

Peter Arnold

Autoreferát dizertačnej práce

VÝBOJOVÁ ČINNOSŤ OBJEKTOV NA ZÁKLADE FYZIKÁLNEHO MODELOVANIA

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore 5.2.30. elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 30.10.2015

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Peter Arnold

Autoreferát dizertačnej práce

VÝBOJOVÁ ČINNOSŤ OBJEKTOV NA ZÁKLADE FYZIKÁLNEHO MODELOVANIA

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 30.10.2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Fakulte Elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predkladateľ: Ing. Peter Arnold
Útav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

Školiteľ: doc. Ing. Pavol Šandrik, PhD.
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Oponenti: prof. Ing. Iraida Kolcunová, PhD., Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technickej univerzity v Košiciach

Ing. Mário Gajdoš, PhD., ELBA, a. s.

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 16. 12. 2015 o 11:30 h.

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky, Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

Obsah

Tézy dizertačnej práce	4
Úvod	5
1 Diagnostika izolačných systémov	6
1.1 Meranie výbojovej činnosti	6
2 Čiastkové výboje	8
2.1 Vznik čiastkových výbojov	8
2.2 Vplyv čiastkových výbojov na izolačný systém	8
2.3 Druhy čiastkových výbojov	9
2.4 Charakteristické veličiny opisujúce druh výbojovej činnosti	10
2.4.1 Základné veličiny	10
2.4.2 Fázovo a časovo odvodené veličiny	11
2.4.3 Štatistické operátory	11
3 Modelovanie výbojovej činnosti	13
3.1 Analýza súčasného stavu modelovania výbojovej činnosti	13
3.2 Fyzikálne modely čiastkových výbojov	13
3.2.1 Návrh fyzikálnych modelov - 1 návrh	15
3.2.2 Návrh fyzikálnych modelov – 2 návrh	15
3.3 Modely pre samostatné poruchy	16
3.3.1 Model S1 – Izolácia bez porúch	16
3.3.2 Model S5 – Dutina v izolante	17
3.3.3 Model S6 – Veľké množstvo dutín v izolante	17
3.3.4 Model S7 – Koróna 1 v zapojení: hrot VN / doska uzemnená	18
3.3.5 Model S8 – Koróna v zapojení: doska VN / hrot uzemnený	19
3.4 Kombinácie porúch	20
3.4.1 Model K1 – Paralelné zapojenie modelov S7 a S9	20
3.4.2 Model K3 – Paralelné zapojenie modelov S5 a S7	21
3.4.3 Model K5 – Paralelné zapojenie modelov S6 a S7	22
4 Závery a prínosy pre prax	23
Záver	24
Výber z použitej literatúry	25

Tézy dizertačnej práce

1. Analýza súčasného stavu modelovania výbojovej činnosti.
2. Rozbor charakteristických veličín modelov pre jednotlivé druhy výbojovej činnosti.
3. Realizácia fyzikálnych modelov pre jednotlivé typy výbojovej činnosti a merania na týchto modeloch.
4. Aplikácia výsledkov získaných z meraní na fyzikálnych modeloch a možné vyhodnotenie reálnych prevádzkových objektov.

Úvod

Snahou prevádzkovateľov elektroenergetických zariadení výroby, distribúcie i spotreby elektrickej energie je zvyšovanie spoľahlivosti a znižovanie nákladov. Táto snaha vedie k preventívnej údržbe. Systém „prevádzkuj do poruchy“ sa prežíva a prioritu a stále väčší význam získava diagnostika v plnom slova zmysle. Časy o prioritu diagnostiky niektorej z vlastností zariadení sú za nami. Každá vlastnosť má svoj význam a spravidla porucha hocktovej súčasti vedie k odstaveniu zariadenia. Začínajú narastať straty z nedodania elektrickej energie a neodkladná oprava s finančnými stratami úmernými rozsahu havárie. Uvedené platí aj na izolačný systém zariadenia. Portfólio diagnostickej aparatúry i stupeň poznania sú na takej úrovni akej sú. A od toho sa rozvíja i úroveň diagnostiky izolačných systémov. Je možné určiť s väčšou a či menšou presnosťou izolačný odpor, kapacitu, stratový činiteľ, výbojovú činnosť i jej lokalizáciu. Z toho odvodiť vodivosť, permeabilitu, prípadne ich časové zmeny. Sú pokusy aj s istou pravdepodobnosťou predpokladať zvyškovú elektrickú pevnosť. Pre realizáciu myšlienky plnohodnotnej preventívnej údržby je to však málo. Všetky merateľné parametre sú prejavom tej ktorej vlastnosti ako celku a potrebná analýza a nutná adresnosť sa iba rozvíja. Nemožno si myslieť, že neexistuje to, čo nie je poznané. Doterajší vývoj je toho jasným dôkazom. Vývoj napreduje a je podmienený zvyšovaním úrovne poznania. Predpokladané, alebo matematicko-fyzikálnou cestou zistené skutočnosti je potrebné overovať experimentom, čo vedie k rozvoju meracej techniky. Jednoznačným dôkazom tohto konštatovania je sledovanie výbojovej činnosti. Pokiaľ globálne hodnoty izolačného odporu, kapacity, stratového činiteľa i výbojovej činnosti poskytujú možnosť konštatovania zmeny, ale príčinná súvislosť nie je zatiaľ na dostatočnej úrovni. Ideálne by bolo tieto hodnoty sledovať aj počas prevádzky a bezprostredne reagovať na zmeny. Realizácia on-line merania diagnostických veličín je však z princípu metodiky merania nerealizovateľná a navyše výsledky by boli obrazom celého meraného obvodu, čiže i so spotrebiteľskou sieťou.

Rozvoj digitálnej meracej techniky však poskytuje možnú cestu, ktorá dáva nádej na zvýšenie úrovne diagnostiky. Je možné sledovať prejav výbojovej činnosti v digitálnej forme. Výsledkom je obraz zhľuku impulzov, ktoré sa s priloženým napätím mení. Jeho analýza a rozbor príčin v on-line zapojení je zatiaľ na úrovni utópie. Jednoduchšia a snád' aj schodná cesta sa javí pri meraniach off-line. Možno merať napäťovú závislosť, čo je v zapojení on-line nepredstaviteľné. Je možné zistiť obraz výbojovej činnosti pre zvolené napätia, ale nie je možné vykonať analýzu a definovať príčiny vzniku zmien. Existujú isté pokusy riešiť tento problém vizuálnym porovnávaním s obrazcami zmeraných pri známych podmienkach. Problémom je existencia vzorových obrazcov. Porovnávanie a či zhoda obrazcov nie je pre digitálne metódy problém. Pre jednoduché podmienky je získanie digitálneho obrazu výbojovej činnosti pri prísne definovaných podmienkach možné.

Téma dizertačnej práce a jej tézy dávajú možnosť prispieť k riešeniu tejto problematiky. Na ich základe a realizovaní merania obrazu výbojovej činnosti od najjednoduchších usporiadaní až po ich kombináciu môže viesť k získaniu vzorových obrazov pre rôzne druhy výbojov a ich napäťovú závislosť. Následne je možné potom do istej miery vykonať porovnanie obrazu výbojovej činnosti reálneho objektu a predpokladať príčinnú súvislosť.

Predložená dizertačná práca je obrazom a dokumentom realizácie týchto postupov a predkladá vzorové obrazy výbojovej činnosti, ktoré boli získane za prísne definovaných podmienok, a ktoré dávajú možnosť rozpoznávania výbojovej činnosti.

1 Diagnostika izolačných systémov

Diagnostika izolačných systémov znamená stanovenie a klasifikáciu príznakov, ktoré poukazujú na zmenu parametrov počas používania zariadenia.

Na posúdenie spoľahlivosti a zvyškovej životnosti niektorých izolačných systémov boli donedávna k dispozícii len deštruktívne metódy – napäťové skúšky. Vynárala sa preto potreba nedeštruktívnych metód diagnostiky starnutia na spoľahlivé stanovenie stavu izolácie systémov. Nedeštruktívnou sa rozumie metóda, ktorá dokumentuje celkový stav izolácie bez toho, aby počas skúšky zaťažovala izolačný systém vysokým skúšobným napätím. Moderné diagnostické zariadenie má podať prevádzkovateľovi informáciu o celkovom stave zariadenia. Pomáha dať fundovanú odpoveď na otázku, či sa oplatí odstrániť poruchu, alebo či je efektívnejšie izolačný systém alebo celé zariadenie vymeniť. V súčasnosti nie je k dispozícii univerzálna metóda, ktorá by samotná bez pomoci iných metód dokázala určiť stav izolačného systému. Preto je potrebné definovať súbor metód komplexne analyzujúci stav zariadenia. Ich výber závisí na type zariadenia a na požiadavkách prevádzkovateľa.[1]

Voľba vhodnej diagnostickej metódy:

- skúška sa musí týkať vlastnosti, ktorá je predmetom záujmu,
- skúška musí byť dostatočne preukázateľná,
- rozloženie namáhania má byť zhodné so skutočným,
- uprednostňujú sa nedeštruktívne skúšky,
- skúška nesmie podstatne ovplyvniť degradáciu.

Diagnostické metódy rozdeľujeme na:

- elektrické,
- neelektrické.

Rozdelenie diagnostických metód vzhľadom na prevádzku testovaného zariadenia:

- off-line –testovacia diagnostika,
- on-line –funkčná diagnostika.

Elektrické metódy vzhľadom pôsobenia na skúmaný objekt:

- deštruktívne,
- nedeštruktívne.

Elektrické metódy vzhľadom na druh použitého napätia:

- jednosmerné,
- striedavé,
- kombinované.

Neelektrické metódy:

- plynová chromatografia,
- akustická detekcia,
- optická detekcia,
- termovízia.

1.1 Meranie výbojovej činnosti

Meranie čiastkových výbojov je na prvom mieste v zozname diagnostických metód aplikovaných na zariadeniach vysokého a veľmi vysokého napätia. Metódy sa neustále zdokonaľujú po teoretickej aj technickej stránke. Do popredia sa dostávajú on-line metódy umožňujúce meranie priamo v prevádzke bez odstávky diagnostikovaného zariadenia.

Neelektrické metódy

Nie sú vhodné na kvantitatívne meranie veličín výbojovej činnosti, ale sú vhodné na ich lokalizáciu. Neelektrickými metódami sa prevažne zisťuje výbojová činnosť vznikajúca pri povrchu izolácie.

Akustická detekcia – táto metóda je vhodná pre lokalizáciu vzniku výbojov a používa sa ako doplnková metóda k priamej galvanickej metóde. Zvuk výbojovej činnosti sa zachytáva mikrofónmi

v kombinácií so zosilňovačom a vizualizačnou jednotkou. Výhodou metódy je, že môže byť aplikovaná za prevádzky zariadenia.

Chemická detekcia – čiastkové výboje v plynných a kvapalných dielektrikách, spôsobujú rozklad týchto materiálov na iné produkty. Na základe chemickej analýzy produktov starnutia rozpustených v plyne alebo oleji zisťuje prítomnosť čiastkových výbojov. Podľa množstva týchto produktov vime určiť stupeň degradácie.

Optická detekcia – svetelnej emisie sa vykonáva v tmavej miestnosti voľným okom alebo ďalekohľadom veľkej svietivosti alebo fotografickým záznamom s pomerne dlhým časom expozície. Zachytia sa len čiastkové výboje na viditeľných miestach a preto je metóda nepoužiteľná vo vnútri izolácie.

