

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Studijní program: B2644 Aplikovaná elektrotechnika

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Použití kapacitních a induktivních snímačů
pro on-line detekci částečných výbojů**

Vedoucí práce: Ing. Josef Pihera, Ph.D.

Autor: Tomáš Trkovský

2010

Anotace

Tato bakalářská práce nastiňuje problematiku a velmi cenný význam diagnostiky elektrických strojů a přístrojů vn a vvn v moderní elektrotechnice, který spočívá zejména v zjišťování aktuálního stavu těchto zařízení a odhadu jejich chování v dalším provozu. V práci jsou popsány teoretické základy částečných výbojů, včetně používaných základních parametrů a typů těchto částečných výbojů. Zvláště se pak práce zaměřuje na možnosti a metody snímání částečných výbojů a způsoby aplikace těchto metod v provozní diagnostice. Důraz je kladen především na metody on-line, tj. na metody umožňující měření bez přerušování provozu elektrických zařízení. Jsou zde probírány zejména induktivní a kapacitní snímače, které se používají ke snímání výbojové činnosti, jejich výhody a nevýhody.

Klíčová slova

Diagnostika, částečné výboje, senzory částečných výbojů, kapacitní snímače, induktivní snímače, měření částečných výbojů, on-line měření, kalibrace.

Annotation

This thesis outlines problems and high-value signification of high voltage and very high voltage electrical machine and equipment diagnostics in modern electrical engineering, which especially consists in recognition the current state these devices and estimation of their behaviour in further service. In the work are described theoretical principles of partial discharges, including used basic parameters and types of the partial discharges. Especially then the work is focused on possibilities and detection methods of the partial discharges and ways of applying these methods in operational diagnostics. Above all emphasis is placed on on-line methods, i. e. on the methods allow measurement without service interruption of electrical devices. There are discuss primarily inductive and capacitive couplers, which are used as sensors of discharge activities, their benefits and disadvantages.

Key words

Diagnostics, partial discharge, partial discharge sensors, capacitive couplers, inductive couplers, partial discharge measurement, on-line monitoring, calibration.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, které jsou součástí této bakalářské práce.

V Plzni, dne 01. 06. 2010

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za profesionální přístup při konzultacích řešené problematiky, za odbornou pomoc a výborné vedení při vytváření této bakalářské práce.

Obsah

Použité symboly a zkratky.....	8
0 Úvod.....	9
1 Cíle práce.....	10
2 Diagnostika elektrických zařízení.....	10
2.1 Význam diagnostiky.....	11
2.2 Diagnostický systém jako nástroj diagnostiky s aspektem na částečné výboje...	12
3 Částečné výboje.....	14
3.1 Základní parametry částečných výbojů.....	15
3.1.1 Veličiny vztahované k jednotlivým impulsům.....	15
3.1.1.1 Zdanlivý náboj q impulsu částečného výboje.....	15
3.1.1.2 Fázový úhel φ_i a čas t_i výskytu impulsu částečného výboje.....	16
3.1.1.3 Četnost impulsů n	16
3.1.2 Veličiny integrované.....	16
3.1.2.1 Střední proud částečných výbojů I	16
3.1.2.2 Střední kvadratický součet D	16
3.1.2.3 Výkon částečných výbojů P	17
3.1.3 Napětí vztahovaná k částečným výbojům.....	17
3.1.3.1 Zkušební napětí částečných výbojů.....	17
3.1.3.2 Zapalovací napětí částečných výbojů U_i	17
3.1.3.3 Zhášecí napětí částečných výbojů U_e	18
3.2 Typy částečných výbojů.....	18
3.2.1 Typ A.....	18
3.2.2 Typ C.....	19
3.2.3 Typ G.....	20
3.2.3 Typ K.....	21
3.3 Působení částečných výbojů na materiály.....	21
3.3.1 Elektrické účinky.....	22
3.3.2 Erozivní účinky.....	22
3.3.3 Chemické účinky.....	22
3.3.4 Tepelné účinky.....	22
4 Měření částečných výbojů.....	23
4.1 Neelektrické metody měření částečných výbojů.....	23

4.2 Elektrické metody měření částečných výbojů.....	24
4.2.1 Přímé elektrické metody – globální metoda měření částečných výbojů.....	24
4.2.2 Nepřímé elektrické metody.....	25
4.2.2.1 Metoda induktivně vázané sondy.....	25
4.2.2.2 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy.....	27
4.2.2.3 Kapacitní drážková sonda.....	28
4.2.2.4 Kapacitní a induktivní snímače.....	29
4.2.2.4.1 Kapacitní sondy.....	29
4.2.2.4.2 Induktivní sondy.....	33
4.2.2.5 Praktické použití kapacitních a induktivních snímačů pro on-line měření částečných výbojů.....	35
4.2.3 Kalibrace měřicí soustavy.....	36
5 Závěr	38
6 Literatura	39

Použité symboly a zkratky

A_1	vstupní amplituda
A_2	výstupní amplituda
C	kapacita snímače
D	střední kvadratický součet
E	intenzita elektrického pole
F	přenosová funkce
H	intenzita magnetického pole
I	střední proud částečných výbojů
i_1	primární proud
i_2	sekundární proud
k	koeficient transformace
L	vlastní indukčnost cívky
M	vzájemná indukčnost
N	počet závitů
n	četnost impulzů
P	výkon částečných výbojů
q	zdánlivý náboj
R	činný odpor
t_i	čas výskytu impulzu částečného výboje
U_e	zhášecí napětí částečných výbojů
U_i	zapalovací napětí částečných výbojů
v_n	vysoké napětí
v_{vn}	velmi vysoké napětí
Z	zisk
φ_i	fázový úhel výskytu impulzu částečného výboje
ε	permitivita
ε_r	relativní permitivita
ε_0	permitivita vakua
μ	permeabilita
μ_r	relativní permeabilita
μ_0	permeabilita vakua
ω	úhlová frekvence

0 Úvod

Moderní elektrické stroje a přístroje se vyznačují dielektrickými systémy, které mají poměrně složité uspořádání, navíc z různých dielektrik. V současné době je nereálné vyrobit izolační systém jakéhokoliv elektrického zařízení (např. elektrického točivého stroje či výkonového transformátoru) bez plynných dutinek v izolaci, ve kterých dochází při provozu zařízení k elektrickým průrazům. Jelikož tyto průrazy jsou neúplné, částečné, nedojde k úplnému překlenutí mezi dvěma elektrodami o různých potenciálech, ale pouze k jejich částečnému přemostění, hovoříme o těchto jiskrových výbojích jako o částečných výbojích. Přestože jsou tyto výboje relativně málo energetické, hlavně svojí opakovanou činností způsobují stárnutí izolace a mohou vést až k její destrukci. Objevují se v oslabeném místě izolace, vedou k postupnému rozvoji defektů a pozvolna snižují její elektrickou pevnost až do úplného průrazu. Z tohoto důvodu a se stupňujícími se požadavky na spolehlivost provozu elektrických zařízení vn a vvn se monitorování výbojové činnosti stalo celosvětovým trendem. Díky boomu počítačové a měřicí techniky v posledních desetiletích můžeme měření částečných výbojů považovat za nedílnou součást profylaktického systému a jednu z nejdůležitějších a nejrozšířenějších diagnostických metod v silnoproudé elektrotechnice. S tím souvisí i snaha výrobců a provozovatelů elektrických zařízení o prosazení profylaktiky a základů pravidelné diagnostiky do legislativy (předpisů a norem) a především do provozní praxe.

1 Cíle práce

Cíle této bakalářské práce můžeme shrnout do třech následujících základních tematických bodů, které jsou součástí jejího zadání:

- Specifikace problematiky měření částečných výbojů
- Popis možností snímání částečných výbojů pomocí induktivních a kapacitních snímačů
- Návrh aplikačních možností těchto snímačů

2 Diagnostika elektrických zařízení

2.1 Význam diagnostiky

Současná doba klade velký důraz na přesnost, kvalitu a spolehlivost všech prvků, podsystémů a systémů elektrických zařízení, čímž vzrůstá i význam informací o jejich vlastnostech a chování na všech jejich úrovních a způsobů jejich získávání. Tuto funkci zajišťuje jeden z nejdůležitějších vědních oborů současné moderní elektrotechniky – diagnostika, v souvislosti s elektrotechnikou mluvíme pak přesněji o diagnostice elektrotechnologické. Diagnostika slouží tedy jako prostředek ke zjišťování, určení stavu objektů v obecném slova smyslu.

Diagnostika elektrických zařízení sleduje stav elektrických zařízení po celou dobu jejich života a získává o nich potřebné informace na úrovni [5]:

- prvků elektrických zařízení – materiály pro daný účel (vstupní vlastnosti)
- technologických procesů výroby zařízení (změny vlastností vyvolané zpracováním, kvalita procesu)
- provozu zařízení (změny vyvolané provozními vlivy)

Na úrovni prvků se jedná o výběr vhodných materiálů k danému konkrétnímu účelu na základě struktury a vlastností látek. Jednotlivé látky můžeme modifikovat tak, aby vznikuvší materiál odpovídal podmínkám zadání, tj. splnil dané požadavky. Diagnostika na této úrovni nám poskytuje potřebné informace o parametrech látek (použitých materiálů), o jejich vývoji při modifikaci pro daný účel a následně i informace o interakcích probíhajících při těchto procesech.

Neméně důležité poslání má pak tato diagnostika i ve vlastní výrobě, tedy v oblasti technologických procesů, a to hned v několika rovinách. V první řadě ve vstupních a mezioperačních kontrolách, kde diagnostika včas vyloučí špatné díly z výrobního procesu. Zabráněním postupu výrobku se špatnou částí dalším technologickým procesem má diagnostika značný ekonomický efekt. Dále ve výstupních kontrolách, při kterých je odzkoušen hotový výrobek u výrobce. Je zřejmé, že tato diagnostika má opět značný ekonomický efekt spočívající v omezení záručních řízení a oprav na minimum.

