



PUBLIKÁCIA TECHNICKEJ UNIVERZITY V KOŠICIACH

STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV

November 2008

Číslo 5/2008

ISSN 1337-0103

Obsah

Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník Použitie metódy snímania akustickej emisie pri detekcii výbojovej činnosti v izoláciách typu papier-olej	3
Dušan Medveď Využitie metódy konečných diferencií pre riešenie rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní vzoriek	5
Bystrík Dolník, Ján Tkáč, Juraj Kurimský Možnosti ochrany izolácie elektrických zariadení pred účinkami atmosférickej elektriny	7
Iraida Kolcunová, Juraj Kurimský Čiastkové výboje v statorovej izolácii elektrických strojov točivých	11

Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Použitie metódy snímania akustickej emisie pri detekcii výbojovej činnosti v izoláciách typu papier-olej

Abstrakt. Kombinovaná izolácia používaná pri konštrukcii veľkých transformátorov je veľmi citlivá na pôsobenie prevádzkových činiteľov. Naša práca je orientovaná na modelovanie výbojovej činnosti v laboratórnych podmienkach, za účelom overovania možnosti použitia neelektrických meracích metód a to priamych aj nepriamych. Podrobnejšie je analyzovaná akustická emisia signálov vyvolaných čiastkovými výbojmi v kombinovanej izolácii typu papier-olej, jej snímanie a vyhodnocovanie.

Abstract. Compound insulation used in power transformers is very sensible to outdoor operation impact factors. Our work was oriented on the modeling of partial discharges effect in laboratory condition. Nonelectric method with special orientation to application of acoustic measurement of partial discharges activity were tested. Force influence of acoustic sensor was also tested. (Contribution for SES2008 Seminar – Application of Acoustic Emission Sensing Method for Discharge Activity in Paper-Oil Insulation).

Kľúčové slová: izolácia, akustická emisia, čiastkový výboj.

Keywords: insulation, acoustic emission, partial discharge.

Úvod

Je známe, že v prevádzkových podmienkach vznikajú v izolácii elektrických zariadení, najmä silnoprúdových, čiastkové výboje. Čiastkový výboj, ktorý vznikne napr. v izolácii olejom plnených transformátorov vygeneruje elektromagnetický impulz, ktorého časť energie sa transformuje na mechanickú energiu v podobe tlakovej vlny.

V závislosti na týchto parametroch trvanie tlakovej vlny môže byť rôzne. Tieto vlny sa šíria olejovým médiom až kým jej čelo nenarazí na nádobu transformátora alebo tuhý predmet, ktorý je súčasťou konštrukcie transformátora.

Poznamenajme, že existuje niekoľko spôsobov ako tento elektrofyzikálny proces využiť pre diagnostické merania. Základnými parametrami, ktoré kvantifikujú akustickú tlakovú vlnu sú:

akustická rýchlosť v (m/s),

intenzita akustického vlnenia I (W/m²),

akustický tlak p (Pa),

hladina akustickej intenzity L_I (dB) a hladina akustického tlaku L_p (dB).

Tlakové pole vytvorené akustickou vlnou možno vyjadriť pomocou diferenciálnej rovnice druhého rádu:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (1)$$

kde p je tlakové pole, ∇ je Laplaceov operátor, v je rýchlosť šírenia zvuku v médiu, t je čas [1]. Je výhodné monitorovať neúplné prirazy dielektrika práve akustickými metódami.

Základné charakteristiky vzniknutého vlnenia možno modelovať napr. na fyzikálnom modeli v laboratórnych podmienkach, pričom pri dodržaní špecifických požiadaviek dá sa dosiahnuť patričná zhoda laboratórnych a in-situ meraní.

Predmet výskumu

Predmetom laboratórneho výskumu bolo dielektrikum vyrobené kombináciou dvoch izolačných materiálov, ktoré sa bežne používajú napr. v olejových transformátoroch: papier-olej. Olejová zložka dielektrika bola vytvorená transformátorovým olejom s označením ITO 100. Papierové komponenty boli zasa vyrobené z transformátorového papiera. Použité boli tri vrstvy s kruhovým prierezom,

pričom hrúbka papiera činila 430 μ m. Takýmto spôsobom boli pripravené štyri rôzne typy vzoriek: bez dutiny, s dutinou širokou 1 mm, 3 mm a posledná vzorka s dutinou 6 mm. Alternatívne boli pripravené aj vrstvené papierové vzorky spojené s epoxidovou živicom. V tomto prípade hrúbka vzoriek dosahovala 1 350 μ m.

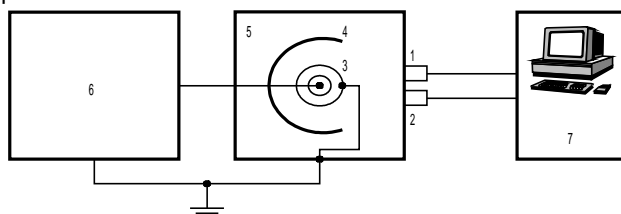
Fáza experimentov

Zostrojil sa špeciálny pridržiavač (obr. 3). Požiadavky na pridržiavač boli nasledovné: konštantný prítlak vzoriek, polohovateľnosť vysokonapäťovej elektródy, vymeniteľnosť styčných elektród. Vzorky boli umiestnené v špeciálnej nádobe s transformátorovým olejom.

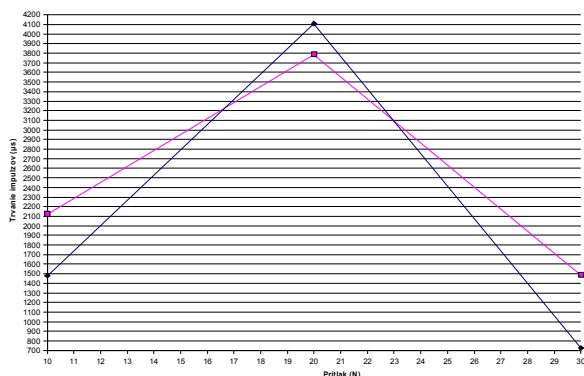
Pridržiavač sondy ako aj skonštruovaný elektródový systém, boli najprv testované na vyrobených vzorkách za účelom ďalšej optimalizácie ich konštrukcie pomocou priamej metódy a pomocou akustickej metódy podľa zapojenia na obr. 1 [2].

Všetky experimenty realizovali sa v laboratórnych podmienkach. Primárnym cieľom experimentu bolo zaznamenanie procesov vyvolaných čiastkovými výbojmi súčasne ako akustické spektrum a fázové rozloženie. Akustická časť bola realizovaná vo frekvenčnom pásme 80–180 kHz dvomi nezávislými piezokeramickými snímačmi. Signály boli následne spracované zariadením obsahujúcim digitálny signálový procesor, pomocou ktorého možno zo signálov determinovať čas nábehu, počet prechitov nad definovanou prahovou úrovňou, energiu signálu, trvanie a amplitúdu.

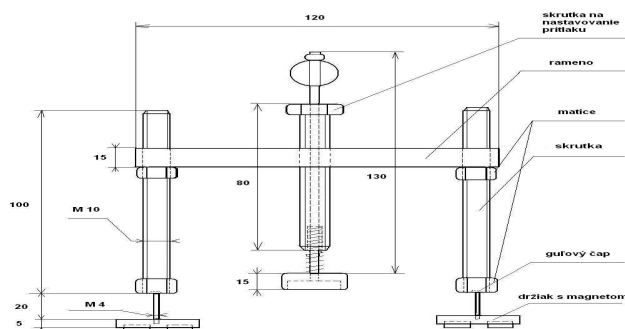
Samotné merania boli realizované na rôznych vzorkách, pri napätiach s efektívnou hodnotou 5, 7 a 10 kV. Každý merací interval celkovo trval 6 minút. Pri experimentoch bol overovaný aj vplyv prítlaku sondy na namerané výsledky, preto sa merania uskutočňovali dvojkanálovým spôsobom podľa obr. 1.



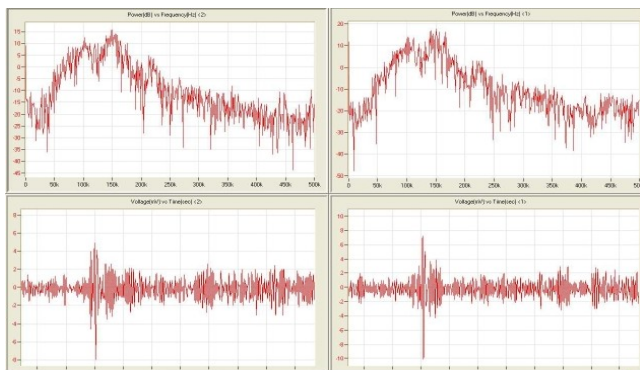
Obr. 1. Bloková schéma zapojenia pri meraní akustickou metódou



Obr. 2. Vplyv tlaku sondy č. 1 a 2 na odozvu signálu od ČV



Obr. 3. Konštrukcia pridržiavača s nastaviteľným prítlakom



Obr. 4. Porovnanie záznamov signálu zo sondy č. 2 a 1

Diskusia k výsledkom experimentu

Vzorky vykazovali určitú dynamiku zmien, a to ako počas meracieho intervalu, tak aj v závislosti od veľkosti priloženého napätia. Zistilo sa, že výbojová činnosť spôsobuje vo vnútri vzoriek zmeny, ktoré sú príčinou rozdielov pri nasledujúcich opakovaných meraniach za rovnakých podmienok. Ďalej zistilo sa, že po približne piatich meracích intervaloch sa výbojová činnosť stabilizuje. Experimenty preukázali vplyv priestorovej konfigurácie meracej aparatury a prepojavacích vedení, zvlášť vo vysokonapäťovej časti schémy zapojenia [4]. Bolo potrebné vyriešiť vhodné usporiadanie prívodov k elektródam a ich technické riešenie. Parazitné kapacity spôsobili napätovú nevyváženosť elektródového systému umiestneného v oleji, ktorá sa zvyrazňuje pri viacerých izolačných materiáloch.

