

Epoksi reçinede iz oluşumu ve 3 farklı deşarj seviyesi için yineleme haritaları analizi

Tracking failure and recurrence plot analysis for three different levels in the discharge on epoxy resin

Mehmet Murat İSPİRLİ¹, Aysel ERSOY YILMAZ²

¹İstanbul Gelişim Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
mmispirli@gelisim.edu.tr

²İstanbul Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
aersoy@istanbul.edu.tr

Özet

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın gün geçtikçe artması sebebiyle yüksek gerilim ve akımların iletimine yönelik yoğun talep yüksek gerilim yalıtımındaki problemleride beraberinde getirmiştir. Dış ortamda elektriksel yalıtım amacıyla kullanılan polimerler çevresel şartlara maruz kalmaktadır. Bu çalışmada, bu stresleri modellemek ve etkilerini analiz etmek için ASTM D5288 standardı kullanılmıştır. Bu standart ile katkısız epoksi reçine örneklerin iz oluşumu davranışı incelenmiştir. Deney sırasında, 3. 20. ve 50. damlanın buharlaşma anında elden edilen deşarj akımları yineleme haritaları yöntemi ile analiz edilmiştir.

Abstract

Electric energy requirement is increasing day by day, so excessive demand for the transmission of high voltage and current has brought problems in high voltage insulation. The polymers used for electrical insulation in the external environment is exposed to environmental conditions. In this paper, ASTM D5288 standards is used to simulate this environmental stresses. In this standard tracking failure of pure epoxy resin samples are investigated. During the experiment, 3., 20. and 50. drop the instant evaporation mechanism obtained through discharge currents, that they were analyzed by the recurrence plot method.

1. Giriş

Elektrik enerjisinin kullanıldığı her alanda yalıtım hayati bir önem taşımaktadır. Özellikle yüksek gerilimlerin iletildiği ve dağıtıldığı noktalarda kullanılan yalıtım malzemelerinin güvenliği ve güvenilirliğinin sağlanması gerekmektedir. Güvenliğin ve güvenilirliğin test edilmesi için ASTM(American Society for Testing and Materials),UL (Underwriter Laboratories) ve IEC (International Electrotechnical Commission) tarafından belirlenmiş test standartları mevcuttur. Bunlardan ASTM D5288 test standardı dış ortamda kullanılan malzemelerin çevresel şartlar altında iz oluşumu davranışını modellemede kullanılır. Yüzeyde iz oluşumu malzeme yüzeyinde karbon iletken bir yol içeren dielektriksel

bir bozulma olayıdır[1]. Yüzeyde iz oluşumu olgusu 3 adımda incelenir.

- Örneğin yüzeyinde boşalmanın meydana gelmesiyle yüzeyinde ısı artışı olur. Bu artan ısı ile gerçekleşen yanma sonrası örnek yüzeyinde iz oluşur.
- İz oluşumu sonucunda yüzeyde artan karbon yoğunluğu ısının daha fazla artmasına sebep olur.
- Son adımda örnek yüzeyinde artan karbon yoğunluğu iletken bir yol oluşturur. Bir noktadan sonra oluşan bu iletken yol yeterli enerji ile beraber örneğin delinmesine sebep olur[2].

Günümüzde elektrik endüstrisinde yaygın olarak olarak kullanılan polimerik yalıtkanlar polivinilklorür (PVC), epoksi reçine, polietilen (PE), ve polyesterlerdir[3-6]. Epoksi rüzgar türbini uygulamalarının döner kısımlarında ve dönüştürücülerin izolasyon kovani gibi güç iletiminde kullanılan malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır[7-10]. Epoksi reçineler termoset polimerler sınıfında yer alan suya karşı dayanımı yüksek olan bir polimer türüdür. Epoksi reçineler alüminyum oksit(Al_2O_3), magnezyum oksit(MgO) gibi kil katkıları ile kullanım şartlarına göre farklı şekillerde hazırlanırlar. Epoksi reçineler, yüksek mekanik dayanım, yalıtılacak yüzeye iyi yapışma ve yalıtım yüzeyinin arasını tamamen doldurma gibi avantajları ile elektriksel yalıtımda ön plana çıkmaktadırlar.

