

Pavol Duda, Irida Kolcunová

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

Modelovanie povrchových čiastkových výbojov

Abstrakt. Povrchové čiastkové výboje vznikajú na rozhraní dvoch dielektrík pevné-plynné alebo pevné-kvapalnú dielektrikum. Výbojová činnosť vznikajúca v mieste najväčšieho namáhania postupne degraduje izoláciu elektroenergetických zariadení a postupom času môže viesť k úplnému prerazu izolačného systému. Modelovaním a následným výskumom rozvoja výbojovej činnosti sa získajú poznatky, ktoré môžu byť použité v praxi na určenie stupňa nebezpečenstva výbojovej činnosti. V predkladanom článku sú uvedené výsledky modelovania výbojovej činnosti na vysokonapäťových cievkach elektrických strojov točivých v laboratórnych podmienkach.

Kľúčové slová: čiastkový výboj, povrchový výboj, vysokonapäťová cievka, elektrický stroj

Abstract. Surface partial discharges appear on the interface between two dielectrics like solid and gas or solid and liquid dielectric. The discharge activity generated in the point of the greatest stress degrades gradually the insulation of the power equipment, and over time can lead to a complete breakdown of the insulation system. Modeling and research of the development of discharge activity are needed to acquire knowledge that can be used in practice to determine the degree of the discharge activity danger. The article presents the results of the modeling discharge activity on the high-voltage coils of the rotating electrical machines under laboratory conditions.

Keywords: partial discharge, surface discharge, high voltage coil, rotating machine

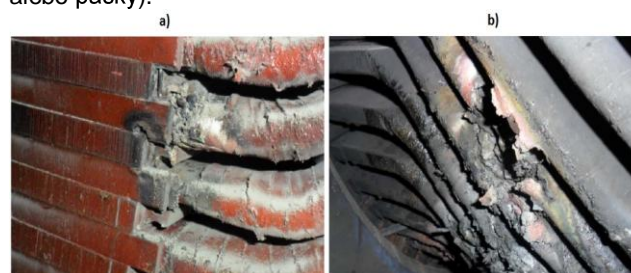
Úvod

Na izolačný systém pôsobia rôzne negatívne vplyvy, ktoré degradujú izoláciu a znižujú tak spoľahlivosť a životnosť elektroenergetického zariadenia. Jedným z takýchto vplyvov sú čiastkové výboje, ktoré vznikajú v miestach kde intenzita elektrického poľa prekročí kritickú hodnotu. Jedným z typov čiastkových výbojov sú povrchové výboje. Povrchové výboje vznikajú najčastejšie na rozhraní plynného a pevného dielektrika. V praxi degradujú statorovú izoláciu vysokonapäťových cievok elektrických strojov točivých. Jednou z častí, kde sa objavujú tieto výboje je výstup cievky z drážky statora. Výboje po povrchu sú nebezpečné a svojou veľkou energiou poškodzujú povrch izolácie, pričom môže dôjsť až k požiaru v elektroenergetickom zariadení [1]. Na ochranu izolačného systému pred povrchovými výbojmi sa používajú rôzne polovodivé nátery alebo pásky. Modelovaním a skúmaním výbojovej činnosti po povrchu izolačného systému vysokonapäťovej cievky môžeme v laboratórnych podmienkach sledovať zmeny charakteristických parametrov čiastkových výbojov. Tieto poznatky následne môžu byť veľmi užitočné v praxi na určenie stupňa nebezpečenstva výbojov vznikajúcich v izolačnom systéme elektroenergetických zariadení.