Vplyv tlaku akustickej sondy, ktorá bola uchytená na stene nádoby, na parametre akustického signálu bol riešený skonštruovaním pridržiavača s nastaviteľným prítlakom, ktorý bol aplikovaný na sondu č. 1. Výsledky meraní

uvedené v tabuľke č. 1 preukázali optimálny prítlak 20 N na ktorý je konštruovaný aj štandardne dodávaný magnetický pridržiavač. Vykonal sa množstvo meraní, ktoré potvrdili vysokú reprodukovateľnosť výsledkov. V tabuľke č. 1 sú uvedené výsledky; σ je štandardná odchýlka. Na základe nich bola zostrojená grafická závislosť uvedená na obr. 2.

Tabuľka 1. Porovnanie údajov zo sondy č. 1 a 2

Vlastnosť	Kanál	Min.	Max.	Priem.	σ
Čas nábehu (μ s)	1	0,0000	1 470	8,0350	62,8261
Početnosť (-)	1	1,0000	12	1,1176	0,5135
Energia (J)	1	0,0000	3	0,0135	0,1376
Trvanie (μ s)	1	0,0000	1 480	17,9715	93,7080
Amplitúda (dB)	1	1,0000	56	41,1146	1,5056
Čas nábehu (μ s)	2	0,0000	1 470	12,0248	86,3114
Početnosť (-)	2	40,0000	11	1,2396	0,8055
Energia (J)	2	0,0037	3	0,0206	0,1976
Trvanie (μ s)	2	0,0000	2 124	25,2882	127,7674
Amplitúda (dB)	2	40,0000	56	41,4256	1,9336

Príklad zaznamenaných výsledkov z meracieho kanálu č. 2 a č. 1 je zobrazený na obr. 4. Z obrázku je zrejmé, že pri nastavení optimálneho prítlaku pridržiavača namerané signály sú tvarovo identické. Bolo by vhodné tieto signály podrobiť frekvenčnej analýze na vzájomné porovnanie frekvenčných spektier oboch signálov[3].

Záver

Zhotovený elektródový systém vyhovuje stanoveným požiadavkám a umožňuje meranie výbojovej činnosti v kovovej nádobe s transformátorovým olejom. Je potrebné overiť stabilitu plastovej pôrovitej podložky, ktorá svojou pružnosťou zabezpečuje optimálny prítlak. Keďže závislosť na obr. 3 má silné lokálne maximum, možno predpokladať, že pod vplyvom teploty ako aj dlhodobého mechanického namáhania, môže dôjsť k zmenšeniu prítlaku a tým aj k skresleniu nameraných výsledkov. Vyrobený pridržiavač preukázal optimálnu možnosť použitia počas dlhodobého prítlaku snímača. Perspektívne bude potrebné pripraviť meraciu aparaturu s väčším počtom meracích kanálov, čím by sa získal prehľad o priestorovom rozložení emitovaného signálu ČV na stene nádoby po jej obvodu a po jej povrchu čím sa získa prehľad o vplyve jednotlivých konštrukčných častí na šírenie akustického signálu.

Literatúra

- [1] Skubis, J.: A state of development of the acoustic method for assesment of partial discharges and directions of its improvement. 2nd I.C.D.I, High Tatras, Slovakia, 2000, s. 144–152.
- [2] Stoličný, P.: Meranie výbojovej činnosti v izolácii papier-olej. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. 63 s.
- [3] Petráš, J.: Partial discharge acoustic emission signal analysis. Przeglad Elektrotechniczny. Vol. 3, 2007. pp. 177–179. ISSN 1731-6106.
- [4] Džmura, J.: Macroscopic particles in direct and alternating electric field. Przeglad Elektrotechniczny. Vol. 3, 2007. pp. 78–80. ISSN 1731-6106.
- [5] Balogh, J.: Partial discharge activity by inductive sensor and simultaneous acoustic emission sensing. Przeglad Elektrotechniczny. Vol. 3, 2007. pp. 13–15. ISSN 1731-6106.

Autori vyjadrujú poďakovanie Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporenie tejto práce v rámci projektu APVV-20-006005 a Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/3142/06.

Autori: Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Jan.Tkac@tuke.sk, Juraj.Kurimsky@tuke.sk, Bystrik.Dolnik@tuke.sk

Dušan Medveď

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Využitie metódy konečných diferencií pre riešenie rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní vzoriek

Abstrakt. Tento príspevok sa zaoberá využitím numerických metód pre určovanie rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní skúmaných vzoriek. Skúmané vzorky sú namáhané v teplotnom poli a dochádza k tepelnému starnutiu materiálu. Nakoľko materiál obsahuje nehomogenity dochádza v niektorých miestach k rýchlejšiemu starnutiu materiálu. Správne určenie a lokalizovanie miest s najväčším teplotným gradientom pomáha stanoviť vhodné opatrenia pre zabránenie nežiaducich deštruktívnych dejov. V týchto prípadoch je možné s výhodou využiť numerické metódy ako napríklad metódu konečných prvkov alebo metódu konečných diferencií.

Abstract. This article deals with the utilizing of numerical methods for thermal field determining caused by thermal stress of investigated samples. The investigated samples are stressed in thermal field and they are influenced by thermal ageing. Because the material contains also non-homogenous particles there is faster ageing in some locations of the material. The proper determination and localization of places with the biggest thermal gradient helps to determine the appropriate actions for preventing of unwanted destructive effects. In these cases it is possible with the benefit to utilize the numerical methods such as the finite element method and finite difference method.

Kľúčové slová: Metóda konečných diferencií, teplotné pole, tepelné starnutie

Keywords: Finite difference method, thermal field, thermal ageing

Úvod

Predpokladom pre dosiahnutie čo najdlhšej životnosti skúmanej vzorky je správny výber materiálu vzorky. Akosť vzorky závisí tak od kvality použitého materiálu, ako aj šetrného zaobchádzania pri skladovaní a ukladaní do sušiacoho úložného zariadenia. Starnutie materiálu sa prejavuje krehnutím, samovoľnou lámavosťou, stratou objemu, čím sa radikálne znižuje jeho izolačná schopnosť. Základné fyzikálne a chemické vlastnosti, ako aj funkčnosť izolačných materiálov sa overujú laboratórnymi skúškami. Laboratórne skúšky patria väčšinou do skupiny urýchlených skúšok a preto je potrebné voliť zosilňujúce skúšobné podmienky tak, aby čo najvernejšie simulovali reálne podmienky. Ďalšou z metód určenia funkčnosti materiálov pri tepelnom namáhaní je počítačová simulácia, pri ktorej sa zisťuje rozloženie teplotného poľa alebo štruktúrne zmeny materiálu. Vhodnými metódami pri tejto počítačovej simulácii je metóda konečných prvkov, metóda konečných diferencií a ich rôzne modifikácie.

1 Matematické modelovanie teplotného poľa

Vo všeobecnosti, časovo premenné procesy tepelného namáhania v izolačnom materiáli je možné popísať rovnicou vedenia tepla [1]:

$$(1) \quad c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \cdot \nabla \vartheta) = q_e$$

kde ϑ je teplota, ρ je objemová hmotnosť materiálu, c je merná tepelná kapacita, λ je tepelná vodivosť materiálu a q_e je merný tepelný výkon vnútorného zdroja energie v jednotke objemu. Tento merný tepelný výkon zdroja energie q_e sa získa z výpočtu dopadajúceho sálavého toku z výhrevných článkov ohrievacieho telesa na povrch skúmaného materiálu.

V mnohých úlohách tepelného namáhania sa kombinujú hraničné podmienky s tepelnými stratami spôsobenými prúdením a sálaním. Ako príklad takejto hraničnej podmienky je možné uviesť výraz [2]

$$(2) \quad -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \mathbf{n}} = \alpha \cdot (\vartheta_p - \vartheta_0) + c_p \cdot (\vartheta_p^4 - \vartheta_0^4) + q_p$$

kde $\frac{\partial \vartheta}{\partial \mathbf{n}}$ je teplotný gradient v smere normály k povrchu v uvažovanom bode, α je koeficient prestupu tepla prostredím, c_p je koeficient sálenia šedého povrchu (súčin Stefan-Boltzmannovej konštanty a príslušnej emisivity) q_p je generovaný výkon na povrchu skúmaného materiálu a \mathbf{n} vyjadruje normálový vektor k hranici povrchu.