Kirlilik yaşanmaya etki eden parametrelerden birisidir. Yalıtım malzemesinin yüzeyinde doğadaki kirliliğe bağlı olarak iyonize bir tabaka oluşur. Bu oluşan tabaka kritik değerine üzerine çıktığında malzeme yüzeyinde iletken yollar ortaya çıkar ve bu yollardan kaçak akımlar akmaya başlar. Karşılaştırmalı yüzeyel boşalma indeksi (Comparative tracking index - CTI) testi bu tür bozulma aşamalarını hızlı bir şekilde gerçekleştirerek, izolatörün dayanıklılığı ve direnci hakkında önemli sonuçlar verir.

Bu çalışmada elektrik-elektronik sektöründe yalıtım amacıyla yaygın olarak kullanılan epoksi reçinenin yüzey aşınım performansı incelenmiştir. Yüzey aşınım performans analizi yapılırken ASTM D5288 test standartlarına uygun şekilde karşılaştırmalı yüzeyel boşalma indeksini belirleyen bir test düzeneği hazırlanmıştır. Deneyler boyunca örnekler

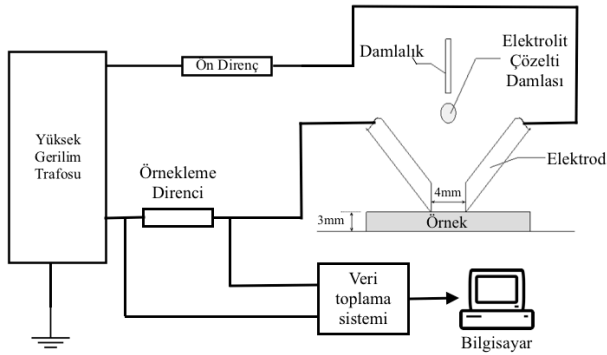
üzerinden kaçak akım verileri toplanmış ve bunlar lineer olmayan zaman serisi analizi olan yineleme haritaları(Recurrence Plot - RP) yöntemi ile analiz edilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Karşılatırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi(CTI)

Bu çalışmada ASTM D5288 test standardı baz alınarak karşılatırmalı yüzeysel boşalma indeksini belirleyen bir test düzeneği kurulmuştur. Hazırlanmış olan bu düzeneğe kullanılarak epoksi reçine örneklerin ağırlık kayıpları ve iz derinlikleri incelenmiştir. Ayrıca örnek yüzeyinden kayıt edilen kaçak akım verileri lineer olmayan zaman serisi analizi yöntemi olan yineleme haritaları yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada, yineleme haritaları analizi yapılırken 3. ,20. ve 50.damladan sonra örnek yüzeyinden çözeltinin buharlaşma anında kayıt edilen kaçak akım verileri analiz edilmiştir.

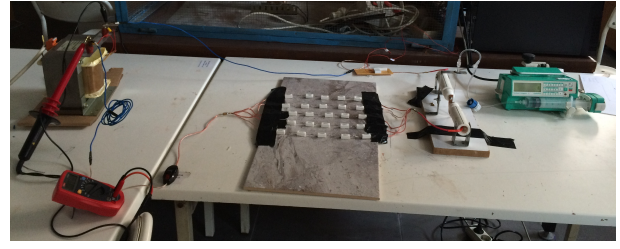
Karşılatırmalı yüzeysel boşalma indeksi testi ilk olarak 1959 yılında uluslararası elektroteknik komisyonu tarafından kabul edilmiştir[11]. 1979 yılında ise IEC 112 standardı olarak son halini almıştır. Bu test standardı daha sonra ASTM tarafından geliştirilerek D5288 standardı olarak 1992 yılında onaylanmıştır[12]. Bu standart son olarak 1 kasım 2014 yılında ASTM tarafından tekrar revize edilmiştir[12]. ASTM D5288 standartlarına uygun şekilde hazırlanan deney düzeneği şekil-1’de verilmiştir.