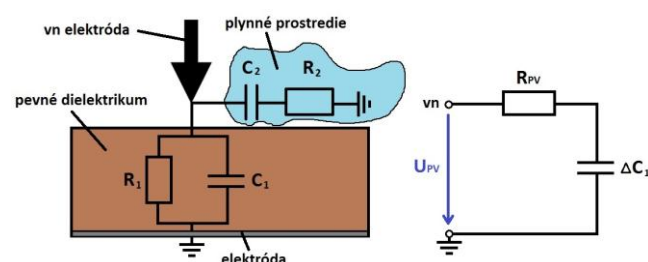
Povrchové výboje

Povrchové výboje predstavujú pre vysokonapäťové zariadenia (izolátory, priečokky a iné) veľký problém [3]. Ide o čiastkový výboj, ktorý vzniká na rozhraní plynného (resp. kvapalnú) a pevného izolantu. Povrchové výboje vznikajú na miestach, ktoré sú najviac namáhané elektrickým poľom. Hodnota kritického napätia, pri ktorom vzniknú povrchové výboje U_{PV} je závislá od dielektrickej permitivity materiálu, vlhkosti a hygroskopickosti pevného izolantu, vlhkosti obklopujúceho plynu, nečistôt na povrchu a od iných okolitých faktorov. S ďalším zvyšovaním napätia vzniká na povrchu pevného dielektrika výboj vo forme paralelných vlákien takzvaný kľzavý výboj [2][4][5]. Kľzavé výboje majú veľkú energiu a na povrchu pevného dielektrika vytvárajú zuhoľnatené stopy (tzv. tracky), čím sa mení vodivosť povrchu pevného izolantu. Na obrázku 1a je znázornené poškodenie izolácie povrchovým výbojom na výstupe cievky z drážky statora a na obrázku 1b - dôsledok pôsobenia výbojov medzi cievkami statorového vinutia

v jeho čele. Tieto výboje svojou veľkou energiou ničia izoláciu elektroenergetických zariadení a na ich zamedzenie sa používajú rôzne ochrany (polovodivé nátery alebo pásky).



Obr. 1 Poškodený izolačný systém točivého stroja: a) korónovými výbojmi v mieste výstupu cievky z drážky statora, b) výbojmi medzi jednotlivými cievkami v čele statorového vinutia [6]



Obr. 2 Náhradná schéma izolácie medzi hrotom a doskou [3]

Rozhodujúcim faktorom na preskok po povrchu pevného izolantu je špecifická povrchová kapacita C_1 . Tento parameter predstavuje kapacitu jednotkovej plochy izolantu voči protihľej elektróde. Pri predpoklade, že vrstva pevnej izolácie v okolí elektródy má jednotkovú plochu ($S=1$) a hrúbku izolácie d , potom sa hodnota jednotkovej špecifickej kapacity C_1 vyráta ako [7]:

$$(1) \quad C_1 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{1}{d}$$

Kde ε_r je relatívna permitivita pevného dielektrika a ε_0 je permitivita vákua. Z náhradnej schémy izolácie (obrázok 2) odpor R_{PV} predstavuje odpor kanála povrchového výboja a ΔC_1 znázorňuje kapacitu povrchu dielektrika, ktorý sa nachádza pod povrchovým výbojom a platí [7]:

$$(2) \quad \Delta C_1 = k \cdot C_1$$

Teplnú energiu povrchového výboja W_T , ktorá vytvára zuhoľňatené stopy vyrátame ako[7]:

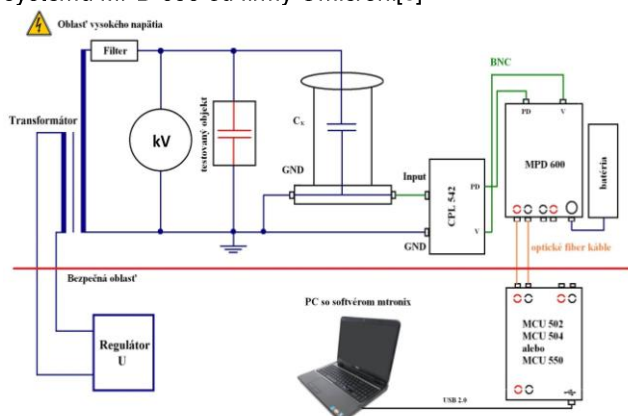
$$(3) \quad W_T = \frac{1}{2} \Delta C_1 \cdot U_{KV}^2$$

Kritická hodnota napätia kľavého výboja U_{KV} sa vypočíta[7]:

$$(4) \quad U_{KV} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_T}{k \cdot \Delta C_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_T \cdot d}{k \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}}$$

Zostavenie pracoviska na meranie výbojovej činnosti

Výbojová činnosť sa meria pomocou priamej metodiky podľa normy IEC 60270. Prístroje sú zapojené podľa schémy zapojenia, ktorá je znázornená na obrázku 3. Na začiatku merania jednotlivých typov čiastkových výbojov sa musí vykonať kalibrácia skúšaného objektu. Záznam výbojovej činnosti sa uskutočňuje pomocou meracieho systému MPD 600 od firmy Omicron.[5]