V prípade rozloženia teploty v telese valcového tvaru, rovnicu (1) je možné formálnym prepisom uviesť do tvaru

$$(3) \quad c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + q_e$$

Podobne, rovnica (1) sa môže v pravouhlej sústave súradníc (napr. pre rovinnú dosku, hranol) prepísať do tvaru

$$(4) \quad c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + q_e$$

Rovnice (3) a (4) spolu s hraničnými podmienkami sa najviac používajú pri matematickom modelovaní tepelných procesov.

2 Metóda konečných diferencií

Algoritmus výpočtu pozostáva z nahradenia parciálnych diferenciálnych rovníc (3) a (4) diferenčnými rovnicami, ktorých hodnoty sú odvodené z najbližších susedných uzlov predmetnej oblasti. Táto metóda umožňuje aproximáciu parciálnych diferenciálnych rovníc bod po bode [1].

Ako príklad takejto metódy môže byť jednorozmerné teplotné pole dané funkciou ϑ , ako funkciou súradnice x . Pomocou doprednej metódy konečných diferencií bude mať prvá derivácia tejto funkcie v bode x_0 tvar

$$(5) \quad \vartheta'(x_0) \cong \frac{\vartheta(x_0 + \Delta x) - \vartheta(x_0)}{\Delta x}$$

kde Δx predstavuje malý dĺžkový krok.

Pre ďalšie využitie je ešte vhodné spomenúť tvar aproximácie druhej derivácie tejto funkcie

$$(6) \quad \vartheta''(x_0) \cong \frac{\vartheta(x_0 + \Delta x) - 2 \cdot \vartheta(x_0) + \vartheta(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

3 Riešenie 1-rozmerovej úlohy v telese valcového tvaru využitím metódy konečných diferencií

Ak je možné predmetnú úlohu riešenia teplotného poľa zjednodušiť natoľko, že šírenie tepla sa uvažuje len v jednom smere, rovnica šírenia tepla (1) nadobudne tvar [3], [4]:

$$(7) \quad \frac{\partial \vartheta(r, t)}{\partial t} = a_\vartheta \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta(r, t)}{\partial r} \right) + f(r, t)$$

kde výraz na pravej strane a_ϑ vyjadruje koeficient tepelnej difuzivity ($a_\vartheta = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$), a funkcia f značí výraz pre vnútorný zdroj ($f(x, t) = \frac{q_e}{\rho \cdot c}$). Smer šírenia tepla sa uvažuje po polomere ohrievaného telesa r . Riešenie tejto rovnice je samozrejme úplné, až pri stanovení počiatočných a hraničných podmienok. Rozdelením valcového telesa rovnomernou sieťou na úseky s dĺžkou Δr s počtom dielikov n po polomere r_2 sa teplota v i -tom uzle ($i = 1, 2, 3, \dots, n-1$) a j -tom čase ($j = 1, 2, 3, \dots, t_n$) vypočíta ako funkcia týchto časových a súradnicových diferencií. V mieste $r = i \cdot \Delta r$ a čase $t = j \cdot \Delta t$ bude teplota daná ako funkcia $\vartheta_{i,j} = \vartheta(i \cdot \Delta r, j \cdot \Delta t)$. Teda, formálnym prepisom predmetnej rovnice (7) sa získa diferenčná rovnica

$$(8) \quad \frac{\Delta \vartheta}{\Delta t} = a_\vartheta \cdot \left(\frac{\Delta^2 \vartheta}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\Delta \vartheta}{\Delta r} \right) + \frac{q_e}{\rho \cdot c}$$

v ktorej dĺžkové a časové kroky sú definované pomermi $\Delta r = \frac{r_2}{n}$ a $\Delta t = \frac{t_f}{t_n}$, kde r_2 je polomer valcového telesa, n je počet delení valca pozdĺž polomeru r_2 , t_f je celková doba ohrevu, t_n je počet časových delení.

Pre takto zvolenú sieť uzlových bodov i, j sa rovnica (8) využitím vzťahov (5) a (6) prepíše do tvaru

$$(9) \quad \frac{\vartheta_{i,j+1} - \vartheta_{i,j}}{\Delta t} = a_\vartheta \cdot \left(\frac{\vartheta_{i+1,j} - 2 \cdot \vartheta_{i,j} + \vartheta_{i-1,j}}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r_i} \cdot \frac{\vartheta_{i+1,j} - \vartheta_{i-1,j}}{2 \cdot \Delta r} \right) + f_{i,j}$$

z ktorej sa vypočíta neznáma teplota v i -tom uzle a čase $j+1$

$$(10) \quad \vartheta_{i,j+1} = \vartheta_{i,j} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot a_\vartheta \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2} \right) + \vartheta_{i+1,j} \cdot \left(\frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{2 \cdot \Delta r \cdot r_i} \right) \cdot a_\vartheta \cdot \Delta t + \vartheta_{i-1,j} \cdot \left(\frac{1}{(\Delta r)^2} - \frac{1}{2 \cdot \Delta r \cdot r_i} \right) \cdot a_\vartheta \cdot \Delta t + \frac{q_e}{\rho \cdot c} \cdot \Delta t$$

Ktorú, je možné upraviť pre maticový zápis ako

$$(11) \quad \vartheta_{i,j+1} = \vartheta_{i,j} \cdot (1 - 2 \cdot \beta) + \vartheta_{i+1,j} \cdot \left[\beta \cdot \left(1 + \frac{\Delta r}{2 \cdot r_i} \right) \right] + \vartheta_{i-1,j} \cdot \left[\beta \cdot \left(1 - \frac{\Delta r}{2 \cdot r_i} \right) \right] + \frac{q_e}{\rho \cdot c} \cdot \Delta t$$

kde $\beta = \frac{\Delta t \cdot a_\vartheta}{(\Delta r)^2}$ a $i = 1, 2, \dots, n$.

Zo zápisu (10) vyplýva, že teplota v i -tom uzle ($i \in \{1; m-1\}$) a čase $(j+1) \cdot \Delta t$ je jednoznačne určená teplotami susedných uzlov $\vartheta_{i+1,j}$, $\vartheta_{i-1,j}$, v predchádzajúcom čase $j \cdot \Delta t$.

Teplotu na hranici vyšetrovanej oblasti (na povrchu valca s polomerom r_2 , t.j. v uzle n) je možné získať riešením hraničnej podmienky 3. druhu s úpravou na diferenčný tvar

$$(12) \quad \vartheta_{n,j} = \frac{\lambda \cdot \vartheta_{n-1,j} + \alpha \cdot \Delta r \cdot \vartheta_0}{\lambda + \alpha \cdot \Delta r}$$

kde $\vartheta_{n,j} = \vartheta_{r_2}$ je neznáma teplota na povrchu valca a ϑ_0 je teplota okolitého prostredia tohto telesa.

Pri predpokladanom symetrickom ohreve valcového telesa v jeho strede ($r=0$) platí $\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$, teda aj v diferenčnom tvare musí platiť

$$(13) \quad \frac{\vartheta_{1,j} - \vartheta_{0,j}}{\Delta r} = 0$$

Z výrazu (13) vyplýva, že teplota v strede ohrievaného telesa ($i=0$) sa rovná teplote v nasledujúcom uzle ($i=1$) v tom istom čase $j \cdot \Delta t$, t.j. $\vartheta_{1,j} = \vartheta_{0,j}$.

Pri riešení tejto 1-rozmerovej úlohy teplotného poľa valcového telesa (len po polomere), je nutné určiť podmienku stability riešenia. V tomto prípade je to výraz označený symbolom β , ktorý sa vyskytuje v maticovom tvare teplotnej rovnice (11)

$$(14) \quad \beta = \frac{\Delta t \cdot a_\vartheta}{(\Delta r)^2} \leq \frac{1}{2}$$

4 Záver

Tento príspevok mal za úlohu bližšie popísať postup riešenia rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní (urýchlenom tepelnom starnutí). Z množstva metód, ktoré sa využívajú v praxi sa metóda konečných diferencií s výhodou využíva pre jej jednoduchosť a pomerne rýchlu konvergenciu.

Literatúra

- [1] Kunz, K. S., Luebbers, R. L.: Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. CRC-Press: 1993. 464 s. ISBN 0849386578.
- [2] Sadiku, M. N.: Numerical Techniques in Electromagnetics. CRC Press: 2000. 760 s. ISBN: 9780849313950.
- [3] Won Young Yang: Applied Numerical Methods Using MATLAB. Wiley-Interscience: 2005. 528 s. ISBN 0471698334.
- [4] Cimbala, R.: Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov. 1. vyd. Košice: TU, 2007. 188 s. ISBN 978-80-8073-904-1.
- [5] Medveď, D.: Ohrev feromagnetických materiálov do Curieho teploty indukčnou metódou. Dizertačná práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. 170 s.

Tento príspevok bol podporený projektmi Ministerstva školstva Slovenskej republiky APVV-20-006005 a VEGA 1/3142/06.