Elektrické metódy

Využívajú zmeny elektrických parametrov diagnostikovaných objektov. Patria sem:

- meranie stratového činiteľa $tg\delta$,
- kapacitné a induktívne sondy,
- galvanická metóda,
- metóda postupnej vlny,
- meranie rušivých elektromagnetických polí.

Jednotlivé metódy ďalej delíme na:

- lokalizačné – slúžia na lokalizáciu miesta výskytu čiastkových výbojov,
- globálne – zahŕňajú meranie čiastkových výbojov v celom zariadení.

Meranie stratového činiteľa - Stratový činiteľ $tg\delta$ vyjadruje dielektrické straty v izolácii pri striedavom napätí, ktoré okrem vodivostných a polarizačných zložiek obsahujú aj zložku od výbojovej činnosti.

Metóda induktívne viazanej sondy – patrí medzi lokalizačné metódy. Meranie sa realizuje na stroji s vybratým rotorom. Induktívny snímač je priložený nad drážku vinutia, spolu s magnetickým obvodu statora a tyčou vinutia stroja vytvára prúdový transformátor. V sekundári tohto prúdového transformátora, ktorý tvorí cievka sondy sa indukujú impulzy vyvolané dobíjacím prúdom čiastkových výbojov.

Metóda diferenciálnej elektromagnetickej sondy patrí medzi lokalizačné metódy. Diferenciálnu sondu tvoria dva sériové induktívne snímače, ktoré sa umiestnia na koncoch testovanej tyče statorového vinutia. Ak prúdový impulz prechádza oboma sondami rovnakým smerom, čo nastáva v prípade rušivých signálov, výstupné signály sondy sa navzájom vrušia. Pri prechode dobíjacieho impulzu do lokality čiastkového výboja medzi sondami, ktorý sondami prechádza v opačných smeroch, sa výstupný signál sčíta.

Kapacitná drážková sonda – umožňuje diagnostikovať čiastkové výboje aj za prevádzky stroja. Sonda je pevne zabudovaný snímačom a je vložená do statorových drážok stroja už pri jeho výrobe.

LEMKE sonda – merací systém je založený na princípe širokopásmového zosilnenia impulzov čiastkových výbojov a následnou elektronickou integráciou pre vyhodnotenie zdanlivého náboja. Senzor tvorí plošná kapacitná alebo lineárna induktívna sonda, ktorá je pripojená na vstup rýchleho diferenciálneho snímača. Výstupný signál je privedený do osciloskopu a priebeh je zaznamenaný a uložený. [2 s. 87-97]

Galvanická metóda – patrí medzi globálne metódy. Prúdové impulzy výbojov sú snímané priamo zo snímacej impedancie Z_m .

Výhody galvanickej metódy sú nasledovné:

- metóda je použiteľná pre všetky druhy izolačných systémov,
- nízke namáhanie izolačného systému,
- možnosť merania on-line [3].

2 Čiastkové výboje

Existencia čiastkových výbojov bola objavená na začiatku 20-teho storočia. [4] Meranie čiastkových výbojov je neoddeliteľnou súčasťou diagnostiky izolačných systémov.

Čiastkový výboj (ČV) je lokalizovaný elektrický výboj, ktorý iba čiastočne premoštuje izoláciu medzi vodičmi a ktorý sa môže alebo nemusí objaviť v okolí vodiča. Čiastkové výboje sú obvykle dôsledkom koncentrácie lokálneho elektrického namáhania v izolácii alebo na povrchu izolácie. Prejavujú sa ako impulzy s dobou trvania menšou ako 1 μ s. Čiastkové výboje sú často sprevádzané vyžarovaním svetla, tepla, zvuku a chemickými reakciami. [5]

Koróna je forma čiastkového výboja, ktorý sa objavuje v plynnom prostredí okolo vodičov, ktoré sú vzdialené od pevnej alebo kvapalnej izolácie. [6]

Čiastkové výboje delíme na:

- **vonkajšie čiastkové výboje** – sú to výboje v plynch v okolí elektród malých polomerov (koróna),
- **vnútorné čiastkové výboje** – sú to výboje v plynch, obklopené pevným alebo kvapalným dielektrikom (výboje v dutinkách v dielektriku),
- **povrchové čiastkové výboje** – sú to výboje v okolí elektród na rozhraní pevného a plynného dielektrika (kízavé výboje).

2.1 Vznik čiastkových výbojov

Izolačné systavy obsahujú malé dutinky, ktoré vznikajú pri výrobe, ale aj pri namáhaní. Tieto dutinky sú vyplnené plynom, ktorého permitivita je ϵ_r krát menšia ako permitivita izolácie. Zároveň je elektrická pevnosť izolácie oveľa väčšia ako elektrická pevnosť plynu v dutinke. Ak na izolačnú sústavu pôsobí elektrické pole, plyn v dutinkách je namáhaný ϵ_r krát väčším gradientom ako pevná izolácia. Z týchto dôvodov dochádza v dutinkách k prirazuom pri podstatne nižšom napätí, ako je prirazné napätie izolantov.

Zápalné napätie, pri ktorom dôjde k prirazu plynu v dutinkách je dané Paschenovým zákonom:

$$U_z = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma_e})}} \quad (2.1)$$

Prirazné napätie v homogénnom elektrickom poli pri konštantnej teplote je teda funkciou súčinu tlaku plynu a vzdialenosti elektród. Keďže dutinky v izolácii majú rôznu veľkosť a orientáciu k smeru elektrického poľa, k prirazu v dutinkách nedochádza naraz ale pri rôznej veľkosti napätia. [7 s. 98].

Výboj trvá dovtedy, kým sa na protiľahlých stenách dutinky nenahromadí taký veľký náboj, že zníži napätie na hodnotu tzv. zhášacieho napätia, pri ktorom sa výboj neudrží a zhasne. Ak sa napätie na izolácii ďalej zvyšuje, zvyšuje sa aj napätie na dutinke, kým znova nedosiahne hodnotu zápalného napätia. Vtedy nastane opäť výboj a dej sa opakuje, pokiaľ sa napätie na izolácii neprestane zvyšovať. Ak sa napätie ďalej nemení, náboj nahromadený na protiľahlých povrchoch dutiny odteká, tým napätie na dutine stúpa, až dosiahne hodnotu zápalného napätia a dej sa tiež opakuje. [8 s. 155]

2.2 Vplyv čiastkových výbojov na izolačný systém

Výboje v dutinách majú na izoláciu priame aj nepriame účinky. Vplyvom výbojov dochádza v izolácii k chemickým a fyzikálnym zmenám izolačného materiálu, ktoré sú väčšinou nevratné a spôsobujú zhoršenie elektrických vlastností a teda elektrické starnutie izolácie.

Vplyvom čiastkových výbojov v izolante vznikajú tieto deje:

- priame účinky bombardovania povrchu pevného alebo tekutého izolantu iónmi,
- chemické účinky produktov vznikajúcich pri výboji v dutinách,
- tepelné účinky,
- účinky lokálneho zvýšenia gradientu na konci výbojového kanála,
- účinky žiarenia, vznikajúceho pri výbojoch.

2.3 Druhy čiastkových výbojov

Jednotlivé typy čiastkových výbojov rozdeľujeme podľa fázového rozloženia výbojov vo fáze skúšobného napätia na skupiny A až E.

Čiastkové výboje typu A – sú obrazmi vonkajších čiastkových výbojov v plynoch. Po dosiahnutí počiatočného napätia čiastkových výbojov, sa začnú prejavovať ako približne rovnako veľké impulzy rozmiestnené symetricky v okolí amplitúdy na kladnej, resp. zápornej polvlne skúšobného napätia, zvyšovaním napätia rastie ich počet. Pre polohu impulzov, teda v ktorej polvlne sa nachádzajú je rozhodujúce, ktorá časť poruchy je napájaná a ktorá uzemnená. Napríklad pri modeli hrot-doska, ak je napájaný hrot, impulzy sa nachádzajú na zápornej polvlne, ak je hrot uzemnený tak na kladnej polvlne.

Čiastkové výboje typu B – prejavujú sa ako impulzy, ktoré sa objavujú v okolí amplitúd na oboch polvlnách napájacieho napätia a to tak, že v jednej polvlne je väčší počet menších impulzov a v druhej polvlne menší počet väčších impulzov. Tak ako pri výbojoch typu A pre polohu výbojov je rozhodujúce zapojenie. Pri modeli hrot-doska sa veľké impulzy objavujú v kladnej polvlne pri napájanom hrote a v zápornej polvlne, ak je hrot uzemnený.

Čiastkové výboje typu C – prejavujú sa ako impulzy, v oblastiach nárastu, teda od 0 až do maxima napájacieho napätia v oboch polvlnách.

Do tejto skupiny zaradíme:

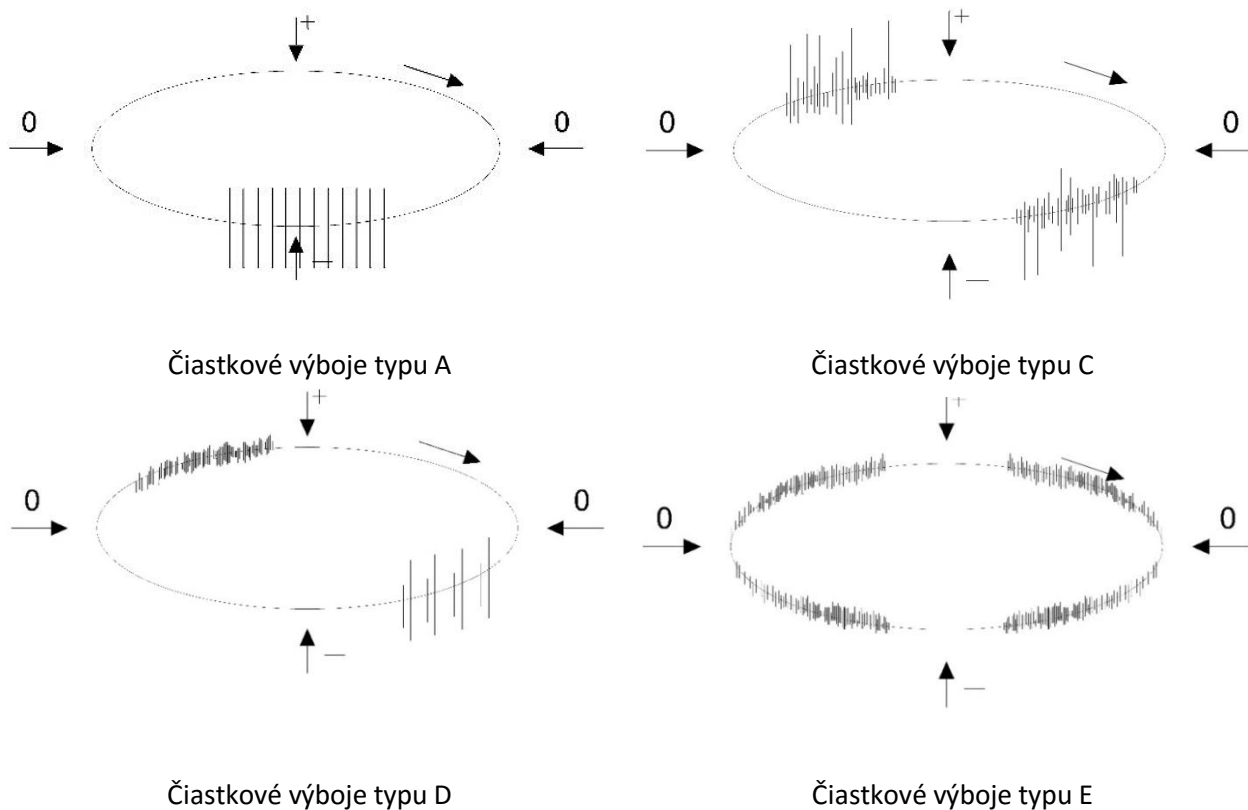
- kľzavé výboje na povrchu pevných izolantov,
- čiastkové výboje,
- v dutine pevného izolantu,
- v plynovej bublinke plynného izolantu,
- medzi dvoma neuzemnenými kovovými časťami.

