

COMPOUND POLIMERIC PENTRU CONTROLUL CÂMPULUI ELECTRIC AL ACCESORIILOR CABLURILOR DE ENERGIE

Antonel PLEȘA¹, Dumitru MIHAI², Petru V. NOȚINGER³

¹ICME ECAB S.A., 42 Drumul între Tarlale Street, 32982 Bucharest, Romania;

Phone: +40 21 2090622; E-mail: aplesa@icme.vionet.gr

²ENERGO COM S.A., 3 Serg. David Ilie Street, 40807 Bucharest, Romania; Phone: +40 21 4608814,

+40 21 46088015; Fax: +40 21 4608816; E-mail: energocom@xnet.ro

³Electrical Engineering Faculty, University "Politehnica" Bucharest, 313 Splaiul Independenței,

Romania; Phone: +40 21 4029126; Fax: +40 21 4104355; E-mail: petrunot@elmat.pub.ro

Abstract. *In joints and terminations for medium and high voltage power cables, high potential gradients may occur in areas where the radial field has discontinuities due to the change in the field borders. These areas are situated at the end of the semi-conducting screen, near and over the joints and generally in locations under voltage and separated by a dielectric. Was researched and experimented a polymeric compound having non-linear resistance thus providing an improved electric field stress-control in the vulnerable areas of power cable accessories.*

The compound can be applied on the inner surface of heat-shrinkable tubes used in accessories for power cables with polymeric insulation (PVC, PE or XLPE).

In dry form, the material is thermoplastic, with stable hardness, 90°C maximum continuous operating temperature and a melt temperature value allowing perfect contact with the surfaces on which it's applied, covering even irregular shapes and eliminating the air bubbles.

The compound has a volume resistivity of $10^{11} - 10^8 \Omega \cdot m$ in the electric field range intensity 50÷500 V/mm (service electric stress domain) and assures a partial discharge level < 10 pC. Due to the high non-linear characteristic of resistivity the stress-control system made with this material is one-component type, which has the advantage of easy installation and efficiency of cascade systems type.

1. INTRODUCERE

Construcția modernă a cablurilor de energie de medie și înaltă tensiune este de tip ecranat, atât în cazul cablurilor monofazate, cât și în cazul celor trifazate compacte, unde fiecare fază este ecranată [1].

Ecranele exterioare ale cablurilor sunt legate la pământ, ceea ce uniformizează câmpul electric radial în izolațiile acestora, determinând o reducere a solicitărilor electrice. Drept urmare, în cablurile de energie, câmpul electric este de tip radial, suprafețele echipotențiale având forma unor cilindri concentrici. Valoarea intensității câmpului electric se calculează cu relația cunoscută pentru condensatoare cilindrice și are valoarea maximă (E_{\max}) la nivelul razei interioare R_i :

$$E_{\max} = \frac{U_0}{R_i \cdot \ln \frac{R_e}{R_i}}, \quad (1)$$

unde U_0 reprezintă diferența de potențial dintre conductor și ecran, R_e – raza exterioră și R_i - raza interioară a izolației.

Repartiția cvasiuniformă a câmpului electric se modifică foarte mult atunci când, pentru executarea terminalului, este îndepărtat ecranul semiconductor al cablului, iar capătul cablului nu este lăsat tratat. În zona întreruperii ecranului apare o concentrare mare a liniilor de câmp electric, ceea ce determină o solicitare excesivă a izolației, solicitare care poate conduce la străpungerea acesteia.

Spre deosebire de izolații, terminalele cablurilor prezintă, întotdeauna, și o componentă longitudinală importantă a câmpului electric de-a lungul interfeței aer-izolație, care poate conduce la conturnarea terminalului netratat, pentru valori ale tensiunii chiar mai mici decât cea de serviciu. Din acest motiv accesoriile pentru cablurile de medie și înaltă tensiune, trebuie să conțină un sistem de control al câmpului electric, astfel încât să asigure un nivel corespunzător de solicitare a izolației electrice, pe întreaga perioadă de funcționare a acesteia.