Autor: Dušan Medveď, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Dusan.Medved@tuke.sk

Bystrík Dolník, Ján Tkáč, Juraj Kurimský

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Možnosti ochrany izolácie elektrických zariadení pred účinkami atmosférickej elektriny

Abstrakt. Účinky výbojových procesov, ktoré prebiehajú v atmosfére, na izoláciu elektrických zariadení sú stále predmetom výskumu rôznych vedných disciplín. Tieto výbojové procesy prejavujú sa predovšetkým ako blesky, ktoré pôsobia, priamo alebo nepriamo, na objekty na zemi ako aj na elektrické zariadenia umiestnené mimo stavebných objektov alebo inštalované v stavebných objektoch. Ďalší faktor, ktorý spôsobuje poškodenie izolácie elektrických zariadení, je elektromagnetický impulz vyvolaný bleskom (LEMP).

Abstract. The influence of discharge phenomenon on the insulation of electric equipments related to the atmospheric processes is topical for different branches. These atmospheric processes exist mainly as bolts and affect warehouses. Another factor responsible for insulation damage of electric equipments is electromagnetic pulse generated by lightning. (Contribution for SES2008 Seminar – Alternative Protection of Electric Equipments Insulation Against Influence of Atmospheric Electricity).

Kľúčové slová: izolácia, atmosférická elektrina, ochrana, prepätie.

Keywords: insulation, lightning, overvoltage protection.

Úvod

Atmosférická elektrina a jej účinky na izoláciu elektrických zariadení je týka sa rôznych oblastí, napr. ochrana osôb nachádzajúcich sa vnútri stavebných objektov, bezpečná a spoľahlivá prevádzka technických zariadení v objektoch, ochrana dát v sieťových databázových aplikáciách (informačno-technické siete), prevádzka strategických inštitúcií a pod.

Vonkajšia ochrana pred bleskom chráni objekty len pred mechanickým a tepelným účinkom: v prípade priameho úderu blesku do objektu nezabráni však nárastu potenciálu budovy, ktorý je závislý od amplitúdy prúdu blesku a hodnoty impulzného zemného odporu uzemňovacej sústavy. Prepätia vnútri objektu prejavujú sa ako následok veľkého rozdielu potenciálov na vodivých častiach zariadení v chránenom objekte.

Problematika ochrany izolácie elektrických zariadení v objektoch pred účinkami prepätí je už dobre známa. S rozvojom nových technológií, najmä informačno-technických, rastú nároky na prepäťové ochrany. Avšak použitie prepäťových ochrán, bez použitia dôkladného komplexného systému ochrany pred účinkami atmosférickej elektriny, nie je dostačujúci.

Účinky atmosférickej elektriny

Atmosférický výboj možno registrovať pomocou zmyslov človeka. Nežiaduce účinky atmosférického výboja možno roztriediť nasledovne:

- tepelné,
- elektrodynamické,
- elektrochemické,
- elektrické prierazy,
- elektromagnetická indukcia a
- iné.

Tepelné účinky

Ak blesk zasiahne predmet, môže sa tento predmet poškodiť podľa toho, akú má špecifickú elektrickú vodivosť. Kovy sú väčšinou málo poškodené s výnimkou miesta zásahu blesku. Keď však blesk zasiahne izolant alebo polovodivú látku, poškodenie môže mať ráz výbuchu, napr. zásah do stromu alebo zásah do budovy.

Najväčšie škody na majetku spôsobené bleskom sú spôsobené požiarom, ktorý je vyvolaný samotným zásahom blesku do objektu.

Elektrodynamické účinky

Elektrodynamické účinky prejavujú sa najmä vtedy, keď vodivé predmety sú blízko seba vo vzájomnom pôsobení magnetických polí a vo vzájomnom súbehu. Ak je však vzdialenosť týchto predmetov (vodičov) väčšia ako 0,5 m, potom elektrodynamické účinky sú prevažne zanedbateľné. Elektrodynamická sila pôsobiaca medzi dvomi vodičmi vo vzájomnom súbehu je

$$F_{ed} = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2 \frac{l}{d} \quad (1)$$

kde: F_{ed} – elektrodynamická sila, i – prúd, μ_0 – permeabilita vákua, l – dĺžka vodiča, d – vzdialenosť medzi vodičmi.

Elektrodynamická sila je úmerná druhej mocnine prúdu. Ak je smer tečúceho prúdu vo vodičoch súhlasný, vodiče sa navzájom priťahujú; ak je smer tečúceho prúdu opačný, vodiče sa navzájom odpudzujú.

Elektrochemické účinky

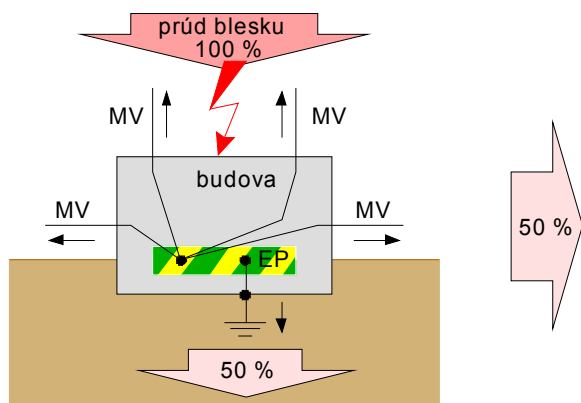
Elektrochemické účinky sú zanedbateľné, pretože ani zvody bleskozvodov, ktoré sú často zasahované bleskom, nedá sa počítať s elektrochemickým rozkladom zemničov. Aj za predpokladu, že celkový zvedený náboj do zeme má hodnotu 100 C, podľa Faradayovho zákona zodpovedá tomu elektrolytické rozloženie najviac 30 mg železa, niklu alebo olova.

Elektrické prierazy

Elektrické prierazy sú spôsobené zväčša galvanickou väzbou. Vyvolané sú veľkým rozdielom potenciálov medzi pracovnými vodičmi a impedanciou uzemnenia: úbytok napätia U_u na impedancii uzemnenia vypočíta sa podľa Ohmovho zákona:

$$U_u = I Z_u \quad (2)$$

kde: I – amplitúda prúdu blesku, Z_u – impedancia uzemnenia.



Obr. 1. Rozdelenie prúdu blesku

Ak zoberieme do úvahy číselné hodnoty: amplitúda prúdu blesku $I = 100 \text{ kA}$ a impedancia uzemnenia $Z_u = 1 \Omega$, bude úbytok napätia na impedancii uzemnenia $U_u = 100 \text{ kV}$; tuná impedancia uzemnenia pozostáva z dvoch častí: reálnej časti (ohmický odpor) a imaginárnej časti (indukčná reaktancia metalických vodičov uzemnenia).

Pre budovy vybavené bleskozvodom so vstupujúcimi a vystupujúcimi vodičmi platí, že približne 50 % prúdu blesku bude tiecť do uzemnenia budovy a zvyšných 50 % bude tiecť cez spomínané metalické vodiče. Na obr. 1. je: EP – ekvipotenciálna prípojnica, MV – metalické vedenie.

Elektromagnetická indukcia

Profesionálne pripravené obrázky sú najväčším problémom mnohých autorov.

$$u_i = M \frac{\Delta i}{\Delta t} \tag{3}$$

kde: u_i – indukované napätie (kV), M – vzájomná indukčnosť (μH), $\Delta i / \Delta t$ – časová zmena prúdu blesku ($\text{kA}/\mu\text{s}$).

Ak budeme uvažovať budovu s bleskozvodom, potom podľa obr. 2 môžu nastať nasledovné prípady:

- a) vlastná slučka v zvode bleskozvodu,
- b) slučka tvorená bleskozvodom a vodičmi elektrickej inštalácie a
- c) slučka tvorená samotnou elektrickou inštaláciou.

Uvažujme druhý vymenovaný prípad vzniku slučky, podľa obr.3a, s nasledovnými parametrami v obvode:

- 1. časová zmena prúdu blesku $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$,
- 2. veľkosť slučky $a=10 \text{ m}$ (pre prierez zvodu $S=50 \text{ mm}^2$ je vzájomná indukčnosť $M \sim 16 \mu\text{H}$ [2].

Potom napätie indukované v slučke, podľa rovnice (3), má amplitúdu $U=1 600 \text{ kV}$. Podobne, môžeme uvažovať tretí vymenovaný prípad vzniku slučky, pozri konfigurácie na obr. 3b–d: jedná sa teda o slučku, ktorá je tvorená samotnou elektrickou inštaláciou, pričom uvažovaná slučka má alebo tvar štvorca nachádzajúca sa v určitej vzdialenosti od zvodu, ktorým prechádza prúd blesku alebo má tvar obdĺžnika: tento môže byť orientovaný rovnobežne so zvodom – jedná sa o súdeň (obr. 3c) alebo kolmo na zvod (obr. 3d). Výpočet indukovaného napätia pre konfigurácie podľa obr. 3c a obr. 3d je uvedený v [2].