Velmi významné a cenné místo v diagnostice zaujímá provozní diagnostika, která má význam při sledování provozu elektrotechnických zařízení. Je důležitá nejenom ve smyslu

sledování vývoje parametrů zařízení, ale především v rozboru příčin poruch. Vzniklé poruchy jsou zaznamenávány, tříděny a archivovány v databázích. Na základě těchto informací lze provést návrhy směřující ke změnám konstrukce příslušného zařízení, například vyloučením prvků a částí, které byly příčinou opakovaných poruch. Diagnostika je tedy nositelkou zlepšení zařízení. Dále díky diagnostickým informacím lze vypracovat předpověď chování systému v dalším období provozu. Elektrotechnologická prognostika je vlastně završením diagnostiky, tedy tím, co je v této oblasti očekáváno.

Diagnostika elektrických zařízení zahrnuje teorii i metody organizace procesu diagnózy, konstruování diagnostických systémů, zjišťování stavu zařízení, shromažďování údajů o zařízení, prognózování dalšího vývoje vlastností objektů diagnózy (s využitím údajů o genezi zařízení), lokalizování míst poruch, určení instrukcí pro údržbu, návrhy na změny konstrukce a výroby, návrhy na změny provozních podmínek. Z toho je zřejmé, že elektrotechnologická diagnostika má nezastupitelné místo v každém stadiu procesu výroby i provozu elektrických zařízení [5].

2.2 Diagnostický systém jako nástroj diagnostiky s aspektem na částečné výboje

Diagnostika má k dispozici své vlastní prostředky nutné k vykonávání diagnostických činností. Ty v sobě zahrnuje diagnostický systém, který by měl splňovat následující podmínky a požadavky [2], [6]:

- Nutné instrumentální vybavení pro diagnostiku. Tím rozumíme soubor měřidel s vhodnými převodníky, sloužící k převodu stavů diagnostického systému na diagnostické signály a potřebná čidla, která snímají požadované veličiny a projevy diagnostického systému a jsou součástí zařízení. Měřícími prvky a obvody částečných výbojů se zabývá kapitola 4.
- Model diagnostikovaného objektu. Je to model, který umožňuje simulovat bezchybné provozní stavy, poruchové stavy diagnostikovaného objektu včetně všech možností stavů, které se zde mohou vyskytnout. Částečné výboje jsou modelovány převážně na Gemant-Philippovově (trojkapacitním) modelu a Böningově pětikapacitním modelu.
- Volbu přístupu k řešení diagnostického problému. Existuje dvojí přístup, a sice fenomenologický a strukturální. Fenomenologický přístup znamená, že při diagnostice jsou důležité jen reakce diagnostikovaného objektu na vstupní

diagnostické signály a nezajímá nás vnitřní struktura objektu, je jednodušší, jsou s ním četné zkušenosti a používá se již velmi dlouho. Oproti tomu pro strukturální přístup je důležité, co se děje ve struktuře diagnostikovaného objektu, dává podrobnější informace, vyžaduje však nákladnější přístroje a speciálně školenou obsluhu. V souvislosti s částečnými výboji nás zajímají oba přístupy diagnostiky.

- S uvedenou problematikou volby přístupu souvisí další aspekt, kterým je problém destruktivnosti či nedestruktivnosti vykonávaných zkoušek. Destruktivní zkoušky mají dobrou výpovědischopnost, avšak pouze za cenu velké spotřeby testovaného materiálu, který je zkouškami zničen. Nedestruktivní mají menší výpovědischopnost, ale zkoušky jsou ekonomicky méně nákladné a lze je opakovat, testovaný materiál zůstává v podstatě nepoškozen. Pro částečné výboje používáme většinou nedestruktivní zkoušky.
- Volbu postupu diagnózy. Rozlišujeme dvě metody stanovení režimu, jakými bude diagnostika postupovat. Je to metoda off-line a on-line. V současné době je stále častěji upřednostňovaná metoda on-line, která umožňuje diagnostikovat zařízení za plného provozu. U částečných výbojů používáme oba přístupy, metoda off-line je stále ještě rozšířenější metodou, kterou ale pozvolna vytlačuje metoda on-line.
- Znalostní a zkušenostní potenciál. Což znamená erudovaný a na požadovanou úroveň vyškolený personál s odpovídajícími znalostmi a zkušenostmi.
- Stanovení metodologie (postupu) vlastní diagnostiky. Je to určení jednotlivých diagnostických operací, jejich optimalizace, stanovení jednotlivých kroků diagnózy s respektováním ekonomických aspektů.

3 Částečné výboje

Nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu je diagnostická veličina, diagnostický signál. Jedním z nejdůležitějších diagnostických signálů v elektrotechnologické diagnostice elektrických zařízení je detekce přítomnosti elektrických výbojů v pevném, kapalném nebo plynném izolantu izolačního systému.

Pokud dojde v izolačním systému při neúplném průrazu (v pevném dielektriku), přeskočení (v kapalném nebo plynném dielektriku) pouze k částečnému proražení, překlenutí izolace, tzn., že nedojde k úplnému překlenutí mezi dvěma elektrodami o různých potenciálech, ale pouze k jejich částečnému přemostění a zbytek izolace je schopen udržet celé provozní (popř. zkušební) napětí a v případě, že k tomuto jevu dojde v plynném izolantu, mluvíme o tzv. částečném výboji.

Částečné výboje jsou tedy lokální elektrické výboje, které jen částečně zkratují izolant mezi elektrodami. Mohou vycházet přímo z jedné z elektrod nebo mohou probíhat i v dutině izolantu. Tyto malé dutinky, které jsou vyplněny plynem, se vyskytují ve vysokonapěťových izolacích elektrických strojů a zařízení a vznikají při výrobě (v praxi není v lidských silách a ani technologicky možné vyrobit dokonalý izolant bez jakýchkoliv nehomogenit), degradací izolace a účinkem velkého lokálního elektrického namáhání v izolaci, na povrchu izolace v okolí vodičů apod. Jestliže zvyšujeme napětí přiložené na izolační systém, při určité hodnotě napětí se objeví v těchto dutinkách výboje, které mají charakter lavinových nebo drobných jiskrových výbojů [1].

Podle normy [4] je částečný výboj (partial discharge) lokalizovaný elektrický výboj, který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Částečné výboje jsou obvykle důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace a vytvářejí proudové (napěťové) impulzy s dobou trvání mnohem menší než 1 μ s.

Částečné výboje významně zhoršují vlastnosti izolačních systémů. Přestože se vyznačují nepatrnými energetickými hodnotami, svojí opakovanou činností postupně negativně ovlivňují jejich spolehlivost a životnost. Částečné výboje působí na izolační systémy především svými elektrickými, erozivními, chemickými a tepelnými účinky.

Částečné výboje můžeme podle místa jejich výskytu [2] rozdělit zhruba do tří skupin:

- **Vnější částečné výboje** jsou částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení, výboje vyskytující se v místech silné nehomogenity

elektrického pole, v okolí ostrých hran, výstupků na povrchu elektrod (např. doutnavé a korónové výboje)

- **Vnitřní částečné výboje** jsou výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, výboje vyskytující se na materiálových nehomogenitách uvnitř izolace (např. výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku)
- **Povrchové částečné výboje** jsou výboje nacházející se v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, výboje vyskytující se na povrchu izolace (např. drážkové výboje mezi povrchem izolace a dnem (železem) drážky statoru, klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky točivých strojů, průchodkách apod.).

3.1 Základní parametry částečných výbojů

Pro vyhodnocování intenzity výbojové činnosti používáme základní elektrické parametry částečných výbojů [1], [2]. Tyto charakteristické veličiny vypovídají o změně a vývoji výbojové činnosti a lze je mezi sebou snadno porovnávat (při periodických měření částečných výbojů na stejných nebo velmi podobných elektrických zařízeních). Rozlišujeme je na veličiny vztažené k jednotlivým impulsům, na veličiny vztažené na sadu impulsů, tzv. integrované, které jsou odvozeny od veličin základních jejich sumarizací za určitý časový interval T a na napětí v souvislosti s částečnými výboji.

3.1.1 Veličiny vztažené k jednotlivým impulsům

3.1.1.1 Zdánlivý náboj q impulsu částečného výboje (apparent discharge)

Zdánlivý náboj q impulsu částečného výboje je absolutní hodnota náboje, při jehož mžikovém přivedení na svorky zkoušeného objektu náboj vyvolá takovou změnu napětí jako vlastní proudový impuls částečného výboje. Zdánlivý náboj se nerovná skutečnému náboji $q_{\text{čv}}$, který je přenesený reálným částečným výbojem. Nemůže být měřen přímo. Udává se v jednotkách pC (pikocoulombech) a je základním diagnostickým parametrem pro měření a vyhodnocování částečných výbojů.

Běžná hodnota q se standardně pohybuje do 10^4 pC. Pokud hodnota q překročí hranici 10^5 pC, znamená to výskyt nebezpečné výbojové činnosti, doporučuje se provést pokud možno okamžité diagnostické měření pro zjištění zdroje částečných výbojů, vizuální kontrolu vinutí stroje, případně opravu elektrického zařízení a zajistit provádění diagnostických měření v co nejkratších intervalech (maximálně půl roku).

3.1.1.2 Fázový úhel φ_i a čas t_i výskytu impulzu částečného výboje (phase angle)

Fázový úhel φ_i impulzu částečného výboje je dán vztahem

$$\varphi_i = 360 \cdot \left(\frac{t_i}{T}\right) \quad [^\circ] \quad (3.1)$$

kde t_i je okamžitá doba výskytu částečného výboje měřená od předešlého kladného průchodu zkušebního napětí nulou a T je doba periody zkušebního napětí. Vyjadřuje se v úhlových stupních nebo radiánech.

3.1.1.3 Četnost impulzů n (pulse repetition rate)

Četnost impulzů n částečných výbojů je poměr střední hodnoty celkového počtu proudových impulzů vyvolaných výbojovou činností a doby trvání určitého časového intervalu. Vyjadřuje se v impulzech za sekundu. V praxi se mohou uvažovat pouze pulzy o velikosti větší než je minimální předepsaná velikost nebo pulzy nacházející se v určitém předepsaném intervalu těchto velikostí.