2. CALCULUL REPARTIȚIEI CÂMPULUI ELECTRIC ÎN TERMINALELE CABLURILOR

Pentru determinarea potențialului și a intensității câmpului electric în cazul întreruperii ecranului s-a utilizat programul QuickField. Rezultatele obținute evidențiază o repartiție a potențialului puternic neuniformă, liniile echipotențiale concentrându-se în zona ieșirii din ecran.

În zona terminalului netratat al unui cablu cu tensiunea nominală de 20 kV, secțiunea conductorului de 150 mm² și având izolația din polietilenă reticulată, rezultă un câmp maxim total în aer (corespunzător, aproape în totalitate, componente longitudinale) [2]:

$$E_{\max} = 67,7 \text{ kV/cm} . \quad (2)$$

Conform teoriei lui Boeck [3] valoarea E_0 a intensității câmpului electric critic în aer, la presiunea p , la care încep procesele de ionizare, însoțite de impulsuri de curent, este dată de relația:

$$\left(\frac{E}{p} \right)_0 = 24,2 \text{ kV/cm}\cdot\text{bar} . \quad (3)$$

Ținând cont de variațiile uzuale ale presiunii, temperaturii și umidității, unii autori [4] utilizează o valoare de prag E_D a câmpului de descărcări în aer mai redusă:

$$E_D = 21,2 \text{ kV/cm} \quad (4)$$

După cum rezultă din relația (2), în cazul terminalului netratat, câmpul longitudinal depășește cu mult această valoare de prag.

Valorile intensității câmpului electric sunt determinate, în general [1,5], de capacitățile dintre suprafața izolației și ecranul exterior (C_1) și dintre suprafața izolației și conductor (C_0) (fig.1).

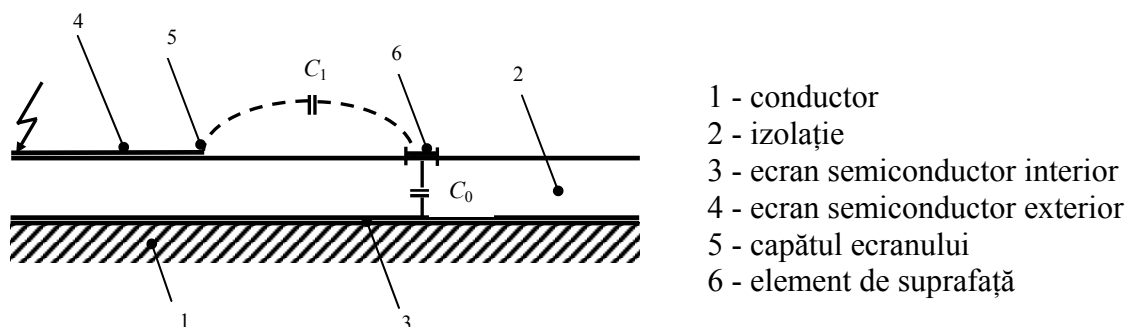


Fig. 1. Reprezentarea capacităților la extremitatea ecranului semiconductor al cablului.

Dacă capacitatea C_1 are valori reduse față de valorile capacității C_0 , căderea de tensiune între capătul ecranului și un „electrod” oarecare de pe suprafața izolației este relativ mare, câmpul electric corespunzător este intens și pe suprafața izolației poate apărea o contornare.

Pentru controlul intensității câmpului electric, respectiv pentru menținerea intensității acestuia la un nivel acceptabil, atât la capătul ecranului, cât și în lungul izolației, se utilizează, în general, două metode. În cadrul primei metode – numită *metoda geometrică* sau *capacitivă* – se utilizează profiluri semiconductoare, iar în cadrul celei de-a doua – *metoda rezistivă* – se utilizează materiale polimerice (elastomerice) cu permitivitate electrică mare și rezistivitate, respectiv impedanță, redusă.