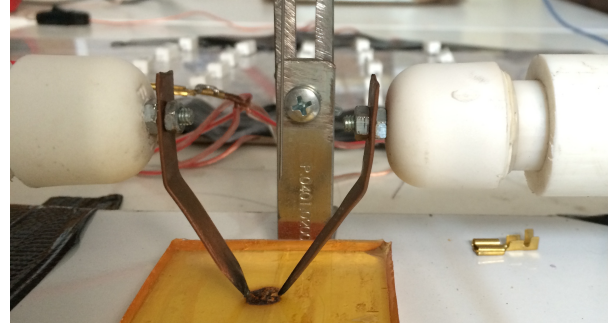
Şekil 1: CTI Deney düzeneği

Bu testte 2 adet 5mmx2mm ölçülerinde birbirine 60° açı yapacak şekilde duran iki bakır elektrot kullanılmaktadır. Test edilecek olan izolasyon örneğinin ölçüleri minimum 15mmx15mmx3mm’dir ve yüzeyindeki kuvvet 1 ± 0.05 N olmalıdır. Yüzeğe damlatılan sıvıdaki amonyum klorür (NH_4Cl) oranı $\%0.1 \pm 0.002$ olmalıdır. Çözeltinin hazırlanmış olduğu su de-iyonize ve suyun öz direnci (resistivity) $23^\circ C$ ’de yaklaşık olarak $4 \Omega m$ olmalıdır. Hazırlanan bu çözelti, elektrotlar arasına 30 ± 5 saniyede bir damla düşecek şekilde hazırlanmış olan bir düzenekle birlikte kullanılmaktadır. Yaklaşık 50 damla düşükten sonra test sona erer. Eğer örneğin üzerine 50 damla düşmeden örnek yüzeyinde bir iz oluşur veya elektrotlar arasından geçen deşarj akımı en az 2 s boyunca $0.5 A$ üstünde olursa iz oluşumu hatası (tracking failure) gerçekleşmiş olur [13,14,15,16]. Örnek üzerinde meydana gelen deşarj akımlarını hesaplamak için deney düzeneğine AD çevirici modül bağlanabilir[17]. İstanbul Üniversitesi Yüksek Gerilim Tekniği laboratuvarında ASTM D5288 test standartlarına uygun şekilde hazırlanmış olan deney düzeneği şekil-2’de gösterilmiştir. Şekil-3’de

hazırlanmış olan deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeni gösterilmiştir.



Şekil 2: YGT Laboratuvarında kurulan deney düzeneği



Şekil 3: Deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeni

2.2 Yineleme Haritaları Analizi Yöntemi

Yineleme haritaları yöntemi gelişmiş bir nonlinear veri analizi yöntemidir. Bu method 1981 yılında Maizel ve Lenk tarafından genetik nükleotid (genetic nucleotid) bir serinin görüntüsel model analizi yöntemi olarak sunulmuştur[18]. Bu yöntem ilk olarak Eckman ve arkadaşları tarafından 1987 yılında dinamik bir sistemin analizi için kullanılmıştır[19]. Yineleme haritaları zaman serisinden bilgilerin çıkartılması için hazırlanmış grafiksel bir framework olması sebebiyle verilerin işlenmesinde pratik bir yöntemdir. [20]. Kaçak akımlar kaotik karakteristiğe sahip sinyallerdir. Bu sebeple kaçak akımların analizi için yineleme haritaları analizi tekniğinin uygulanması oldukça kullanışlıdır [21].

Bu yöntem kullanılarak lineer olmayan karakteristiğe sahip dinamik sistemler örneklenebilir[22]. Yineleme haritaları yöntemi, çok kısa ve kararlı olmayan datalarda bile doğru sonuçlar vermek gibi bir avantaja sahiptir[23]. Takens’in gömme (embedding) teoreminden, zaman serisi dinamik karakteristiklere uygun şekilde aşağıdaki gibi yeniden oluşturulabilir[24].

$$X_{(i)} = [x(i), x(i + \tau), \dots, x(i + (m - 1)\tau)], i = 1, 2, 3 \dots (1)$$

Burada;

$X_{(i)}$: Gömülü vektör,

m : Gömülü boyut,

τ : Gecikme zamanı,

$x(i)$: zaman serisi’dir.

