

Iraida Kolcunová, Marián Hrinko, Juraj Kurimský

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

Vplyv krátkodobého tepelného namáhania na výbojovú činnosť

Abstrakt. Tento článok pojednáva o meraní čiastkových výbojov na vysokonapäťovej cievke z asynchrónneho motora, ktorá bola krátkodobu tepelne namáhaná. Z jednotlivých meraní sú zostrojené dvojrozmerné grafy - fázové rozloženia maximálnych, stredných hodnôt zdanlivého náboja a fázové rozloženia početnosti. Z fázových rozložení sú počítané deskriptívne charakteristiky - šikmosť a špicatosť, ktoré koncentrovanou formou poskytujú informáciu o tvare rozloženia.

Abstract. This article discuss about partial discharge measurements on high voltage stator coil from asynchronous machine which was short-term thermal stressed. From individual measurements were done two-dimensional plots - phase-resolved partial discharges patterns of the maximal and the mean value of apparent charges and the mean value of frequencies. Moreover there were calculated descriptive operators skewness and kurtosis that which provide information in concentrated form about the shape of the phase resolved partial discharge patterns.

Kľúčové slová: Čiastkové výboje, tepelné namáhanie, šikmosť, špicatosť.

Keywords: Partial discharges, thermal stress, skewness, kurtosis.

Úvod

Izolačný systém patrí medzi najdôležitejšie časti vysokonapäťových rotačných strojov. Počas prevádzky je vystavený vzájomnému pôsobeniu viacerých činiteľov, ktoré naň nepriaznivo vplyvajú. Medzi tieto činitele patria elektrické, tepelné, mechanické namáhanie a vplyv okolitého prostredia. Ich pôsobením dochádza k chemickým a fyzikálnym zmenám izolačného materiálu. V konečnom dôsledku sa znižuje kvalita izolačného systému, čím sa zvyšuje pravdepodobnosť zlyhania izolácie elektrickým prierazom. Prieraz je konečné štádium, po ktorom dochádza k dočasnému prerušeniu činnosti elektrického rotačného stroja.

Za účelom prevencie kvality izolačného systému sa používajú rôzne diagnostické metódy. Jednou zo spoľahlivých nedeštruktívnych diagnostických metód je meranie čiastkových výbojov. Medzi výhody merania čiastkových výbojov patrí [1]:

- Indikuje degradáciu izolačného systému skôr ako dôjde k poruche.
- Nevyžaduje použitie vyššieho napätia ako je napätie počas prevádzky stroja.
- Odhaľuje zlú kvalitu novej izolácie v dobe záruky.
- Stanovuje kvalitu previnutia izolácie pred a po navinutí novej izolácie.
- Umožňuje špecifikovať poruchu na danom zariadení.
- Zvyšuje celkovú spoľahlivosť stroja.

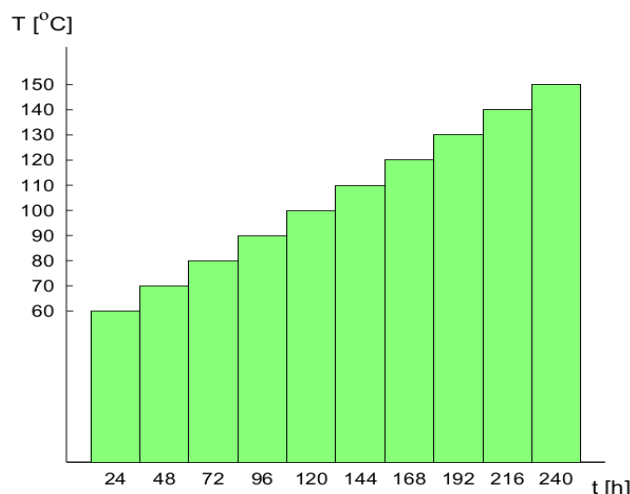
Čiastkové výboje môžeme charakterizovať ako neúplne samostatné výboje, ktoré premostujú iba určitú časť izolácie. Vznikajú v silne nehomogénnych poliach na elektródach s malým polomerom zakrivenia. Ich výskyt signalizuje uvoľnenie cievky v drážke statora, prehriatie alebo kontamináciu vinutia. V mnohých prípadoch, degradácia izolačného systému je relatívne pomalý proces. Doba trvania od detekcie čiastkových výbojov po vznik poruchy je zvyčajne radovo jednotiek rokov [2].