Obr. 3 Schéma zapojenia merania čiastkových výbojov [9]

Povrchové výboje vznikajú na rozhraní dvoch dielektrík (pevné a plynné resp. pevné a kvapalné) v mieste kde sa objavuje tangenciálna zložka intenzity elektrického poľa. Na modelovanie povrchových výbojov sa použila cievka statorového vinutia elektrického stroja točivého (obrázok 4), na ktorej bol skúmaný vznik výbojov v mieste výstupu cievky z drážky statora. Na meranie boli zvolené dve cievky. Cievka č.1 mala polovodivý náter na výstupe cievky z drážky statora na ochranu proti vzniku povrchových výbojov a cievka č.2 bola bez polovodivého náteru.



Obr. 4 Skúmaná cievka s polovodivým náterom [9]

Postup pri meraní

Postup pri meraní povrchových výbojov bol nasledovný. Vysokonapäťová cievka č.1 sa do obvodu zapojí ako kapacita C_x . Následne prebehne kalibrácia skúmanej cievky. Po ukončení kalibrácie sa pristúpi k meraniu.

Napätie sa pomocou regulátora pomaly zvyšuje až sa objaví prvá výbojová činnosť. Pri tomto napätí sa spraví záznam s dĺžkou trvania 1min. Následne sa napätie zvyšuje s krokom 1kV až do napätia 15kV a pri každom kroku sa vykoná daný 1-minútový záznam. Po skončení merania sa zapojí cievka č.2 a vykoná sa kalibrácia. Meranie sa zopakuje rovnakým spôsobom ako pri cievke č.1.

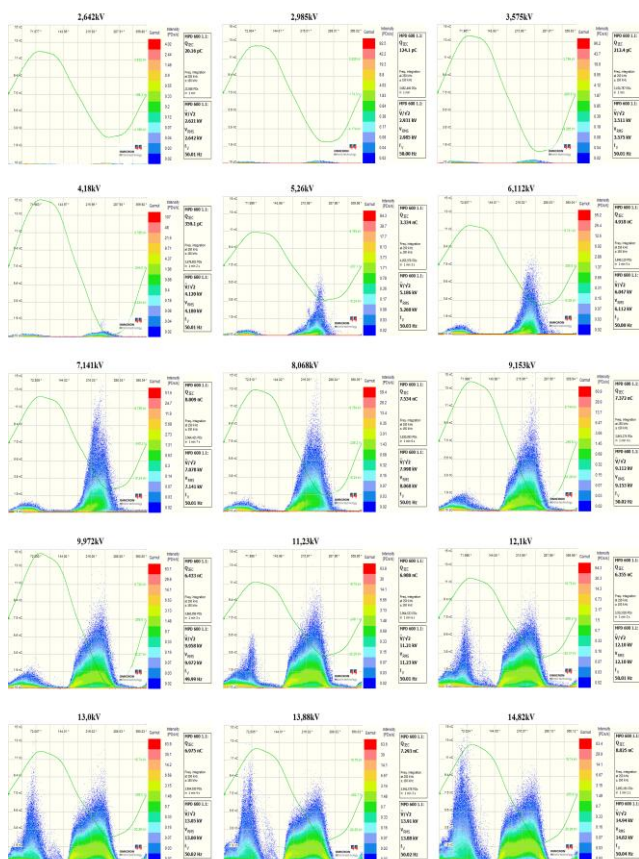
Vyhodnotenie skúmania povrchových výbojov

V tabuľke 1 sú uvedené výsledky merania zdanlivého náboja na cievke s polovodivou ochranou a bez nej pri zvyšovaní napätia. Pri určitej napätovej hladine boli odčítané stredná hodnota zdanlivého náboja (AVG) podľa normy IEC 60270 a maximálna hodnota (MAX).