3.1.2 Veličiny integrované**3.1.2.1 Střední proud částečných výbojů I (average discharge current)**

Střední proud částečných výbojů I je vyjádřen jako součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivých nábojů za určitý časový interval T dělený délkou tohoto intervalu:

$$I = \frac{1}{T} \cdot [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i| + \dots + |q_m|] \quad [C \cdot s^{-1} \text{ nebo } A] \quad (3.2)$$

Udává se v $C \cdot s^{-1}$ (coulombech za sekundu) nebo v A (ampérech), resp. miliampérech.

Běžná hodnota I se standardně pohybuje do 10 μA . Pokud hodnota I překročí hranici 50 μA , znamená to výskyt nebezpečné výbojové činnosti, doporučuje se provádět diagnostické měření v co nejkratších intervalech (maximálně půl roku), provést vizuální kontrolu vinutí stroje a zjednat případnou nápravu.

3.1.2.2 Střední kvadratický součet D (quadratic rate)

Střední kvadratický součet D je součet druhých mocnin (ploch) jednotlivých úrovní zdánlivých nábojů za určitou délku časového intervalu T dělený tímto intervalem:

$$D = \frac{1}{T} \cdot [q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2 + \dots + q_m^2] [C^2 \cdot s^{-1}] \quad (3.3)$$

Vyjadřuje v $C^2 \cdot s^{-1}$ (coulombech² za sekundu).

3.1.2.3 Výkon částečných výbojů P (discharge power)

Výkon částečných výbojů P je roven střední hodnotě výkonu impulzů částečných výbojů přivedeného na svorky zkoušeného objektu po dobu výbojové činnosti T . Tento výkon je způsoben hodnotami zdánlivého výboje q_i :

$$P = \frac{1}{T} \cdot [q_1 \cdot u_{\check{c}v1} + q_2 \cdot u_{\check{c}v2} + \dots + q_i \cdot u_{\check{c}vi} + \dots + q_m \cdot u_{\check{c}vm}] [W] \quad (3.4)$$

kde $u_{\check{c}v1}, u_{\check{c}v2}, \dots, u_{\check{c}vm}$ jsou okamžité hodnoty testovacího napětí, při kterých nastali částečné výboje o velikosti q_1, q_2, \dots, q_m . Výkon částečných výbojů je vyjádřen ve W (wattech). Jeho velikost je možné určit také přímým měřením. Při střídavém napětí může mimo jiné dojít i k situaci, kdy energie jednotlivých výbojů (součin $q_i \cdot u_{\check{c}vi}$) nabude záporných hodnot, a to v případě, že jsou q_i a $u_{\check{c}vi}$ opačné polarity. Tento diagnostický parametr se používá jako doplňkový parametr pro hodnocení intenzity výbojové činnosti.

3.1.3 Napětí vztahovaná k částečným výbojům

3.1.3.1 Zkušební napětí částečných výbojů (partial discharge testing voltage)

Zkušební napětí částečných výbojů je zkušebním postupem předepsané napětí, při kterém by se na testovaném objektu neměla překročit určitá předepsaná hodnota velikosti částečného výboje. Předepsanou velikostí částečného výboje se rozumí jeho nejvyšší hodnota prezentovaná libovolným diagnostickým parametrem (obvykle q) a je pro konkrétní typ zařízení stanovena příslušnou technickou komisí.

3.1.3.2 Zapalovací napětí částečných výbojů U_i (partial discharge inception voltage)

Zapalovací napětí částečných výbojů je nejnižší hodnota zkušebního napětí, při které lze zachytit stabilní částečné výboje. Zkušební napětí je plynule zvyšováno z určité počáteční nízké hodnoty do chvíle zaznamenání existence těchto výbojů. Jinými slovy, zapalovací napětí částečných výbojů je nejnižší přiložené napětí, při kterém dojde ke vzniku částečných výbojů o intenzitě překračující určitou nízkou předepsanou hodnotu. Udává se ve V (voltech), resp. kilovoltech.

3.1.3.3 Zhášecí napětí částečných výbojů U_e (partial discharge extinction voltage)

Zhášecí napětí částečných výbojů je napětí, při kterém už nelze použitým detekčním obvodem zaznamenat stabilní výbojovou činnost. Zkušební napětí je plynule snižováno z určité vyšší hodnoty až do doby, kdy se částečné výboje stanou nezachytitelnými. Jinými slovy, zhášecí napětí částečných výbojů je napětí, při kterém ustávají částečné výboje přesahující za předepsaných podmínek předepsanou nízkou hodnotu. Udává se ve V (voltech), resp. kilovoltech.

3.2 Typy částečných výbojů

Kromě základních elektrických parametrů, které kvantifikují částečné výboje a postihují změny i trendy výbojové činnosti, používáme při vyhodnocování částečných výbojů také jejich typy. Výsledkem přítomnosti částečného výboje objevujícího se ve zkoušeném objektu je proudový (napěťový) impulz částečného výboje (partial discharge pulse). Podle umístění těchto impulzů částečných výbojů na křivce napájecího napětí, tj. podle fázového úhlu částečných výbojů můžeme určovat druh výbojové činnosti, její povahu a lokalizovat místo výskytu (epicentrum výbojové činnosti) [2].

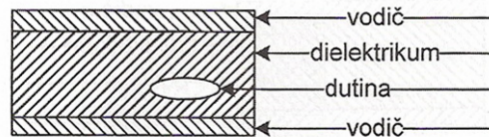
Pozice fázového úhlu výskytu částečného výboje je zobrazována většinou ve formě Lissajousových obrazců napájecího napětí se superponovanými impulzy částečných výbojů, kde značkou 0 je označen průchod napájecího napětí nulou, značkou + (–) kladná (záporná) půlperioda napětí. S rozvojem digitální techniky je v poslední době upřednostňováno zobrazení výbojové činnosti na rozvinuté periodě sinusového zkušební napětí, nicméně pro přehlednost a názornost Lissajousových obrazců jsou tyto obrazce používány pro zobrazení impulsů částečných výbojů dodnes [2].

Pro ilustrativnost si uvedeme pouze čtyři nejcharakterističtější a v praxi nejčastěji se vyskytující typy částečných výbojů. Ve skutečnosti však existuje mnohem podrobnější rozdělení typů částečných výbojů, kde jednotlivé typy se od sebe liší svými modelovými oscilogramy (Lissajousovými obrazci), popř. závislostí velikosti náboje q na zkušebním napětí a značí se velkými písmeny abecedy.

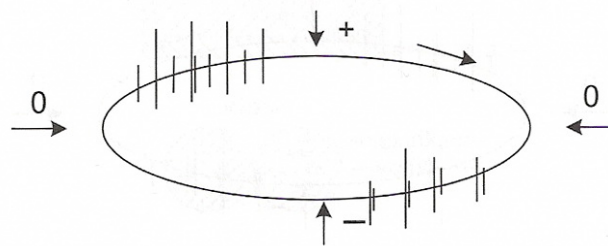
3.2.1 Typ A

Částečné výboje tohoto typu vznikají po přiložení vnějšího napětí na zkoumaný objekt ve vnitřní vzduchové nehomogenně dielektrika (*obr. 3.1*)

Výboje v dutině uvnitř dielektrika mají přibližně stejnou velikost a v přibližně stejném počtu a rozmístění se objevují v kladné a záporné půlčísle na fázi mezi nulou a maximem zkušební napětí. Ve všech po sobě následujících cyklech sinusového průběhu zkušební napětí se částečné výboje vyskytují ve zcela náhodných polohách s různými velikostmi (*obr. 3.2*) [2].



Obr. 3.1 Výboje v dutině uvnitř dielektrika [2]

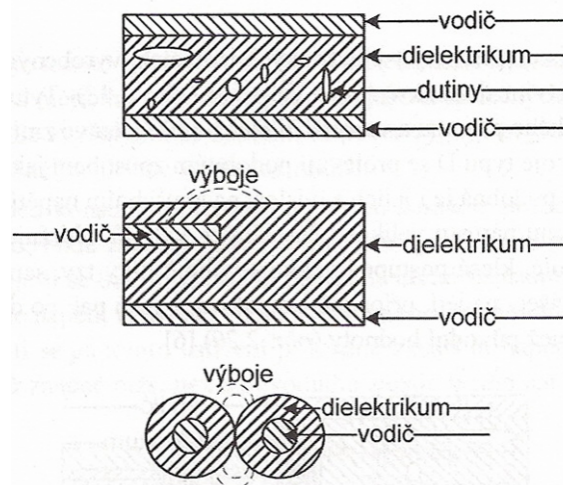


Obr. 3.2 Modelový oscilogram částečných výbojů typu A [2]

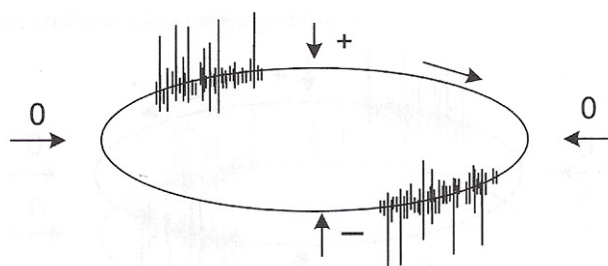
3.2.2 Typ C

Částečnými výboji typu C jsou vnitřní výboje ve větším množství různě velkých dutin, výboje na povrchu dielektrik v místě vysokého gradientu napětí, případně vnější výboje mezi izolací dotýkajícími se vodičů (*obr. 3.3*).

Projevy těchto výbojů jsou obdobné předcházejícím (*obr. 3.4*) [2].



Obr. 3.3 Uspořádání při výbojích typu C [2]

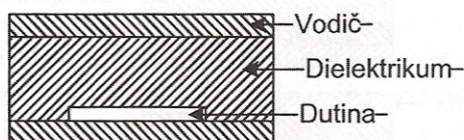


Obr. 3.4 Modelový oscilogram částečných výbojů typu C [2]

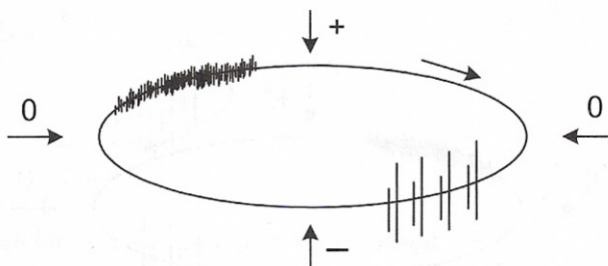
3.2.3 Typ G

V tomto případě se jedná převážně o výboje v dutině mezi vodičem a dielektrikem (obr. 3.5).