Kvalita izolačného systému je vysokou prioritou udržania stroja v bezporuchovej a spoľahlivej prevádzke. Tento článok pojednáva o meraní čiastkových výbojov na vysokonapäťovej cievke, ktorá je krátkodobu tepelne namáhaná. Sleduje rozdiely vo výbojovej činnosti, tvaroch fázového rozloženia čiastkových výbojov (histogramoch $H_{q_{max}}(\varphi)$, $H_{q_n}(\varphi)$, $H_n(\varphi)$). Na minimalizáciu dát histogramov sú použité opisné charakteristiky (šikmosť a

špicatosť), ktoré koncentrovanou formou poskytujú informáciu o tvare fázového rozloženia čiastkových výbojov a sú vhodnými vstupnými údajmi do autonómneho systému rozpoznávania porúch izolačných systémov.

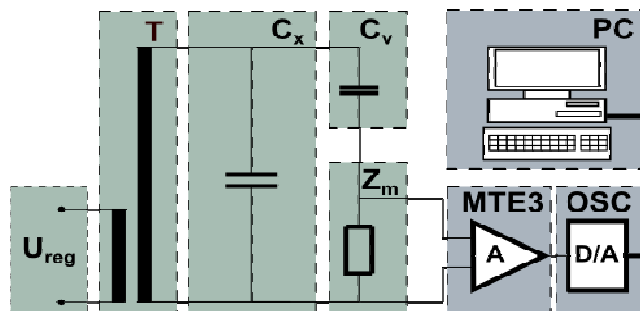
Princíp merania a schéma zapojenia

Meraným objektom bola vysokonapäťová cievka z asynchrónneho stroja. Menovitý výkon stroja $P_n = 0,2$ MW a menovité fázové napätie $U_n = 3,6$ kV. Hlavná izolácia meraného objektu bola vytvorená z termosetického izolácie Samicatherm 366.28 technológiou Resin Rich. Jedná sa o kalcinovo sľudovú pásku spájaná epoxidovou živcou. Tepelná trieda hlavnej izolácie je F (155 °C). Na výstupe cievky z drážky statora nebola použitá polovodivá ochrana na elimináciu povrchových výbojov.



Obr.1 Grafické znázornenie pôsobenia teploty na meraný objekt v teplotvzdušnej sušičke.

Krátkodobá tepelná degradácia prebiehala v teplotvzdušnej sušičke MLW TS 400. Meraný objekt bol vystavený pôsobeniu teploty celkovo 240 hodín. Teplota sa kontinuálne zvyšovala po 24 hodinách o 10 °C z počiatočnej teploty 60 °C po teplotu 150 °C (viď Obr.1). Za účelom presnejšieho štatistického spracovania a vyhodnotenia výsledkov bola cievka meraná päť krát pred tepelným namáhaním a päť po tepelnom namáhaní.