Bu çalışmada, $x(i)$ zaman serisi sistemden ölçülen kaçak akımlardır. Dinamik karakteristikteki bir zaman serisinden

elde edilen fonksiyonun yineleme haritaları serisi olarak tanımlanması aşağıdaki gibidir.

$$R_{i,j} = H\left(\varepsilon - \|X_{(i)} - X_{(j)}\|_2\right), X_i, X_j, \in R^m, i, j \in (1, M) \quad (2)$$

Burada;

ε : eşik değeri ,

$\|\cdot\|$: öklid, maksimum veya manhattan norm ,

$H(k)$: Heaviside fonksiyonu'dur.

Yineleme haritaları tekniği ile analiz yapılırken eşik değeri seçimi çok önemlidir. Burada bahsedilen eşik değeri(ε) belirlenirken zaman serisinin standart sapmasından yararlanılır. Eğer eşik değeri çok büyük seçilirse, haritada alakasız noktalar oluşur. Eşik değerinin çok küçük seçilmesi ise, doğru sonuç veren bazı dataların kaybına sebep olur[25]. Seçilen bu eşik değeri ile zaman serisinde yer alan verilerin değerleri ile bir karşılaştırma bloğu içerisinde karşılaştırılır. Yapılan bu karşılaştırma sonucu değeri 1 olan elemanlar yineleme haritasında siyah ile işaretlenir.

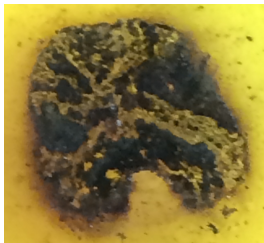
3. Bulgular

Laboratuvar ortamında hazırlanan 60x60x5 mm kalınlığında epoksi reçine örnekler ASTM D5288 standartlarına uygun şekilde hazırlanmış test düzeneğinde test edilmeden önce bütün örnekler 0.1 mg hassasiyetinde analitik terazi ile tartılmıştır. Testten önceki ve sonraki ağırlıkları kayıt edilmiştir. Sonuçların güvenilirliği için, test katkısız farklı epoksi reçine örneklerle 5 kez tekrarlanmıştır. Bu deneyler yapılırken örnekler 600 V gerilim uygulanmıştır. Örnek yüzeyine %0.1 NH₄Cl çözeltisinin düşürülmesi sonrası çözeltinin buharlaşmasından sonra örnek yüzeyinde meydana gelen deşarj şekil-4'de gösterilmiştir.



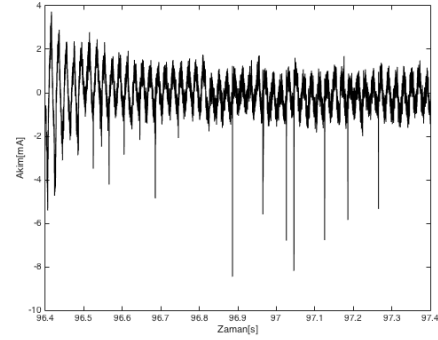
Şekil 4: Buharlaşmadan sonra meydana gelen deşarj anı

Şekil-5'de örnek yüzeyine 50 damla düştükten sonra örnek yüzeyinde meydana gelen iz gösterilmiştir. Burada oluşan izin çapı 7.6 mm'dir ve oluşan izin derinliği 0.979 mm'dir. Yapılan bu deney sonucunda katkısız epoksi reçine örneğin ağırlık kaybı 21.5 mg olmuştur.