Čiastkové výboje typu D - prejavujú sa podobne ako výboje typu C, s rozdielom, že veľkosti impulzov v kladnej a zápornej polvlne nie sú rovnako veľké. Ak je dutinka priamo na rozhraní izolantu a vodivej časti, ktorá je napájaná, impulzy v kladnej polvlne sú väčšie ako v zápornej a naopak.

Do tejto skupiny zaradíme čiastkové výboje v:

- dutinkách v pevnom izolante,
- plynových bublinkách v kvapalnom izolante.

Čiastkové výboje typu E – prejavujú sa ako impulzy symetricky zoskupené okolo oboch prechodov skúšobného napätia nulou. Bývajú spôsobené nedokonalým kontaktom medzi kovovými časťami, alebo medzi dvoma vrstvami polovodivého tienenia.



Obr. 2.1 Typy výbojovej činnosti

2.4 Charakteristické veličiny opisujúce druh výbojovej činnosti

Charakteristické veličiny opisujúce výbojovú činnosť delíme do troch skupín:

- základné veličiny – sú jediné veličiny, ktoré popisujú opakovaný výskyt čiastkových výbojov;
- odvodené veličiny – sú odvodené od základných veličín;
- štatistické operátory.

2.4.1 Základné veličiny:

Zdanlivý náboj q_i – veľkosť náboja, vyvolaná prúdovým alebo napät'ovým impulzom čiastkového výboja v meracom obvode. Zdanlivý náboj sa nerovná množstvu skutočného náboja lokálne pôsobiaceho v mieste výboja, ktorý nemôže byť priamo meraný, nakoľko súvisí s procesmi vo vnútri dielektrika.

$$q_i = b \cdot \Delta U \quad (2.2)$$

kde: b je sériová kapacita s poruchou
 ΔU - zmena napätia spôsobená výbojmi

Fázový uhol výboja - Miesto výskytu výbojov na krivke napájacieho napätia. Vzťahuje na fázu skúšobného napätia U_{sk} počas výbojovej činnosti je reprezentované počiatočným napätím U_i . [9]

$$\phi_1 = 360 \left(\frac{t_1}{T} \right) \quad (2.3)$$

kde: t_1 je čas meraný medzi predošlým kladným priechodom skúšobného napätia nulou a impulzom čiastočného výboja
 T - perióda skúšobného napätia
 ϕ_1 - fázový uhol je vyjadrený v stupňoch [°]

Počiatočné napätie čiastočných výbojov U_i – priložené napätie, pri ktorom sú prvýkrát v skúšanom objekte pozorované opakujúce sa čiastkové výboje, ak je napätie priložené k skúšanému objektu postupne zvyšované z nižšej hodnoty, pri ktorej nie sú pozorované žiadne čiastočné výboje. [6]

2.4.2 Fázovo a časovo odvodené veličiny

Ovodené veličiny sú podmienené základnými veličinami. Na rozdiel od základných veličín sú odvodené veličiny vyhodnocované ako časové závislosti a fázové závislosti, preto musia byť merané vo viacerých periódach skúšobného napätia.

Časovo závislé odvodené veličiny:

- maximálna hodnota zdanlivého náboja $q_{\max}(t)$,
- stredná hodnota zdanlivého náboja $q_{\text{mean}}(t)$,
- súčtový zdanlivý náboj $q_s(t)$,
- počiatkové napätia výbojov $U_i(t)$,
- koncové napätie výbojov $U_e(t)$,
- početnosť výbojov $n_q(t)$,
- súčtový zdanlivý náboj v časovom intervale periódy skúšobného napätia q_s ,

$$q_s = \sum q_i \quad (2.4)$$

- početnosť výbojov v časovom intervale periódy skúšobného napätia n ,

$$n = \sum i \quad (2.5)$$

- stredná hodnota zdanlivého náboja v časovom intervale periódy skúšobného napätia q_n ,

$$q_n = \frac{q_s}{n} \quad (2.6)$$

- maximálna hodnota zdanlivého náboja v časovom intervale periódy skúšobného napätia q_m ,

$$q_m = \text{MAX}(q_i) \quad (2.7)$$

Fázovo závislé odvodené veličiny:

- funkcia súčtového náboja $H_{q_s}(\phi)$,
- závislosť početnosti výbojov $H_n(\phi)$,
- fázové rozdelenie strednej hodnoty zdanlivého náboja $H_{q_n}(\phi)$,
- závislosť maximálneho zdanlivého náboja $H_{q_m}(\phi)$.

2.4.3 Štatistické operátory

Pomocou štatistických operátorov je možné vykonať analýzu odvodených veličín, ktoré síce obsahujú dôležité údaje o výbojovej činnosti v izolačnom systéme, ale sú ťažko spracovateľné.

Pre diskretnú distribučnú funkciu $f(x)$:

$$f(x) = P(X = q_i) = p_i \quad (2.8)$$

kde: P je pravdepodobnosť
 p_i - pravdepodobnosť výskytu zdanlivého náboja q_i

Je možné definovať momenty rozdelenia:

- všeobecný n -tý moment rozdelenia,

$$\mu_n = \sum (q_i - a)^n \cdot p_i \quad (2.9)$$

- pre $n=1$, $a=0$, prvý moment rozdelenia μ , ktorý predstavuje strednú hodnotu rozdelenia,

$$\mu = \sum q_i \cdot p_i \quad (2.10)$$

- pre $n=2$, $a=\mu$, druhý moment rozdelenia σ^2 , ktorý predstavuje varianciu rozdelenia,

$$\sigma^2 = \sum (q_i - \mu)^2 \cdot p_i \quad (2.11)$$

- pre $n=3$, $a=\mu$, tretí moment rozdelenia Sk , ktorý predstavuje šikmosť t.j. ukazovateľ asymetrie rozdelenia v porovnaní k normálnemu rozdeleniu,

$$Sk = \frac{\sum (q_i - \mu)^3 \cdot p_i}{\sigma^3} \quad (2.12)$$

- ak $Sk=0$ rozdelenie je symetrické
- ak $Sk>0$ rozdelenie je zľava asymetrické
- ak $Sk<0$ rozdelenie je sprava asymetrické

- pre $n=4$, $a=\mu$, štvrtý moment rozloženia Ku , ktorý predstavuje ostrosť rozdelenia v porovnaní k normálnemu rozdeleniu.

$$Ku = \frac{\sum (q_i - \mu)^4 \cdot p_i}{\sigma^4} - 3 \quad (2.13)$$

- ak $Ku=0$ rozdelenie je normálové,
- ak $Ku>0$ rozdelenie je ostrejšie ako normálové,
- ak $Ku<0$ rozdelenie je tupšie ako normálové.

Výbojová činnosť sa prejavuje v oboch polvnách skúšobného napätia (v dvoch postupnostiach) a môže mať pre každú polvnu periódy iný charakter. Preto sa veličiny $H_{qn}(\varphi)$ a $H_n(\varphi)$ rozdeľujú pre kladnú a zápornú polvnu skúšobného napätia na $H_{qn}(\varphi)^+$, $H_n(\varphi)^+$, $H_{qn}(\varphi)^-$, $H_q(\varphi)^-$ a momenty rozloženia na Sk^+ , Ku^+ a Sk^- , Ku^- . Rozdelenia $H_{qn}(\varphi)$ a $H_q(\varphi)$ sú ešte definované počtom vrcholov, strednou hodnotou a počiatočnou fázou.

Výbojová asymetria Q je pomerom stredných hodnôt súčtového zdanlivého náboja v kladnej a zápornej polvne podľa vzorca 3.16.

$$Q = \frac{\frac{Q_s^-}{N_q^-}}{\frac{Q_s^+}{N_q^+}} \quad (2.14)$$

- kde: Q_s^+ je súčtový zdanlivý náboj v kladnej polvne skúšobného napätia
 Q_s^- - súčtový zdanlivý náboj v zápornej polvne skúšobného napätia
 N_s^+ - početnosť výbojov kladnej polvne skúšobného napätia
 N_s^- - početnosť výbojov v zápornej polvne skúšobného napätia

Fázová asymetria ϕ je možné vypočítať:

$$\phi = \frac{\varphi_i^-}{\varphi_i^+} \quad (2.15)$$

- kde: φ_i^+ je zapalovacie napätie výbojov v kladnej polvne skúšobného napätia,
 φ_i^- - zapalovacie napätie výbojov v zápornej polvne skúšobného napätia.

3 Modelovanie výbojovej činnosti

3.1 Analýza súčasného stavu modelovania výbojovej činnosti

Modelovanie výbojovej činnosti je pre prax dôležité pre potreby určenia druhu výbojovej činnosti v sledovanom zariadení. Kým pri elektrických metódach, či už on-line alebo off-line, meraním zdanlivého náboja vieme určiť celkové množstvo náboja pochádzajúceho z čiastkových výbojov a teda globálne zhodnotiť rozsah poruchy, ale nevieme na základe tejto veličiny určiť zdroj resp. druh poruchy ktorý je zdrojom týchto výbojov. Určiť druh poruchy, pri elektrických metódach môžeme pomocou fázového rozloženia tohto náboja na fáze skúšobného napätia. Pre každý druh poruchy je charakteristické iné fázové rozloženie výbojov a preto je potrebné toto rozloženie náboja „odtlačok prsta“ poznať. Pre zmapovanie tohto fázového rozloženia výbojov pri jednotlivých poruchách, je potrebné vytvoriť modely jednotlivých typov porúch, tak aby sa v čo najväčšej miere eliminovali iné zdroje výbojovej činnosti. Modely jednotlivých výbojov je možné realizovať matematickými resp. počítačovými modelmi alebo pomocou fyzikálnych modelov. Problematika modelovania výbojovej činnosti pre potreby rozpoznávania výbojov v praxi nie je taká jednoduchá, ako by sa na prvý pohľad mohlo zdať, a preto stále vznikajú nové modely a nové metódy modelovania výbojovej činnosti, napríklad pomocou štatistických operátorov, metódou konečných prvkov, fyzikálnym modelovaním a iné. [5], [10], [11], [12], [13], [14]

Napriek snahe a rôznym prístupom k modelovaniu výbojovej činnosti neexistuje v súčasnosti univerzálny model, ktorým by bolo možné spoľahlivo nasimulovať všetky možné poruchy, a ako to v praxi často býva, tak aj kombinácie týchto jednotlivých porúch. Keďže správanie sa čiastkových výbojov je ovplyvnené veľkým počtom faktorov (druh poruchy, veľkosť poruchy, geometrickými vlastnosťami poruchy, usporiadania elektród, materiálu a mnoho ďalších) predpokladom pre vytvorenie matematických modelov, alebo ich overenie je potrebné vytvorenie fyzikálnych modelov a podrobná analýza nameraných veličín. [11], [14], [15] Výsledkom meraní na fyzikálnych modeloch je vytvorenie vzorových záznamov prejavov jednotlivých druhov výbojovej činnosti, ktoré môžu byť aplikované na rozoznávanie zdrojov porúch na zložitejších izolačných systémoch, alebo na rozoznávanie porúch izolačných systémoch na reálnych zariadeniach v praxi. [13], [18], [17], [20], [21], [17]

3.2 Fyzikálne modely čiastkových výbojov

Pri návrhu a realizácii fyzikálnych modelov, je potrebné zabezpečiť, aby v každom modeli vznikala výbojová činnosť iba v definovanej poruche a všetky ostatné zdroje porúch boli eliminované. Taktiež je nutné, aby pri meraní boli vylúčené rušenia z meracieho obvodu a okolia.