Určení výbojů tohoto typu je velmi obtížné (dutinky v dielektriku obsahují uhlíkové částičky, nestejnorodá povrchová vodivost). Při laboratorních simulacích tohoto typu nehomogenity izolace však bylo zjištěno, že pulzy těchto částečných výbojů se superponují na fázi testovacího napětí v oblasti před jeho amplitudou v obou polaritách, přičemž se v jedné půlvlně vyskytuje velké množství malých pulzů a v druhé malé množství pulzů s vysokou amplitudou (rozdíl velikosti pulzů může být až trojnásobný). Rozmístění a velikost pulzů na sinusové křivce testovacího napětí je ve zmíněných oblastech zcela náhodné (obr. 3.6) [2].



Obr. 3.5 Dutina mezi vodičem a dielektrikem [2]

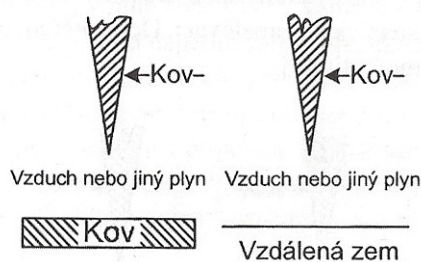


Obr. 3.6 Modelový oscilogram částečných výbojů typu G [2]

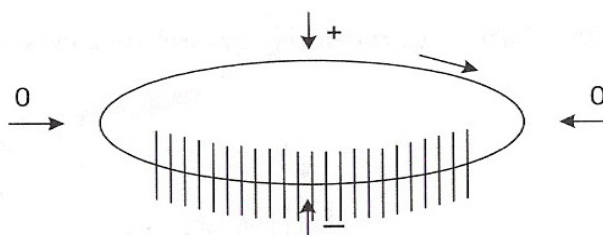
3.2.4 Typ K

Výboje typu *K* vznikají tehdy, je-li přítomna vnější koróna v okolí ostrých kovových hrotů nebo hran (*obr. 3.7*).

Tyto částečné výboje se v detektoru objevují jako pulzy umístěné pouze v jedné půllně napájecího napětí, symetricky rozložené okolo vrcholu napěťové křivky. Všechny pulzy mají srovnatelnou amplitudu a jsou od sebe vzdáleny přibližně o stejný fázový úhel (*obr. 3.8*) [1].



Obr. 3.7 Uspořádání způsobující výboje typu *K* [2]



Obr. 3.8 Modelový oscillogram částečných výbojů typu *K* [2]

3.3 Působení částečných výbojů na materiály

Rozvinutá výbojová činnost způsobuje svojí přítomností selhávání dlouhodobě namáhaných izolací. Destrukční vliv na izolační systém mají zejména vnitřní částečné výboje, které způsobují v nehomogenitách dielektrika a v jejich bezprostřední blízkosti, svými přímými i nepřímými účinky, chemické a fyzikální změny izolantu. Jedná se v podstatě o nevratné změny spojené zejména se snižováním elektrické pevnosti izolantu až na hranici průrazu a se zkracováním životnosti izolantu. Způsobená degradace dielektrik částečnými výboji je následkem především chemické degradace dielektrika a vlivem bombardování stěn dutinky částicemi (např. ionty, elektrony). Vnější částečné výboje trvalý destruktivní vliv nemají.

Výbojová činnost působí svými degradačními účinky více na organické materiály izolantů (např. kompozitní materiály obsahující epoxidová a silikonová pojiva), a to i krátkodobých provozních intervalech. Naproti tomu anorganické skupiny materiálů (slída,

porcelán, ...) jsou proti těmto negativním účinkům částečných výbojů poměrně rezistentní i v dlouhodobých časových intervalech.

Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly, částečné výboje působí na materiály izolačních systémů především svými negativními elektrickými, erozivními, chemickými a tepelnými účinky [2].

3.3.1 Elektrické účinky

Jestliže se v dutince vyvine oblouk, pak se pravděpodobně jeho následkem uvnitř dutinky vytvoří vodivé dráhy. Při vysokých hodnotách intenzity elektrického pole může koncentrace elektrického pole způsobit v tomto místě čistě elektrický průraz a vodivá dráha, která je nasycena nabitými částicemi, se může postupně šířit izolantem.

3.3.2 Erozivní účinky

Tyto částice, zejména ionty a elektrony, mají na izolant ničivý vliv. Bombardováním stěn dutinky způsobují její postupné rozšiřování, které při pokračující erozi může vést až k průrazu celého izolantu.

3.3.3 Chemické účinky

Chemické účinky výbojů vznikají při déle trvajícím elektrickém namáhání. Dutinky obsahují vzdušnou vlhkost, ze které se odlučují chemické prvky a sloučeniny, které spolu pak reagují. Z kyslíku se vlivem působení částečných výbojů vytváří ozon s intenzivními oxidačními účinky. Ozon pak chemickým sloučením s oxidy dusíku může při vysokých teplotách vytvářet i velmi agresivní kyselinu dusičnou. Kyselina dusičná naleptává povrch uvnitř dutinky a rozkládá izolant. Dochází k chemickým reakcím, jejichž výsledkem jsou plynné, kapalné a pevné vedlejší produkty rozkladu izolantů při výbojích. Tyto produkty rozkladu dále difundují do okolního pevného dielektrika a svojí chemickou destrukcí vytvářejí vodivé oblasti nezanedbatelných rozměrů.

3.3.4 Tepelné účinky

Částečné výboje mohou díky oteplení, které jejich aktivita způsobuje, zapříčinit tepelnou nestabilitu a tepelný průraz. Nicméně doposud nebyly prokázány skutečnosti o vlivu teploty na proces stárnutí dielektrika vyvolaný částečnými výboji.

4 Měření částečných výbojů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, existují dva režimy diagnostiky – off-line a on-line. Většina diagnostických měření izolačních systémů elektrických zařízení se dnes provádí v režimu off-line, tj. na odstaveném stroji během jeho opravy či revize. Se vzrůstajícími požadavky na spolehlivost provozu se však stále populárnější a rozšířenější stávají metody on-line, tj. diagnostická měření během provozu stroje. Při měřeních off-line tedy můžeme zatížit izolační systém pouze zkušebním napětím a nikoliv jeho reálným provozním napětím. Další výhoda měření on-line oproti měření off-line spočívá především v možnosti okamžitého zjištění změny stavu izolačního systému, což nám dává dostatek času na sledování rozvoje poruchy a naplánování jejího odstranění [1].

Na základě celé řady různých fyzikálních a chemických projevů částečných výbojů neelektrického a elektrického charakteru můžeme rozdělit měření částečných výbojů do dvou velkých skupin – na neelektrické a elektrické metody detekce.

4.1 Neelektrické metody měření částečných výbojů

Zejména díky neelektrickým jevům jako jsou chemické působení zplodin výbojové činnosti, světelné záření viditelného a ultrafialového spektra, tepelný ohřev okolí a zvukové vlny ve slyšitelném a ultrazvukovém pásmu můžeme dělit neelektrické metody detekce na akustické, optické a chemické [2]. Tyto výše uvedené jevy lze vhodným způsobem detekovat, lokalizovat a kvantifikovat míru rozvinutí výbojové činnosti.

Akustická detekce využívá metod amplitudové analýzy a metod časových diferencí, přičemž snímání probíhá převážně pomocí směrových mikrofonů s vysokou citlivostí v různém frekvenčním pásmu.

Optická detekce se provádí většinou za použití termovize, přímého pozorování ve tmě a fotografického nebo fotoelektrického záznamu.

Chemická detekce využívá rozbor chladicího média, detekci ozónu nebo strukturálních analýz.

4.2 Elektrické metody měření částečných výbojů

Hlavním elektrickým projevem částečných výbojů je vznik proudových impulzů spojený s generováním vysokofrekvenčního magnetického pole. Na měření těchto proudových impulzů, které vznikají působením částečných výbojů v napájecí síti, jsou založeny elektrické metody detekce částečných výbojů.

Výboj v dutině dielektrika vyvolá na svorkách zkoušeného objektu pokles napětí o jistou danou hodnotu, který úměrný náboji proudového impulsu výboje. Tento pokles napětí souvisí s indukčností napájecího obvodu, která nedovolí, aby byl ze zdroje hrazen potřebný úbytek elektrické energie (nábojů). Díky výbojovým procesům vznikne tedy v měřicím obvodu vyrovnávací proud, který na svorkách měřicí impedance vyvolá ekvivalentní měřitelnou napět'ovou odezvu. Takto zaznamenané impulzy napětí, superponované na střídavém napájecím napětí, je vhodné oddělit od síťové napájecí frekvence pomocí vhodného filtru [2].

Mezi elektrické metody pro měření částečných výbojů patří především měření dielektrických ztrát, detekce impulzů nabíjecích proudů, kapacitní a induktivní sondy aj. Tyto elektrické metody můžeme obecně rozdělit na metody globální a metody lokalizační. Při použití globální metody měříme částečné výboje v celém zařízení nebo v jedné jeho fázi najednou a vyhodnocujeme celkový stav izolačního systému. Zatímco při použití lokalizační metody měříme částečné výboje s cílem vyhledat místa zdrojové lokality částečných výbojů. V praxi se obě tyto metody běžně kombinují, nejprve použijeme globální metodu pro zjištění celkového stupně znehodnocení izolace a poté pomocí lokalizační metody určíme místo, lokalizujeme zdroj působení výbojové činnosti.