Tabuľka 1 Namerané hodnoty zdanlivého náboja na skúmaných cievkach

U _{poč} [kV]	Cievka č.1 (s náterom)		Cievka č.2 (bez náteru)	
	q _{IEC} [pC] (AVG)	q _{IEC} [pC] (MAX)	q _{IEC} [pC] (AVG)	q _{IEC} [pC] (MAX)
4	25,0	38,83	350,21	935,0
6	93,46	183,13	4820,0	8769,67
8	339,11	506,0	7580,0	14740,0
10	566,72	964,1	6280,0	13003,3
12	632,15	1066,0	6210,0	11036,7
14	651,54	1351,3	7120,0	13256,7
15	686,36	1381,0	8460,0	18490,0

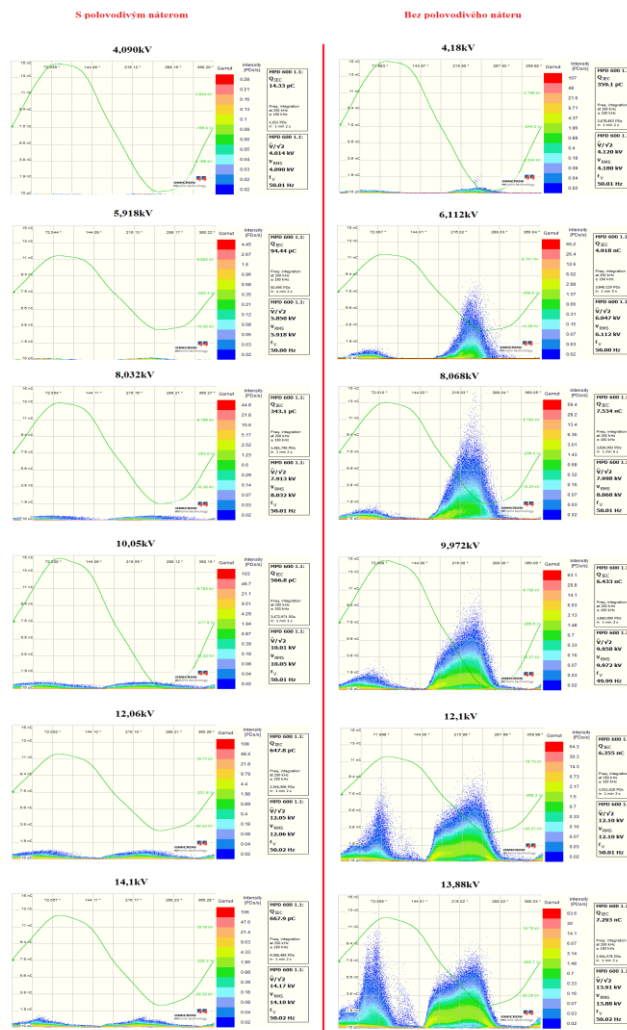
Rozvoj kľavých výbojov na cievke bez polovodivej ochrany je znázornený na obrázku 5. Počiatočné napätie na cievke č.2 bolo U_{POČ}=2,6 kV a išlo o vnútorné výboje s priemerným zdanlivým nábojom q_{IEC}=21,31 pC. S ďalším zvyšovaním napätia sa výbojová činnosť rapídne zvyšovala a pri napätí 5,26 kV začalo sršanie – zvukový prejav výbojov po povrchu izolácie. So zvyšovaním napätia sa rozvíja najmä výbojová aktivita v zápornej polperióde, čo znamená že čiastkové výboje sa rozvíjajú zo strany uzemnenej časti, t.j. drážky statora. V tomto mieste je najväčšia intenzita elektrického poľa. Od napätia 11,2 kV nadobúda výbojová činnosť vysoké hodnoty aj v kladnej polperióde. Tu sa objavili výboje na čelách vinutia. Pri ďalšom zvyšovaní napätia hodnota zdanlivého náboja je vyrovnaná ako v kladnej tak aj zápornej polperióde priloženého napätia.



Obr. 1 Rozvoj povrchových výbojov na cievke bez polovodivého náteru

Obrázok 6 poukazuje na rozdiel medzi cievkou s polovodivým náterom a bez neho. Z uvedeného vyplýva, že cievka č.1 s polovodivou ochranou má omnoho nižšiu výbojovú aktivitu ako cievka č.2. Počiatočné napätie na cievke č.1 bolo $U_{POČ}=4,1$ kV, pričom stredná hodnota zdanlivého náboja bola $q_{IEC}=25$ pC. Táto výbojová činnosť je charakteristická pre vnútorné výboje. Pri 7kV sa začali rozvíjať povrchové výboje, tie sa postupne zvyšovali a od napätia 12 kV do 15 kV sa výbojová činnosť zvyšovala veľmi pomaly (takmer sa nemenila).

