

Franciszek MOSIŃSKI¹

Politechnika Łódzka Instytut Elektroenergetyki (1)

Wpływ objętości dielektryków na ich wytrzymałość elektryczną

Abstract. *The paper deals of the area and volume effect of all kind of an high voltage insulation structures.*

Keywords: high voltage insulation, area effect, volume effect

1. Wstęp

Fakt, że ze wzrostem grubości warstwy dielektryka rośnie napięcie przebicia układu izolacyjnego jest powszechnie i intuicyjnie znany. Jednakże to, że wytrzymałość elektryczna, rozumiana jako natężenie pola elektrycznego, przy którym, z określonym prawdopodobieństwem, zachodzi przebicie, maleje ze wzrostem grubości warstwy izolacji – nie zawsze jest całkowicie jasne.

Wzrost grubości warstwy dielektryka przy stałej powierzchni elektrod układu izolacyjnego lub wzrost powierzchni elektrod przy stałej grubości warstwy dielektryka jest równoznaczny wzrostowi objętości izolacji. Zwykle wzrost objętości izolacji prowadzi do spadku wytrzymałości elektrycznej definiowanej w kategorii natężeń pola elektrycznego. Ta właściwość układów izolacyjnych wykazuje specyficzne cechy dla poszczególnych rodzajów dielektryków: gazowych, ciekłych i stałych. W tym referacie, w skrócie, omówiono to zagadnienie podając praktycznie użyteczne przy projektowaniu izolacji wzory i wykresy.

2. Próżnia

Mechanizm wyładowań w próżni może być objaśniony w oparciu o statystyczną teorię słabych punktów. Mikronierówność katody, przy dostatecznie dużych natężeniach pola elektrycznego, eksploduje wyładowaniem elektrycznym wskutek dużej gęstości prądu przedprzebieciowego – w teorii „nagrzewania katodowego” lub wiele mikronierówności katody „krzewi prądem” doprowadzając do przebicia w najbliższym punkcie – według teorii zjawisk przyelektrodowych. Ta druga teoria, zakładając, że prąd przedprzebieciowy nie jest emitowany przez pojedynczą mikronierówność elektrody, lecz przez wiele mikronierówności, została potwierdzona mikroskopowymi obserwacjami powierzchni elektrod, które wykazały, że ślady przebicia w dowolnym odstępnie elektrod (o dowolnej konfiguracji i odległości) są rozrzucone chociaż nie wychodzą poza obszar, w którym natężenia pola elektrycznego na powierzchni elektrody są nie mniejsze niż 90% natężeń maksymalnych. Obszar ten zdefiniowano jako powierzchnię efektywną [1] lub powierzchnię szczególnie naprężoną lub „robotczą” [6]. Tylko ta część powierzchni elektrod układu izolacji próżniowej jest odpowiedzialna za inicjację wyładowań elektrycznych.

Rozumowanie powyższe – zakładające, że im większa powierzchnia elektrod tym jest więcej słabych punktów (mikronierówności) zdolnych zainicjować wyładowanie – prowadzi do zależności napięcia przebicia lub natężenia pola elektrycznego, przy którym zachodzi przebicie, od wielkości powierzchni efektywnej.

Na rys. 1 pokazano, za [6], zależność przemiennego napięcia przeskoku od „roboczej” powierzchni elektrod. Przy stałym odstępzie elektrod malenie napięcia przeskoku jest tożsame z maleniem naprężeń przeskoku.

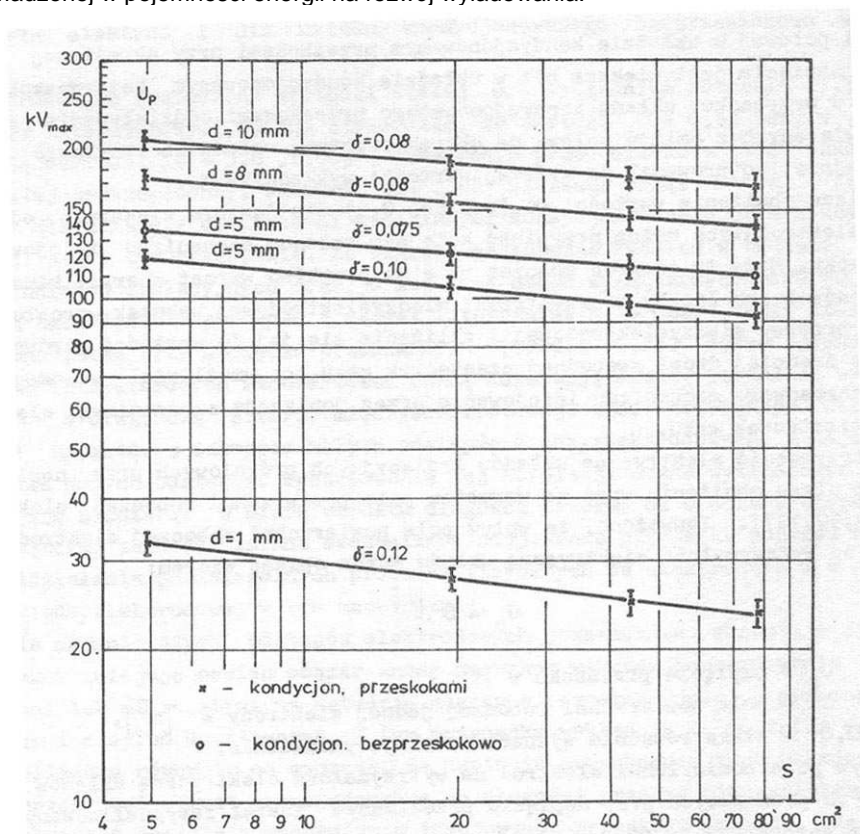
Podobne zależności obserwuje się dla napięcia stałego. Przykładowo dla elektrod płaskich wpływ powierzchni elektrod można zapisać wzorem:

$$U_p = D \cdot S^{-\delta} \quad (1)$$

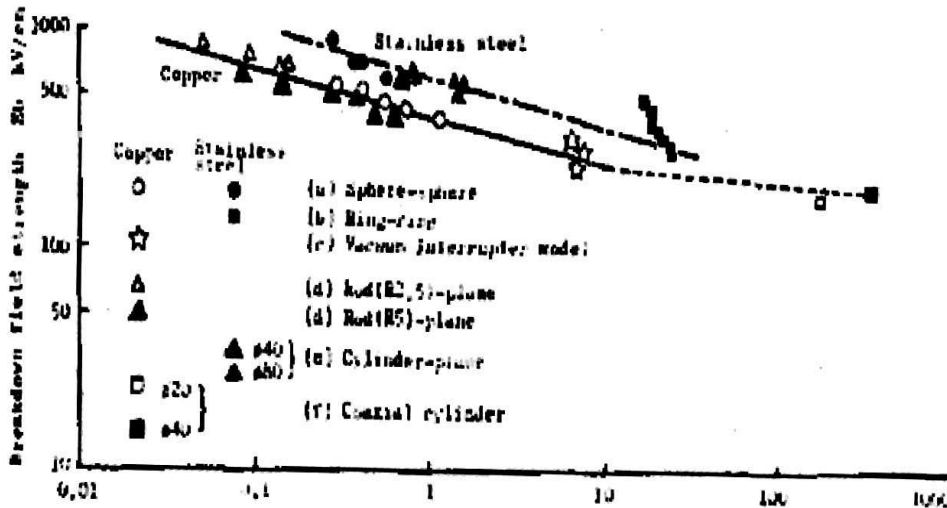
gdzie: U_p – napięcie przeskoku [V]; S – pole powierzchni „roboczej” [m^2]; D, δ - stałe eksperymentalne.

Na rys. 2 podano za [1] zależności efektu powierzchni dla udaru łączeniowego 450/2300 μs , dla dwóch różnych materiałów elektrod: miedzi i stali.

Według [2, 3] wyjaśnienie efektu powierzchni jedynie w kategoriach statystycznych jest niepełne. Wzrost powierzchni elektrod jest równoważny wzrostowi pojemności układu. Eksperymenty wykazały, że podobny wynik uzyskuje się jeśli bezpośrednio z badanym odstępem elektrod włączyć równolegle odpowiednią pojemność. Świadczy to o wpływie zgromadzonej w pojemności energii na rozwój wyładowania.



Rys. 1 Zależność przemiennego napięcia przeskoku od pola powierzchni „roboczej” wg.[6]



Rys. 2 Efekt powierzchni izolacji próżniowej dla elektrod miedzianych $E_{50} = 380 \cdot S_{eff}^{-0.23}$ i dla

elektrod stalowych $E_{50} = 580 \cdot S_{eff}^{-0.25}$ wg. [1] dla udaru łączeniowego 450/2300 μ s

Potwierdzeniem teorii statystycznej (teoria wartości ekstremalnych [7]) są natomiast metalurgiczne badania powierzchni elektrod poddanych wyładowaniom w próżni [4]. Badania te wykazały, że: (1) w układach o elektrodach ze stopów metali, o przeskoku decydują fazy stopu o mniejszych temperaturach topnienia; (2) napięcie wytrzymywane stałe (DC) rośnie z udziałem w stopie żelaza (Fe); (3) kondycjonowanie elektrod daje dwójakie skutki: usunięcie lub stępienie mikronierówności elektrod oraz wyparowanie niskotopliwej fazy z powierzchni katody.

3. Dielektryki gazowe

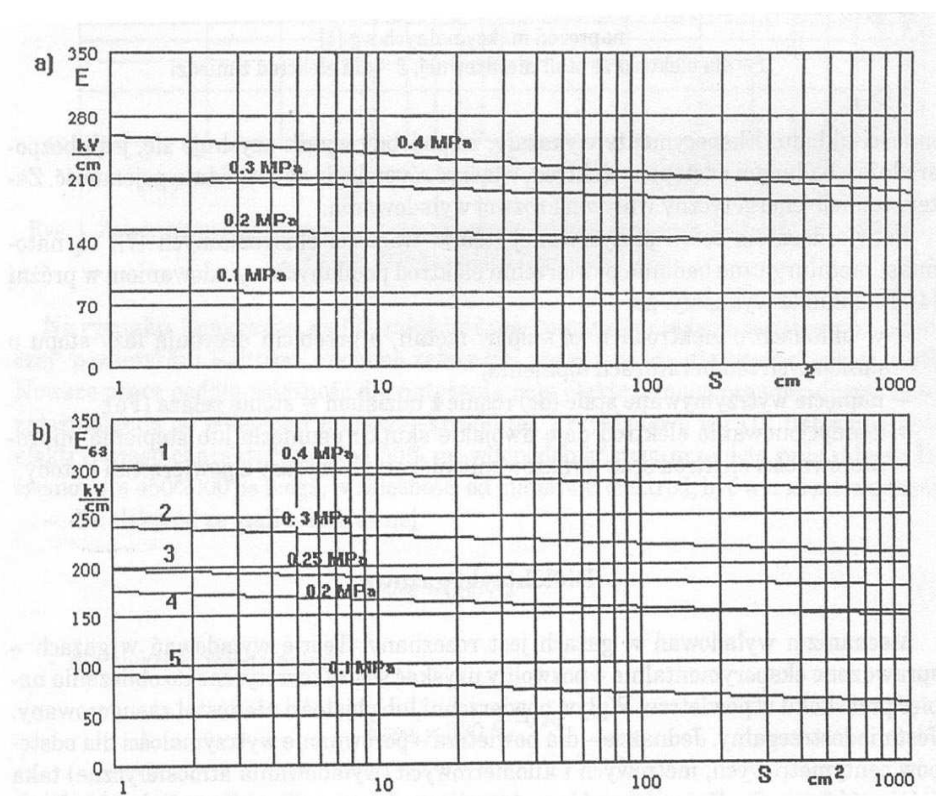
Mechanizm wyładowań w gazach jest rozeznany. Teorie wyładowań w gazach – sprawdzone eksperymentalnie – pozwoliły uzyskać wzory teoretyczne do obliczania napięć przeskoku w powietrzu. Wpływ powierzchni lub objętości nie został zasugerowany. Jest niedostrzegalny. Jednakże – dla powietrza – porównanie wytrzymałości dla odstępów centymetrowych, metrowych i kilometrowych (wyładowania atmosferyczne) taką zależność sugerują. Przy odstępach centymetrowych czy metrowych, próg przeskoku to 21 kV/cm (poniżej tej wartości pola pierwszy współczynnik Townsenda jest równy zero), podczas gdy przy wyładowaniach atmosferycznych do zapoczątkowania lidera stopowanego wystarcza (w szczególnych warunkach) 10 kV/cm, a do jego rozwoju tylko 1 kV/cm.