Metoda geometrică constă în controlul liniilor de câmp prin introducerea unui deflector. Această piesă mărește însă volumul accesoriului și, implicit, crește consumul de materiale auxiliare. Realizarea acestei piese vulcanizate este, în general, mai costisitoare decât aplicarea unei pelicule de material rezistiv și, în plus, trebuie realizată o gamă dimensională de piese care să acopere întregul domeniu de secțiuni ale cablurilor.

Metoda rezistivă constă în montarea, la capătul ecranului exterior, a unui rezistor, format din materiale cu impedanță scăzută, care, practic, scurtcircuitează condensatorul C_1 (fig. 1). Curentul corespunzător condensatorului C_0 determină o cădere de tensiune pe acest rezistor conducând la reducerea intensității câmpului electric pe suprafața izolației.

În cadrul metodei rezistive se pot folosi două tipuri de materiale: cu impedanță fixă sau cu impedanță variabilă. Materialele din grupa a doua, au impedanța invers proporțională cu intensitatea câmpului electric, realizând o trecere graduală de la caracterul semiconductor al ecranului la caracterul electroizolant al izolației cablului, cu o distribuție optimă a liniilor de câmp în lungul izolației.

3. MATERIALE STRESS-CONTROL

Materialele care permit reducerea solicitărilor electrice în izolație sunt denumite *materiale stress-control* [1,6,7,8,9]. Un material stress-control cu comportare liniară respectă legea lui Ohm, iar unul cu o comportare neliniară satisface relația:

$$I = k U^\gamma, \quad (5)$$

în care I reprezintă intensitatea curentului electric, U – tensiunea electrică și K , γ – constante de material (γ având valori supraunitare [9]).

3.1. STRUCTURĂ ȘI PROPRIETĂȚI

Materialele stress-control utilizate în cadrul accesoriilor pentru cabluri de medie tensiune sunt fabricate sub formă de benzi autocompactizante, masticuri, tuburi, plăci sau vopsea semiconductoare [10] și se aplică în zona întreruperii ecranului semiconductor.

În literatură sunt prezentate diverse compoziții cu rezistență electrică *neliniară* utilizate în scopul reducerii solicitărilor electrice. Acestea sunt materiale compozite ce conțin în matricea polimerică diferite umpluturi, care conferă proprietatea de material disipativ al câmpului electric. Printre aceste umpluturi, sunt menționate: dioxidul de titan, oxidul de zinc, silicea precipitată, carbura de siliciu, titanatul de bariu, alumina hidratată etc. [9,12].

Într-o serie de soluții constructive ale accesoriilor pentru cabluri se utilizează materiale cu permitivitate relativă mai mare de 15 și care au o caracteristică tensiune-curent liniară (ohmică). Aceste materiale au, însă, un rol relativ limitat de reducere a solicitărilor electrice. Alte soluții utilizează sisteme stress-control pe bază de materiale cu rezistivități diferite, plasate adiacent pe izolațiile cablurilor pentru crearea unui sistem în cascadă, astfel încât rezistența electrică să crească progresiv către zona cu tensiune înaltă. Rezistivitățile diferite sunt obținute prin modificarea concentrației de particule de umplutură cu aceeași granulație, de la o zonă la alta [7] sau prin modificarea granulației particulelor pentru o concentrație dată [11].

Aranjamentele de straturi tip cascadă [7,11,15] încearcă să simuleze comportarea unui material având rezistivitate electrică neliniară.

Wandmacher (3M Company) prezintă [8] o variantă constructivă de sistem stress-control format din două părți: un tub stress-control termocontractabil sau retractabil la rece și un material ușor mulabil aplicat pe suprafața de trecere de la ecranul semiconductor la stratul electroizolant al cablului. Un alt sistem bicomponent, care prezintă o comportare foarte bună la impulsuri de tensiune a fost realizat de firma Raychem [13].