Proces realizácie fyzikálnych modelov prebiehal v nasledujúcich krokoch:

- výber vhodného izolačného materiálu,
- výber vhodných vysokonapäťových elektród,
- realizácia kontrolnej vzorky t.j. modelu bez porúch,
- overenie kontrolnej vzorky meraním,
- realizácia jednotlivých fyzikálnych modelov výbojovej činnosti.

Výber izolačného materiálu

Pri voľbe vhodného materiálu bol kladený dôraz na to, aby bol použitý materiál, ktorý sa používa v izolačných systémoch v reálnych elektrotechnických zariadeniach. Druhé kritérium výberu bolo, aby daný materiál bol ľahko dostupný a aby sa s ním dalo pracovať bez potreby zložitých technologických postupov. V prvom kroku boli vytvorené pokusné vzorky za použitia polyetylénu, epoxidu a polyuretánovej zalievacej hmoty. Po zhodnotení pokusných vzoriek, ako materiál na realizáciu fyzikálnych modelov bola zvolená dvoj-komponentná polyuretánová zalievacia hmota s pružnosťou tvrdej gummy, vytvrdzovaná pri izbovej teplote, neobsahujúca rozpúšťadlá. V praxi

používaná na stavbu elektrických zariadení, kde sa požadujú látky bez vnútorného pnutia, s dobrými elastickými a elektroizolačnými vlastnosťami (zalievanie transformátorov a káblových spojok).

hranica pevnosti v ťahu	2,4 MPa
ťažnosť pri pretrhnutí	49 %
elektrická pevnosť	26 kV/mm
vnútorná rezistivita pri 23 °C	$2,9 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$
povrchová rezistivita	$2,8 \cdot 10^{14} \Omega \cdot m$
tepelná odolnosť	130 °C

Návrh elektród

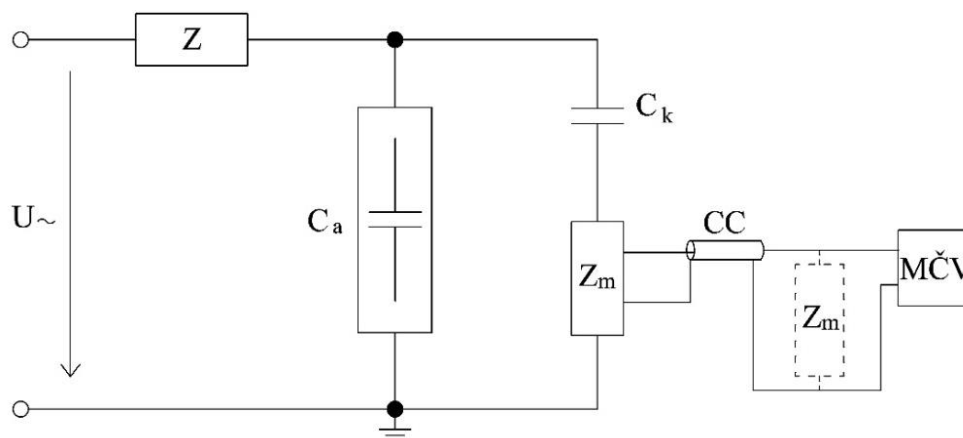
Pre voľbu elektród je potrebné, aby elektrické pole v okolí elektród bolo čo najviac homogénne a tým sa zabránilo vzniku neželaných vonkajších čiastkových výbojov. Túto podmienku je možné splniť vhodným geometrickým tvarom elektród t.j. elimináciou ostrých hrán prípadne vhodným polomerom zakrivených vodivých častí.

Návrh meracej aparatury a zapojenie

Pri návrhu meracej aparatury a skúšobného obvodu je nevyhnuté aby, aby samotná aparatura resp. skúšobný obvod nebol zdrojom rušenia. Zdrojom rušenia v meracom obvode môžu byť: napájací zdroj (drážkové výboje), VN vodivé časti (koróna), nedokonalé spoje vodivých častí na VN aj uzemnenej strane, rušenie z okolia (rušenie z elektrickej siete, rádiové rušenie...).

Merací obvod pozostával z zdroja vysokého napätia (NN regulačný transformátor a VN transformátor s maximálnym výstupným napätím 50kV), väzobného kondenzátora C_k (1000pC), väzobnej impedancie Z_m (AKV 573 – HAEFELY TECH), analógového merača čiastkových výbojov MČV (Tetex 9124), externého kalibrátora (KAL 451 TT – HAEFELY TECH). Keďže merač čiastkových výbojov bol analógový, pre potreby ďalšieho spracovania nameraných údajov, bol na digitalizáciu priebehov použitý digitálny osciloskop (HP 54522A).

Pre elimináciu rušenia z okolia bol celý merací obvod umiestnený v tienenej kabíne. Pre elimináciu koróny boli VN častí meracieho obvodu prepojené rúrovými vodičmi o priemere 2 cm. Pre overenie, že napájací zdroj ani zvyšok aparatury nie sú, zdrojmi rušení a výbojovej činnosti, bolo spravené overenie aparatury, bez zapojeného modelu výbojovej činnosti, v rozsahu 0 – 20 kV, pričom v tomto rozsahu nebola zaznamenaná žiadna výbojová činnosť ani výrazné rušenie. Pozadie resp. rušenie z okolia bolo na úrovni 0,7 – 0,8 pC.

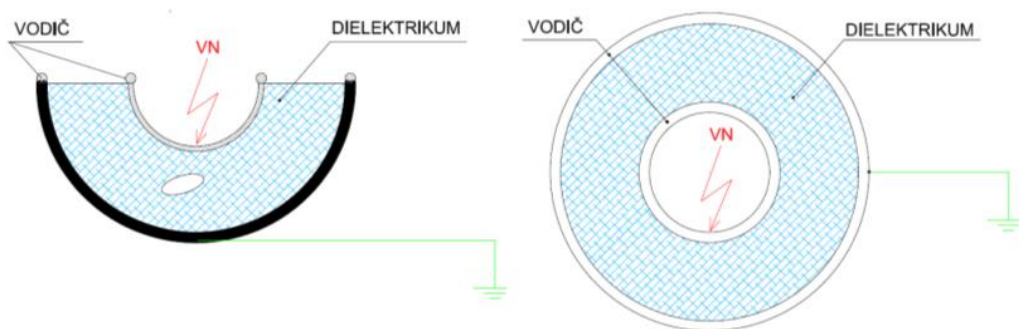


Obr. 3.1 Zapojenie 1 meracieho obvodu pre meranie galvanickou metódou

Na obr. 3.1 C_a reprezentuje skúšaný objekt, C_k väzobný kondenzátor, MČV merač čiastkových výbojov, CC koaxiálny kábel, U vysokonapäťový prívod, Z_m vstupnú impedanciu MČV a Z je filter na zníženie hladiny šumu pozadia z vn zdroja.

3.2.1 Návrh fyzikálnych modelov - 1 návrh

V prvom návrhu a vyhotovení fyzikálnych modelov výbojovej činnosti, z dôvodu dosiahnutia čo najviac homogénneho elektrického poľa, bola použitá elektróda tvaru polgule na uzemnenej časti a elektróda tvaru gule na VN časti. Ako izolant bola použitá zalievacia hmota na báze PUR. Pre odstránenie neželaných porúch (vzduchových bubliniek) a pre zabezpečenie dokonalého prilnutia izolantu k elektródam, po odliati zalievacej hmoty bol model umiestnený do vákuovej komory a vytvrdenie materiálu prebiehalo pri nízkom tlaku. Počas merania pre elimináciu povrchových výbojov bol model umiestnený do nádoby s transformátorovým olejom. Ako prvé bolo realizované meranie na vzorke bez poruchy a podľa predpokladov, nebola v rozsahu 0-20 kV zaznamenaná žiadna výbojová činnosť. Následne bolo realizované meranie na modeli z veľkým počtom bublín v dielektriku, avšak ani pri tomto modeli v rozsahu napájacieho napätia 0-20 kV nebola zaznamenaná žiadna výbojová činnosť. Pri ďalšom zvyšovaní napätia sa začali v obvode prejavovať výboje pochádzajúce z VN zdroja, preto bolo potrebné model prepracovať resp. navrhnuť nový.



Obr. 3.2 Návrh vzorky s dutinou v izolante



Obr. 3.3 Detail modelu

3.2.2 Návrh fyzikálnych modelov – 2 návrh

Pri druhom návrhu modelov pre meranie výbojovej činnosti bola znovu použitá dvojzložková zalievacia hmota na báze PUR, znovu vytvrdzovaná vo vákuovej komore. Elektródy boli použité kovové disky s priemerom 8 cm. Pre rovnomerne rozloženie elektrického poľa a zabráneniu vzniku koróny na elektródach sú hrany elektród zaoblené.



Obr. 3.4 Meracia aparátúra s modelom

Vzorky izolantu boli vyhotovené, ako odliatky v tvare disku o priemere 20 cm a hrúbke 1 cm. Väčší priemer izolačného disku, ako polomer diskov elektród bol zvolený pre zväčšenie povrchovej dráhy, aby sa zabránilo možnému preskoku po povrchu. Ostatné časti meracieho obvodu ostali rovnaké, ako v predchádzajúcom meraní.

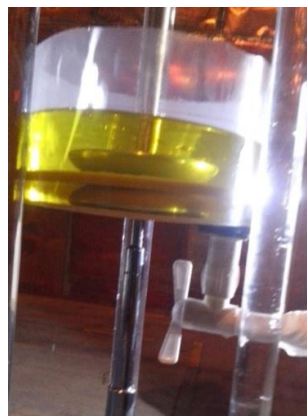
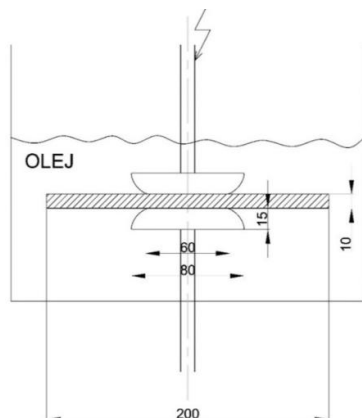
3.3 Modely pre samostatné poruchy

3.3.1 Model S1 – Izolácia bez porúch

Model S1 - bez porúch, bol použitý pre potrebu kontrolného merania a overenie, že v samotnom meracom obvode nevznikajú čiastkové výboje. Maximálna hodnota zdanlivého náboja bola 4 pC pri napájacom napätí 20 kV. Počas celého merania v rozsahu 0 - 20 kV neboli na merači čiastkových výbojov detegované žiadne impulzy pochádzajúce z výbojovej činnosti.



