach der Funktion $E = E_m \cos \omega t$, da wir die maximale Spannungsbeanspruchung in der Zeit $t = 0$ ms von den Intervall $20 \geq t \geq 0$ ms definieren. Die dielektrische Verschiebung wird dann nach der Funktion $D = D_m \cos(\omega t - \delta)$ verlaufen, wobei δ den Winkel des Faktors der dielektrischen Verluste darstellt der sich theoretisch im Intervall von $90^\circ \geq \delta \geq 0^\circ$ bewegen kann.

Die Druckzustände in der Defektstelle

Die Defektstellen werden von Ansätzen, Fasern der elektrischen Bäumchen, bzw. in der Form der Rotationsellipsoide oder Paraboloiden mit Krümmungsradius von etwa 2 bis $1000 \mu\text{m}$ gebildet. Meistens kann man die gebildete Konfiguration mit der Anordnung Spitze-Platte, bzw. Spitze-Spitze vergleichen. Die Gefährlichsten sind die Ansätze mit dem Krümmungsradius von $2\text{--}10 \mu\text{m}$, wo die maximale Feldstärke den Wert bis 1 GV/m also 10^4 kV/cm erreicht.

Untersuchen wir weiter den Einfluss der relativen Permittivität des Grundmaterials auf die Druckhöhe in der Abhängigkeit von der Feldstärke in der Defektstelle. In der logarithmischen Skala bekommen wir lineare Abhängigkeiten, die darauf hinweisen, daß je kleineren Krümmungsradius die lokale

Deformation aufweist, desto größer der Druck ist, der sich durch die Vergrößerung von ϵ_r erhöht (Abb. 4). In der Betriebspraxis kommt viel öfter die Wechselbeanspruchung durch die Frequenz von 50 Hz vor.

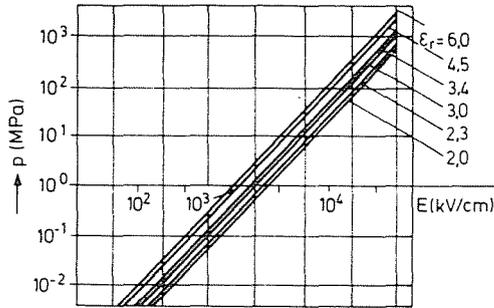


Abb. 4

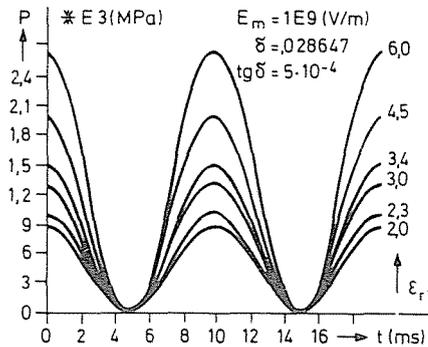


Abb. 5

Der Isolationsabbau hat einen komplizierten Charakter und auch die mechanische Beanspruchung von den elektrischen Drücken aufweist einen pulsierenden Verlauf, wie es aus der abgeleiteten Gleichung ersichtlich ist. Bei der Programmerarbeitung für den Rechner gingen wir daraus hervor, daß durch eine fortschreitende Entwertung des Isolationsystems durch lokale Defekte sich die Leitfähigkeit und der Wert des Verlustfaktors ändern. Wir haben uns ein Intervall der Änderungen von $5 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^0$ gewählt, was die Verschlechterung der Qualität bis zu dem vollständigen Abbau der elektrischen Eigenschaften abspiegelt. Die Berechnungen wurden in dem Umfang der Feldstärke von 10^7 V/m bis 10^{10} V/m für Isolierstoffe mit relativer Permittivität von 2, 2,3, 3, 3,3, 3,4, 4, 4,5 und 6 durchgeführt. Die Änderungen der Druckwellen haben wir während einer Periode (20 ms) verfolgt, wobei sich zeigte, daß im Falle von hochwertigsten und guten Isolierstoffen die Amplitude der Druckbeanspruchung immer positiv war (Abb. 5). Mit der Verschlechterung

rung von $\text{tg } \delta$ wird sich der maximale Wert der Amplitude in die Richtung nach rechts verschieben und bei $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^0$ erreicht die Verschiebung bereits 10% der Gesamtperiode d.h. 2 ms. Die Entwertung des Isolationszustandes zeigt sich auch in der Höhe der Druckamplitude, wo zum Schaden der positiven Beanspruchung die negative mechanische Beanspruchung zu Ausdruck kommt, das sehr ungünstig den Isolationszustand beeinflusst, wobei die absoluten Werte der Amplituden nicht gleich sind (Abb. 6).