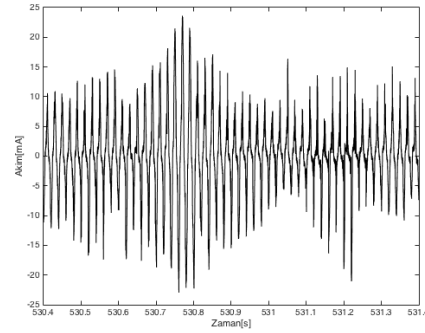
Şekil 5: 50 damla düştükten sonra örnek yüzeyinde oluşan iz
ASTM D5288 standartına uygun şekilde hazırlanan deney düzeneğinin toprak elektrotundan kaçak akım verileri kayıt

edilmiştir. Şekil-6'da 3.damlanın düşmesinin ardından örnek yüzeyinde %0.1 NH₄Cl çözeltisinin buharlaşma anında kayıt edilen kaçak akım verisi gösterilmiştir. 3.damlanın ardından meydana gelen deşarj akımlarının tepe değeri genel olarak 2 mA civarındadır.



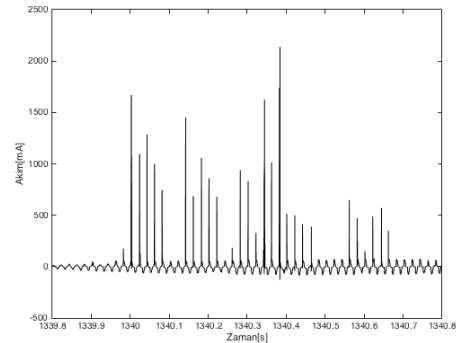
Şekil 6: 3.damla düştükten sonra örnek yüzeyinden kayıt edilen kaçak akım verisi

Şekil-7'de 20.damlanın düşmesinin ardından örnek yüzeyinde %0.1 NH₄Cl çözeltisinin buharlaşma anında kayıt edilen kaçak akım verisi gösterilmiştir. 20.damlanın ardından meydana gelen deşarj akımlarının tepe değeri minimum 10 mA civarındayken, maksimum 20-25 mA arasındadır.



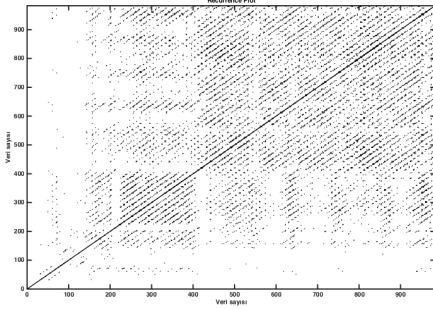
Şekil 7: 20.damla düştükten sonra örnek yüzeyinden kayıt edilen kaçak akım verisi

Şekil-8'de 50.damlanın düşmesinin ardından örnek yüzeyinde %0.1 NH₄Cl çözeltisinin buharlaşma anında kayıt edilen kaçak akım verisi gösterilmiştir. 50.damlanın ardından meydana gelen deşarj akımlarının tepe değeri 1.5 -2 A arasında değişmektedir.



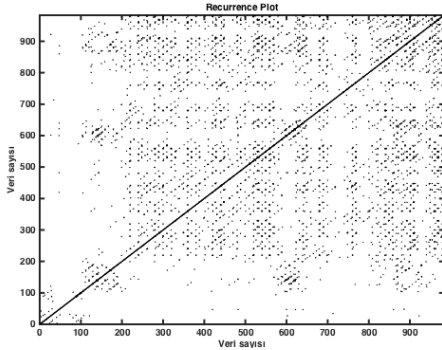
Şekil 8: 50.damla düştükten sonra örnek yüzeyinden kayıt edilen kaçak akım verisi

ASTM D5288 standartına uygun şekilde hazırlanan deney düzeneğinin toprak elektrotundan kayıt edilen kaçak akım verilerinin 3., 20. ve 50.damlanın buharlaşmasından sonra elde edilen kaçak akım verileri lineer olmayan bir analiz yöntemi olan yineleme haritaları yöntemi ile analiz edilmiştir. Şekil-9'da 3.damla düştükten sonra kayıt edilen kaçak akım verisinin yineleme haritası gösterilmiştir. Burada nokta yoğunluğunun fazla olması küçük boyutlu deşarj akımlarının yoğunluğunun daha fazla olduğunu göstermektedir. Burada çözeltinin buharlaşmasından hemen sonraki deşarj akımlarının genliği sonraki evrelere göre daha yüksektir.