Obr. 3.5 Model S1 – dielektrikum bez porúch (detail)



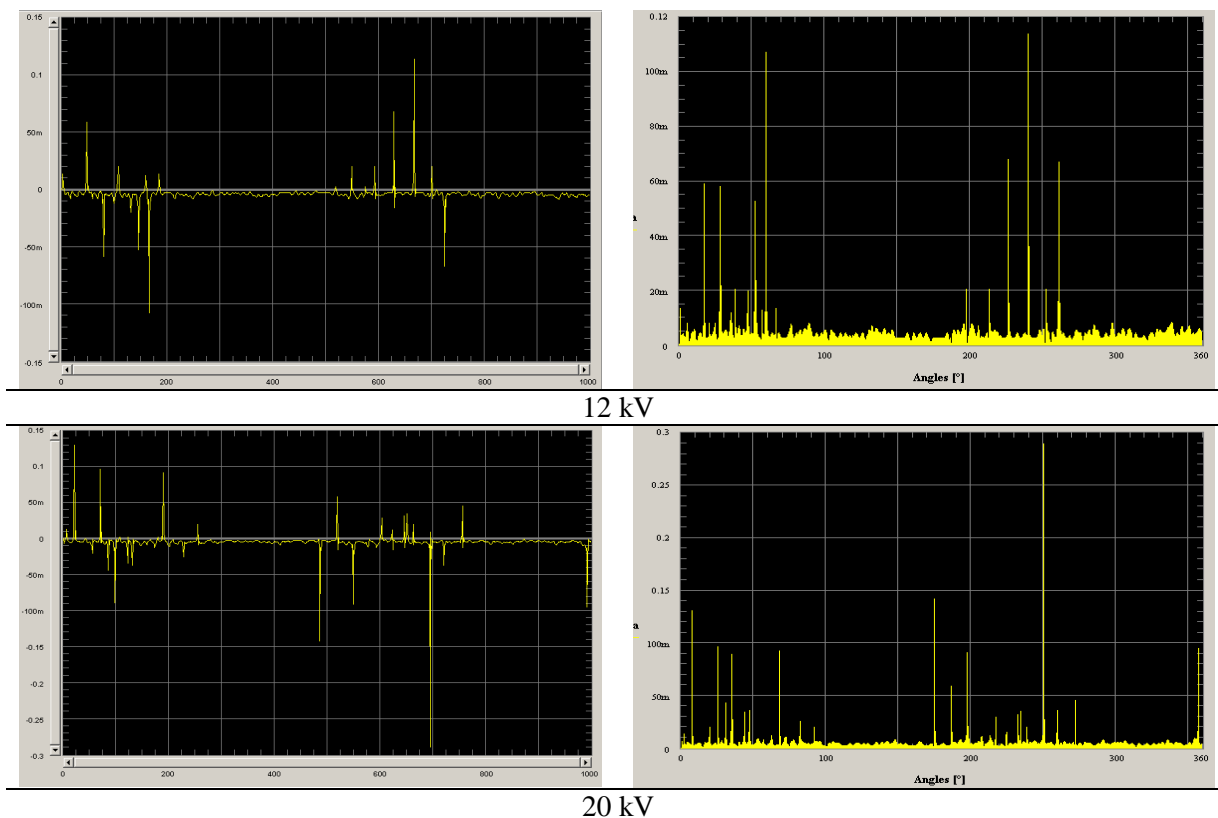
Obr. 3.6 Návrh fyzikálneho modelu

3.3.2 Model S5 – Dutina v izolante

Výboje sa začali objavovať pri napätí 5,8 kV náhodne v oboch polvlnách medzi 35 -65° a 210° - 275° fázy skúšobného napätia, zo začiatku sústredené v okolí 45° resp. 235° a zvyšovaním skúšobného napätia sa postupne rozširovali až do oblasti 10° - 90° a 185° - 275° (obr. 3.8). Zvyšovanie napätia na veľkosť zdanlivého náboja nemalo veľký vplyv a postupne sa náboj ustálil na hodnote 600 pC. Počas znižovania napätia bola pre jednotlivé hodnoty skúšobného napätia veľkosť zdanlivého náboja rovnaká, ako pri tých istých hodnotách počas zvyšovania. Zhášacie napätie výbojov bolo nižšie ako zápalné a to 5,5 kV.



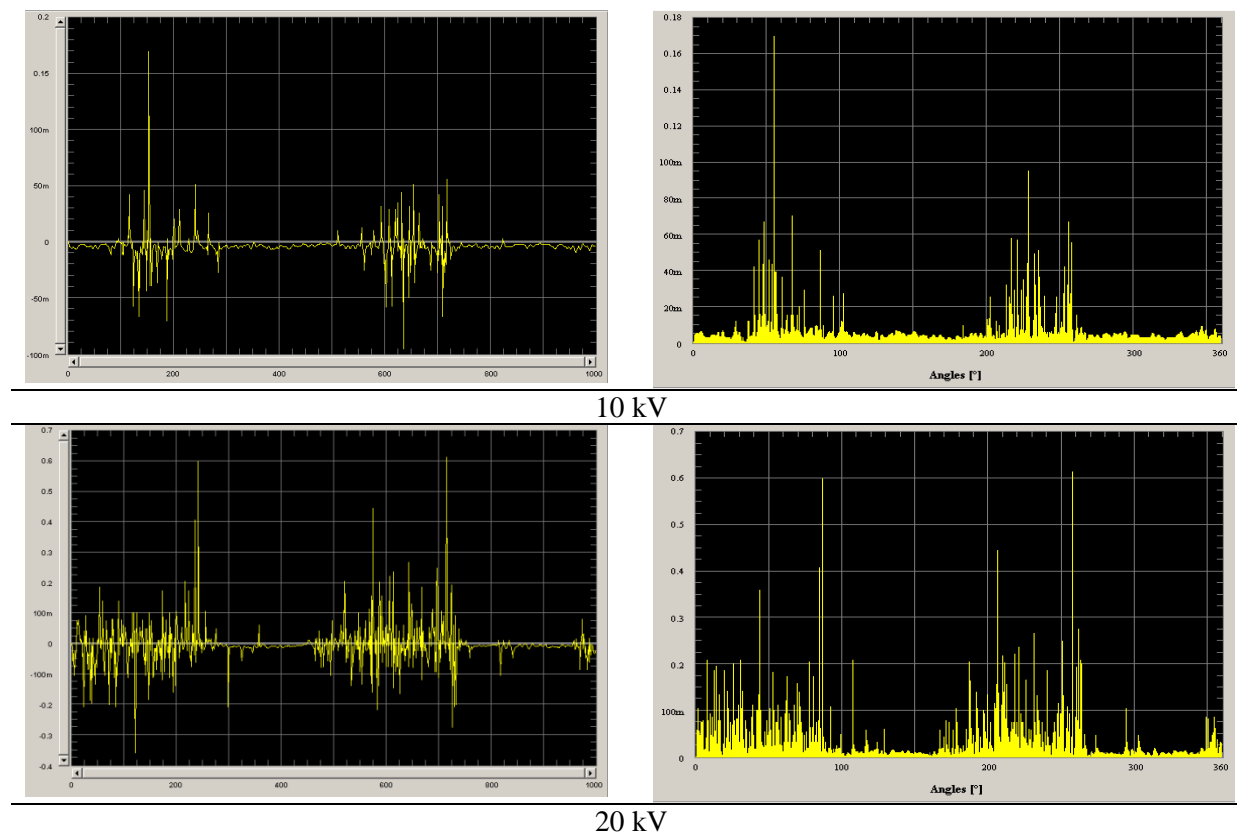
Obr. 3.7 Model S5 - dutina v izolante (detail)



Obr. 3.8 Priebeh a fázové rozloženie náboja - Model S5 – dutina v izolante

3.3.3 Model S6 – Veľké množstvo dutín v izolante

Model S6 – disk izolantu obsahoval veľké množstvo rôznych dutín (bubliniek) v celom objeme izolantu. Dutiny boli vytvorené ešte pre samotným vytvrdnutím materiálu a vytvrdzovanie vzorky neprebiehala vo vákuovej komore. Počiatočné napätie výbojov bolo 5,8 kV a zhášacie 5,1 kV.



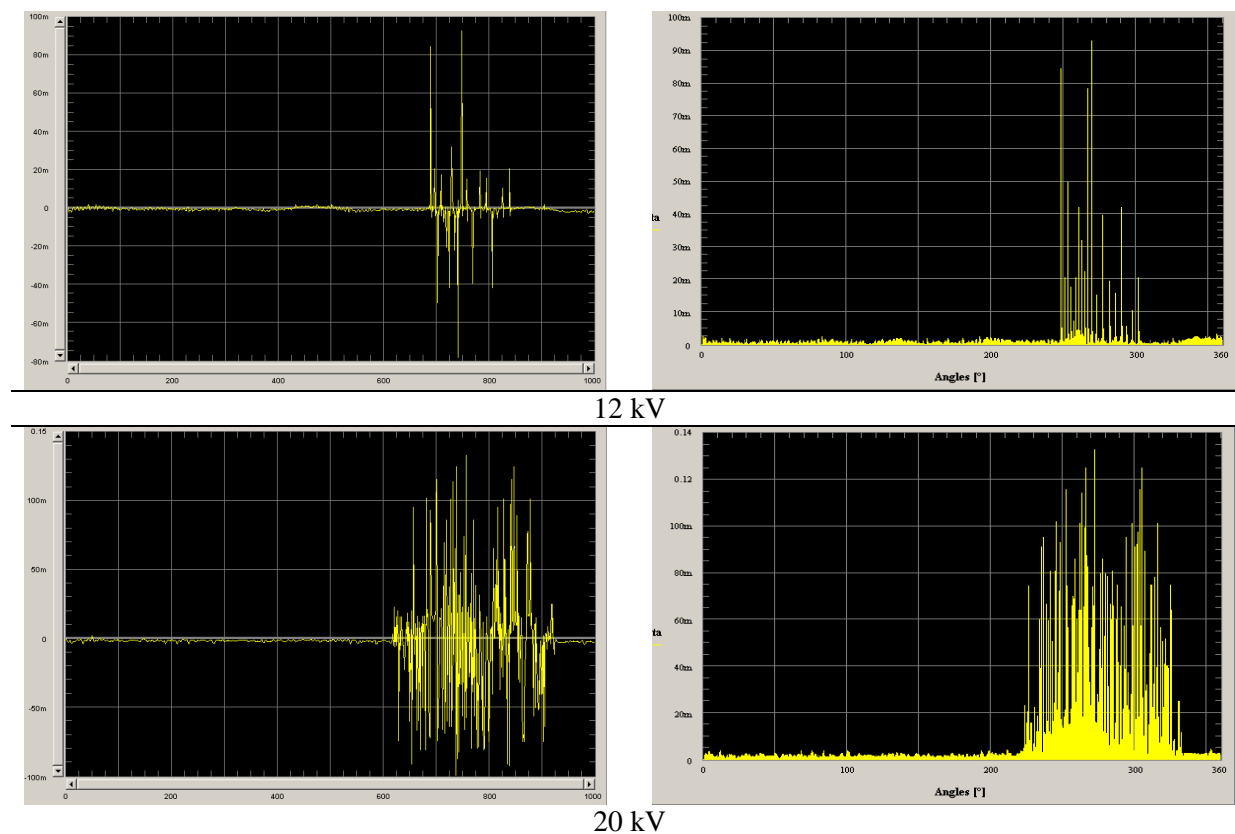
Obr. 3.9 Priebeh a fázové rozloženie náboja - Model S6

3.3.4 Model S7 – Koróna 1 v zapojení: hrot VN / doska uzemnená

Model S7 (obr. 3.10) bol vyhotovený, ako model koróny v zapojení s napájaným hrotom a uzemnenou doskou. Počiatočné napätie výbojov bolo dosiahnuté pri hodnote napájacieho napätia 10,24 kV. Výboje boli rozmiestnené symetricky rozložené v okolí maxima zápornej polvlny napájacieho napätia. So zvyšovaním napätia sa počet výbojov zväčšoval a rozširoval sa interval ich umiestnenia, pri napájacom napätí 12 kV sa výboje nachádzali v oblasti 250-300° a pri napätí 20kV v oblasti 225-330° fázy napájacieho napätia (obr. 3.11).