Alte variante constructive implică utilizarea de materiale sub formă de plăci, care se aplică în zona de capăt a ecranului semiconductor, peste care se aplică stratul electroizolant, format din benzi sau tuburi termocontractabile sau retractabile la rece.

Dezavantajul principal al variantelor constructive prezentate mai sus constă în faptul că nu se elimină complet aerul din interiorul terminalului, în momentul realizării acestuia. Aplicarea unei plăci de material - chiar un mastic [14] - conduce, inevitabil, la formarea de denivelări, pliuri și praguri prin suprapunere, care nu se pot nivela convenabil, astfel încât, la aplicarea unui tub termocontractabil, aerul să fie eliminat integral. În cavitățile care rămân în interiorul terminalului se produc, în timpul funcționării cablului, descărcări electrice parțiale, fapt care determină, în timp, o degradare a izolației cablului și, în final, străpungerea acesteia.

3.2. NOU MATERIAL STRESS-CONTROL

Un sistem constructiv care asigură eliminarea totală a aerului de la interfața izolației cablului, este cel bazat pe materiale cu impedanță neliniară sub formă de peliculă subțire, aplicată pe suprafața interioară a tuburilor termocontractabile, pe o lungime bine determinată. Pelicula de material stress-control cu care este căptușit tubul, se înmoaie la temperatura de termocontractare și asigură un contact intim între tub și suprafețele pe care acesta este aplicat, preluând forma suprafețelor și eliminând aerul interstițial.

Realizarea terminalelor de cabluri cu tuburi termocontractabile care au aplicată în interior o peliculă de material stress-control, prezintă următoarele avantaje:

- eliminarea completă a aerului din interiorul terminalului;
- consum redus de materiale;
- poziționarea exactă a stratului de material stress-control în zona întreruperii ecranului;
- ușurința la montaj și reducerea timpului de lucru necesar montajului terminalului;
- realizarea unui terminal cu un gabarit redus.

În cadrul SC Energo Com S.A. București, au fost întreprinse cercetări în vederea obținerii unui compound polimeric stress-control unicomponent, aplicabil pe tuburi termocontractabile.

A fost realizat un compound cu proprietăți superioare celor existente în comerț și care este denumit, în continuare, *SC ENC 20*. Materialul obținut este termoplastic, ușor polarizabil și stabil la îmbătrânire termooxidativă, putând fi utilizat la o temperatură nominală de 90⁰ C.

Materialul stress-control este format, în principal, dintr-o matrice polimerică nepolară (EPR), cu plasticitate ridicată, în care se află dispersată carbură de siliciu cu granulație 20...40 μm , în raport de 10:1 până la 17:1 față de elastomerul de bază.

Materialul, se dizolvă într-un solvent adecvat și se aplică cu un dispozitiv special în interiorul tuburilor termocontractabile utilizate la realizarea terminalelor cablurilor cu izolație din PVC, PE sau XLPE. Astfel, tuburile sunt livrate în cadrul accesoriilor, pregătite pentru montaj, având deja încorporat sistemul de control al câmpului electric. Lungimea pe care se aplică pelicula de material stress-control variază în funcție de tipul terminalului și de tehnologia de montaj.

Calculul repartiției câmpului electric (fig.2), efectuat cu ajutorul programului QuickField arată o modificare importantă a formei liniilor de câmp în lungul terminalelor, în sensul creșterii componente longitudinale a acestuia în cazul terminalului realizat cu material stress-control, față de terminalul netratat. Aceasta constituie o îmbunătățire a comportării terminalelor, fapt confirmat prin încercările de tip de laborator la care acestea au fost supuse, în conformitate cu DIN VDE 0278.