W sześciofluorku siarki wpływ mikrozanieczyszczeń w objętości gazu i wpływ stanu powierzchni elektrod jest ewidentny. Według [9] wpływ pola powierzchni elektrod można wyrazić wzorem:

$$E_{n63\%} = E_{63\%} - \gamma \cdot \ln(n) \quad (2)$$

gdzie: $E_{n63\%}$ - natężenie przeskoku (kwantyl 63 % - moda w rozkładzie dwuwykładniczym (Gumbela)) dla powierzchni n -krotnie większej niż 10 cm^2 ; $E_{63\%}$ - natężenie przeskoku (moda w rozkładzie Gumbela) dla powierzchni 10 cm^2 ;

Przykład zależności natężeń pola elektrycznego przy przeskoku, z prawdopodobieństwem 63%, dla różnych ciśnień SF_6 i napięciu przemiennym oraz przy napięciu udarowym piorunowym pokazano na rys. 3. Jak wynika z rys. 3b uzyskane przez różnych autorów wyniki, dla napięcia udarowego $1.2/50 \mu\text{s}$, są zgodne. Wytrzymałość rośnie ze wzrostem ciśnienia gazu i maleje ze wzrostem powierzchni elektrod.



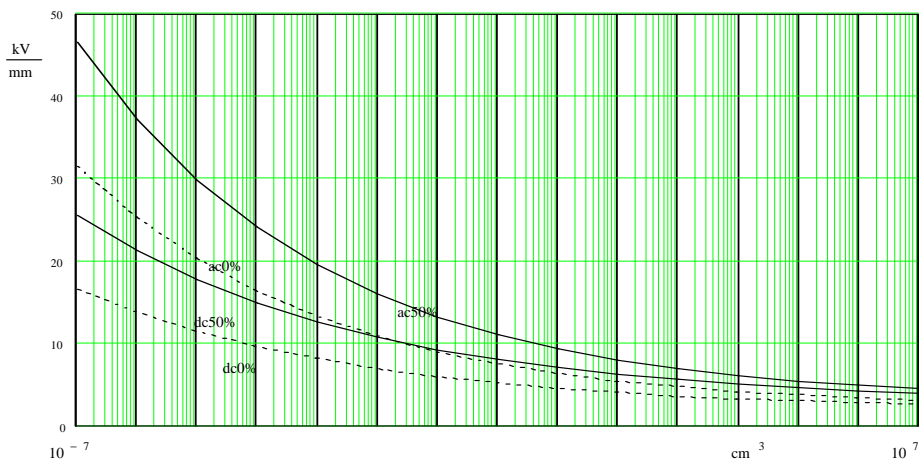
Rys. 3 Zależność natężeń przeskoku w sześciofluorku siarki od powierzchni elektrod: (a) dla napięcia przemiennego wg [9]; (b) dla udaru $1.2/50 \mu\text{s}$; zależności 1,2,4,5 – wg [9]; zależność 3 – wg [8].

4. Ciecze izolacyjne

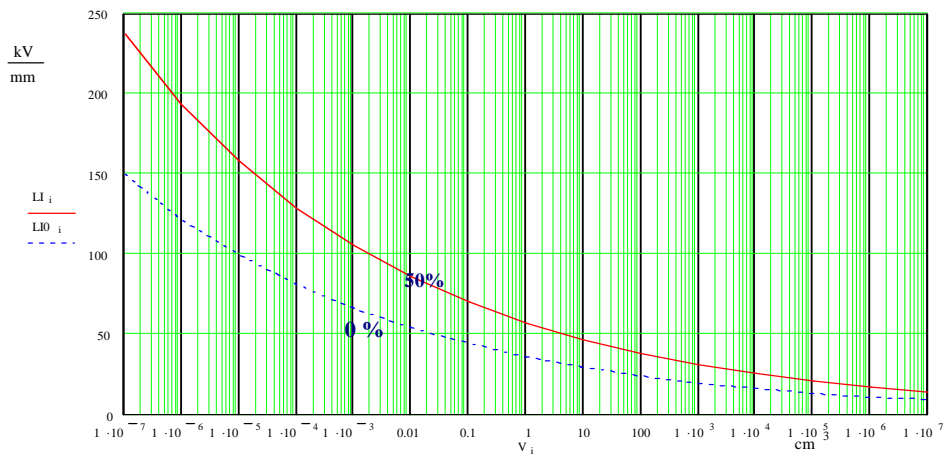
Teorie przebicia komercyjnych dielektryków ciekłych są jeszcze niekompletne i nie pozwalają na ilościowe podejście do szacowania wytrzymałości elektrycznej. Jediną realną drogą określenia wytrzymałości elektrycznej jest eksperyment planowany i opracowany statystycznie. Na tej drodze uzyskuje się wzory eksperymentalne wykorzystywane do projektowania układów izolacyjnych. Dla przypadku najważniejszego dielektryka ciekłego stosowanego w układach wysokonapięciowych jakim jest mineralny olej transformatorowy, istnieje rozbudowana teoria tzw. efektu objętości [10,27,28], według której natężenie pola elektrycznego, przy którym zachodzi przebicie zależy od tzw. objętości szczególnie naprężanej definiowanej jako objętość między elektrodą o większej krzywiznie, a