Obr. 3.10 Model S7 – koróna 1: hrot VN / doska uzemnená



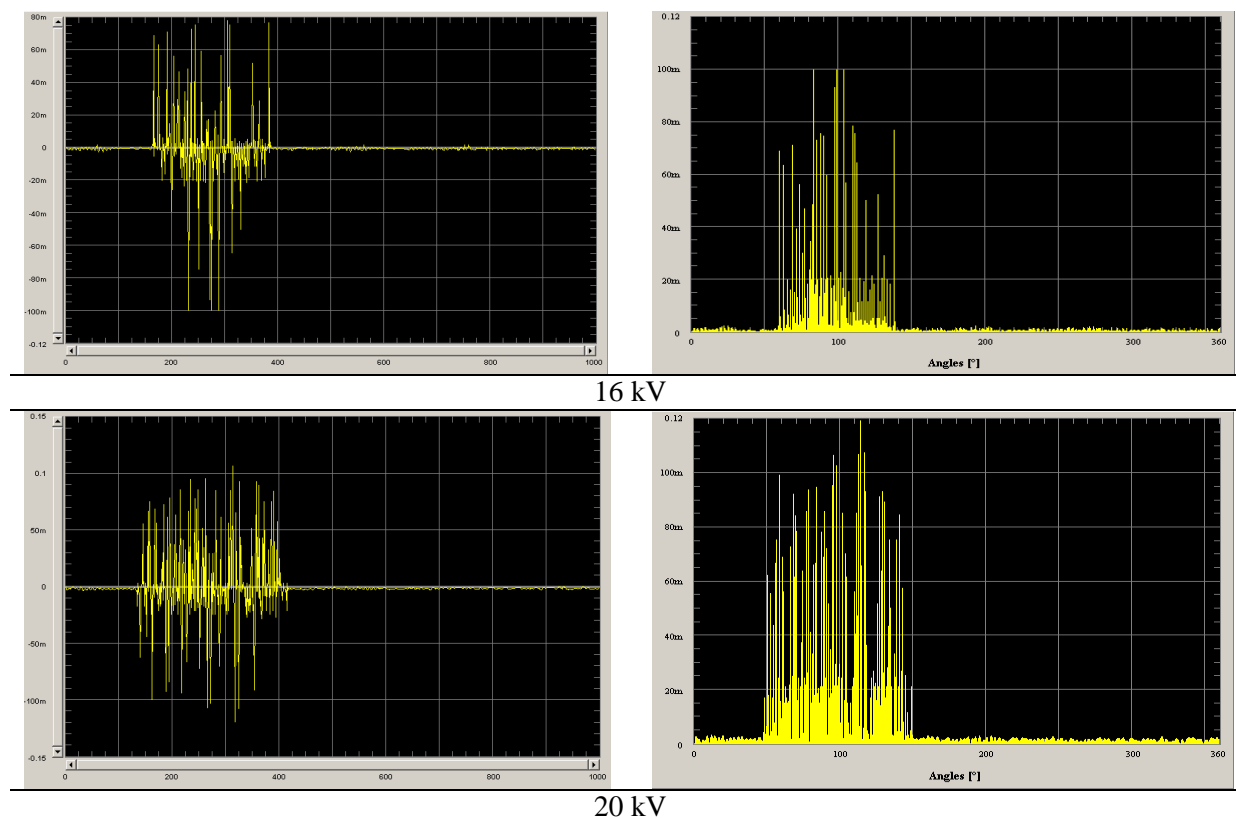
Obr. 3.11 Priebeh a fázové rozloženie náboja - Model S7

3.3.5 Model S8 – Koróna v zapojení: doska VN / hrot uzemnený

Model S8 (obr. 3.12) bol takmer totožný s modelom S7. Na rozdiel od modelu S7, bolo v tomto prípade opačné zapojenie modelu a to tak, že napätie bolo privedené na dosku a hrot uzemnený. Počiatočné napätie koróny bolo 14,12 kV. Výboje sa začali objavovať v kladnej polvlne napájacieho napätia, symetricky rozložené v okolí maxima napájacieho napätia. Zvyšovaním napätia sa zvyšoval počet výbojov a rozširovala oblasť ich výskytu od 60-140° pri 15 kV po 50-150° pri 20 kV (obr. 3.13).



Obr. 3.12 Model S8 - koróna 1: doska VN / hrot uzemnený



Obr. 3.13 Priebeh a fázové rozloženie náboja - Model S8

3.4 Kombinácie porúch

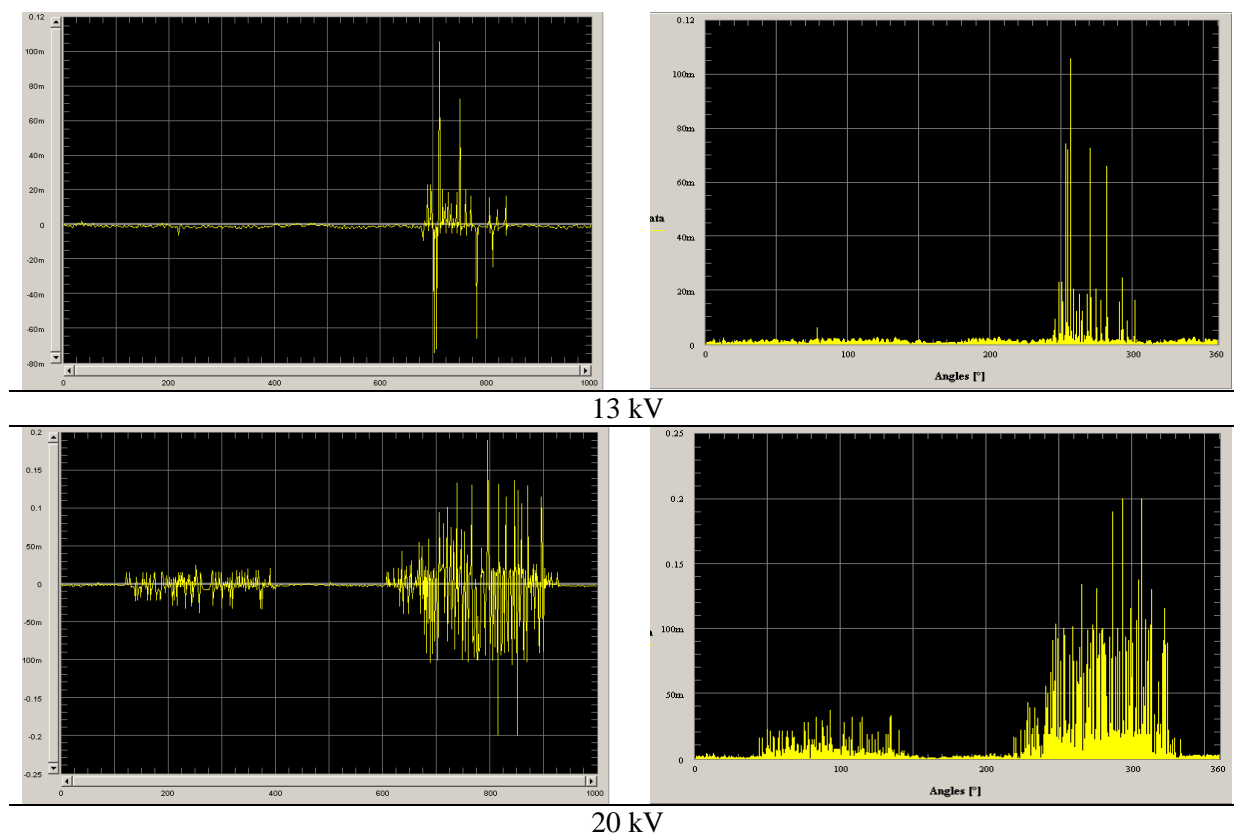
Pre modelovanie viacerých porúch v izolačnom systéme boli použité vybrané modely samostatných porúch. Modely boli zapojené paralelne (obr. 3.14). Postup merania bol rovnaký, ako pri meraniach na modeloch samostatných porúch.



Obr. 3.14 Merací obvod s dvomi rôznymi poruchami

3.4.1 Model K1 – Paralelné zapojenie modelov S7 a S9

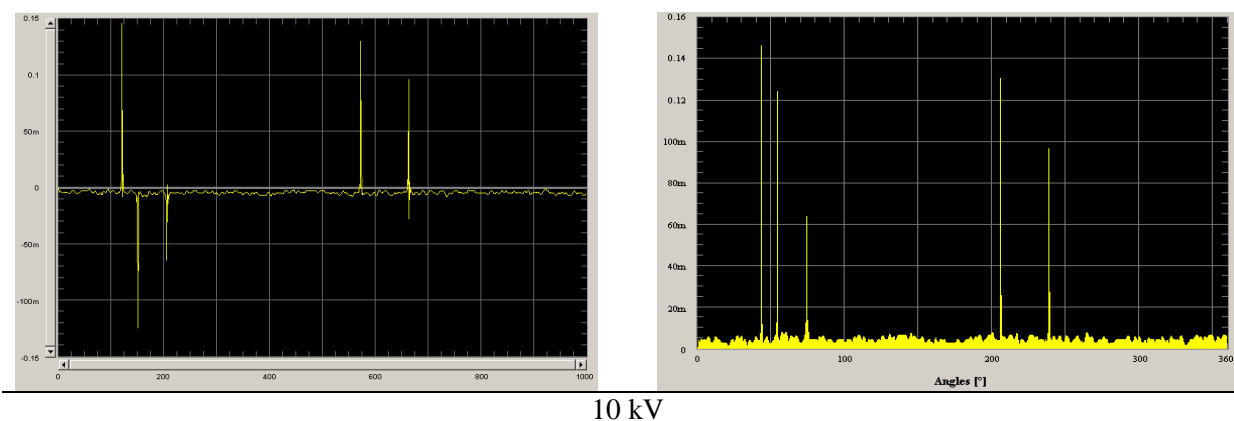
Model K1 bol vyhotovený ako paralelná kombinácia modelov S7 a S9. Počiatočné napätie výbojov bolo rovnaké ako pri modeli S7. Výboje sa začali prejavovať najskôr v zápornej polvne napájacieho napätia, symetricky rozložené v okolí maxima. Pri napätí 12,16kV sa začali výboje objavovať symetricky aj v okolí maxima na kladnej polvne napájacieho napätia. So zvyšovaním napätia sa výboje postupne rozširovali v oboch polvnách a pri dosiahnutí 20kV sa nachádzali v intervaloch 50-145° a 285-300° na fáze napájacieho napätia (obr. 3.15).