Prehľad indukovaných napätí pre konfigurácie slučiek podľa obr. 3b–d je uvedený v tab. 1. Uvažujú sa nasledovné parametre obvodu:

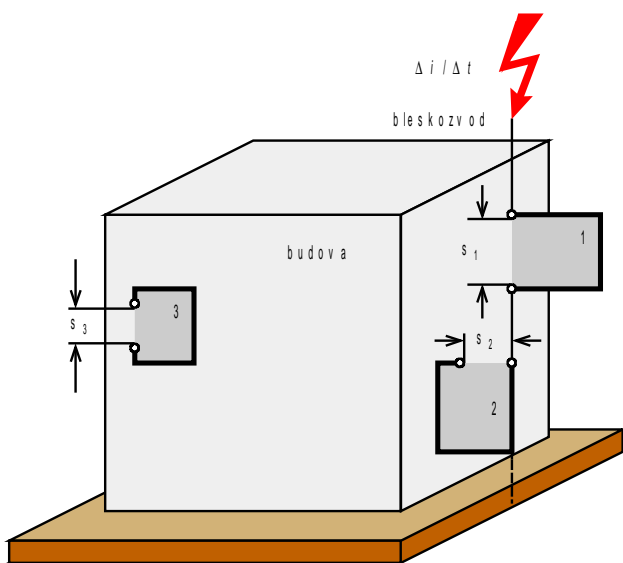
- a) časová zmena prúdu blesku $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$,
- b) dĺžka strany slučky $a=10 \text{ m}$,
- c) dĺžka vodičov inštalácie $l=10 \text{ m}$ a
- d) vzájomná vzdialenosť vodičov $b=3 \text{ mm}$.

Tabuľka 1. Hodnoty indukovaných napätí v slučke podľa obr. 3.

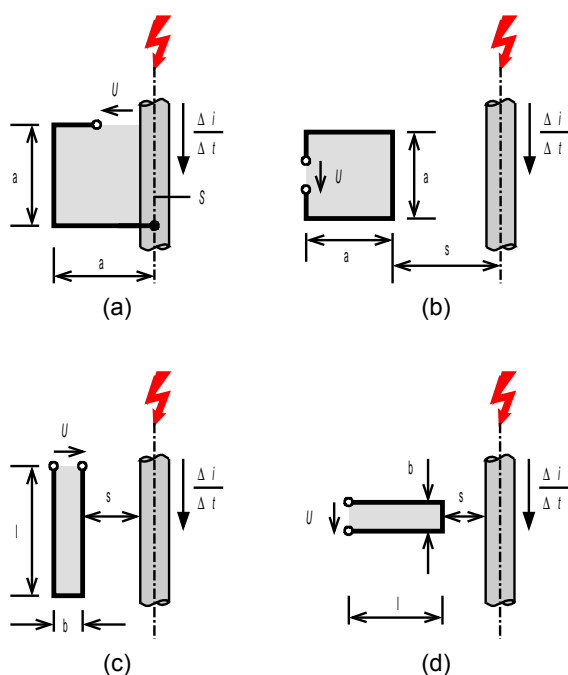
Konfigurácia	Vzájomná indukčnosť	Indukované napätie
Obr. 3b	4,8 μH	480 kV
Obr. 3c	0,6 $\mu\text{H}/\text{m}$	600 V
Obr. 3d	0,48 $\mu\text{H}/\text{m}$	144 V

Základné elektrické parametre atmosférického výboja

Triedenie a opis atmosférických výbojov sú podmienené energeticky najhoršími prípadmi: jedná sa o výboje medzi búrkovým mračnom a zemským povrchom. Nový rad noriem, IEC EN 61024-1, IEC EN 62305 vychádza z teórie pravdepodobnosti. Podľa IEC EN 61024-1 resp. IEC EN 62305-1, na celkový priebeh výboja podstatne vplýva skutočnosť, či sa jedná o zostupný blesk, smerujúci z búrkového mračna k zemskému povrchu, alebo o vzostupný blesk. Väčšina vedeckých textov pojednáva



Obr. 2. Indukované prepätia v metalických vodičoch



Obr. 3. Vznik indukovaných prepätí

o zostupnom blesku [3]. Parametre pre impulz prúdu blesku sú definované v príslušných normách. Všeobecne sa uvažuje s aproximačným tvarom 10/350, ktorý má väčší náboj zvedený do zeme ako impulzy prúdu s tvarom 4/10 alebo 8/20 používané na testovanie varistorov [2].

Porovnávaci blesk je fiktívny blesk definovaný pomocou štyroch parametrov. Tieto štyri parametre bývajú prekróčené najviac v 5 % všetkých skutočných prepäťových udalostí spôsobených atmosférickým výbojom. Jedná sa o nasledovné parametre blesku [4]:

- amplitúda prúdu blesku I_{max} – používa sa pre výpočet potenciálu v okolí uzemňovača,
- časová zmena prúdu blesku $(di/dt)_{max}$ – uvažuje sa pre výpočet indukovaného napätia na vlastnej indukčnosti vodičov (vodivých predmetov),
- náboj zvedený do zeme – časový integrál prúdu blesku $\int i dt$ – náboj (As) spôsobuje tavenie materiálu, napr. na elektródach iskrísk a stanovuje množstvo absorbovanej energie, napr. vo varistoroch,
- impulz druhej mocniny prúdu – časový integrál druhej mocniny prúdu blesku – špecifická energia prúdu blesku $W/R = \int i^2 dt$ – uvažuje sa pre výpočet energie (J) na prechodových odporoch (Ω) svoriek a na výpočet elektrodynamických síl pôsobiacich na prívodných vedeniach, ktorými tečie prúd blesku.

Parametre blesku podľa IEC EN 62305

Norma definuje štyri úrovne ochrany pred bleskom (LPL) a štyri triedy ochrany (LPS): energeticky najnáročnejšia trieda ochrany je označená „I“ – uvažuje sa prúd blesku s amplitúdou $I_{max}=200$ kA a náboj $Q_{imp}=100$ C; od triedy ochrany I odvádzajú sa ďalšie, menej náročné triedy ochrany II–IV. V triede ochrany II uvažujú sa parametre na úrovni 75 % triedy ochrany I, pre triedu ochrany III a IV uvažujú sa zasa parametre na úrovni 50 % triedy ochrany I. Súhrn najdôležitejších hodnôt je uvedený v tab. 2 [1–3].

Tabuľka 2. Maximálne parametre blesku zodpovedajúce úrovni ochrany pred bleskom podľa IEC EN 62305

Veličina	Jednotka	Úroveň ochrany pred bleskom (LPL)		
		I	II	III a IV
<i>Prvý impulz prúdu</i>				
I_{max}	kA	200	150	100
Q_{imp}	C	100	75	50
W/R	kJ/ Ω	10 000	5 600	2 500
T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	10/350	10/350	10/350
<i>Následný impulz prúdu</i>				
I_{max}	kA	50	37,5	25
$\Delta i / \Delta t$	kA/ μs	200	150	100
T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	0,25/100	0,25/100	0,25/100
<i>Dlhý impulz prúdu</i>				
Q_{long}	C	200	150	100
T_{long}	s	0,5	0,5	0,5

Súbor noriem 62305

EN / IEC 62305-1 informuje o nebezpečenstve blesku, o parametroch blesku, o odvodených parametroch pre simuláciu účinkov blesku a o parametroch skúšok pre simuláciu účinkov blesku na súčasti prepäťovej ochrany. Ďalej uvádza súhrn noriem pre ochranu pred bleskom. Vysvetľuje postupy a zásady ochrany, ktoré sú základom ďalších častí.

EN / IEC 62305-2 uvádza postup na výpočet rizika pre objekty alebo inžinierske siete pred bleskom typu mrak – zem. Riziko (celkové riziko) R , je definované ako miera pravdepodobných ročných strát (osôb a majetku) spôsobená bleskom vzťahnutá na hodnotu (osôb a majetku) chráneného objektu. Tolerované riziko R_T zas ako najväčšia prípustná hodnota rizika pre chránený objekt. Pravdepodobnosť vzniku škody závisí od vlastností

uvažovaného objektu – hodnotí sa nosná konštrukcia, vyhotovenie vnútorných a vonkajších podlaží, strechy atď. Početnosť výskytu nebezpečnej udalosti závisí hlavne od miestnej hustoty atmosférických výbojov, rozmerov posudzovaného objektu a vlastností jeho okolia (vplyv má aj počet a vlastnosti napájacích vedení). Koeficient škôd rešpektuje zo spôsobu a účelu využitia posudzovaného objektu; berie do úvahy aj počet a trvanie prítomnosti osôb v priestore objektu, druh služieb, ktoré sú poskytované pre verejnosť a význam kultúrnych hodnôt nachádzajúcich sa v posudzovanom objekte. Výsledkom aplikácie tejto časti normy je definovanie prípustného rizika pre daný objekt a stanovenie úrovne ochranných opatrení (LPL – Lighting Protection Level), ktoré treba na objekte vykonať. Analýza musí byť súčasťou technickej správy prevádzkového súboru ochrana pred bleskom [1], [3], [6], [9].

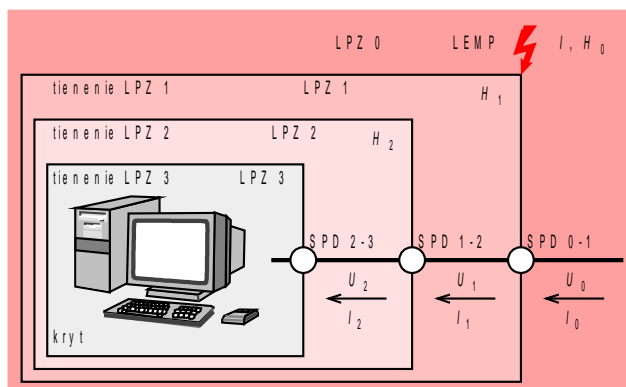
EN / IEC 62305-3 týka sa ochranných opatrení (návrh bleskozvodu – vonkajšia ochrana pred bleskom) na zníženie fyzických škôd a nebezpečenstva ohrozenia života priamymi údermi blesku do objektov. Táto časť normy rieši sčasti aj problematiku vnútornej ochrany pred bleskom (dostatočná vzdialenosť, vyrovnanie potenciálov). Pre návrh zachytávacieho zariadenia norma povoľuje použiť niektorú z nasledovných metód:

- metóda ochranného uhla (jednoduché objekty),
- metóda mrežovej sústavy (ploché strechy) alebo
- metóda bleskovej gule (členité objekty).