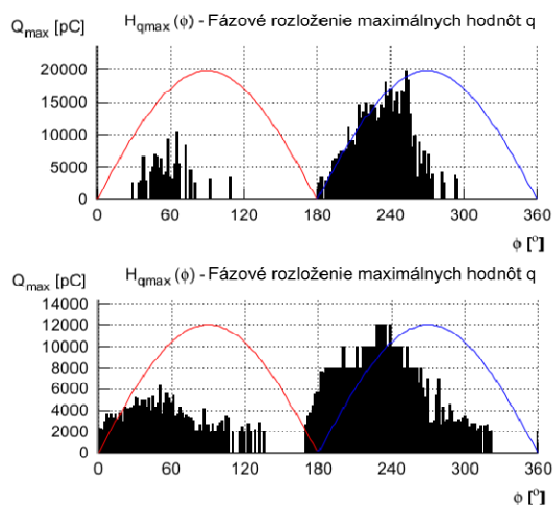
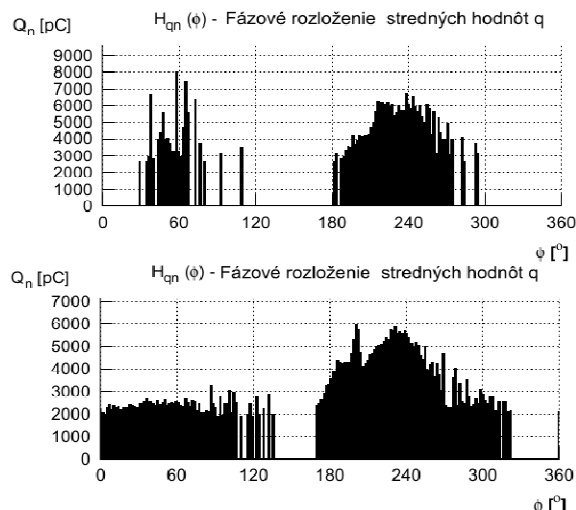
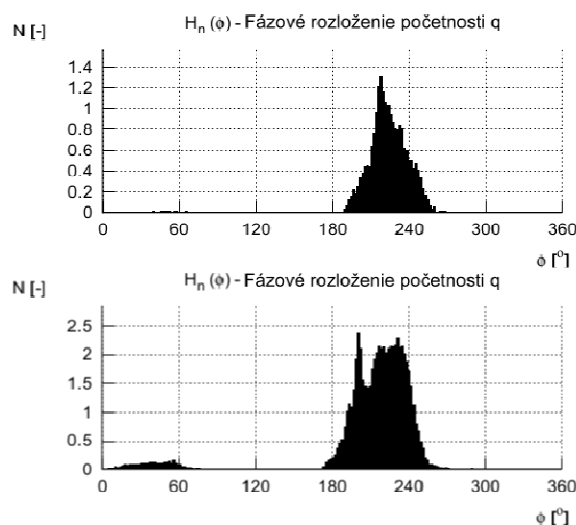
Obr.2 Principiálna schéma zapojenia.

- T - vn transformátor
- U_{reg} - regulátor napätia
- PC - personálny počítač
- Z_m - meracia impedancia
- C_v - väzobný kondenzátor
- OSC - digitálny osciloskop
- MTE3 - meracie zariadenie
- C_x - meraný objekt (vn cievka)

Principiálna schéma zapojenia je na Obr. 2. Na meraný objekt bolo prostredníctvom napätového regulátora a vysokonapäťového transformátora privádzané vysoké napätie. Ostré hrany koncov cievky boli homo-genizované guľovou elektródou, čím sa vylúčil vplyv koronových výbojov od vysokonapäťovej elektródy. Drážkova časť bola uzemnená prostredníctvom štyroch pásov alobalu, 1,5 cm od konca vodivej vrstvy drážkovej časti, vzájomne galvanicky spojených. Meralo sa od napätia, pri ktorom bola zachytená stabilná výbojová činnosť po napätie 6 kV s krokom 0,2 kV. Každé meranie trvalo 3 minúty. Vzniklé čiastkové výboje v podobe prúdových impulzov, vyvolávali na meracej impedancii úbytky napätí. Úlohou meracieho zariadenia MTE3 bolo napätové úbytky zosilniť. Digitalizácia analógového signálu bola vykonávaná v digitálnom osciloskope odkiaľ údaje v digitálnej podobe postupovali do personálneho počítača. V personálnom počítači prebiehal záznam a spracovávanie nameraných výsledkov.

Analýza nameraných výsledkov

Namerané údaje boli zaznamenané v dvoch základných súboroch. Prvý súbor obsahoval informácie o hodnotách zdanlivého náboja, druhý im prislúchajúcu početnosť.


 Obr.3 Fákové rozloženie maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov $H_{qmax}(\varphi)$ pred a po tepelnom namáhaní pri 6 kV.

 Obr.4 Fákové rozloženie maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov $H_{qn}(\varphi)$ pred a po tepelnom namáhaní pri 6 kV.

 Obr.5 Fákové rozloženie maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov $H_n(\varphi)$ pred a po tepelnom namáhaní pri 6 kV.