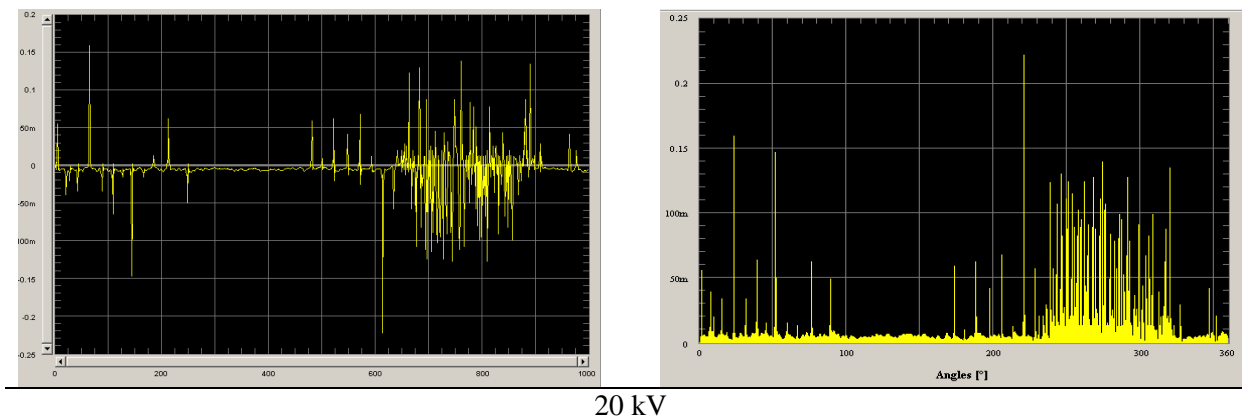
Obr. 3.15 Priebeh a fázové rozloženie náboja - Model K1

3.4.2 Model K3 – Paralelné zapojenie modelov S5 a S7

Model K3, podobne ako model K2 predstavoval dve súčasné, rôzne poruchy v izolačnom systéme. Prvú poruchu predstavovala dutina v dielektriku (model S5) a druhú koróna v zapojení s napájaným hrotom a uzemnenou doskou (model S7). Počiatočné napätie výbojov bolo 5,8 kV. Pri 20 kV boli na fáze napájacieho napätia výboje rozložené v oblastiach 10-90° a 175-325° a to tak, že v zápornej polvne boli výboje s väčšou početnosťou ako v kladnej polvne napájacieho napätia (obr. 3.16).



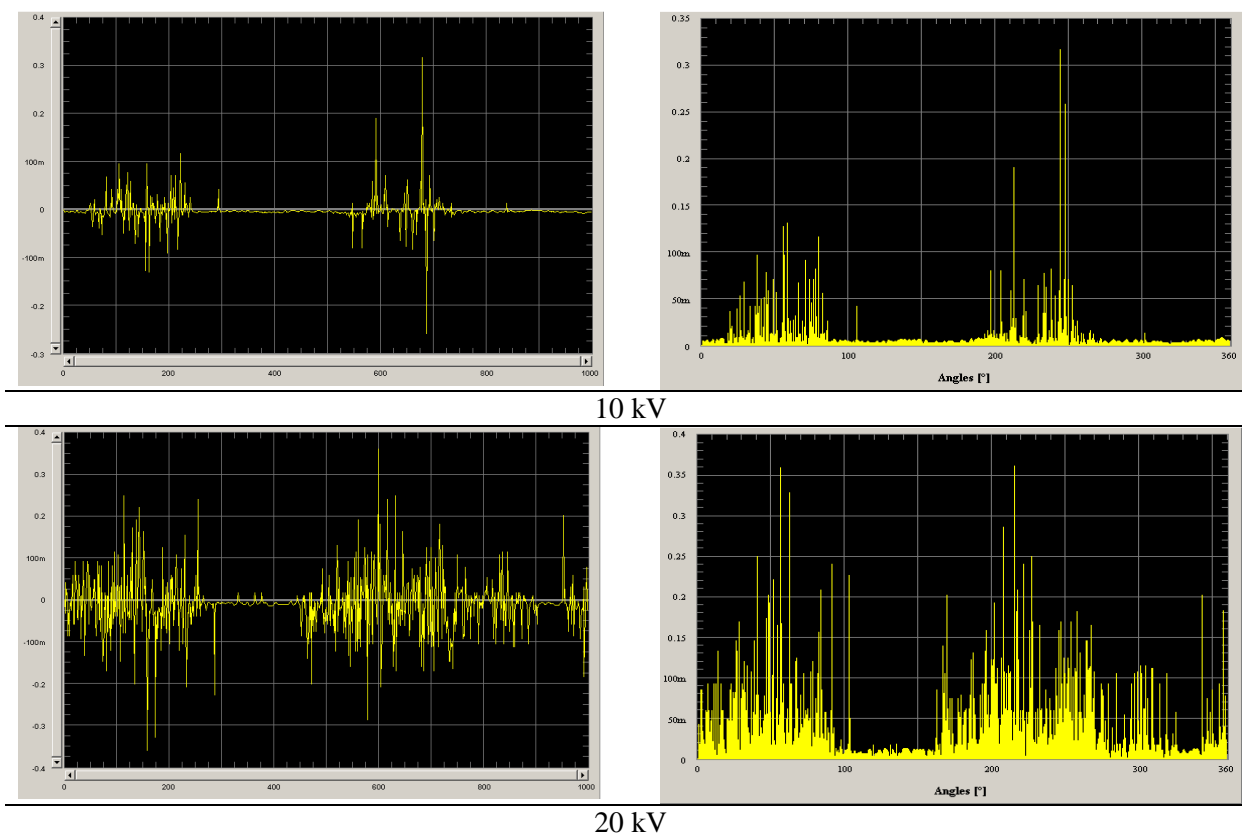
10 kV



Obr. 3.16 Priebeh a fázové rozloženie náboja - Model K3

3.4.3 Model K5 – Paralelné zapojenie modelov S6 a S7

Model K5 bol vyhotovený ako paralelné zapojenie modelov S6 a S7. Počiatočné napätie výbojov bolo 6 kV. Výboje boli rozložené v oboch polvlnách napájacieho napätia približne s rovnakou početnosťou. Od 13 kV začali mať výboje v zápornej polvlnke vyššiu početnosť ako výboje v kladnej polvlnke a zväčšoval sa interval ich rozmiestnenia (obr. 3.17).



Obr. 3.17 Priebeh a fázové rozloženie náboja - Model K5

4 Závery a prínosy pre prax

Cieľom dizertačnej práce bolo riešenie možností diagnostiky stavu izolačného systému so zameraním sa na výbojovú činnosť. Pre potreby vyhodnotenia off-line ale aj on-line elektrických meraní je potrebné dôkladne poznať prejavy výbojovej činnosti nielen pri jednotlivých poruchách, ale aj pre ich kombinácie. Jedeným z merateľných prejavov výbojovej činnosti je meranie zdanlivého náboja výbojov a jeho fázové rozloženie. Kým veľkosť zdanlivého náboja vie vypovedať viac-menej o rozsahu poruchy, tak jej príčinu môžeme analyzovať pomocou jeho fázového rozloženia. Na analýzu takto nameraných fázových rozložení, musíme poznať vzorové rozloženia. Takéto vzorové rozloženia, môžeme získať modelovaním výbojovej činnosti za prísne definovaných podmienok. Získané výsledky na základe experimentálneho monitorovania napäťovo amplitúdovej aj fázovej závislosti pre jednotlivé typy fyzikálnych modelov za prísne definovaných podmienok, sú príspevkom k rozvoju metodiky rozpoznávania výbojovej činnosti v reálnej praxi. Výsledky práce s ohľadom jej prínosu pre prax je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- 1) Návrh realizácie fyzikálnych modelov reprezentujúcich jednotlivé poruchy v izolačných systémoch,
- 2) Návrh realizácie fyzikálnych modelov reprezentujúcich viacero porúch v izolačných systémoch.
- 3) Návrh meracieho pracoviska pre meranie na fyzikálnych modeloch s elimináciou rušivých vplyvov.
- 4) Vytvorenie vzorových rozložení zdanlivého náboja pre vybrané kombinácie porúch izolačného systému.

Záver

Potrebu priebežného diagnostikovania stavu elektrických zariadení si uvedomuje čoraz viac prevádzkovateľov, ale zároveň aj dodávateľov týchto zariadení. Pokiaľ v minulosti boli elektrické zariadenia prevádzkované do poruchy, v súčasnej dobe si prevádzkovatelia začali uvedomovať ekonomické následky nečakaných porúch, a s tým spojené zastavenie výroby a náklady na opravy, prípadne kompletnú výmenu zariadení. Preto v praxi je časť zodpovednosti prenesená aj na dodávateľov. V prípade havárie zariadenia môžu byť všetky náklady spojené s haváriou prenesené aj na dodávateľa. V mnohých prípadoch nie je nákladná samotná oprava, alebo výmena zariadenia, ale zastavenie výrobných procesov. Keďže vznikla potreba v prvom rade zabrániť ekonomickým škodám, v druhom rade zbaviť sa zodpovednosti za spôsobené škody, ako na strane prevádzkovateľa, tak aj na strane dodávateľa, začal tlak na diagnostiku týchto zariadení, ktorá by zabránila nečakaným výpadkom výroby. Jednou z hlavných častí elektrických zariadení, bez ktorých by elektrické zariadenia nemohli fungovať, je izolačný systém. Kým niektoré poškodenia resp. opotrebovania sú na prvý pohľad zrejmé, veľa porúch elektrotechnických zariadení je spôsobené práve následkom zlyhania izolačného systému. Izolačný systém elektrických zariadení môže zlyhať z viacerých dôvodov, napríklad pôsobením vonkajších vplyvov, ako priame mechanické poškodenie izolácie, povrchové chemické poškodenie, tieto poškodenia sú pri pravidelných obhliadkach zariadení väčšinou rýchlo odhalené. Ťažšie odhaliteľné, a preto aj nebezpečnejšie sú poruchy a procesy odohrávajúce sa vo vnútri samotných izolantov. Aj keď sa izolant môže zdať na prvý pohľad neporušený môže obsahovať poruchy, ktoré vznikajú, či už pri samotnej výrobe, alebo vplyvom prevádzky a teda elektrického, mechanického alebo tepelného namáhania. V týchto poruchách vplyvom elektrického poľa vznikajú čiastkové výboje, ktoré ďalej narúšajú izoláciu. Ak sa tieto poruchy neodhalia včas, postupom je izolácia z vnútra natoľko poškodená, až dôjde k jej prirazu a havárii celého zariadenia. Pri meraní výbojovej činnosti, môžeme určiť typ poškodenia pomocou fázového rozloženia čiastkových výbojov, ktorý je charakteristický pre každý druh poruchy. Kým v laboratórnych podmienkach môžeme pomerne presne toto rozloženie náboja zaznamenať a vyhodnotiť, pri meraniach v prevádzke zosnímaný priebeh obsahuje rušenia, alebo nie je možné ho priradiť k žiadnym známym vzorovým rozloženiam. Môže to byť spôsobené tým, že výsledné rozloženie výbojov nie je obrazom prejavov jedného druhu čiastkových výbojov, ale zariadenie obsahuje viacero porúch. V práci sú uvedené možnosti realizácie fyzikálnych modelov výbojovej činnosti pre jednotlivé poruchy, ale aj fyzikálne modely pre prípady viacerých porúch. Vytvorenie vzorových obrazcov rozloženia zdanlivého náboja na takýchto modeloch, môže zlepšiť možnosti diagnostikovania porúch izolačných systémov v praxi. Výsledky je možné aplikovať na off-line ale aj on-line meraniach.