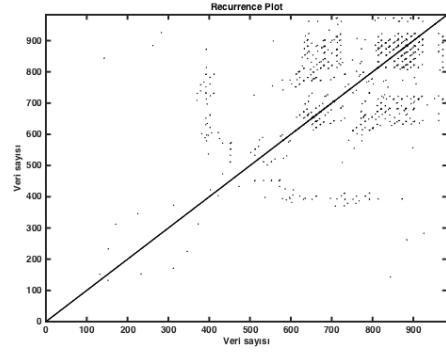
Şekil 9: 3.damla düştükten sonra elde edilen yineleme haritası

Şekil-10'da 20.damla düştükten sonra kayıt edilen kaçak akım verisinin yineleme haritası gösterilmiştir. Burada nokta yoğunluğu 3.damla düştükten sonraki durumla karşılaştırıldığında azalmıştır. Burada beyaz alan yoğunluğunun 3.damlaya oranla fazla olması yüksek genlikli deşarj akımlarının yoğunluğunun arttığını göstermektedir. 3.damla düştükten sonraki durumda olduğu gibi bu yapıda da çözeltinin buharlaşmadan hemen sonra deşarj akımlarının genliği sonraki evrelere göre daha yüksektir.



Şekil 10: 20.damla düştükten sonra elde edilen yineleme haritası

Şekil-11'de 50.damla düştükten sonra kayıt edilen kaçak akım verisinin yineleme haritası gösterilmiştir. Burada nokta yoğunluğu 3. ve 20. damla düştükten sonraki durumlarla karşılaştırıldığında azalmıştır. Burada beyaz yoğunluğunun 3. ve 20. damlaya oranla fazla olması yüksek genlikli deşarj akımlarının yoğunluğunun önceki iki duruma göre daha fazla olduğunu göstermektedir. 3. ve 20.damla düştükten sonraki durumların aksine burada damla düştükten hemen sonraki evre ile daha sonraki evreler arasında deşarj akımların genliklerinin çok fazla değişmediği görülmektedir.



Şekil 11: 50.damla düştükten sonra kayıt edilen kaçak akım verisinin RP topolojik yapısı

4. Sonuçlar

ASTM D5288 standartına uygun şekilde karşılaştırmalı yüzeyel boşalma indeksini belirlemek için hazırlanan deney düzeneğinde yapılan testler ve bu testler sırasında kayıt edilen kaçak akım verilerinin yineleme haritaları yöntemi ile analiz edilmesi sonucunda;

- Katkısız epoksi reçine örnekte 21.5 mg ağırlık kaybı, 0.979 mm erozyon derinliği ölçülmüştür.
- Deney düzeneğinin toprak elektrotundan elde edilen kaçak akım verileri sonucunda örnek yüzeyine düşen damla sayısının artmasıyla örnek yüzeyinde ölçülen kaçak akımların genliği artmıştır.
- Örnek yüzeyinden kayıt edilen kaçak akım verilerinin recurrence plot yöntemi ile analizi sonucunda yüksek genlikli kaçak akımların yoğunluğunun düşen damla sayısının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir.
- 3. ve 20. damlaya oranla 50.damladan sonra kayıt edilen yüksek genlikli deşarj akımlarının yoğunluğu daha fazladır. Buradan yüksek genlikli deşarj akımlarının bu kadar yoğun olması sebebiyle örneklerde 50.damla veya öncesinde iz oluşumu hatası meydana geldiği sonucuna varılabilir.

5. Kaynaklar

- [1]Yoshimura, N., Kumagai, S., & Du, B. (1997). Research in Japan on the tracking phenomenon of electrical insulating materials. IEEE Electrical Insulation Magazine, 5(13), 8-19.
- [2]Dong, D. S., Du, B. X., Zhang, X., & Zhu, X. (2006, June). Discharge Characteristic of Phenolic Resin by Using Chaos theory. In 2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials (pp. 550-553). IEEE.
- [3] Kuffel, E., Zaengl, W.S., 1992, High Voltage Engineering, 1st ed., Pergamon Press, Oxford, 0-08-024213-8. [4] Malik, N. H., Al-Arainy, A. A., & Qureshi, M. I. (1998). Electrical insulation in power systems. Marcel Dekker.
- [5] Ozkaya, M., 1979, Yüksek Gerilim Tekniğinde Deşarj Olayları, 1st ed., İTÜ Matbaası, İstanbul , 1152.