Z hodnôt zaznamenaných zdanlivých nábojov a im prislúchajúcich početností boli vytvorené dvojrozmerné grafy - fákové rozloženia výbojovej činnosti - $H_{qmax}(\varphi)$, $H_{qn}(\varphi)$, $H_n(\varphi)$ (viď Obr.3 - Obr.5).

Fákové rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov, stredných hodnôt zdanlivých nábojov a početností tzv. histogramy $H_{qmax}(\varphi)$, $H_{qn}(\varphi)$, $H_n(\varphi)$ boli realizované prostredníctvom programu podľa matematických pravidiel.

Histogram fákového rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov $H_{qmax}(\varphi)$ bol vypočítaný podľa vzťahu 1.

$$(1) \quad H_{qmax,i} = \max[q_{i,j}]_{j=1}^n$$

Jedná sa o maximálne hodnoty zdanlivých nábojov v príslušných fákových okienkach. Index i označuje príslušné fákové okienko, index j označuje danú sínusovku priloženého napätia.

Histogram fákového rozloženia stredných hodnôt zdanlivých nábojov $H_{qn}(\varphi)$ bol vypočítaný podľa vzťahu 2.

$$(2) \quad H_{qn,i} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^n q_{i,j} n_{i,j}$$

Jedná sa o stredné hodnoty zdanlivých nábojov v príslušných fákových okienkach. Indexy i a j majú rovnaký význam ako v rovnici 1.

Histogram fázového rozloženia stredných hodnôt početností $H_n(\varphi)$ bol vypočítaný podľa vzťahu 3.

$$(3) \quad H_{n,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n n_{i,j} = \frac{n_i}{n}$$

Jedná sa o stredné hodnoty početností v príslušných fázových okienkach. Indexy i a j majú rovnaký význam ako v rovniciach 1 a 2.

Pri odhaľovaní porúch čiastkových výbojoch je dôležitá fáza ich vzniku a rozvoja. Preto sú histogramy fázových rozložení $H_{q_{\max}}(\varphi)$, $H_{q_n}(\varphi)$, $H_n(\varphi)$ rozdelené na kladnú a zápornú polvinu priloženého napätia $H_{q_{\max}}^+(\varphi)$, $H_{q_n}^+(\varphi)$, $H_n^+(\varphi)$ a $H_{q_{\max}}^-(\varphi)$, $H_{q_n}^-(\varphi)$, $H_n^-(\varphi)$.

Z historamov fázových rozložení boli vypočítané deskriptívne charakteristiky šikmosti S_k a špicatosti K_u , ktoré koncentrovanou formou poskytujú informáciu o tvare histogramov.

Operátor šikmosti sa vypočíta podľa vzťahu 4. Porovnáva histogramy fázových rozložení s normálnym rozložením.

$$(4) \quad S_k = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2})^3} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^3 n_i}{s^3}$$

Symboly \bar{q} , s sú aritmedický priemer a rozptyl. Aritmedický priemer sa vypočíta podľa vzťahu 5

$$(5) \quad \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i n_i$$

a rozptyl podľa vzťahu 6

$$(6) \quad s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 n_i}$$

Operátor šikmosti rovný 0 poukazuje na zhodný tvar histogramu s normálnym rozdelením. Záporný operátor šikmosti predstavuje ľavostrannú šikmost, t.j. s pretiahnutým chvostom v ľavej časti histogramu. Kladný operátor šikmosti predstavuje pravostrannú šikmost, t.j. s pretiahnutým chvostom v pravej časti histogramu fázového rozloženia. Symbol i označuje fázové okienko.

Operátor špicatosti sa vypočíta podľa vzťahu 7. Podobne ako operátor šikmosti porovnáva histogramy fázových rozložení s normálnym rozdelením.

$$(7) \quad K_u = \frac{m_4}{(\sqrt{m_2})^4} - 3 = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^4 n_i}{s^4} - 3$$

\bar{q} , s a i majú rovnaký význam ako v rovnici pre šikmost' 6.

Pri špicatost' rovnej 0 má histogram totožnú šikmost' s normálnym rozdelením. Špicatost' menšia ako 0 signalizuje plochejší tvar histogramu ako tvar normalného rozdelenia a naopak, špicatost' väčšia ako 0 signalizuje ostrejší tvar histogramu fázového rozloženia voči normalnému rozdeleniu.