Zachytávacie zariadenie môže byť zostrojené alebo zo zachytávacích tyčí alebo napnutých lán a drôtov (zachytávacích vodičov) alebo z mrežovej sústavy. Metóda ochranného uhla a metóda mrežovej sústavy je vhodná len pre určité typy objektov; naopak, metóda bleskovej gule je platná všeobecne. Vnútna ochrana pred bleskom sa realizuje pomocou vyrovnania potenciálov. Vyrovnanie potenciálov obmedzuje rozdiely potenciálov, vyvolané prúdom blesku, medzi kovovými inštaláciami vnútri budovy a pracovnými vodičmi energetických a informačno-technických vedení vchádzajúcich do budovy a vychádzajúcich z budovy. Predpokladom je, že do LPS sa zapoja: kovové konštrukcie objektu, kovové inštalácie, vonkajšie vodivé predmety a vedenie spojené s objektom, elektrické a energetické systémy vnútri chráneného objektu.

EN / IEC 62305-4 týka sa ochranných opatrení na zamedzenie zlyhania elektrických a elektronických systémov v objektoch: opatrenia sú založené na princípe zón ochrany pred bleskom (LPZ) – vnútorná ochrana pred bleskom: uzemnenie, vyrovnanie potenciálov, elektromagnetické tienenie a trasy vedení, inštalácia prepäťových ochrán (SPD). Definícia LPZ je nasledovná:

- LPZ 0_A, vonkajšia nechránená oblasť v ktorej existuje možnosť priameho úderu blesku;
- LPZ 0_B, vonkajšia oblasť chránená zachytávacím zariadením – zamedzený priamy úder blesku a priestor tesne pri stenách objektu, terase a nižšej streche;
- LPZ 0_C, vonkajšia oblasť 3x3 m tesne nad zemou okolo celého objektu chránená pred priamym úderom blesku – možnosť výskytu krokového alebo dotykového napätia pri údere do zachytávacieho zariadenia;
- LPZ 1, vnútorný priestor nachádzajúci sa za vonkajšími stenami objektu a pod strechou objektu, nie je možný priamy úder blesku;
- LPZ 2 vnútorný priestor miestností a chodieb ohraničený vnútornými stenami objektu, nie je možný priamy úder blesku;
- LPZ 3 vnútorný priestor kovových krytov koncových elektrických zariadení, vnútorný priestor odtienených miestností.



Obr. 4. Definovanie zón ochrany pred bleskom LPZ

Koncepcia LPZ definuje postup rozdelenia chráneného objektu do zón s rozdielnou citlivosťou voči rušeniu, pozri obr.4. Rušenie, spôsobené priamymi údermi blesku do objektu ako aj blízky údermi blesku, sa na hraniciach zón redukuje na úrovne, ktorým nasledujúce systémy odolávajú bez poruchy. Na rozhraniach jednotlivých zón treba vyhotoviť ekvipotenciálnu prípojnicu a opatrenia zabezpečujúce elektromagnetické tienenie. Tlmenie elektromagnetického poľa realizuje sa v každej zóne ako: vonkajšie (externé) tienenie, vhodné vedenie trás a tienenie vedenia; vymenované opatrenia môžu sa kombinovať. Postupným radením SPD v jednotlivých LPZ zabezpečí sa koordinovaná ochrana elektrických zariadení pred účinkami atmosférickej elektriny, čím sa dodrží koordinácia izolácie podľa definovaných kategórií prepätí. Odporúča sa, aby sa jednotlivé typy SPD používali od toho istého výrobcu. Koordinovaná ochrana značí, že jednotlivé typy SPD sa počas prepäťovej udalosti vzájomne negatívne neovplyvňujú. Špeciálna oblasť pre SPD je rozvod malého napätia ako napr. anténový signál, obvody ISDN a pod. Tieto obvody sú špecifické väčším odporom ako napájacie silové vedenia, preto nimi tečie menší prúd blesku: iba asi 5 % celkového prúdu blesku. Prepäťové ochrany (SPD) triedia sa na: typ 1 alebo B – zvodič prúdu blesku, a na typ 2 a typ 3 alebo C, resp. D – zvodič prepätia. Označenie veľkými písmenami (B, C, D) je prebraté z noriem DIN VDE, v praxi je toto označenie zaužívané. SPD typ 1 inštaluje sa na rozhraní zón LPZ 0–1, umiestňuje sa čo najbližšie k hlavnému prívodu do budovy, väčšinou v hlavnom rozvádzači, kde sa mení kategória prepätia z IV na III: slúži na vyrovnanie potenciálov a na zvedenie priamych úderov blesku; typ 2 inštaluje sa na rozhraní zón LPZ 1–2, slúži na ochranu pevných inštalácií pred prepätím, ktoré vznikajú indukčnou resp. kapacitnou väzbou počas úderu blesku alebo spínacími procesmi; typ 3 inštaluje sa na rozhraní zón LPZ 2–3, slúži na ochranu pred prepätím v pevných inštaláciách, v pohyblivých prívodoch alebo na ochranu koncových zariadení. SPD typ 1, zhotovený zväčša ako iskriško, skúša sa impulzom prúdu s tvarom 10/350, kým SPD typ 2 a SPD typ 3, zhotovený z varistora na báze ZnO alebo zo supresorovej diódy, impulzom prúdu s tvarom 8/20, príp. 4/10.

EN / IEC 62305-5 je zameraná na ochranu smerujúcu na zmenšenie nebezpečenstva a na zníženie prevádzkových strát v systémoch vstupujúcich do objektov, hlavne na elektrických, oznamovacích a informačných vedeniach. Impedancia slaboprúdových rozvodov má vyššiu impedanciu, čo možno pokladať za výhodu, pretože amplitúda prepätí je menšia. Nevýhodou je rôznosť napäťových úrovní a značný počet druhov prenosových vedení; jedná sa o metalické vedenia určené na prenos

analogových alebo digitálnych informácií. V slaboprúdových rozvodoch používa sa dvojestupňový systém ochrán: hrubá ochrana a jemná ochrana, ktoré môžu byť umiestnené oddelene alebo spolu v jednom púzde, tzv. kombinovaná ochrana. Dôležitá vlastnosť prepäťových ochrán určených pre informačno-technické vedenia je vložený útlm resp. pracovný kmitočet, ktorý treba pri dimenzovaní rešpektovať, aby nedošlo počas normálnej prevádzky k tlmeniu užitočného signálu.

Záver

Pre ochranu objektov pred účinkami atmosférickej elektriny sú v súčasnosti záväzné medzinárodné normy EN / IEC 62305. Tieto normy používajú termíny, ktoré majú byť dobre známe projektantom, napr.: bezpečná vzdialenosť (s), ochranný priestor, zóna ochrany pred bleskom (LPZ), tolerované riziko a i. Pribudli však ďalšie, ktoré charakterizujú analýzu [1], [5]. Diskutovanou témou je téma aktívnych bleskozvodov. Podkladom pre vznik STN 34 1391 bola francúzska norma. Medzinárodná normalizácia považuje takúto ochranu za nedostatočnú.

Literatúra

- [1] Kutáč, J.: *Nový pripravovaný súbor evropských noriem v teorii a praxi*. In IEN / IEC 62305 Ochrana před bleskem, Ostrava: SPBI, 2006. 117 s. ISBN 80-86634-80-9
- [2] Hasse, P.: *Überspannungsschutz von Niederspannungsanlagen*. In Betrieb elektronischer Geräte auch bei direkten Blitzeinschlägen, 4. vydanie Kolín, SRN: TÜV-Verlag, 1998. 320 s. ISBN 3-8249-0474-8
- [3] Burant, J.: *Blesk a přepětí*. In Systémová řešení ochrany, Praha: FFC Public s.r.o., 2006. 256 s. ISBN 80-86534-10-3
- [4] Hasse, P.: *Ochrana zařízení nízkého napětí před přepětím*. In Provoz elektronických zařízení i při přímých úderech blesku, vyd. EMITOR, 1996. 198 s.
- [5] Kroupa, J.: *Standards IEC, EN pre ochranu pred bleskom*. In eNOVINY. Technický manažment – Technika a legislativa [on-line]. 2007, č. 5. [cit. 02. 10. 2008]. Dostupné na internete: <<http://www.enoviny.sk/?sekcia=3&uroven=1&obsah=12&cid=20017>>. ISSN 1336-4014
- [6] Kutáč, J., Minařík, M.: *K nejasnostem nového souboru norem ČSN EN 62305*. In Elektriika.cz, elektrotechnický portál o silnoproudé elektrotechnice. [on-line]. 2007. [cit. 02. 10. 2008]. Dostupné na internete: <<http://elektriika.cz/data/clanky/dehn-novy-soubor-norem-csn-en-62305>>
- [7] *International Standard*. Household and similar electrical appliances – Safety. Part 1: General requirements [on-line]. 2004. [cit. 02. 10. 2008]. Dostupné na internete: <<http://www.dianyuan.com/bbs/u/32/1123138182.pdf>>. ISBN 2-8318-7469-6
- [8] Sova, A.: *OCHRONA ODGROMOWA*. In Strefowa koncepcja ochrony odgromowej i przepięciowej w obiektach budowlanych [on-line]. 2004. [cit. 02. 10. 2008]. Dostupné na internete: <http://www.ochrona.net.pl/pdf/Odgromowa_25.pdf>
- [9] Kutáč, J.: *Nové evropské normy v oblasti ochrany před bleskem (3. část)*. In Elektriika.cz, elektrotechnický portál o silnoproudé elektrotechnice. [on-line]. 2006. [cit. 10. 10. 2008]. Dostupné na internete: <<http://elektriika.cz/data/clanky/clanek.2006-01-23.6740757683>>.