- [6] Gallagher, T. J., & Pearmain, A. J. (1983). High voltage: measurement, testing, and design. John Wiley & Sons.
- [7] V. Tomer, G. Polizos, E. Manias and C. A. Randall, "Epoxy-based Nanocomposites for Electrical Energy Storage. I: Effects of Montmorillonite and Barium Titanate Nanofillers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 108, No. 7, pp. 074116 (14pp), 2010.
- [8] T. Yamazaki, S. Karaki, T. Muraoka, Y. Matsumoto, K. Oonishi and S. Inno, "Development and field test results of the AC 275 kV compact filter ", *IEEE Power Eng. Rev.*, Vol. 16, No. 10, pp. 45-46, 1996.
- [9] G. Banhegyi, V. Vargha, P. Muller and E. Zelenyanszki, "Estimation of Thermal Acceleration Factors of Ageing Epoxy Insulation Using Thermogravimetry and Entuitive Kinetic Model", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 16, No. 5, pp. 1420-1429, 2009.
- [10] A. D. Lorenzi, L. Grando, A. Pesce, P. Bettini and R. Specogna, "Modeling of Epoxy Resin Spacers for the 1 MV DC Gas Insulated Line of ITER Neutral Beam Injector System", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 16, No. 1, pp. 77-87, 2009.
- [11] Mitchell, G. R. (1974). Present Status of ASTM Tracking Test Methods. *Journal of Testing and Evaluation*, 2(1), 23-31.
- [12] ASTM (5288), 2014, Standard Test Method for Determining Tracking Index of Electrical Insulating Materials Using Various Electrode Materials
- [13] IEC Publ. 60112, "Method for the Determination of the Proof and the Comparative Tracking Indices of Solid Insulating Materials", 4th edition, 2003
- [14] IEC Publ. 112, "Recommended Method for Determining the Comparative Tracking Index of Solid Insulating Materials under Moist Conditions", 2nd edition, 1971.
- [15] IEC Publ. 112, "Method for Determining the Comparative and the Proof Tracking Indices of Solid Insulating Material under Moist Conditions", 3rd edition, 1979.
- [16] ASTM (D3638), 1979, Standard test methods for comparative tracking index of electrical insulating materials, 113-125.
- [17] Dong, D. S., Du, B. X., Zhang, X., & Zhu, X. (2006, June). Discharge Characteristic of Phenolic Resin by Using Chaos theory. In *Properties and applications of Dielectric Materials*, 2006. 8th International Conference on (pp. 550-553). IEEE.
- [18] Maizel, Jacob V., and Robert P. Lenk. "Enhanced graphic matrix analysis of nucleic acid and protein sequences." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 78.12 (1981): 7665-7669.
- [19] Eckmann, J-P., S. Oliffson Kamphorst, and David Ruelle. "Recurrence plots of dynamical systems." *EPL (Europhysics Letters)* 4.9 (1987): 973.
- [20] Liu, Yong, and B. X. Du. "Recurrent plot analysis of leakage current on flashover performance of rime-iced composite insulator." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 17.2 (2010): 465-472.
- [21] Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 16(3), 285-317.
- [22] Du, Boxue, Yu Gao, and Yong Liu. "Effects of Gamma-Ray Irradiation on Tracking Failure of Polymer Insulating Materials." *Nuclear Power-operation, safety and enviroment* (2011):341.
- [23] Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics reports*, 438(5), 237-329.
- [24] Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In *Dynamical systems and turbulence*, Warwick 1980 (pp. 366-381). Springer Berlin Heidelberg.
- [25] Du, B. X., Guo, Y. G., Liu, Y., & Tian, L. (2014). Effects of adding nanofiller on DC tracking failure of epoxy/MgO nano-composites under contaminated conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(5), 2146-2155.