Operátory šikmosti a špicatosti boli počítané zvlášť pre kladnú a zápornú polperiódu historgamov fázových rozložení $H_{q_{\max}}(\varphi)$, $H_{q_n}(\varphi)$, $H_n(\varphi)$.

Deskriptívne charakteristiky poskytujú informáciu o tvare histogramov fázových rozložení zdanlivých nábojov a početností v redukovanej podobe. To umožňuje spolu s ďalšími charakteristikami (napr. nábojová asymetria, korelačný faktor) poskytnúť výrazne redukovanú vstupnú informáciu do autonómneho systému a výrazne tak znížiť čas potrebný na odhalenie typu výbojovej činnosti.

Zhodnotenie výsledkov

V Tab.1 a Tab.2 sú uvedené namerané maximálne hodnoty zdanlivých nábojov, početností a fázový uhol ich vzniku. Vyhodnotenie bolo realizované pre napätovú hladinu 3,6 kV, čo zodpovedá menovitému fázovému napätiu meranej cievky, a napätovú hladinu 6 kV.

Tabuľka 1. Tabuľka nameraných hodnôt pre fázove napätie meraného objektu 3,6 kV pred a po tepelnom namáhaní.

| Pred tepelným namáhaním | | | | |
|-------------------------|-----------------------|-------|--------------------|--------------------|
| U [kV] | Q _{max} [pC] | N [-] | φ ⁺ [°] | φ ⁻ [°] |
| 3,6 | 1200 | 0.01 | 50-70 | 230-270 |
| 3,6 | 4000 | 0.5 | 40-70 | 200-270 |
| 3,6 | 4000 | 0.05 | - | 210-300 |
| 3,6 | 3500 | 0.05 | 30-70 | 220-290 |
| 3,6 | 3500 | 0.16 | - | 240-260 |
| Po tepelnom namáhaní | | | | |
| U [kV] | Q _{max} [pC] | N [-] | φ ⁺ [°] | φ ⁻ [°] |
| 3,6 | 12000 | 0.40 | 30-40 | 200-300 |
| 3,6 | 4500 | 0.35 | 30-70 | 230-270 |
| 3,6 | 4500 | 0.40 | 30-80 | 220-300 |
| 3,6 | 6000 | 0.04 | - | 230-250 |
| 3,6 | 3500 | 0.27 | 30-70 | 230-270 |

Pri napätovej hladine 3,6 kV výbojová činnosť vykazovala vyššiu aktivitu po tepelnom namáhaní. Maximálne hodnoty zdanlivého náboja sa pohybovali v intervale od 1200 pC do 4000 pC. Priemerná výbojová činnosť pred tepelným namáhaním bola 3240 pC. V prípade po tepelnom namáhaní výbojová aktivita vzrástla. Maximálna hodnota zdanlivého náboja bola v intervale od 3500 pC do 12000 pC, s priemernou hodnotou 6100 pC.

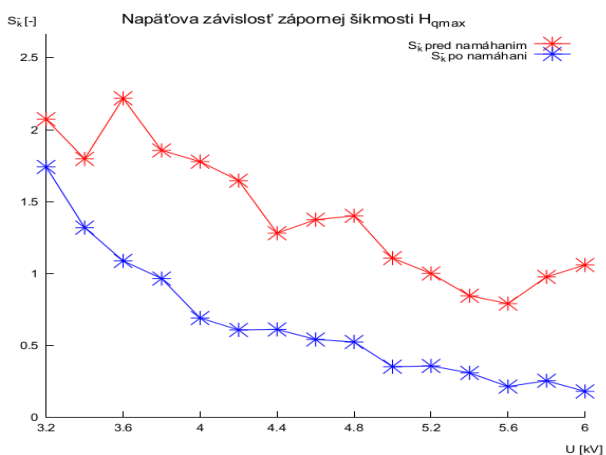
Pri napätovej hladine 6,0 kV výbojová aktivita po tepelnom namáhaní klesla. Maximálne hodnoty zdanlivého náboja pred tepelným namáhaním boli v intervale od 14000 pC do 25000 pC s priemernou hodnotou 18800 pC. Po tepelnom namáhaní sa maximálne hodnoty zdanlivého náboja pohybovali v rozmedzi od 8000 pC do 25000 pC s priemernou hodnotou 15600 pC.