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

powierzchnią ekwigradentalną o natężeniu pola elektrycznego równym 90% natężenia maksymalnego. W oparciu o to rozumowanie – dla pól równomiernych i słabo nierównomiernych oraz dla elektrod gołych i izolowanych izolacją typu zwojowego – istnieją zależności eksperymentalne o charakterze uniwersalnym, czyli niezależne od konfiguracji i odstępów elektrod. Przykład takich zależności dla najszerszego zakresu objętości podano w [30] dla mediany naprężeń przebicia. W oparciu o własne analizy określono wartości parametrów przesunięcia rozkładu Weibulla spełniające definicję naprężeń wytrzymywanych (o prawdopodobieństwie przebicia 0 %). Wyniki przedstawiono na rys. 4, 5 i 6 odpowiednio dla napięć stałych, przemiennych, udarowych piorunowych i udarowych łączeniowych.

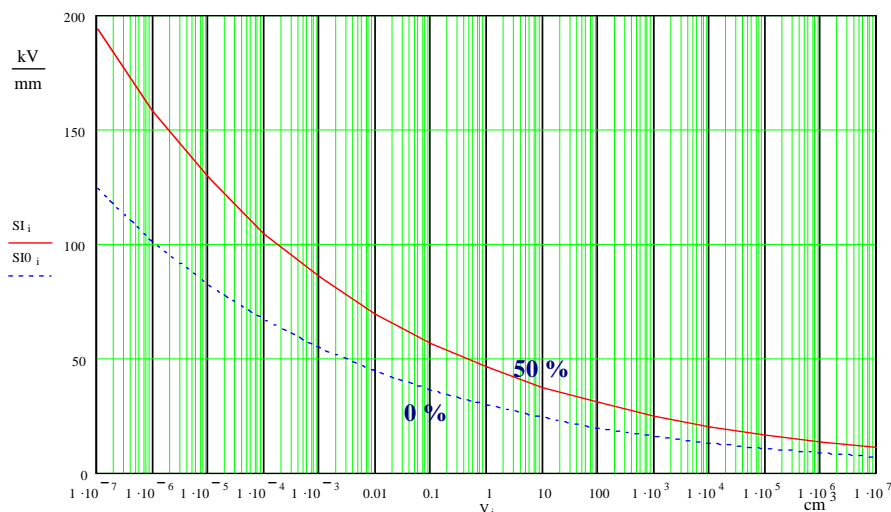


Rys. 4 Efekt objętości dla oleju transformatorowego przy napięciach przemiennych i stałych: mediana wg [30]



Rys. 5 Efekt objętości dla oleju transformatorowego przy napięciu udarowym piorunowym: mediana wg [30]

[30]



Rys. 6 Efekt objętości dla oleju transformatorowego przy napięciu udarowym łączeniowym: mediana wg [30]

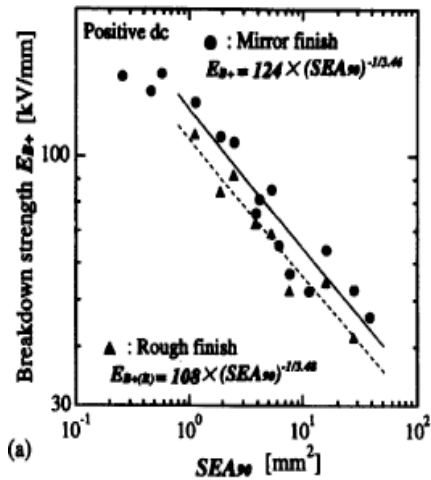
Jak wynika z rys. 4 do 6 krzywe efektu objętości zmierzają asymptotycznie do ustalonej wartości jeśli objętość zmierza do dużych wartości. Asymptoty te – obowiązujące dla oleju o parametrach tolerowanych przy produkcji energetycznych transformatorów wysokonapięciowych – zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Asymptotyczna wytrzymałość oleju przy dużych objętościach szczególnie naprężanych

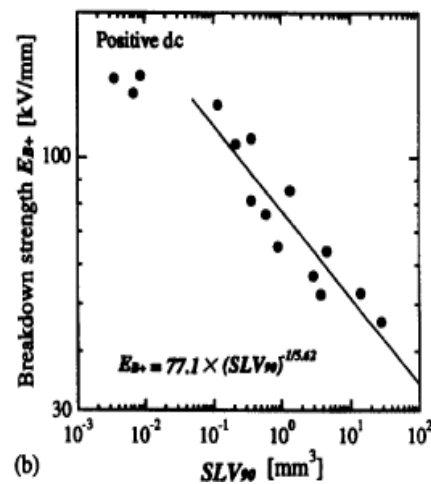
Rodzaj napięcia	Wartość	Jednostki
LI	8.6 or 8	kV/m m
SI	7	kV/m m
AC cont	3.5	kV/m m
AC 1 min	3.4 or 2 ÷ 3	kV/m m
AC 30 min	3	kV/m m
DC cont	3.5	kV/m m
DC 1 min	3.0	kV/m m
DC 30 min	2.6	kV/m m