Autori vyjadrujú poďakovanie Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporenie tejto práce v rámci projektu APVV-20-006005 a Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/3142/06.

Autori: Bystrík Dolník, Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Bystrik.Dolnik@tuke.sk, Jan.Tkac@tuke.sk, Juraj.Kurimsky@tuke.sk

Iraida Kolcunová, Juraj Kurimský

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Čiastkové výboje v statorovej izolácii elektrických strojov točivých

Abstrakt. V objeme elektroizolačného materiálu sú čiastkové výboje generované aj počas prevádzky. Je všeobecne známe, že k pôsobeniu čiastkových výbojov prispievajú mechanické, elektrické, tepelné a iné formy namáhania. Príspevok sa zaoberá výskumom aktivity čiastkových výbojov v drážkach statorovej izolácie elektrických strojov točivých. Sú prezentované experimentálne výsledky z meraní na výseku statora ako modelí pre skúmanie daného javu.

Abstract. Under operation of the rotating machines the partial discharges are generated in the insulation material bulk. There are known that mechanical, electrical, thermal, etc impacts lead to partial discharge phenomena. Paper deals with research of discharge activity in the slots of rotating machine stator. The experimental measurements were done and partial discharge analysis is presented. The phase discharge distribution changes relating to applied voltage can point to near failure occasion. (Contribution for SES2008 Seminar – PD in stator slots).

Kľúčové slová: izolácia, čiastkové výboje.

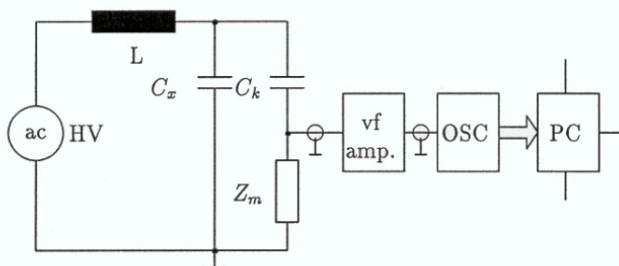
Keywords: insulation, partial discharges.

Úvod

Počas prevádzky elektrických strojov točivých dochádza v dôsledku elektrických, mechanických, tepelných a iných namáhaní k vzniku čiastkových výbojov v statorovej izolácii. K takým výbojom patria výboje po povrchu izolácie na čelách vinutí alebo pri výstupe cievky z drážky statora, výboje v drážke statora a vnútorné výboje. Je veľmi dôležité podľa výsledkov meraní rozoznať typ čiastkových výbojov. Za tým účelom boli vykonané merania na vysokonapäťovej cievke umiestnenej do drážky statora, na ktorej bolo možné zvlášť odmerať výboje pri výstupe cievky z drážky statora a výboje v drážke. Získané fázové rozloženia výpovedeschopných veličín čiastkových výbojov a ich zmena v závislosti na priloženom napätí umožňuje určiť typ poruchy v praxi.

Laboratórne merania

Merania boli uskutočnené v laboratórnych podmienkach na dvoch statorových cievkach vinutia elektrického stroja, dimenzovaných pre napäťovú hladinu 6 kV, ktoré boli vyhotovené špeciálne pre účely merania. Na cievkach bola aplikovaná vodivá ochrana na zabránenie vzniku výbojov v drážke statora. Za účelom sledovania vplyvu polovodivej ochrany na rozvoj výbojovej činnosti pri výstupe cievky z drážky statora na povrch jednej cievky bola navinutá polovodivá páska Akasic 4b. Priame, galvanické meranie čiastkových výbojov sa uskutočnilo podľa schémy zapojenia uvedenej na obr. 1, t.j. zapojenie uzemneného objektu podľa normy IEC 60270. Na overenie a potvrdenie miesta vzniku výbojovej činnosti bola použitá akustická sonda.

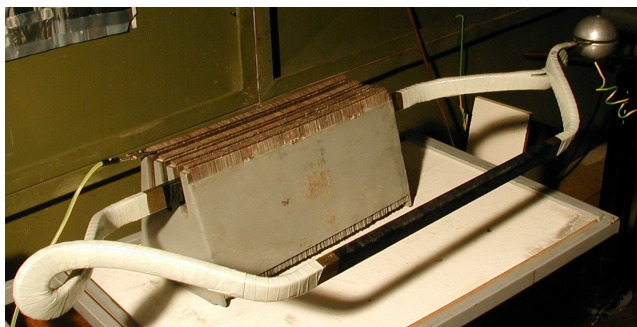


Obr. 1: Schéma zapojenia meracieho obvodu

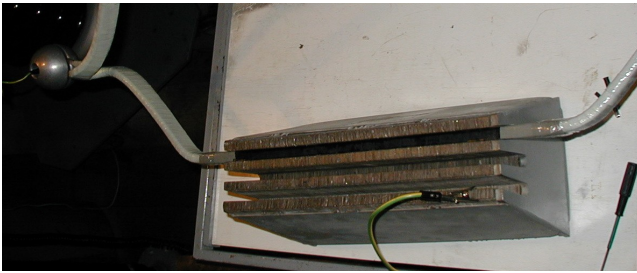
Merania boli vykonané postupne na dvoch cievkach, ktoré sa postupne vkladali do jednej drážky špeciálne vyhotoveného výseku statora elektrického stroja. Umiestnením cievky vinutia do drážky statora bolo sčasti dosiahnuté modelovanie podmienok v prevádzke. Testovacie napätie bolo privedené na vzájomne prepojený začiatok a koniec vodiča cievky. Výsek statora bol uzemnený.

Napätie bolo postupne zvyšované, až do objavenia počiatkových výbojov. Vtedy bolo vykonané prvé meranie čiastkových výbojov. Ďalej napätie krokom 200V sa zvyšovalo do hodnoty 6,2 kV, ktoré o 200V prevyšuje hodnotu nominálneho združeného napätia cievky 6 kV. Pri každej napäťovej hladine bolo vykonané meranie čiastkových výbojov a podrobené fázovej analýze vybraných výpovedeschopných veličín.

V prvom kroku bola odmeraná výbojová činnosť v cievke bez polovodivej ochrany. Umiestnenie cievky do drážky statora je vidieť na obr.2. Tu dochádzalo k vzniku čiastkových výbojov ako pri výstupe cievky z drážky statora tak aj v samotnej drážke. Na ohraničenie výbojovej činnosti aj na poukázanie vplyvu polovodivých ochrán na znižovanie hladiny čiastkových výbojov bola použitá cievka, na ktorú bola aplikovaná polovodivá poľom riadená páska Akasic 4b s polovičným prekrytím v mieste ukončenia vodivej ochrany, ako je vidieť na obr.3. Postup merania čiastkových výbojov bol rovnaký pre obidve cievky.



Obr. 2 Cievka v drážke bez polovodivej ochrany



Obr. 3 Cievka v drážke s polovodivou ochranou

Rozvoj výbojovej činnosti pri zvyšovaní napätia

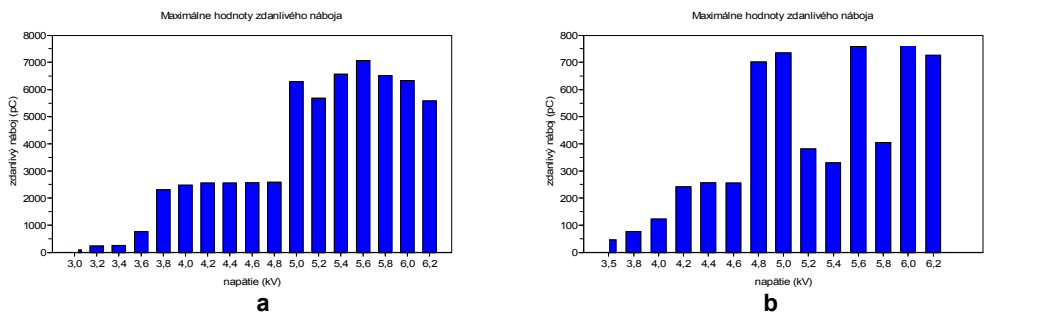
Výsledky meraní poukazujú na rozdielny rozvoj výbojovej činnosti, hoci v oboch prípadoch sa jednalo o rozvoj povrchových výbojov. Zmena maximálnych hodnôt zdanlivého náboja čiastkových výbojov pri zvyšovaní napätia pre cievku umiestnenú do drážky statora bez povrchovej ochrany je uvedená na obr. 4a a pre cievku s povrchovou ochranou je uvedená na obr. 4b.