Tabuľka 2. Tabuľka nameraných hodnôt pre fázove napätie meraného objektu 6,0 kV pred a po tepelnom namáhaní.

| Pred tepelným namáhaním | | | | |
|-------------------------|-----------------------|-------|--------------------|--------------------|
| U [kV] | Q _{max} [pC] | N [-] | φ ⁺ [°] | φ ⁻ [°] |
| 6,0 | 14000 | 0.12 | 50-70 | 210-260 |
| 6,0 | 18000 | 0.80 | 40-70 | 180-260 |
| 6,0 | 25000 | 0.90 | 20-80 | 180-290 |
| 6,0 | 18000 | 0.50 | 30-60 | 180-260 |
| 6,0 | 19000 | 0.35 | 30-110 | 180-290 |
| Po tepelnom namáhaní | | | | |
| U [kV] | Q _{max} [pC] | N [-] | φ ⁺ [°] | φ ⁻ [°] |
| 6,0 | 23000 | 1.00 | 10-120 | 190-290 |
| 6,0 | 8000 | 1.50 | 10-130 | 190-300 |
| 6,0 | 25000 | 1.40 | 20-70 | 180-290 |
| 6,0 | 10000 | 0.03 | - | 230-250 |
| 6,0 | 12000 | 2.30 | 0-130 | 180-320 |

Na Obr.6 až 11 sú zobrazené závislosti deskriptívnych operátorov šikmosti a špicatosti fázových rozložení H_{qmax} (φ), H_{qn} (φ), H_n (φ) od priloženého napätia pred a po tepelnom namáhaní. Vzhľadom k faktu, že výbojová činnosť dominuje v zápornej polvine priloženého napätia, sú závislosti operátorov zobrazené iba pre zápornu polperiódu.

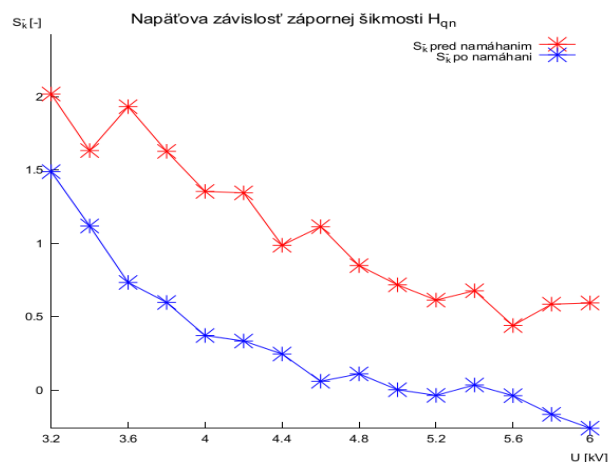
Z grafov napätovej závislosti šikmosti fázových rozložení H_{qmax} (φ), H_{qn} (φ), H_n (φ) (viď Obr.6 až 8) vidieť, že hodnoty šikmosti pri jednotlivých napätiach pred tepelným namáhaním sú vyššie ako po tepelnom namáhaní. Vyššie hodnoty šikmosti signalizujú naklonenosť do pravej strany a so vzrastom napätia nakláňanie do ľavej strany. Avšak v konečnom dôsledku je smernica prechodu z pravej do ľavej strany podobná pred a po tepelnom namáhaní.



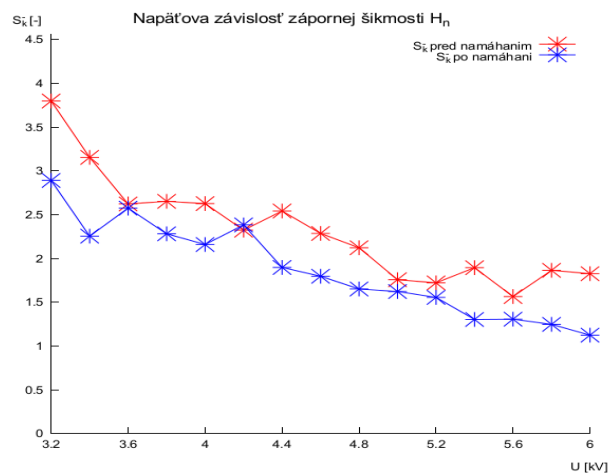
Obr.6 Operátor šikmosti S_k histogramu fázového rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov H_{qmax} (φ) v závislosti od napätia.