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

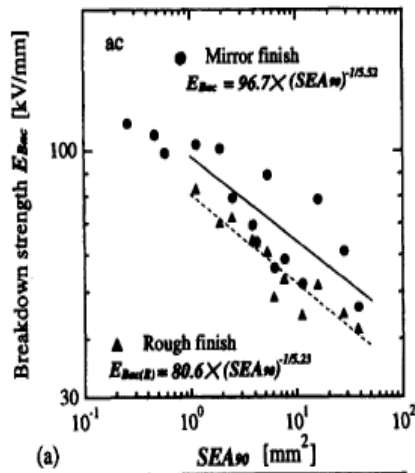
Podobne zależności obowiązują dla innych dielektryków ciekłych. Na rys. 7 i 8 pokazano za [16] krzywe efektu objętości dla ciekłego azotu odpowiednio dla napięcia stałego i przemiennego. Natomiast na rys. 9 i 10 pokazano za [13] graniczne wartości naprężeń przebicia dla ciekłego helu, odpowiednio dla nie wrzącego i wrzącego. W tym przypadku zwiększenie odstępów elektrod jest – przy niezmienionej ich powierzchni – tożsame ze wzrostem objętości.



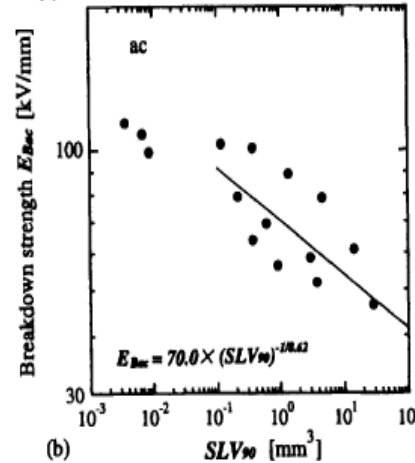
(a)



(b)



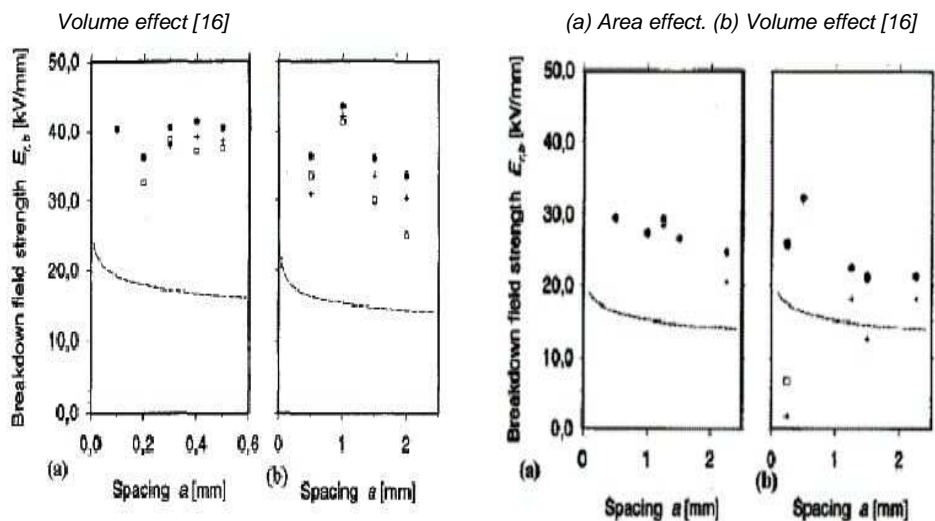
(a)



(b)

Rys. 7. Natężenie przebicia ciekłego azotu (E_{B+}) w funkcji szczególnie naprężanej powierzchni {Stressed Electrode Area (90%) SEA}, i szczególnie naprężanej objętości {Stressed Liquid Volume (90%) SLV}, dla dodatniego napięcia stałego (dc): (a) Area effect. (b)

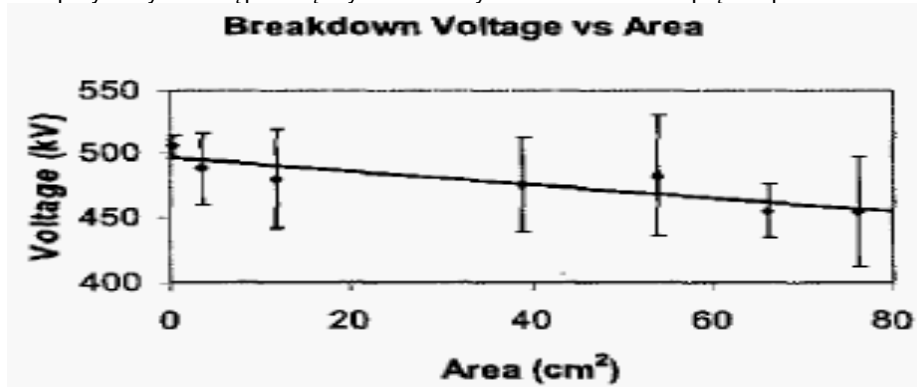
Rys. 8. Natężenie przebicia ciekłego azotu w funkcji szczególnie naprężanej powierzchni {Stressed Electrode Area (90%) SEA}, i szczególnie naprężanej objętości {Stressed Liquid Volume (90%) SLV}, dla napięcia przemiennego (ac):



Rys. 9. Oszacowanie wytrzymałych (bliskich 0% wg parametru przesunięcia rozkładu Weibulla) naprężeń przebicia dla ciekłego helu LHe przy 4.2 K/ 100 kPa (a) dc data (b) ac (crest) [13]

Rys. 10. Oszacowanie wytrzymałych (bliskich 0% naprężeń przebicia dla ciekłego słabo wrzącego helu przy 4.2 K/ 100 kPa; (a) sphere positive, (b) sphere negative.