Počiatkové výboje v prípade cievky bez polovodivej ochrany sa objavili pri napätí 3kV a ich maximálna amplitúda zdanlivého náboja bola 77pC. Jednalo sa o vnútorné čiastkové výboje. Pri zvyšovaní napätia na 3,6kV

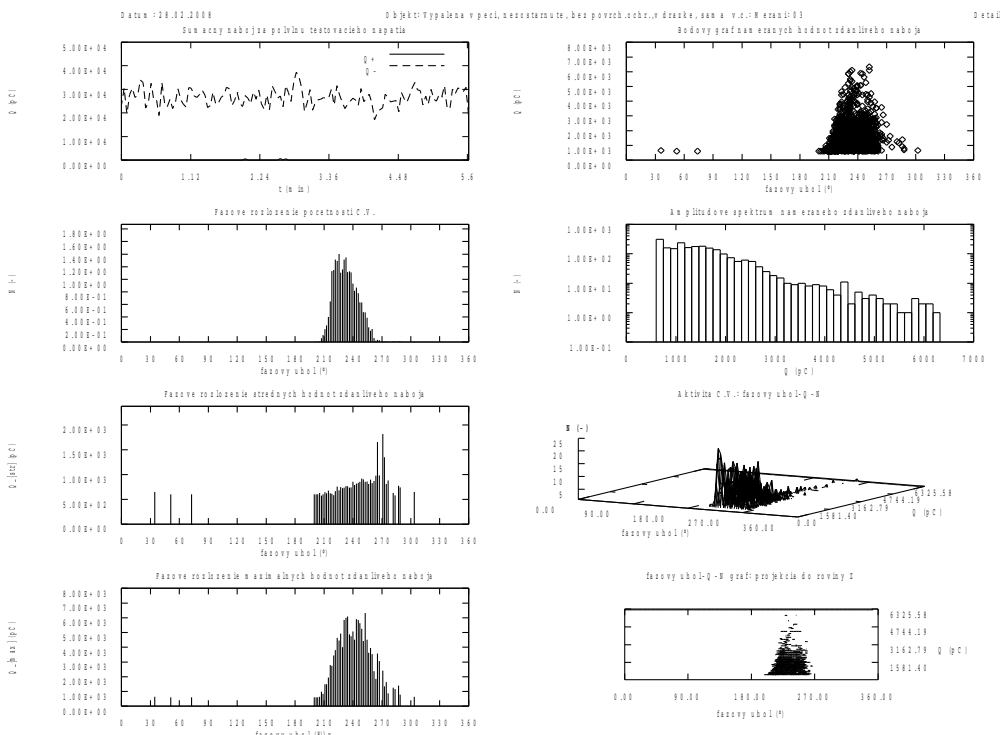
sa objavili počiatkové korónové výboje v mieste výstupu cievky z drážky statora s maximálnou amplitúdou 770pC a pri napätí 3,8kV ich amplitúda narástla na hodnotu 2500pC. Pomocou akustickej sondy bolo preukázané rozširovanie výbojovej činnosti smerom ako do stredu drážky, tak aj smerom k čelu vinutia. Pri napätovej hladine 5kV výboje boli akusticky detekované v plnom rozsahu drážky a maximálna amplitúda zdanlivého náboja dosiahla hodnotu $q_{max}=6000pC$.

V prípade cievky s polovodivou ochranou prvé počiatkové vnútorné výboje sa objavili pri napätí 3,5kV a ich maximálna hodnota zdanlivého náboja neprevýšila 38pC. V porovnaní s predchádzajúcim meraním korónové výboje s amplitúdou 700pC sa objavili pri vyššom napätí: $U=4,8kV$. Do maximálnej hodnoty testovacieho napätia 6,2kV ich amplitúda sa zväčšila iba nepatrne a dosiahla hodnotu 800pC. Za pomoci akustickej sondy bolo preukázaný vznik výbojov po povrchu izolácie v mieste výstupu cievky z drážky statora.

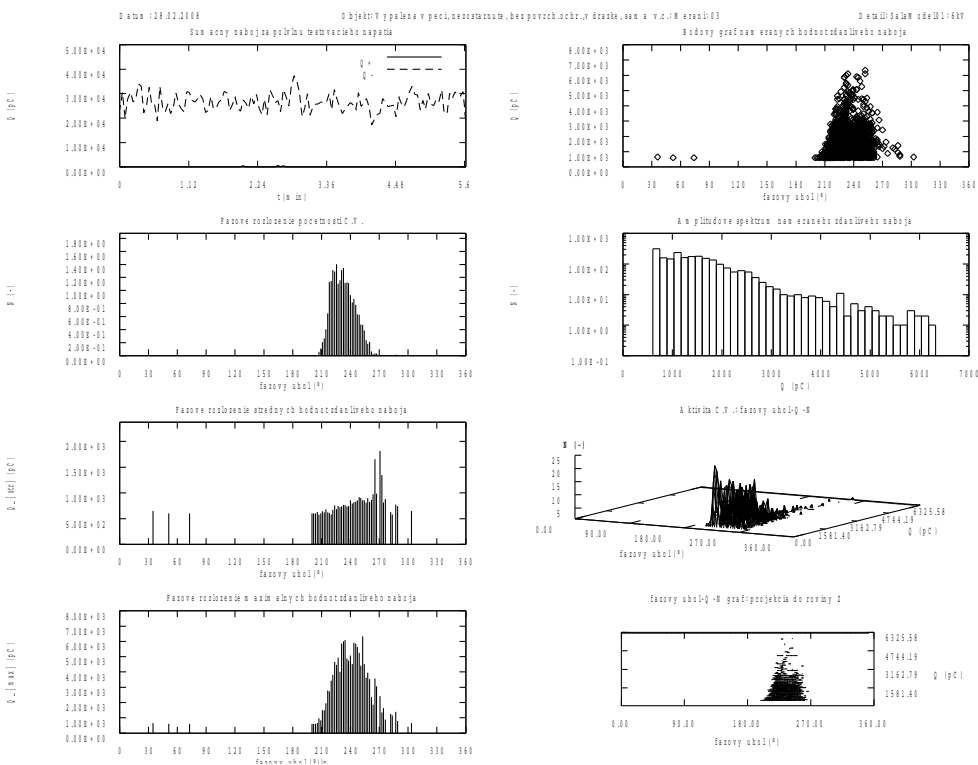
Pre porovnanie fázových rozložení a maximálnych hodnôt zdanlivého náboja čiastkových výbojov sú uvedené výsledky meraní pri napätovej hladine 6kV na cievke bez polovodivej ochrany (obr.5) a na cievke s polovodivou ochranou (obr.6).



Obr 4: Zmena maximálnych hodnôt zdanlivého náboja pri zvyšovaní napätia



Obr. 5: Analýza výbojovej činnosti – cievka bez polovodivej ochrany



Obr. 6: Analýza výbojovej činnosti – cievka s polovodivou páskou

Maximálna hodnota zdanlivého náboja pre obidva prípady v zápornej polvine aplikovaného napätia je väčšia ako v kladnej polvine a dosahuje hodnotu $q_{max}=6300pC$ pre cievku bez polovodivej ochrany a $q_{max}=800pC$ pre cievku s polovodivou ochranou, čo činí takmer osemnásobný rozdiel. Namerané výsledky poukazujú na účinnosť polovodivej ochrany, ktorá zabraňuje vzniku výbojov o veľkej amplitúde vedúcich k poškodeniu povrchu izolácie vysokonapäťových cievok.

Záver

Čiastkové výboje, v dlhodobom meradle, vedú k erózii a následnému poškodeniu povrchu izolácie vysokonapäťových cievok. Príčinou ich vzniku je rozvíjajúca sa ionizácia v dutinách a nehomogenitách vplyvom silného elektrického poľa [3]. Prezentované závery poukazujú na možnosť včasného odhalenia rozvíjajúcich sa výbojov pri výstupe cievky z drážky statora. Bolo poukázané na možný spôsob ich odstránenia.

Literatúra

[1] Záliš, K.: Evaluation of Partial Discharge Measurement. In: Proceedings of the VII Symposium (EUI '99). Zakopane (Polsko), 21.-23.10.1999, pp. 496-503.
 [2] Cimbala, R.: Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov. TU v Košiciach, 2007, ISBN 978-80-8073-904-1.
 [3] Marton, K. - Dolník, B.: Motion of macroscopic particles in direct and alternating high voltage electric field. In: 9th ISH : Electric and magnetic field calculation and measurement : International symposium on high voltage engineering : Graz, August 28 - September 1, 1995. Graz : Graz University of technology, 1995. p. 8377-1-8377-4.

Táto práca je financovaná zo zdrojov VEGA-1/3142/06 a APVV-20-006005

Autori:

Doc. Ing. Irida Kolcunová, PhD, iraida.kolcunova@tuke.sk, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 040 01 Košice, Slovensko
 Ing. Juraj Kurimský, juraj.kurimsky@tuke.sk, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 040 01 Košice, Slovensko