4.2.1 Přímé elektrické metody – globální metoda měření částečných výbojů

Tato globální metoda je jednou a nejpoužívanějších metod na sledování stavu izolačních systémů. Je založena na přímém snímání proudových impulzů částečných výbojů galvanicky vázanou měřicí impedancí. Tato impedance je většinou realizována RLC členem, který je navržen jako nízkofrekvenční propust s paralelně připojenými ochrannými prvky proti přepětí. Měřicí impedance může být obecně tvořena rezistorem, paralelním zapojením odporu a kondenzátoru a rezonančním obvodem. Jak již bylo uvedeno, dobíjecí impulzní proudy vytvářejí na snímací impedanci úbytky napětí odpovídající zdánlivému náboji q jednotlivých částečných výbojů. Snímací impedance tak slouží k převádění proudových pulzů vyvolaných výboji na výstupní napět'ové pulzy vedené do měřicího zařízení a slouží mimo jiné také

k odfiltrování superponovaných impulzů částečných výbojů od napájecí frekvence [2]. Dalšími nezbytnými součástmi zkušebního obvodu jsou kromě měřicí impedance také zesilovač, picocoulombmetr a osciloskop. Pro tuto metodu měření částečných výbojů existují tři normované základní zapojení: se sériovou impedancí (zapojení impedance do větve vazebního kondenzátoru), s paralelní impedancí (zapojení impedance do větve měřeného objektu) a můstkové zapojení.

Mezi nesporné výhody této metody měření částečných výbojů patří především vysoká citlivost měření (možnost regulace velikostí vazební kapacity), velká výpovědischopnost, malé ohrožení měřeného objektu v režimu on-line (každá součást izolačního systému je na svém pracovním potenciálu, takže nedochází k jeho nadměrnému přetěžování). Mezi nevýhody můžeme počítat citlivost na vnější rušivé vlivy (např. elektromagnetické vlny rádiových vysílačů) a na vnitřní rušivé vlivy (způsobované jednotlivými prvky v měřicím obvodu).

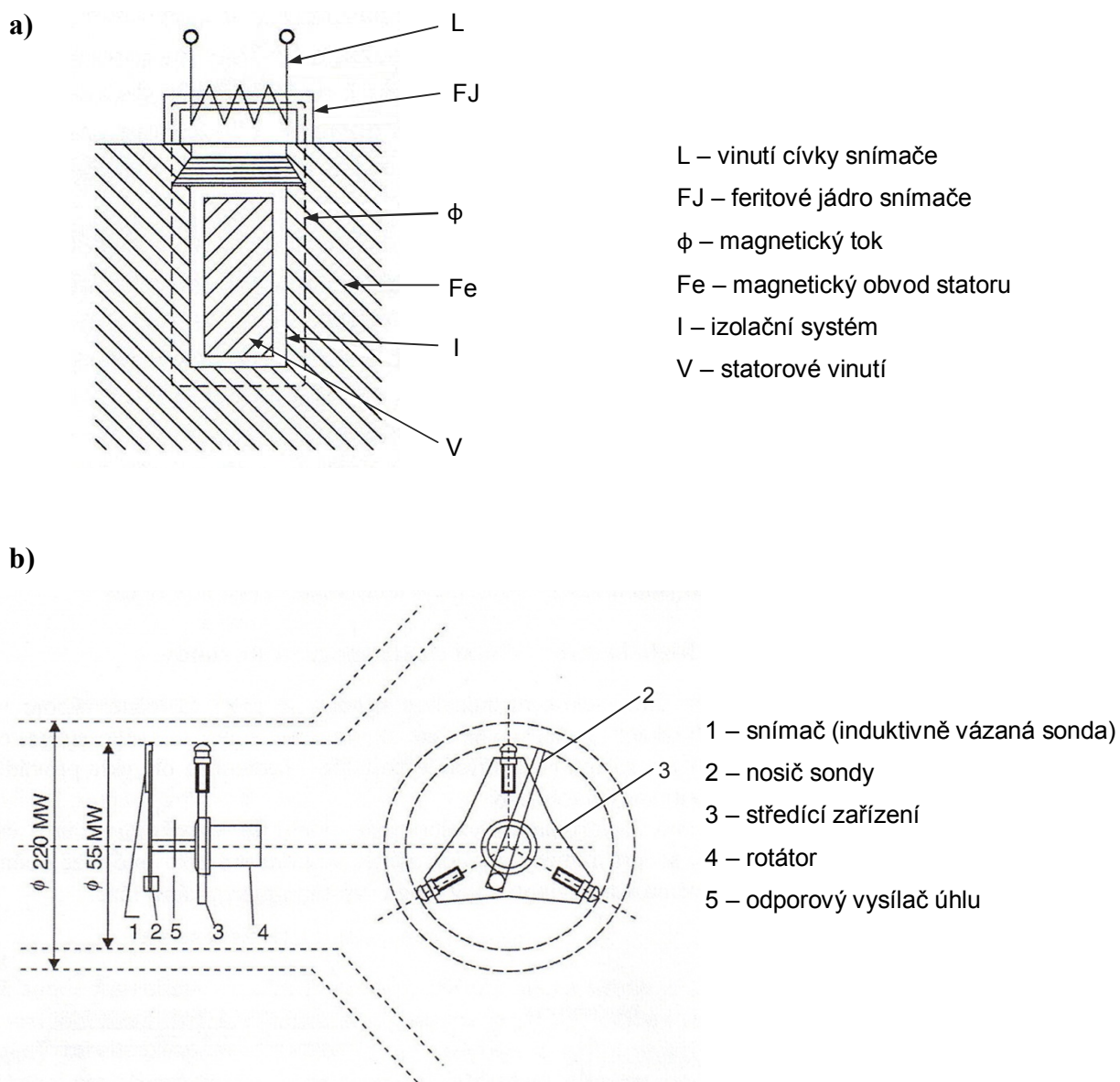
Globální metoda měření částečných výbojů je aplikovatelná na všechny točivé stroje od jmenovitého napětí 1kV a výše, provádí se jako metoda off-line, tj. při odstávce zařízení, v případě trvale instalovaných snímačů lze tuto metodu použít jako metodu on-line, kdy se vyhodnocují časové průběhy diagnostikovaných parametrů.

4.2.2 Nepřímé elektrické metody

Nepřímé elektrické metody jsou založené na skutečnosti, že v poškozeném místě vysokonapěťové izolace dochází k vyzařování energie, přičemž její výkon je odváděn do okolního prostředí. Tuto energii v podobě elektromagnetického pole detekujeme pomocí vhodných snímačů, antén apod.

4.2.2.1 Metoda induktivně vázané sondy

Metoda induktivně vázané sondy patří mezi lokalizační metody, schopné určit s určitou pravděpodobností místo, ve kterém došlo z nejrůznějších příčin ke zvýšené výbojové činnosti. Tento snímač (sonda), přiložený obkročmo na drážku, je tvořen otevřeným feritovým C-jádrem s navinutou cívkou a vytváří spolu s magnetickým obvodem statoru a vodičem (tyčí) proudový transformátor. V cívce sondy („sekundární vinutí“) se indikuje vysokofrekvenční signál o amplitudě úměrné dobíjecím impulzním proudům, které jsou vyvolané výbojovou činností a protékají vodivou tyčí vinutí („primární vinutí“) (*obr. 4.1a*).



Obr.4.1 a) Principiální schéma induktivně vázané sondy [1], b) Instalační schéma induktivně vázané sondy – uložení ve statoru [1]

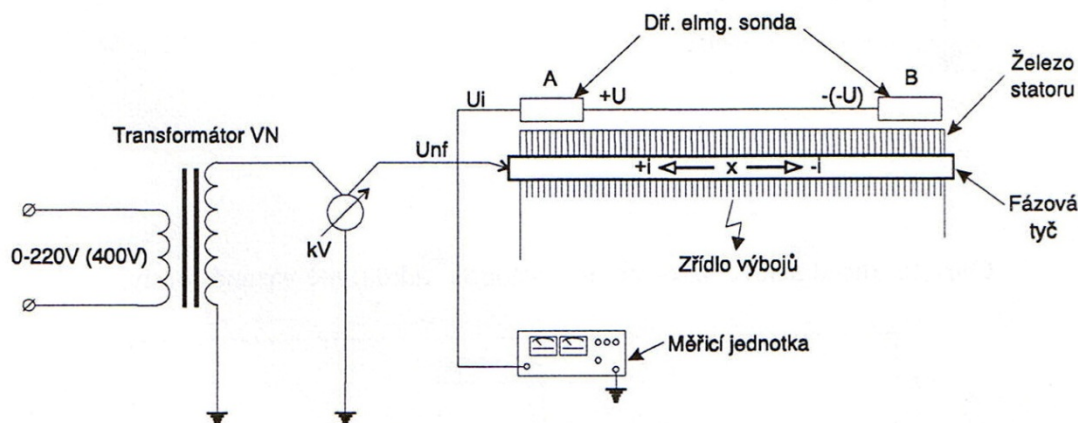
Metodu induktivně vázané sondy lze aplikovat pouze pro turboalternátory řady 55 až 220 MW, v případě hydroalternátorů tato metoda není vhodná z konstrukčních důvodů. Měření se provádí na stroji s demontovaným rotorem, tedy pouze v režimu off-line.

4.2.2.2 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy

Diferenciální elektromagnetickou sondou se měří částečné výboje v jednotlivých drážkách zkoumané fáze statorového vinutí točivého stroje a slouží k lokalizaci zdrojů částečných výbojů.

Impulzní proudy částečných výbojů se šíří vlivem elektromagnetického pole prošetřované fáze z jejich zdroje oběma směry ke koncům vinutí fáze. Diferenciální elektromagnetická sonda je složena ze dvou jednoduchých induktivních sond zapojených elektricky proti sobě, které jsou umístěné na konce jedné drážky vinutí. Znamená to, že se v každé ze sond indukuje napětí stejné velikosti, ale opačného smyslu, úměrné velikosti náboje vybitého v místě vzniku částečných výbojů.

Nachází-li se zřídlo částečných výbojů v části vinutí ohraničené oběma sondami, napětí indukovaná v jednotlivých sondách se sečtou, protože jsou stejné polarity. K sondě A teče proud $+i$ a k sondě B teče proud $-i$ (obr. 4.2). Vinutí sondy B je vinuto v opačném smyslu a indukuje se v něm tedy napětí opačné polarity než v sondě A, takže protéká-li sondou B proud záporné polarity, polarita indukovaného napětí je pak kladná. Je-li zřídlo výbojů mimo úsek vinutí ohraničený sondami, indukovaná napětí v jednotlivých sondách jsou v tomto případě opačné polarity a odečtou se. Tímto zapojením se eliminuje vliv cizího rušení a vliv výbojové činnosti v sousedních drážkách.