Na rys. 11 pokazano zależność efektu powierzchni (objętości) dla wody. W tym przypadku również zwiększenie odstępów elektrod jest – przy niezmiętej ich powierzchni – tożsame ze wzrostem objętości, a malenie napięcia przebicia w funkcji powierzchni jest tożsame przy stałym odstępnie międzyelektrodowym - z maleniem naprężeń przebicia.



Rys. 11. Efekt powierzchni dla wody przy impulsach napięciowych o stromym czole i dla elektrod z profilem Bruce'a, wg. [26]

5. Dielektryki stałe

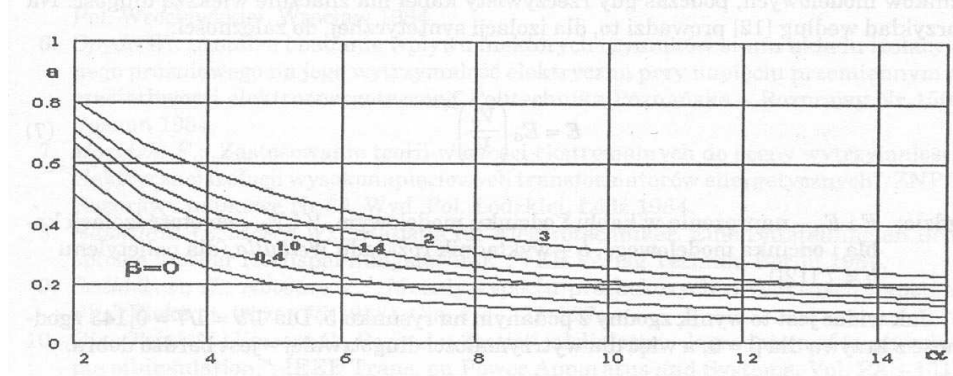
O wytrzymałości elektrycznej w praktycznych układach izolacji decydują niejednorodności materiału stałego i dlatego wytrzymałość elektryczna dielektryków technicznych (zwana wytrzymałością praktyczną lub nieswoistą) jest znacznie mniejsza od wytrzymałości swoistej przewidywanej dla idealnie czystego dielektryka. Stąd również trudności w rozeznaniu mechanizmów wyładowań elektrycznych. Istniejące teorie opracowane dla dielektryków

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

czystych, nie mają praktycznego zastosowania. Pozostają teorie statystyczne (i eksperymenty), które wykazały, że wytrzymałość elektryczna dielektryków stałych wyraźnie zależy od ich grubości, zgodnie z zależnością:

$$E_{pz} = E_{p1} \cdot z^{-a} \quad (3)$$

gdzie: E_{pz} – natężenie przebicia przy grubości dielektryka z -krotnie większej niż grubość, przy której uzyskano wartość E_{p1} ; a – wykładnik pokazany na rys. 12.



Rys. 12 Zależność wykładnika a we wzorze (3) od parametrów α i β rozkładu Weibulla (4)

Przy korzystaniu z wzoru (3) i rys. 12 należy uwzględnić, że wykładnik a zależy jest od tego, czy rozpatruje się wytrzymałość krótkotrwałą czy długotrwałą. Jeśli rozważać wytrzymałość krótkotrwałą wyznaczaną np. przy napięciu przemiennym o amplitudzie zwiększanej w sposób ciągły, to niezbędna jest znajomość parametru β wielowymiarowego rozkładu Weibulla (wzór (4)). Rozważania na ten temat znaleźć można w [11]. Dla wytrzymałości długotrwałej, określanej np. przy napięciu przemiennym o stałej wartości amplitudy, przyjmuje się $\beta = 0$, czyli wartość a odczytuje się z dolnej krzywej z rys. 12.

$$P(\gamma_E, t_p) = 1 - \exp(-C \cdot \gamma_E^\alpha \cdot t_p^\delta) \quad (4)$$

gdzie: γ_E – prędkość wzrostu naprężeń $\left[\frac{kV}{mm} \cdot s \right]$ zależna od grubości materiału

$[\gamma_E \neq const]$; t_p – czas do przebicia; C , α , δ - parametry rozkładu określane w oparciu o analizę statystyczną. Między parametrami α , β , δ występuje związek $\beta = \delta - \alpha$. Natomiast parametr $a = (1 + \beta)/(\alpha + \beta)$. W przypadkach praktycznych wartości α zawierają się w przedziale $\langle 4; 14 \rangle$, natomiast β w granicach $\langle 0.4; 2 \rangle$. Dla wytrzymałości długotrwałej w wyrażeniu (4) znika wyraz związany z prędkością zmian natężenia pola γ .