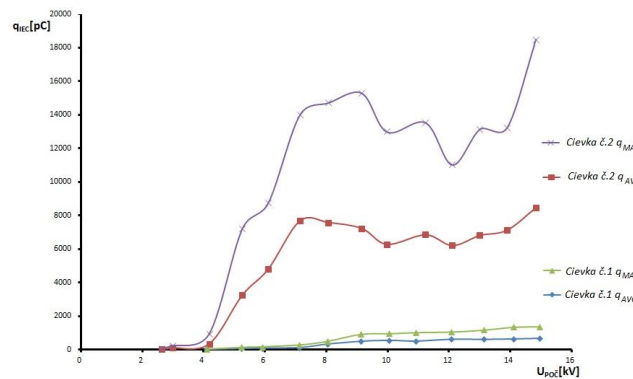
Pre názorne porovnanie výbojovej činnosti maximálne a stredné hodnoty zdanlivého náboja častkových výbojov pri zvyšovaní napätia sú vynesené do grafickej závislosti. Z grafickej závislosti (obrázok 7) je zrejmé, že od hodnoty napätia 9,1 kV nameraná výbojová aktivita sa stabilizuje v prípade oboch cievok. Rozdiel medzi maximálnou a strednou hodnotou výbojovej činnosti je väčší v prípade cievky bez polovodivej ochrany. Taktiež tu vidieť väčšie kolísanie maximálnych hodnôt zdanlivého náboja pri zvyšovaní napätia, čo poukazuje na nestabilnú výbojovú činnosť. Od napätia 12,1 kV sa podľa obrázku 7 výbojová činnosť opäť zvyšuje. Charakteristické hodnoty zdanlivého náboja pri konkrétnom napätí sú uvedené v **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.1**.



Obr. 6 Porovnanie skúmaných cievok

Záver

Modelom pre povrchové častkové výboje bola statorová cievka elektrického stroja točivého. Výbojová činnosť sa skúmala na dvoch statorových cievkach, pričom cievka č.1 bola s polovodivým náterom na výstupe cievky z drážky statora a cievka č.2 bola bez polovodivého náteru. Z nameraných výsledkov sa potvrdilo, že použitie polovodivého náteru na výstupe cievky z drážky má pozitívny vplyv na zníženie výbojovej činnosti.



Obr. 7 Napät'ová závislosť zdanlivého náboja na skúmaných cievkach

PodĎakovanie



„Táto práca bola podporovaná Agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky pre štrukturálne fondy EÚ na základe projektu Vývoj unikátneho nízkoenergetického statického zdroja pre elektrosystémy (číslo projektu: 26220220029, prioritná os 2 Podpora výskumu a vývoja)“

Literatúra

- [1] K. Záliš. Částečné výboje v izolačných systémoch elektrických stroju. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [2] K. Marton. Technika vysokých napätí. 1.vyd. Bratislava:Alfa, 1984.
- [3] V. Bloschchitsyn. Review of surface discharge experiments. St.-Petersburg StateUniversity, Physics Faculty, 2010.
- [4] V. Wallace, K. Holtzhausen. High voltage engineering. Practice and theory. 1.vyd. Stellenbosch: University of Stellenbosch, ISBN 978-0-620-3767. Dostupné na internete:

<http://www.dbc.wroc.pl/Content/3458/high_voltage_engineering.pdf>

- [5] M. Šipoš. Meranie výbojovej aktivity v nehomogénnych poliach. Bakalárska práca, Košice, 2013.
- [6] L. Chuanyang, S. Jiancheng, K. Ailiang, L. Lingyan, S. Wen, L. Zhipeng. PD Patterns of Stator Windings by In-factory Experiment on a 10kV Motor. In: Conference Proceedings of ISEIM s. 168 – 171, 2014.
- [7] I. Kolcunová. Prednášky z predmetu Technika vysokých napätí, TUKE Košice. Dostupné na internete:<<http://web.tuke.sk/feikee/web/index.php?pg=technika-vysokych-napaeti-2&hl=en>>
- [8] P. Duda. Modelovanie výbojovej aktivity v izolačnom systéme elektroenergetických zariadení. Diplomová práca. Košice, 2016.

Autori: Iraidá Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolcunova@tuke.sk
Pavol Duda, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: pavol.duda.2@student.tuke.sk