Obr. 4.2 Princip měření částečných výbojů diferenciální elektromagnetickou sondou [1]

Metoda měření úrovně částečných výbojů diferenciální elektromagnetickou sondou je vhodná pro hydroalternátory a pro turboalternátory. Jedná se převážně o měření off-line. V případě, že sondu nelze vsunout do vzduchové mezery, je nutné vyjmout rotor.

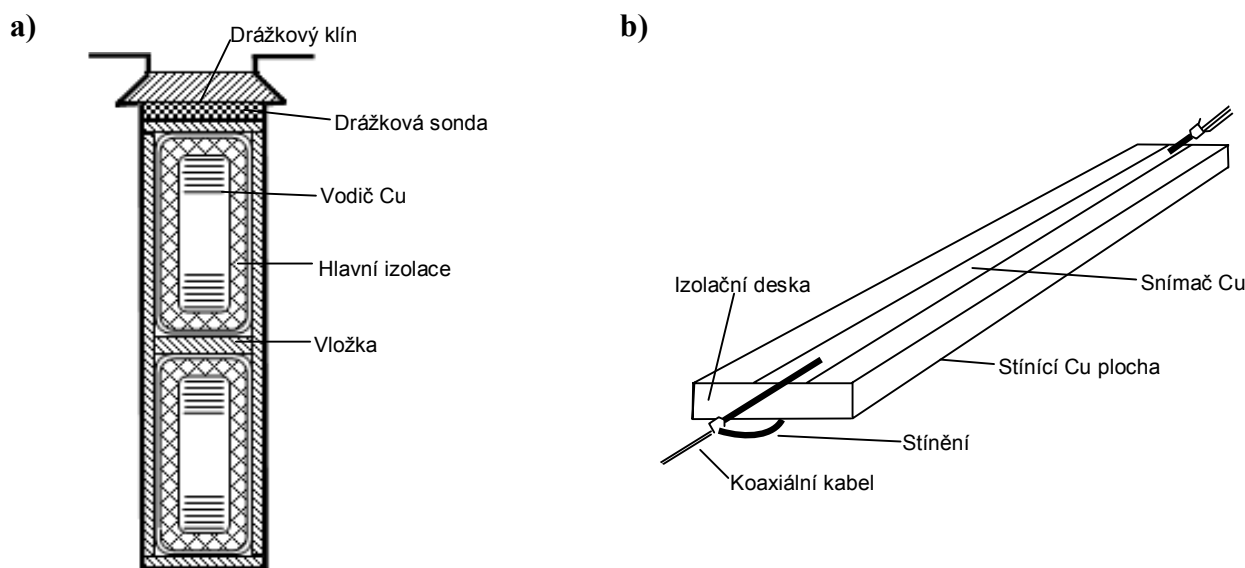
4.2.2.3 Kapacitní drážková sonda

Kapacitní drážková sonda je v podstatě velmi citlivý kapacitní snímač, který se vkládá již při výrobě pod klín do drážky statorového vinutí točivých strojů (*obr. 4.3a*).

Jedná se tedy o metodu on-line, jelikož umožňuje diagnostikovat částečné výboje i za provozu elektrických točivých strojů. Tato metoda umožňuje přesnou lokalizaci výbojové činnosti. Využívá existence elektromagnetického pole, které je vyzařováno do okolního prostoru z míst zdrojů částečných výbojů, tzn. z vnitřku drážek stroje nebo z čel vinutí.

Princip tohoto kapacitního snímače spočívá v detekci a lokalizaci energie elektrického pole impulzů částečných výbojů kovovou strukturou elektrody umístěnou do elektrického pole. Kapacitní drážková sonda je tvořena izolačním materiálem, na jehož jedné straně je vodivá kovová folie (stínění) a na druhé po celé délce vyleptaný úzký měděný pásek vodiče sloužící jako snímač (*obr. 4.2b*). Signály jsou přenášeny z obou konců sondy k vyhodnocovacímu zařízení koaxiálními kabely. Šířka sondy odpovídá šířce drážky statoru a její délka odpovídá $\frac{1}{4}$ délky vlny příslušné k žádané frekvenci. Snímaná šířka pásma této sondy je 10 MHz až 1000 MHz [2].

Kapacitní drážková sonda má řadu výhod, mezi něž patří kromě on-line detekce částečných výbojů i necitlivost vůči vnějšímu rušení a ve spojení s vhodným měřicím zařízením možnost odlišení rušivých signálů [1].



Obr. 4.3 a) Umístění kapacitní drážkové sondy v drážce, b) Schématický náčrtek drážkové sondy

4.2.2.4 Kapacitní a induktivní snímače

Tyto elektromagnetické sondy pro indikaci výbojové činnosti jsou jako ostatní nepřímé metody měření částečných výbojů založeny na principu detekce vyzářené vysokofrekvenční energie z místa vzniku částečného výboje do okolí. Vyzářený výkon w do okolí se skládá ze složky elektrické a magnetické a platí pro něj vztah z [1]:

$$w = -E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial t} - H \cdot \mu \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.1)$$

kde E je intenzita elektrického pole, ε je permitivita, H je intenzita magnetického pole a μ je permeabilita. Kapacitní snímače snímají vyzářované elektrické pole a induktivní snímače pracují na principu snímání magnetického pole. Jejich výhodou je použití on-line, tedy bez nutnosti přerušit provoz zkoumaného zařízení. Slouží převážně k orientační detekci výbojové činnosti. Díky galvanickému oddělení jsou v režimu on-line bezpečné z hlediska ochrany měřicího systému před nebezpečným přepětím v případě průrazu izolace (nebezpečné vysoké napětí se na vstup měřicích přístrojů nedostane) a nevyžadují použití měřicí impedance [1]. Nevýhodou je obtížná filtrace ostatních rušivých elektromagnetických signálů z různých zdrojů.

4.2.2.4.1 Kapacitní sondy

Signály vyzářené částečnými výboji v místě poškození izolačního systému vyvolávají vznik rychlých přechodových jevů v elektrickém poli. Tyto přechodové jevy, které charakterizují výbojovou činnost a trvají velmi krátce (řádově ns), musí být dále zpracovány přístroji měřicího obvodu. To klade tedy zvýšené nároky jak na parametry sond, tak i na následné obvody pro zpracování signálu. Elektrické pole je snímáno senzorem, který tvoří kapacitní sonda zapojená na vstup rychlého diferenciálního zesilovače, jehož signál je zesílen zesilovačem s proměnným zesílením. Výstupní signál z obvodů pro zpracování se dále zpracovává analogově nebo digitálně. Vstup diferenciálního zesilovače musí být navržen tak, aby dokázal co možná nejlépe potlačit vlivy cizích rušivých polí [1].

Důležitým faktorem, který je třeba znát u kapacitního senzoru je jeho frekvenční odezva. Vlastnosti měřicího systému ve frekvenční oblasti jsou závislé na daném měřicím uspořádání. K problému můžeme přistoupit jako k hledání frekvenční charakteristiky – tzv. „black box“. Na vstup měřicího systému se přivádí sinusový signál měnící se frekvence. Na

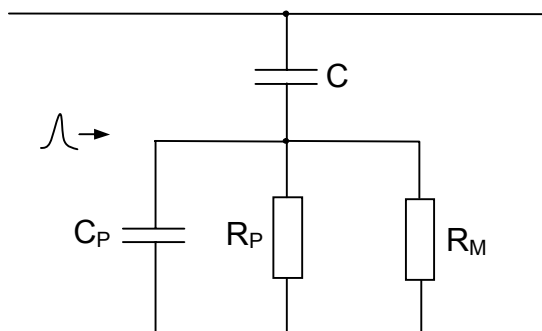
výstupu z měřicího systému je měřena odezva. Zaznamenávána je frekvence a fáze ve vztahu k vstupnímu signálu. Zisk se vypočítává pro každou frekvenci jako poměr výstupní amplitudy ke vstupní amplitudě.

$$Z = 20 \log |F(j\omega)| = 20 \log \left| \frac{A_2}{A_1} \right| \quad (4.2)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}\{F(j\omega)\}}{\text{Re}\{F(j\omega)\}} \quad (4.3)$$

kde Z je zisk (dB), A_1 a A_2 jsou vstupní a výstupní amplituda, $F(j\omega)$ je přenosová funkce sledovaného senzoru, ω je úhlová frekvence. Známe-li frekvenční odezvu senzoru, můžeme určit i mezní frekvence pro přesné měření tvaru impulzu [12].

Nejrozšířenějším typem kapacitní sondy je snímač koaxiálního tvaru (*obr.4.5*). Tato **koaxiální kapacitní sonda** se používá zejména pro detekci částečných výbojů ve vysokonapěťových kabelech. Snímač je tvořen úzkým kovovým páskem, který je po odstranění části vnějšího kovového pláště kabelu ovinut v místě obnažené oblasti kabelu na vnější polovodičové stínění kabelu. Přestože je tento snímač elektroda s relativně vysokým potenciálem, polovodičové stínění kabelu zajišťuje, že snímač neovlivňuje izolační systém kabelu [8], [9]. Náhradní obvod tohoto snímače představuje *obr. 4.4*.