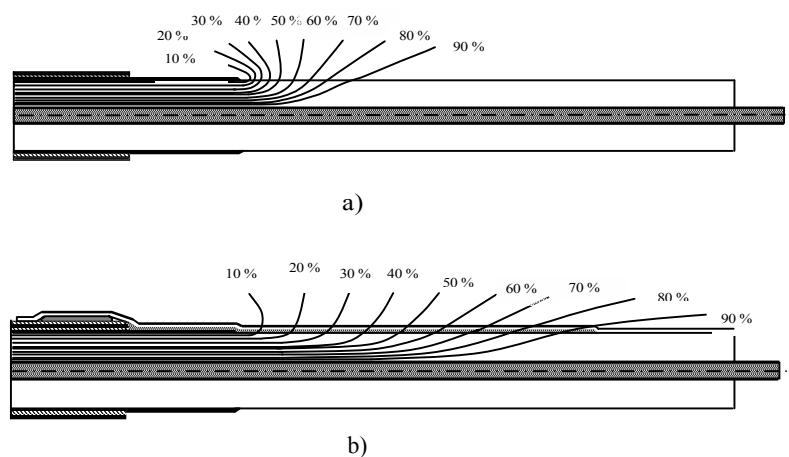


Fig. 2. Forma liniilor de câmp la întreruperea ecranului semiconductor
a) terminal netratat; b) terminal cu stress-control neliniar.

În figura 3 este prezentată variația rezistivității de volum a unor eșantioane realizate din diferite materiale stress-control utilizate la fabricarea terminalelor. Se constată că materialul, *SC ENC 20*, prezintă valori ale lui ρ_v mai reduse decât acelea ale eșantioanelor *B*, *C* și *D*, dar puțin mai mari decât cele ale eșantionului *A*. În cazul eșantioanelor *A* rezistivitatea prezintă însă un fenomen de “saturație” pentru valori ale intensității câmpului electric mai mari de 550 V/mm, spre deosebire de eșantionul *SC ENC 20*, pentru care ρ_v continuă să scadă (pe măsură ce *E* crește) către domeniul valorilor materialelor semiconductoare utilizate în construcția ecranelor cablurilor.

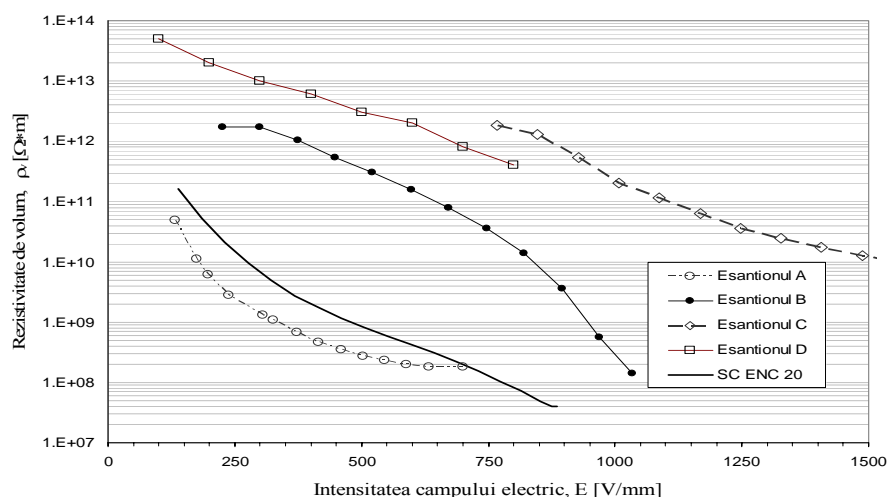


Fig. 3. Variația rezistivității de volum în funcție de intensitatea câmpului electric aplicat, pentru compoul stress-control *SC ENC 20*, în comparație cu mostre reprezentative.