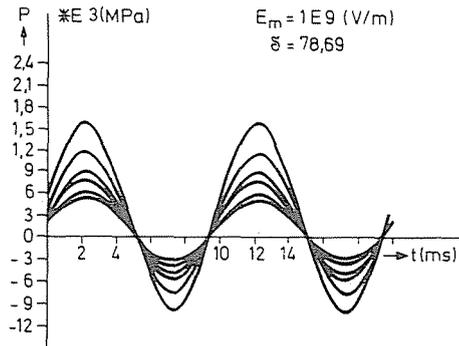


Abb. 6

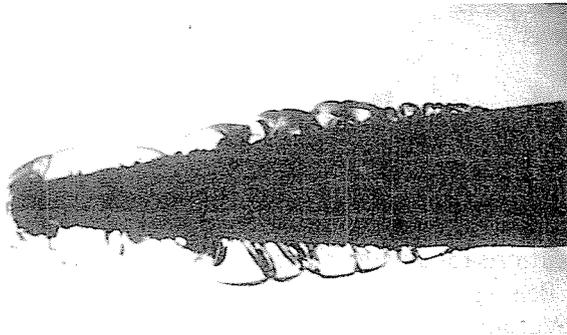


Abb. 7

Die Grenzfläche der Defektstelle wird dadurch stark beansprucht. In Abb. 6 ist diese Veränderung nicht so markant, jedoch beträgt $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^0$, das Verhältnis der Amplituden 1,6 : 1. In den Isolierstoffen mit höherer relativen Permittivität, bei Feldstärken bis 10 GV/m erhöht sich wesentlich die Druckbeanspruchung und erreicht die Werte bis $2,5 \cdot 10^3 \text{ MPa}$.

Unsere Berechnungen wurden experimentell in drei Typen von festen Isolierstoffen bewiesen und zwar in Fällen von Kabel-Polyäthylen, Epoxid-Harz, und Silikon, die als Vergußkabelendstücke von 22 kV Kabeln in der

Elektroenergetik dienlich waren. Die Messungen wurden in dem Temperaturbereich von 25 °C bis 80 °C durchgeführt. Kunstdefekte wurden mit einer Stahlnadel mit Krümmungsradius der Elektrode von 5 bis 10 μm gemacht.

Die obenangeführten physikalischen Erscheinungen haben wir auch experimentell untersucht. Die Messungen wurden mit Proben von PE, Epoxidharz und kombinierten Materialien des Typs Öl — Kondensatorpapier und Öl — biaxial orientierte Polypropylenfolie durchgeführt. Die Destruktion des Isoliersystemes in der Nähe der Inhomogenität wurde durch die phototechnische Methode untersucht (Abb. 7, 8, 9), wobei während der Experimente die kombinierte elektrothermische Beanspruchung im Bereich der Temperaturen bis 80 °C gewählt wurde.

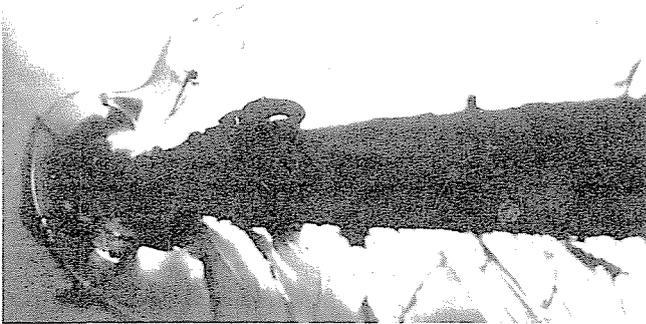


Abb. 8



Abb. 9

Schlußfolgerung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Interaktion des elektrischen Feldes mit dem Isolierstoff, bzw. mit dem Isoliersystem von dem Aspekt der mechanischen Wirkungen aus (Druck, bzw. Zug) und auf die Defektstelle

appliziert untersucht. Die analogischen Erwägungen beziehen sich auf die Entwicklung der Kanälchen in den elektrischen Bäumchen. In der weiteren Etappe wird es notwendig sein, sich auf die Untersuchung und Aufnahme des Drucks mit experimentellen Verfahren, insbesondere bei der elektrischen Beanspruchung durch harmonische Wechselspannung zu richten. Aus den bisherigen Ergebnissen ist zu erwarten, daß die Druckänderung in der Zeitabhängigkeit bei verschiedenen Arten der Isolationen einen pulsierenden Charakter haben wird, wobei auch die harmonische Analyse des gewonnenen Verlaufs zur Klärung der mechanisch deformierten Isoliersysteme, beansprucht durch ein kombiniertes elektrisches und thermisches Feld, beitragen kann.

Literatur

1. BAHDER, G.—DAKIN, W.,—LAWSON H.: Analysis of treeing type breakdown, CIGRÉ 1978
2. KUPALEN, S. D.: Elektromagnitnoje pole, Gosenergoizdat Moskva 1963
3. STRATTON, J.: Teória elektromagnetického pole, SNTL Praha 1963
4. MARTON, K.—MARTONOVÁ, M.: Prednáška na 7. sympóziu "Kvapalná dielektriká elektrotechnike, Vysoké Tatry 1985
5. MARTON, K. et al.: Záverečná výskumná správa R 10—125—903—02, EF VST Kosice 1985
6. MARTON, K.—KOLCUNOVÁ, I.: Elektrické a mechanické sily v izolacnych systémoch pri kombinovanom elektricko-tepelnom namáhaní, Zborník zo IV. vedeckej konferencie EF VST, Kosice 1986
7. KNEPPO, L.: Elektrické pole, SVTL Bratislava 1963, skriptum
8. GRIAC, J.: Vplyv vnútorného mechanického napätia na tvorbu elektrických stromčekov v PE. III. vedecká konferencia EF VST Kosice, 1984

Dr. Karel MARTON Svermova ulica c 9/A
041 20 Kosice