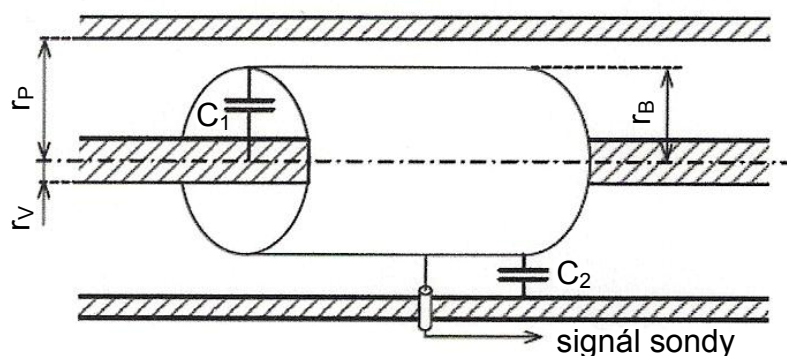
Obr 4.4 Náhradní obvod kapacitního snímače

kde R_P je povrchový odpor mezi snímačem a kovovým pláštěm, který závisí na odporu polovodičové vrstvy, R_M je měřicí odpor, je to vstupní odpor měřicího obvodu, C_P je kapacita mezi snímačem a pláštěm a C je kapacita snímače, která závisí na délce snímače a kapacitě

kabelu na jednotku délky C_0 . Tato kapacita na jednotku osové délky je dána podle [1], [8] vztahem:

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.4)$$

kde r_1 je vnitřní poloměr, r_2 je vnější poloměr koaxiálního vedení, ε_r je relativní permitivita izolantu a ε_0 zde zastupuje permitivitu vakua, jejíž hodnota je $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr 4.5 Schéma kapacitní sondy

Dosadíme-li z obr. 4.5 do výše uvedeného vzorce délku sondy l , poloměr vodiče r_V , poloměr sondy r_B , poloměr vnějšího pláště (stínění) kabelu r_P , obdržíme pro kapacity C_1 a C_2 vztahy:

$$C_1 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln \frac{r_B}{r_V}} \quad \text{a} \quad C_2 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln \frac{r_P}{r_B}} \quad (4.5)$$

V případně homogenní izolace je faktor přenosu ρ dán podle [1]:

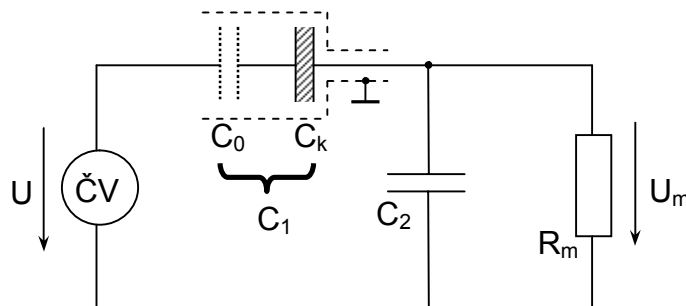
$$\rho = \frac{C_1 + C_2}{C_2} = \frac{\ln \frac{r_B}{r_V} \cdot \ln \frac{r_P}{r_B}}{\ln \frac{r_P}{r_B}} \quad (4.6)$$

Citlivost sondy je dána převážně její délkou, protože její průměr je limitován geometrickými rozměry zkoumaného kabelu. Mezi nevýhody kapacitních sond patří nemožnost určit elektricky odstíněné zdroje částečných výbojů a nutnost přerušování silového obvodu v okamžiku jejich aplikace.

Kromě koaxiálních kapacitních sond se používají i **kapacitní sondy terčikového typu**. Kondenzátor je vytvořený terčikem z Cu elektrody, který se zkoumanou izolací a jejím

kovovým jádrem představuje kapacitu s případným místem poškození nebo se místo kovové elektrody snímač osazuje keramickým kondenzátorem (převážně diskového tvaru) s vysokou relativní permitivitou. Pokud je kondenzátorový disk oboustranně pokovovaný (Ag) umožňuje měření přímým dotykem na uzemněnou část vn.

Základní princip kapacitní detekce částečných výbojů je dán náhradním zapojením (obr. 4.6). Poškozené místo izolace vyzařuje reálnou složku intenzity elektrického pole (E) a magnetického pole (H) úměrnou velikosti amplitudy proudového impulzu odpovídající částečnému výboji. Kapacitní snímač indikuje elektrické pole. Náhradní schéma se skládá z fiktivního zdroje signálu U a vstupní RC části zesilovače náboje [11]. Základ obvodu tvoří kapacitní snímač C_1 .



Obr 4.6 Náhradní obvod kapacitního snímače

kde U je signál částečného výboje, C_k kapacita snímače, C_0 kapacita mezi snímačem a zkoušeným objektem, C_2 vstupní kapacita zesilovače a R_m vstupní odpor zesilovače.

Pokud je kapacitní sonda o kapacitě C_k umístěná v určité vzdálenosti nad měřeným objektem vytváří se kapacita C_0 (vzduchová mezera, částečná kapacita izolace apod.). Výsledná kapacita C je pak daná sériovým zapojením obou kondenzátorů.

Přenosová funkce obvodu v komplexním tvaru [11]:

$$\frac{\bar{u}_m}{\bar{u}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega R_m}(C_1 + C_2)} \quad (4.7)$$

Mezní frekvenci obvodu vyjádříme vztahem [11]:

$$f_m = \frac{1}{2\pi R_m(C_1 + C_2)} \quad (4.8)$$

$$\text{kde: } R_m(C_1 + C_2) = \tau \quad (4.9)$$

Úpravou komplexního tvaru (4.7) získáme rovnici přenosové funkce pro poměr napětí [11]:

$$\frac{U_m}{U} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \omega\tau \sqrt{\frac{1}{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (4.10)$$

4.2.2.4.1 Induktivní sondy

Induktivní sondy pracují na principu snímání magnetického pole vyzařovaného zdrojem částečných výbojů. Výhodou v porovnání s kapacitními snímači je jejich vysoká citlivost. Lze je podle způsobu použití rozdělit na dva typy, na toroidní sondy a na lineární induktivní sondy.

Toroidní induktivní sondy mají proudové obvody magneticky svázané, viz. obr. 4.7. Primární vinutí je tvořeno vodičem pracovního uzemnění procházejícího středem toroidu. Sekundární vinutí je tvořeno vlastním vinutím sondy navinutým na toroidu. Jádrem toroidu je obvykle tvořeno z magneticky měkkého materiálu, který je vhodný pro aplikace v oblasti velmi slabých magnetických polí. Tyto toroidy mají úzkou hysterezní smyčku a vyznačují se snadným zmagnetizováním i odmagnetizováním, mají vysokou hodnotu počáteční a maximální permeability a malé měrné ztráty. V ideálním případě platí pro sekundární napětí toroidního vinutí vztah [1]:

$$u_2 = -i_1 \cdot R_2 - L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (4.11)$$

kde u_2 je výstupní napětí, R_2 činný odpor, i_1 primární proud, i_2 sekundární proud, L_2 vlastní indukčnost cívky toroidu a sílu vazby udává vzájemná indukčnost M_{21} mezi primárním a sekundárním obvodem.

Je-li toroidní jádro obdélníkového průřezu s výškou h , vnitřním poloměrem r_1 a vnějším poloměrem r_2 platí [1]:

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot N_2^2 \cdot h \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{a} \quad M_{21} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot N_2 \cdot h \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.12)$$

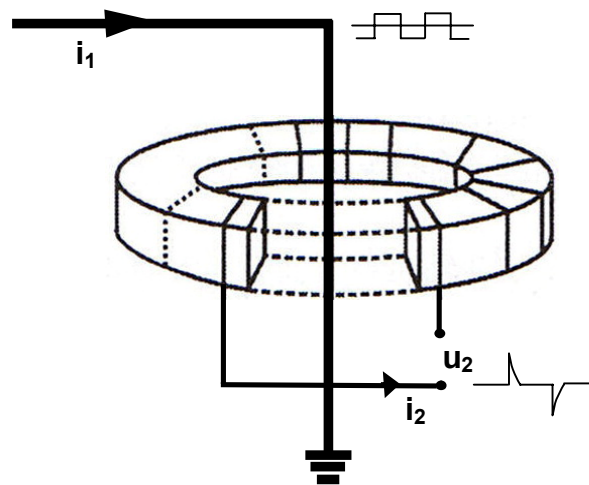
kde μ_r je relativní permeabilita magnetického jádra toroidu, μ_0 permeabilita vakua, která je rovna $1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ a N_2 je počet závitů sekundárního vinutí toroidu.

Koeficient transformace k nezávisí na tvaru průřezu primárního vodiče a je podle [1] dán vztahem:

$$k = \frac{M_{12}}{L_2} = \frac{1}{N_2} \quad (4.13)$$

Z hlediska přenosu je nutné uvést, že vinutí N_1 obsahuje jeden závit.

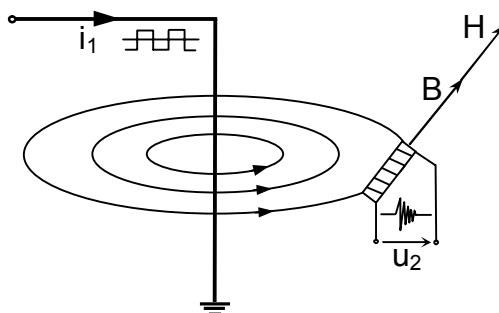
Velkou nevýhodou tohoto způsobu měření je indukce vnějšího rušení do měřicího obvodu. Pro zvýšení odolnosti proti vnějšímu rušení se obvykle používají toroidy s malým počtem závitů v oblasti velmi malých proudů. Další nevýhodou je nutnost přerušení elektrického obvodu zkoumaného zařízení při aplikaci těchto sond. Jedním z nejpoužívanějších toroidních induktivních snímačů je Rogowskiho cívka s N rovnoměrně rozloženými závitů a konstantní plochou smyčky [7].



Obr 4.7 Schéma zapojení toroidní induktivní sondy

Na rozdíl od toroidních sond se **lineární induktivní sondy** umísťují do elektromagnetického pole tak, aby podélná osa sondy byla orientována současně s vektory magnetické indukce B a s vektorem intenzity magnetického pole H . Princip funkce je na obr. 4.8. Pokud je sonda přiložena kolmo na vodič, zpracuje pouze cca 40% vyzařované energie. Naopak je-li sonda přiložena rovnoběžně s vodičem, zpracuje jen cca 15% vyzařované energie [1]. Protože signál částečného výboje vzniklý v izolačním systému má různou

amplitudu tvar i dobu trvání, je relativně obtížné zachytit jej a kvantifikovat vyhovujícím rezonančním obvodem. Lineární induktivní sondy mají oproti toroidním sondám výhodu spočívající ve snadné aplikaci na zkoumaný objekt, aniž by bylo nutné rozpojit obvod zkoumaného objektu.