Proprietățile fizice principale ale materialului *SC ENC 20* sunt prezentate în tabelul 1. Compoundul *SC ENC 20* prezintă următoarele avantaje:

- Nivelul descărcărilor parțiale al terminalelor realizate cu acest material este < 10 pC (încadrându-se în cel mai sever normativ existent – DIN VDE 0278);
- Variație mare și neliniară a rezistivității electrice ρ_v , în funcție de E (dacă E crește de la 50 la 500 V/mm, ρ_v scade de la 10^{11} la 10^8 $\Omega \cdot m$);
- Punct de înmuiere adecvat utilizării în cadrul procedurii de termocontractare al tuburilor;
- Capacitate mare de mulare pe suprafețe neregulate și de eliminare a aerului în timpul termocontractării tuburilor;
- Solubilitate foarte bună în solvenți polari și nepolari, astfel încât, se pot realiza soluții (la concentrații mari de substanță uscată) suficient de fluide pentru aplicare pe tuburi.

Tabelul 1 Proprietățile compoulului *SC ENC 20*

PROPRIETATEA	U.M.	VALORI	NORMATIV
Culoare	-	gri	Vizual
Punct de înmuiere	°C	140÷150	EN 1427
Densitate, 23°C	g/cm ³	1,7	EN 453
Rezistivitate de volum (E = 50÷500 V/mm)	Ω·m	10 ⁸ ÷10 ¹¹	CEI 93
Permitivitate relativă (ϵ_r), 50 Hz	-	>14	CEI 250
Conductivitate termică, min.	W/m·K	0,3	STAS 5912
Temperatura nominală de operare	°C	90	ISO 11346

4. CONCLUZII

În cadrul lucrării s-au prezentat caracteristicile unui nou material realizat de autori și utilizat (la S.C. Energo Com S.A. București) pentru construcția terminalelor de cabluri.

Calculul și încercările experimentale efectuate arată că materialul propus (*SC ENC 20*), prezintă caracteristici superioare unor materiale utilizate în prezent pentru realizarea accesoriilor de cabluri (cum sunt acelea din care s-au confecționat eşantioanele A-D).

5. BIBLIOGRAFIE

1. Heinold, L., *Power Cables and their Applications*, Ed. Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1990.
2. Maricaru, M., Premize tehnologice privind testul de descărcări parțiale ale cablurilor de energie, Ph.D Thesis, UPB, 1999.
3. Beyer, M., Boeck, W., Möller, K., Zaengl, W., *Hochspannungstechnik. Theoretische und praktische Grundlagen*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New-York/London/Paris/Tokio, 1986.
4. Odon, L., *Influența repartiției intensității câmpului electric în accesoriile cablurilor cu izolație din materiale sintetice*, Electrotehnika, 76, 1983, Nr. 9, p. 307-318.
5. Noțingher, P.V., *Sisteme de izolație*, Editura Printech, București, 2002.
6. Kehr, D., Goebell J., *Dielectric material for influencing electric fields, and stress control devices made therefrom*, United States Patent 4234439.
7. Chazelas, E., *Electrical stress control electrode in combination with a junction end of a shielded insulated electrical conductor*, United States Patent 4418240.
8. Wandmacher, R., Larson, J., Chor, L., Heyer T., *Stress control for termination of a high voltage cable*, United States Patent 6015629.
9. Kemp, C., Bachmaier, G., *Electrical stress control*, United States Patent 6124549.
10. Salahshourian, H., *Stress graded cable termination*, United States Patent 3631519.
11. Salahshourian, H., *Stress cascade-graded cable termination*, United States Patent 3644662.
12. Deschamps, L., Vicaud A., *Composite material having a nonlinear electrical resistance, especially for stress grading (distributing the potential) in cable termination*, Brevet D'Invention Francaise 2547451.
13. Larsson, P., *Method for terminating a high voltage cable*, United States Patent 4551915.
14. Rossignol, G., *Mastic with non-linear electric resistance and coating element for the connection of electrical components*, European Patent Application 0005387.
15. Foote, G., Fulcomer, R., Lindamood, M., *Shielded electrical conductor terminations and methods of making same*, United States Patent 4187389.
16. Pleșa, A., Mihai, D., *Compoziție polimerică cu rezistență electrică variabilă neliniară*, Brevet de Invenție RO118959.