Grafy napätovej závislosti špicatosti fázových rozložení H_{qmax} (φ), H_{qn} (φ), H_n (φ) (viď Obr.9 až 11) vykresľujú zmenu špicatosti so vzrastom napätia pred a po tepelnom

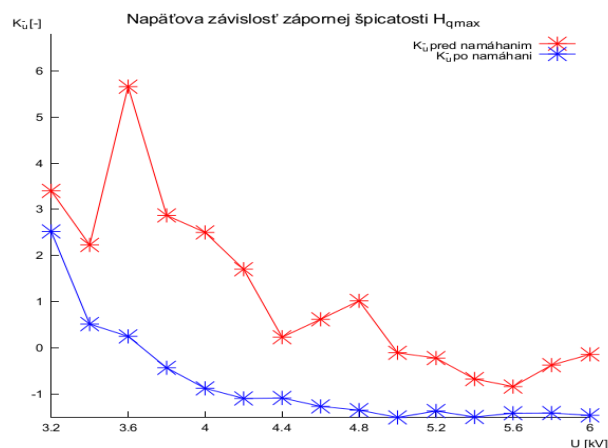
namáhaním. Taktiež ako v prípade šikmosti, hodnoty špicatosti sú vyššie v prípade pred tepelným namáhaním ako po tepelnom namáhaní.



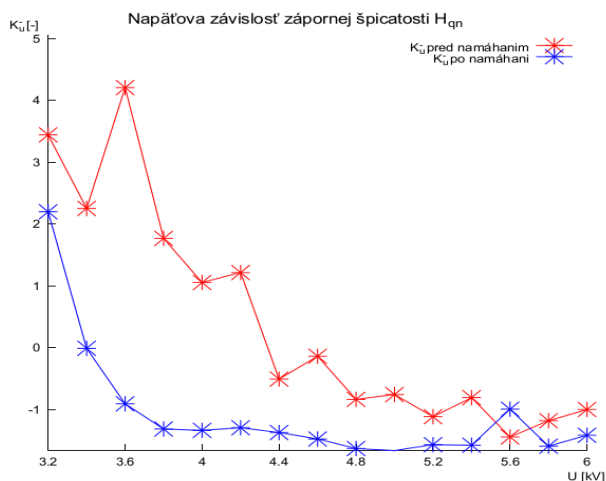
Obr.7 Operátor šikmosti S_k histogramu fázového rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov H_{qn} (φ) v závislosti od napätia.



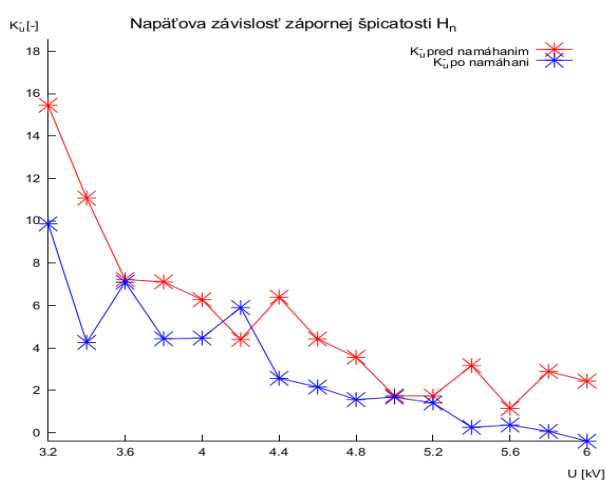
Obr.8 Operátor šikmosti S_k histogramu fázového rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov H_n (φ) v závislosti od napätia.



Obr.9 Operátor špicatosti K_u histogramu fázového rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov H_{qmax} (φ) v závislosti od napätia.



Obr.10 Operátor špicatosti K_u histogramu fázového rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov H_{qn} (φ) v závislosti od



napätia.