Výber z použitej literatúry

- [1] MARTON, K.: Diagnostika nn a vn zariadení v elektroenergetike z hľadiska teórie a praxe. 1/2006, Košice: s.n., 2006, Starnutie izolačných systémov. ISSN 1337-0103.
- [2] MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P.: Diagnostika elektrických zariadení. Praha : BEN Technická Literatúra, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] ARNOLD, P., KMENT, A. PÍPA, M., JANÍČEK, F.: Insulation System Defects of Renewable Energy Sources. Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE , s. 145--148. ISBN 978-80-89402-64-9.
- [4] PETERSEN, W.: Beitrage zur berechnung der hochspannungsisolierung. s.l.: Archif fur Elektrotechnik, 1912.
- [5] ASHRAF, A., STEWART, B., HEPBURN, D., ZHOU, CH.: Simulation of shock wave due to partial discharge using finite element method. Vancouver, BC : s.n., 2007, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, s. 120-123. ISBN 978-1-4244-1482-6.
- [6] STN EN 60270. Technika skúšok vysokým napätím - Meranie čiastočných výbojov. s.l.: SÚTN, 2002.
- [7] BARTÁK, A., MRAVINÁČ, L., NEUMANN, J., VAŘÁK, J.: Diagnostika poruch izolací elektrických strojů. Praha : STNL, 1984.
- [8] ARTBAUER, J., ŠEDOVIČ, J., ADAMEC, V.: Izolanty a izolácie. Bratislava: ALFA,1969.
- [9] KELEN, A.: The functional testing of HV generator stator insulation. s.l.: CIGRE paper 15-03, 1976. Appendix A.
- [10] AMBIKAI RAJAH, R., PHUNG, B., RAVISHANKAR, J.: The modeling of partial discharge waveforms in power systems equipment. Ho Chi Minh City: s.n., 2012, IPEC, 2012 Conference on Power & Energy , s. 687-691. INSPEC 13566099.
- [11] ILLIAS, R., CHEN, G., LEWIN, P.: Comparison of partial discharge measurement and simulation results for spherical cavities within solid dielectric materials as a function of frequency using Finite Element Analysis method. San Diego, CA: s.n., 2010, Electrical Insulation (ISEI), s. 1-5. ISBN 978-1-4244-6298-8.
- [12] KUPERSHTOKH, A., KARPOV, D., MEDVEDEV, D., STAMATELATOS, C., CHARALAMBAKOS, V., PYRGIOTI, E., AGORIS, D.: Stochastic models of partial discharge activity in solid and liquid dielectrics. 2007, Science, Measurement & Technology, IET (Volume:1, Issue: 6), s. 303-311. ISSN 1751-8822.
- [13] MING, T., JIANYANG, S., JIANZHAO, G., HONGJIE, L., WEI Z., DELIANG, L.: Time-Domain Modeling and Simulation of Partial Discharge on Medium-Voltage Cables by Vector Fitting Method. 2014, Magnetics, IEEE Transactions on (Volume:50 , Issue: 2). ISSN 0018-9464.
- [14] ILLIAS, A., OTHMAN, M., TUNIO, M., BAKAR, A., MOKHLIS, H.: Measurement and simulation of partial discharge activity within a void cavity in a polymeric power cable model. Bologna : s.n., 2013, Solid Dielectrics (ICSD), 2013 IEEE International Conference, s. 105-108. ISBN 978-1-4799-0807-3.
- [15] ILLIAS, H., TUNIO, M.A., BAKAR, A.H., MOKHLIS, H., CHEN, G.: Partial discharge behaviours within a void-dielectric system under square waveform applied voltage stress. 2014, Science, Measurement & Technology, IET (Volume:8, Issue: 2), s. 81 - 88. ISSN 1751-8822.

- [16] ARNOLD, P., KMENT, A., PÍPA, M., JANÍČEK, F.: On-site Partial Discharges Measurement of XLPE Cables. Transactions on Electrical Engineering Vol. 1. 2012, ISSN 1805-3386, s. 107-110.
- [17] CSELKO, R., TAMUS, A.: Occurrence of partial discharges in low-voltage cables at the failure spot. San Juan : s.n., 2012, Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium, s. 5-9. ISBN 978-1-4673-0488-7 .
- [18] PATSCH, P., MENZEL, J., BENZEROUK, D.: The Analysis of PD-Sequences from Different Defects. Bali : s.n., 2006, Properties and applications of Dielectric Materials, 2006. 8th International Conference, s. 31-35. ISBN 1-4244-0189-5.
- [19] MEIJER, S., GULSKI, E., AGORIS, P., SEITZ, P., HERMANST, LAMBALLAIS, L.: Advanced Partial Discharge Measuring System for Simultaneous Testing of Cable Accessories. Bali : s.n., 2006, Properties and applications of Dielectric Materials, 2006. 8th International Conference, s. 687-690. ISBN 1-4244-0189-5.
- [20] YUAN, W., CHUANGLI, G., ZHIPENG, W., PENGCHENG, D.: Partial Discharge Online Monitoring for Hydro-generator. Changsha: s.n., 2011. Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2011 International Conference. ISBN 978-1-61284-278-3.
- [21] MULROY, P., HURTADO, A., BADETZ, D.: On-line partial discharge monitoring system for distribution networks. Bali: s.n., 2012. Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference. s. 542-545. ISBN 978-1-4673-1019-2.

Publikované práce

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - ARNOLD, Peter - JANÍČEK, František. Comparison of mechanical strength and durability of selected cables. In *Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014*. 1. vydanie. Brno: Brno University of Technology, 2014, s. 483-487. ISBN 978-1-4799-3806-3.
- AFC02 LIŠKA, Martin - JANIGA, Peter - CINTULA, Boris - VIGLAŠ, Dominik - ARNOLD, Peter. Distributed generation and its influence on voltage changes in low voltage grids and transformer loading. In *Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014*. 1. vydanie. Brno: Brno University of Technology, 2014, s. 125-129. ISBN 978-1-4799-3806-3.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 ARNOLD, Peter. Experimental Workplace for Analysis of Partial Discharges. In *ELITECH'10: 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010*. Bratislava : STU v Bratislave, 2010, s.CD-Rom. ISBN 978-80-227-3303-8.
- AFD02 ARNOLD, Peter. Physical Models of Discharge Activity. In *ELITECH'11 : 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2011, s.1-4. ISBN 978-80-227-3500-1.
- AFD03 ARNOLD, Peter. Lanové vodiče v elektrických staniách VVN a ZVN, dimenzovanie na účinky skratových prúdov. In *ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2012 [elektronický zdroj : Trenčín, 9.-12.10.2012]*. Bratislava : FEI STU, 2012, s.CD-ROM, s. 165-168. ISSN 1335-2547.
- AFD04 ARNOLD, Peter. Online Measuring Partial Discharges in Cables. In *ELITECH'12 [elektronický zdroj] : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22 May 2012*. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-3705-0.
- AFD05 ARNOLD, Peter. High Voltage Laboratory. In *ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-3947-4.
- AFD06 ARNOLD, Peter - KMENT, Attila - PÍPA, Marek - JANÍČEK, František. Insulation System Defects of Renewable Energy Sources. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.145-148. ISBN 978-80-89402-64-9.
- AFD07 CÍMER, Andrej - ARNOLD, Peter. Lanové prepojenia v rozvodniach distribučnej a prenosovej siete. In *ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011*. Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011, s.259-262. ISBN 978-80-227-3508-7.
- AFD08 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - ARNOLD, Peter - JANÍČEK, František. Photovoltaic Power Plant of National Centre for Research and Application of Renewable Energy Sources. In *Renewable Energy Sources 2013: 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.423-426. ISBN 978-80-89402-64-9.
- AFD09 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - ARNOLD, Peter - JANÍČEK, František. Testing laboratory of solar systems at institute of power and applied electrical engineering. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd.

Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 115-118. ISBN 978-80-89402-69-4.

- AFD10 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - ARNOLD, Peter - JANÍČEK, František. Mechanical strength and electrical tests of selected ACSR cables. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014: Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 169-172. ISBN 978-80-89402-69-4.
- AFD11 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - ARNOLD, Peter - JANÍČEK, František. Photovoltaic power plant at institute of power and applied electrical engineering. In *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1.vyd. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 177-180. ISBN 978-80-89402-73-1.
- AFD12 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - ARNOLD, Peter - JANÍČEK, František. Impulse testing of medium voltage cables. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014*. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 183-185. ISSN 1335-2547.
- AFD13 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - ARNOLD, Peter - JANÍČEK, František. Mechanical strength, heating and electrical tests of ACSR cables. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj]: Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014*. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 180-182. ISSN 1335-2547.

BDE Odborné práce v ostatných zahraničných časopisoch

- BDE01 ARNOLD, Peter - KMENT, Attila - PÍPA, Marek - JANÍČEK, František. On-site Partial Discharges Measurement of XLPE Cables. In *Transactions on Electrical Engineering*. Vol. 1, No. 4 (2012), s.107-110. ISSN 1805-3386.

BED Odborné práce v domácich recenzovaných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- BED01 ARNOLD, Peter - KMENT, Attila - PÍPA, Marek - JANÍČEK, František. On-Site Partial Discharges Measurement of XLPE Cables. In *ELEN 2012 [elektronický zdroj] : Elektroenergetika 2012. Odborná konferencia. Praha, 11.-12.9.2012*. Praha : ČVUT, 2012, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-01-05096-5.

BEF Odborné práce v domácich nerecenzovaných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- BEF01 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - JANÍČEK, František - ARNOLD, Peter. Overovacie merania na 123 kV mobilnej rozvodni. In *Zvyšovanie energetickej bezpečnosti Slovenskej republiky 2013 : zborník z vedeckej konferencie. Modra-Harmónia, Slovenská republika, 28.11.2013*. 1.vyd. Trnava : VUJE, 2013, s.13-17. ISBN 978-80-89402-66-3.
- BEF02 KMENT, Attila - PÍPA, Marek - JANÍČEK, František - ARNOLD, Peter. Medium Voltage Cables Impulse Tests. In *Zvyšovanie energetickej bezpečnosti Slovenskej republiky 2013 : zborník z vedeckej konferencie. Modra-Harmónia, Slovenská republika, 28.11.2013*. 1.vyd. Trnava : VUJE, 2013, s.19-21. ISBN 978-80-89402-66-3.