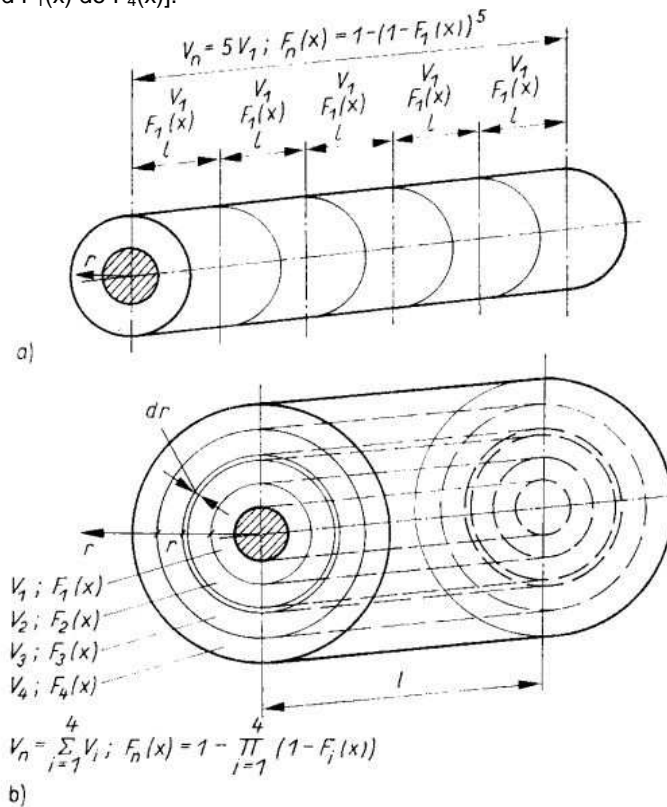
Zależności powyższe wykorzystywane są głównie przy projektowaniu izolacji kabli, gdzie zaprojektowaną izolację można sprawdzić jedynie poprzez badania krótkich odcinków modelowych podczas gdy rzeczywisty kabel ma znacznie większą długość. Na przykład według [12] prowadzi to, dla izolacji syntetycznej, do zależności:

$$E = E_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (5)$$

gdzie: E i E_0 – naprężenia wytrzymałwane odpowiednio w kablu o rzeczywistej długości i w odcinku modelowym; V i V_0 – odpowiednio objętość izolacji rzeczywistego kabla i odcinka modelowego; b – parametr kształtu rozkładu Weibulla (dla polietylenu $b = 7$ wg. [12]).

Jak widać jest to wynik zgodny z podanym na rys. 12. Dla $1/b = 1/7 = 0.143$ zgodność z krzywą dla $\beta = 0$, a więc dla wytrzymałości długotrwałej, jest bardzo dobra.

W przypadku pełnych badań statystycznych polegających na zbadaniu pewnej liczby (próbki losowej o liczności n) odcinków modelowych kabla i oszacowaniu dystrybuanty napięć (naprężeń) przebicia dla układu modelowego $F_1(x)$ można również wyznaczyć dystrybuantę napięć (naprężeń) przebicia dla rzeczywistego kabla $F_n(x)$ wykorzystując tzw. prawo wzrostu prawdopodobieństwa. Obrazuje to rys. 13. gdzie na rys. 13a pokazano sposób postępowania w przypadku gdy odcinki modelowe są jednakowe, a na rys. 13b gdy odcinki modelowe różnią się np. grubością izolacji. W tym drugim przypadku dla każdego z modeli należy oddzielnie oszacować odpowiadającą mu dystrybuantę [na rys. 13b oznaczoną odpowiednio od $F_1(x)$ do $F_4(x)$].



Rys. 13 Praktyczne wykorzystanie efektu objętości do oszacowania wytrzymałości elektrycznej kabla elektroenergetycznego, rys. wg. [8]

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

6. Wnioski

- (1) Jak wykazano, o wytrzymałości elektrycznej izolacji stanowi nie tylko jej rodzaj i właściwości, ale dla danej izolacji istotnym czynnikiem jest również jej objętość. Ze wzrostem objętości wytrzymałość elektryczna maleje dla wszystkich rodzajów dielektryków: stałych, ciekłych i gazowych. Jednakże zależność ta jest specyficzną cechą danego dielektryka.
- (2) W referacie podano praktyczne zależności w postaci wykresów i wzorów. Zależności te mogą stanowić podstawę do projektowania praktycznych układów izolacyjnych.