Obr. 4.8 Schéma zapojení lineární induktivní sondy

4.2.2.5 Praktické použití kapacitních a induktivních snímačů pro on-line měření částečných výbojů

Spolehlivost točivých strojů je téměř výhradně charakterizovaná stavem izolace satorového vinutí. Pro on-line detekci částečných výbojů u točivých strojů je možné použít kapacitní drážkovou sondu (kapitola 4.2.2.3). U malých točivých strojů (několik kV), kde je však obtížné tuto sondu instalovat, a to především kvůli vysokým nákladům, je možné použít k lokalizaci částečného výboje snáze instalovatelných snímačů. Pro tyto účely lze použít snímač ve formě nestíněného pásku vodiče umístěného na povrchu drážkového klínu. Tento snímač může být doplněn snímačem ve tvaru U, který je pokryt polovodivou vrstvou a je přilepen na povrch cívky v čele vinutí na výstupu z drážky. U těchto snímačů je nutné použít metody digitálního filtrování, které kompenzují jejich nižší citlivost [10].

Koaxiální kapacitní sondu (kapitola 4.2.2.4.1) můžeme použít při měření částečných výbojů na vysokonapěťových kabelech, na kabelových koncovkách a spojkách či v zařízení zapouzdřených rozvoden. Kapacitní sondy umožňují s vysokou přesností lokalizovat poškozené místo zejména v systémech s epoxidovou izolací jako jsou cívky vn a vvn strojů, suché transformátory, měniče napětí a proudu apod.

Pro snímání dobíjecích proudů částečných výbojů protékajících v přívodu uzemnění měřicího elektrického obvodu je možné využít induktivní vazbu. Proto se mohou induktivní snímače (kapitola 4.2.2.4.2) umístit v zařízeních v místech pracovního uzemnění.

Ve výkonových transformátorech se může použít negalvanické měření pomocí senzorů elektrického nebo magnetického pole. Umístění kapacitní sondy v blízkosti vinutí transformátoru přináší řadu problémů. Zaprvé od sondy musí vést vodič ven z nádoby transformátoru, který by měl přenést náboj v řádech pC v okolí částí vinutí vn a vvn transformátoru a to je prakticky nerealizovatelné, dále je to problém práce zařízení v transformátorovém oleji a hlavně v ovlivnění magnetických toků transformátoru. U měření pomocí induktivní sondy je velkým problémem vnější rušení do měřicího obvodu, proto se tato metoda používá v oblasti velmi malých proudů. Další nevýhodou je rychlost odezvy snímače, která souvisí s magneticky měkkým jádrem, které se hodí spíše pro slabá magnetická pole. To vše tuto metodu vylučuje pro použití ve výkonovém transformátoru [12]. Pro měření můžeme zvolit např. Lemke sondu, která snímá elektromagnetické pole pomocí senzoru, který tvoří plošná kapacitní nebo lineární induktivní sonda, které slouží jako směrová anténa. Kapacitní nebo lineární induktivní sonda jsou zapojeny na vstup rychlého diferenciálního zesilovače, který je navrhnut tak, aby v maximální možné míře potlačoval vliv cizích rušivých polí. Tímto způsobem lze měřit částečné výboje z určité vzdálenosti od zkoušeného objektu a to bez galvanického připojení s objektem. Měřicí systém je založen na principu širokopásmového zesílení impulzů částečných výbojů a následné elektronické integraci pro vyhodnocování zdánlivého výboje [2].

4.2.2 Kalibrace měřicí soustavy

Nezbytnou součástí při měření částečných výbojů je kalibrace měřicí soustavy. Jelikož při přenosu pulzu částečného výboje od snímače k vyhodnocovacímu zařízení dochází vlivem kapacit měřicího obvodu (včetně parazitních) a ztrát při impedančním nepřizpůsobení k jeho zkreslení, resp. zmenšení a používané měřicí přístroje tak poskytují tzv. měřitelný zdánlivý výboj, který se od zdánlivého náboje liší, je nutné měřicí obvod kalibrovat a vlastní měření pak vztahovat na kalibrační hodnoty. Kalibrace se provádí před každým měřením, kromě rutinních měření, kdy se kapacity testovaných objektů kapacit měřicího obvodu neliší o více jak $\pm 10\%$ [1]. Určí se jí závislost mezi zdánlivým nábojem částečných výbojů a velikostí amplitudy snímaného napětí jednotlivých naměřených výbojů. Kalibrace je založená na injektování náboje známé velikosti z kalibrátoru částečných výbojů do měřicího objektu a následném zaznamenání velikosti amplitudy snímacím obvodem. Objekt musí být odpojen od

zkušebního napětí. Z naměřených hodnot je nutné vynést kalibrační křivky, neboli závislost $q=f(U)$.

Při měření přímými metodami mají tyto kalibrační křivky lineární průběh. Velkým problémem při použití nepřímých metod je kvantifikace hodnot, protože kalibrační křivky nejsou lineární a jejich průběh v oblastech mimo oblast použití kalibrátoru (tj. nad 10^4 pC) lze jen obtížně odvodit [1].

5 Závěr

Úvod této práce je věnován významu diagnostiky elektrických strojů a přístrojů v moderní elektrotechnice, který spočívá zejména v zjišťování aktuálního stavu těchto zařízení a odhadu jejich chování v dalším provozu. Jedním ze stěžejních diagnostických signálů v elektrotechnologické diagnostice elektrických zařízení je detekce přítomnosti částečných výbojů v izolačních systémech.

V kapitole 3 byl částečný výboj definován a uvedeno rozdělení, základní parametry a typy částečných výbojů. Základní elektrické parametry se používají pro vyhodnocování intenzity výbojové činnosti a částečné výboje kvantifikují. Nejdůležitějším parametrem je zdánlivý náboj q impulzu částečného výboje. Jednotlivé typy částečných výbojů jsou rozdělené podle umístění impulzů (podle fázového úhlu) částečných výbojů na křivce napájecího napětí, které určuje druh výbojové činnosti, její povahu a lokalizuje místo výskytu. Částečné výboje působí destruktivně na materiály izolačních systémů především svými škodlivými elektrickými, erozivními, chemickými a tepelnými účinky.

Existují dva hlavní přístupy k diagnostickým měřením, a to off-line a on-line. Metoda měření on-line, které nás zajímá, je metoda diagnostického měření během provozu stroje. Na základě celé řady různých fyzikálních a chemických projevů částečných výbojů můžeme rozdělit měření částečných výbojů na neelektrické a elektrické metody detekce. Elektrické metody detekce částečných výbojů dělíme na přímé elektrické metody a nepřímé elektrické metody měření. Přímá elektrická metoda je založena na přímém snímání proudových impulzů částečných výbojů galvanicky vázanou měřicí impedancí, patří obecně mezi globální metody, vyhodnocuje, kvantifikuje celkový stav izolačního systému. Zatímco nepřímá elektrická metoda měření, detekuje v poškozeném místě vysokonapěťové izolace vyzařující energii do okolního prostředí, je metodou lokalizační, pouze určuje, lokalizuje místa zdrojů částečných výbojů. Obě tyto metody se v praxi běžně kombinují. Mezi nepřímé metody měření patří kapacitní a induktivní snímače. Metoda induktivně vázané sondy a metoda diferenciální elektromagnetické sondy jsou použitelné pouze pro měření off-line. Další kapacitní a induktivní sondy jsou použitelné pro metody měření on-line, což je cílem naší práce a jsou proto probírány podrobněji. Samostatná kapitola je pak věnována možným aplikacím těchto snímačů. Nutnou součástí při měření částečných výbojů je kalibrace měřicí soustavy.

6 Literatura

- [1] Záliš, K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, 2005. 142 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [2] Mentlík, V. – Pihera, J. – Polanský, R. – Prosr, P. – Trnka, P.: *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] Mentlík, V.: *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [4] ČSN EN 60270 *Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů*. 2001.
- [5] Mentlík, V.: *Souvislosti diagnostiky* [online]. Materiál k přednáškám z předmětu Diagnostika elektrických zařízení, KET/DEZ, ZČU v Plzni. Vystaveno 15.2.2006 [cit. 2010-06-01]. Dostupné z: [http://webs.zcu.cz/fel/ket/dez/Souvislosti diagnostiky](http://webs.zcu.cz/fel/ket/dez/Souvislosti%20diagnostiky).
- [6] Mentlík, V. – Polanský R.: *Aspekty strukturální elektrotechnologické diagnostiky* [online]. Publikováno květen 2008 [cit. 2010-06-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37214.
- [7] Van der Wielen, P.C.J.M. – Veen, J. – Wouters, P.A.A.F. – Steennis, E.F.: *Sensors for on-line PD detection in MV power cables and their location in substations*. 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, June 1-5, 2003, pp. 215–219.
- [8] Tian, Y. – Lewin, P.L. – Davies, A.E. – Swingler, S.G. – Sutton, S.J. – Hathaway, G.M.: *Comparison of on-line partial discharge detection methods for HV cable joints*. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 4, srpen 2002, pp. 604–615.
- [9] Zhong, L. – Xu, Y. – Chen, G. – Davies, A.E. – Richardson, Z. – Swingler, S.G.: *Use of capacitive couplers for partial discharge measurement in power cables and joints*. IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven the Netherlands, June 25-29, 2001, pp. 412–415.
- [10] Kang, D.-S. – Hwang, D.-H. – Nam, T.-K. – Kim, Y.-J.: *Novel sensors for locating partial discharges in high-voltage rotating machines*. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 22, No. 3, září 2007, 576–583.

- [11] Mentlík, V. – Pihera, J. – Trnka, P. – Martinek, P.: *Partial discharge potential free test methods*. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2006, pp. 586–589.
- [12] Bujaloboková, M. – Trnka P.: *Detekce poruch vn strojů analýzou výbojové činnosti se zaměřením na transformátory* [online]. Publikováno květen 2007 [cit. 2010-06-01]. Dostupné z: http://www.advances.uniza.sk/journal/2007AEEE_Vol6_No3_2007/112-116_Bujalob_trnka.pdf.