Obr.11 Operátor špicatosti K_u histogramu fázového rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivých nábojov H_n (φ) v závislosti od napätia.

Záver

Z výsledkov merania výbojovej činnosti pred a po krátko-dobom tepelnom namáhaní vyplývajú nasledujúci fakty:

- V prípade porovnávania výbojovej činnosti pri meľnovitom fázovom napätí cievky nastal mierny vzrast maximálnych hodnôt zdanlivého náboja ale zreteľnejší pokles maximálnych hodnôt zdanlivého náboja pri napätí 6 kV.
- Deskriptívne operátory šikmosti a špicatosti fázových rozložení výbojovej činnosti v prípade pred tepelným namáhaním nadobúdajú vyššie hodnoty. To signalizuje ostrejšiu pravostrannú šikmosť. Po tepelnom namáhaní sú hodnoty šikmosti a špicatosti nižšie, fázové rozloženie je naklonené viac do ľavej strany a plochejšie - výbojová činnosť sa rozrastá po fáze.

Vzhľadom k danému faktu je možné považovať vplyv krátkodobého teplotného namáhania za pozitívny na výbojovú činnosť.

Literatúra

- [1] STONE, G.C.: Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment. IEEE

Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12 No. 5, October 2005, pp. 891-903. ISSN: 1070-9878.

- [2] STONE, G.C.: Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12 No. 5, October 2005, pp. 891-903. ISSN: 1070-9878.
- [3] YAZICI, B.: Statistical Pattern Analysis of Partial Discharge Measurements for Quality Assessment of Insulation Systems in High Voltage Electrical Machinery, Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Driver, August 2003 pp. 158-161. ISBN: 0-7803-7838-5.
- [4] KOLCUNOVÁ I. Diagnostika elektrických strojov, Technická univerzita Košice 2006. ISBN 80-8073-550-6.
- [5] GULSKI E., KREUGER F.H.: Compute-aided recognition of Discharge Sources. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 1, February 1992, pp. 82-92. ISBN 0018-9367.
- [6] YAZICI B.: Statistical Pattern Analysis of Partial Discharge Measurements for Quality Assessment of Insulation Systems in High Voltage Electrical Machinery. SDEMPED 2003, Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Driver, Atlanta, Georgia, GA USA 24-26, August 2003.
- [7] CIGRE WG 21,03, „Recognition of Discharges,“ Electra, Vol. 11, pp. 61-68,1969.
- [8] SAHOO N. C., SALAMA M. M. A, BARTNIKAS R.. Trends in Partial Discharge Pattern Classification: A Survey. Sahoo et.al: Trends in Partial Discharge Pattern Classification. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, April 2005, pp. 248 - 264. ISSN 1070-9878.
- [9] MARTON, K., BALOGH, J., PETRÁŠ, J., DŽMURA, J.: Situation analysis of electric field on boundary-line of solid state electrode and gas. In: Przegląd elektrotechniczny. Vol. 86, no. 8 (2010), p. 307-311, ISSN 0033-2097.
- [10] CIMBALA, R.: Dielectric spectroscopy of HV insulation material in time and frequency domain. In: IEEEIC 2011 : 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering : conference proceedings : Rome, Italy, 2011, pp. 1-4. ISBN 978-1-4244-8782-0.
- [11] TOMAN, P.; DVOŘÁK, J.; ORSÁGOVÁ, J.; TOPOLÁNEK, D. Measurements earth faults in compensated networks. In PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM ON ELECTRIC POWER ENGINEERING - ELEKTROENERGETIKA 2009.1. TU Kosice, 2009. s. 307-309. ISBN: 978-80-553-0401-4.
- [12] JIANCHENG S.: Aging diagnosis of large generator stator winding insulation based on digital discharge detection, Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on, Vol. 2, 6 August 2002, pp. 765-769, ISBN: 0-7803-5459-1.

Podakovanie



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055. Táto práca vznikla na základe podpory vedeckej grantovej agentúry VEGA MŠVVaŠ SR a SAV č. projektu 1/0487/12

Autori: Irida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: irida.kolcunova@tuke.sk
 Marián Hrinko, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: marian.hrinko@tuke.sk
 Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: juraj.kurimsky@tuke.sk