7. Literatura

- [1] M. Okawa, T. Shioiri, H. Okubo, S. Yanabu – „Area Effect on Electrical Breakdown of Copper and Stainless Steel Electrodes in Vacuum”, *Trans. On Electrical Insulation*, vol. 23, No 1, January 1988, pp. 77-81
- [2] J.D. Cross, B. Mazurek – “Effect of Area on Surface Flashover Voltage in Vacuum”, *Trans. On Electrical Insulation*, vol. 23, No 1 January 1988, pp. 43-45
- [3] B. Mazurek, J.D. Cross – “An Energy Explanation on the Area Effect in Electrical Breakdown in Vacuum”, *Trans. On Electrical Insulation*, vol.22, No 3, June 1987, pp. 341-346
- [4] Chengfeng Qiu, Shiping Wei, Zhimao Yang, Jingchao Zhang, Bingjun Ding, Xiaotian Wang – “Metallurgical Analysis of Electrical Breakdown for Cu-Te System contact Materials in Vacuum”, *Electrical Contacts, 1992.*, Proceedings of the Thirty-Eighth IEEE Holm Conference on, Philadelphia, PA, USA, 1992 IEEE
- [5] B. Mazurek – “Rozwój wyładowań elektrycznych w wysokonapięciowej izolacji próżniowej. Zagadnienia wybrane”, *Prace Naukowe Inst. Podstawa Elektrotechniki i Elektrotechnologii Pol. Wr. Nr 18, Seria Monografie Nr 7, Wrocław 1984*[6] W. Opydo – “Analiza i badanie wpływu niektórych czynników stanu układu izolacyjnego próżniowego na jego wytrzymałość elektryczną przy napięciu przemiennym o częstotliwości elektroenergetycznej”, *Pol. Poznańska, Rozprawy Nr 150, Poznań 1984*
- [7] F. Mosiński – “Zastosowanie teorii wartości ekstremalnych do oceny wytrzymałości elektrycznej izolacji wysokonapięciowych transformatorów energetycznych”, *ZNPL Rozprawy Naukowe Nr 62, Wyd Pol. Łódzkiej, Łódź 1984*
- [8] W. Hauschild, W. Mosch – „Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik“, *VEB Verlag Technik, Berlin 1984*
- [9] K. Sedlackova, V. Novotny – „Metody vypočtu preskokovych a vyrznych napeti v SF₆“, *Elektrot. Obzor 75 (1988), Cis. 4, s. 222-227*
- [10] Trinh N. Giao, C. Vincent, J. Regis – “Statistical dielectric degradation of large-volume oil-insulation”, *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, No 10, October 1982, pp. 3712-3721
- [11] F. Mosiński – “Metody statystyczne w technice wysokich napięć”, *Wyd. PŁ. Łódź 1991*
- [12] B.M. Weedy – “Underground Transmission of Electric Power”, *tłum. Ros. Moskwa 1983*
- [13] J. Gerhold, M. Hubmann, E. Telser – “Breakdown Probability and Size Effect in Liquid Helium”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 5 No. 3, June 1998, pp. 321-333*
- [14] H.Goshima, N.Hayakawa, M.Hikita, K.Uchida, H.Okubo – “Statistical analysis of area and volume effects on breakdown voltage in liquid nitrogen using Weibull distribution”, *Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, June 5-8, 1994*
- [15] H. Goshima, N. Hayakawa, M. Hikita, H. Okubo – „Weibull Statistical Analysis of Area and Volume Effects on the Breakdown Strength in Liquid Nitrogen”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 3, June 1995 pp. 385-393*
- [16] H. Goshima, N. Hayakawa, M. Hikita, H. Okubo – “Area and Volume Effects on Breakdown Strength in Liquid Nitrogen”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 3, June 1995, pp. 376-384*
- [17] N.Hayakawa, H.Sakakibara, H.Goshima, M.Hikita, H.Okubo – “Mutual Contribution of Area and Volume Effects on Breakdown Strength in Liquid Nitrogen”, *Conference Record of the ICDL '96 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy, July 15 - 19, 1996*[18] N. Hayakawa, H. Sakakibara, H. Goshima, M. Hikita, H. Okubo – „Breakdown

- Mechanism of Liquid Nitrogen Viewed from Area and Volume Effects", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 4 No. 1, February 1997, pp. 127-134
- [19] N. Hayakawa, M. Nagino, H. Kojima, M. Goto, T. Takahashi, K. Yasuda, H. Okubo – „Dielectric Characteristics of HTS Cables Based on Partial Discharge Measurement”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, NO. 2, JUNE 2005, pp 1802-1805
- [20] K. Kato, S. Okabe, S. Kaneko, H. Okubo – „Optimization Technique Taking Area Effect into Account for Computer-aided Insulation Design of Vacuum Circuit Breakers”, 0-7803-8461-X/04/520.00 02004 IEEE, pp. 610-613
- [21] A. Masood, M.U. Zuberi, E. Husain – “Electrical Breakdown of Liquid Nitrogen viewed from Area & Volume Effects”, 978-1-4244-1933-3/08/\$25.00 ©2008 IEEE, pp.213-217
- [22] T. Nitta N. Yamada Y. Fujiwara – „Area effect of electrical breakdown in compressed SF₆”, IEEE PES Summer Meeting & EHV/UHV Conference, Vancouver, B.C., Canada, July 15-20, 1973, pp. 623-629
- [23] H. Okubo, M. Hazeyama, T. Kobayashi, N. Hayakawa, T. Takahashi, K. Yasuda – “PD Inception Characteristics in LNFIPL Laminated Paper Composite Insulation System for HTS Cable”, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 1-5 2003 Nagoya, pp. 1178- 1181
- [24] M. O. Pace, I. Sauers, D. R. James, E. Tuncer, G. Polizos – “Design of Liquid-Nitrogen-Insulated Apparatus Through Unified Breakdown Field Data Having Different Area and Volume Effects”, 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena
- [25] M. O. Pace, I. Sauers, D. R. James, E. Tuncer, G. Polizos – “Design Tool for Liquid-Nitrogen Gaps in Superconducting Apparatus”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 21, NO. 3, JUNE 2011, pp. 1441-1444
- [26] K. Truman, E.J. Mankowski, D. Wetz, M. Kristiansen – „The effect of area on pulsed breakdown in water”, 0-7803-8586- 1/04/\$20.00 02004 IEEE pp. 126-128
- [27] K. H. Weber, H. S. Endicott – “Area Effect and Its Extremal Basis for the Electric Breakdown of Transformer Oil”, AIEE Winter General Meeting, New York, N. Y., January 30-February 3, 1956, p.:371-381
- [28] K. H. Weber, H. S. Endicott – “Extremal Area Effect for Large Area Electrodes for the Electric Breakdown of Transformer Oil”, AIEE Summer General Meeting, Montreal, Que., Canada, June 24-28, 1957. pp. 1091-1096
- [29] F. Mosiński – “Objętość, a wytrzymałość elektryczna dielektryków”, Seminarium Techniczne “materiały i układy izolacyjne w przemyśle elektrotechnicznym. Projektowanie – Własności – Diagnostyka”, Ustroń-Jaszowiec 27-29.04.1994, str. 17-25
- [30] M. Murano, S. Menju, M. Ikeda, N. Hasegawa, T. Inoue – “Experimental Extension of Volume Effect on Breakdown of Transformer Oil”, 1974 Winter Power Meet. New York January 27-February 1, C 74 236-6

(1) Autorzy: prof. dr hab. inż. Franciszek Mosiński; Zakład Wysokich Napięć Politechnika Łódzka Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: franciszek.mosinski@p.lodz.pl