

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Mobilní zařízení pro diagnostiku vysokonapět'ových
motorů**

**Vedoucí práce: Prof. Ing. Václav Mentlík, Csc.
Autor: Bc. Ondřej Konopík**

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej KONOPIK**
Osobní číslo: **E12N0018P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Mobilní zařízení pro diagnostiku vysokonapěťových motorů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte aspekty působení provozních a klimatických podmínek na vysokonapěťové motory
2. Stanovte rozhodující parametry pro charakterizování stavu motorů
3. Určete metody vhodné pro zjišťování těchto parametrů
4. Navrhněte mobilní zařízení pro diagnostiku těchto strojů

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN Praha 2006
2. Mentlík, V. et al: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008
3. Mentlík, V. et al: Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN Praha 2011

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku týkající se mobilního zařízení pro diagnostiku vysokonapěťových motorů. Jsou popsány aspekty působící na vysokonapěťové motory. Jsou ukázány rozhodující parametry pro charakterizování stavu strojů a metody pro zjišťování daných parametrů. Bylo provedeno měření pomocí zdroje VLF (velmi nízká frekvence) na turbogenerátoru. Pro měřící vzorky bylo provedeno měření pomocí zdroje VLF a zdroje 50 Hz.

Klíčová slova

Diagnostika, částečný výboj, VLF napětí, $\text{tg}\delta$, izolační systém

Abstract

The master thesis deals with issues relating to mobile devices for diagnostic of highvoltage engines. It describes aspects, which cause on highvoltage engines. It presents deciding parameters for characterised condition of engines and methods for recognition these parameters. It was perfomed measurements with source of VLF (very low frequency) on turbo-generator. For measuring samples were performed measurement with source of VLF and source of 50 Hz

Key words

Diagnostic, partial discharge, VLF tension, $\text{tg}\delta$, insulation system

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, který byl použit při řešení této diplomové práce, je v licenčním držení autora či v držení Fakulty Elektrotechnické, Západočeské univerzity v Plzni.

V Plzni dne 1.5.2015

Ondřej Konopík

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing Václavu Mentlíkovi, CSc., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji panu Ing. Miroslavu Novákovi ze společnosti 1. SERVIS-ENERGO, s.r.o. za poskytnutí odborných konzultací při měření.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 ASPEKTY PŮSOBNÍ PROVOZNÍCH A KLIMATICKÝCH PODMÍNEK NA VYSOKONAPĚŤOVÉ MOTORY	10
1.1 KLIMATICKÉ PODMÍNKY	10
1.1.1 Teplota	12
1.1.2 Vlhkost vzduchu	12
1.1.3 Písek a prach.....	13
1.1.4 Záření.....	14
1.2 KOROZE.....	14
1.2.1 Atmosférická koroze.....	15
1.3 BIODETERIORACE	16
1.4 MECHANICKÉ VLIVY	16
1.5 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	17
1.6 LOŽISKOVÉ PROUDY A HŘÍDELOVÉ NAPĚTÍ.....	18
1.7 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	20
1.7.1 Parametry částečných výbojů	21
2 ROZHODUJÍCÍ PARAMETRY PRO CHARAKTERIZOVÁNÍ STAVU MOTORŮ	26
2.1 NABÍJECÍ PROUDY	26
2.2 ZTRÁTOVÝ ČINITEL.....	26
2.3 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE – ROZMÍSTĚNÍ.....	28
3 METODY PRO ZJISTOVÁNÍ PARAMETRŮ CHARAKTERIZUJÍCÍCH STAV MOTORŮ	30
3.1 MĚŘENÍ HŘÍDELOVÝCH NAPĚTÍ A LOŽISKOVÝCH PROUDŮ	30
3.2 MĚŘENÍ A ANALÝZA NAPÁJECÍHO PROUDU STROJE.....	31
3.3 POLARIZAČNÍ INDEX – PI.....	32
3.4 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE - SCHERINGŮV MŮSTEK.....	33
3.5 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ – KALIBRACE A RUŠENÍ	35
3.6 MĚŘENÍ VLF	36
3.7 MĚŘENÍ ČV A TGA VE FIRMĚ TG 1.SERVIS-ENERGO, S.R.O.....	38
3.8 MĚŘENÍ TURBOGENERÁTORU V ŽILINĚ.....	41
4 MOBILNÍ ZAŘÍZENÍ PRO DIAGNOSTIKU VYSOKONAPĚŤOVÝCH MOTORŮ	49
4.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	49
4.2 POŽADAVKY NA MOBILNÍ DIAGNOSTICKÉ ZAŘÍZENÍ	52
4.3 ICM FLEX – MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO PD A TGA	53
4.4 VLF-34E - 34 kV VLF TESTER.....	56
ZÁVĚR	58
POUŽITÁ LITERATURA	59

Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Základní jednotka	Význam
T	[°C]	teplota
φ	[g/m ³]	absolutní vlhkost vzduchu
d	[mm]	vzdálenost
λ	[m]	vlnová délka
r_{corr}	[$\mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{rok}^{-1}$]	ztráta hmotnosti vlivem koroze
	[$\mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}$]	hloubka koroze
pH	[-]	vodíkový exponent
I	[A]	proud
U	[V]	napětí
q	[pC]	zdánlivý náboj
n	[n.s ⁻¹]	četnost impulzů
I	[C.s ⁻¹ , μA]	střední proud částečných výbojů
tg δ	[°]	ztrátový činitel
Pz	[W]	ztracený výkon
Ω	[s ⁻¹]	úhlová frekvence
f	[Hz]	frekvence
m	[kg]	hmotnost
Riz	[M Ω]	izolační odpor
pi	[-]	polarizační index
C	[pF]	kapacita
J	[A.mm ²]	proudová hustota

Úvod

V době stále se zvyšujících nároků na zajištění bezpečnosti a spolehlivosti elektrické energie je diagnostika vysokonapětových motorů základem pro dlouhodobý provoz elektrických strojů a je nezbytná pro servis a údržbu, ač mu dříve nebyla věnována taková pozornost. Je potřeba pravidelně sledovat stav motorů, jelikož vlivem neplánovaných výpadků hrozí značné ekonomické ztráty. Přání zákazníka často doprovází požadavek na diagnostiku v těžko dostupných místech, kde je potřeba provést měření pomocí mobilního zařízení pro diagnostiku vysokonapětových zařízení.

Předmětem této diplomové práce je problematika mobilního zařízení pro diagnostiku vysokonapětových motorů, především se jedná o diagnostiku částečných výbojů a ztrátového činitele pomocí zdroje VLF – velmi nízké frekvence. Práce vznikla ve spolupráci se společností 1. SERVIS-ENERGO, s.r.o., která se zabývá servisními službami pro energetiku a spolupracovala při měření vzorků pro měření.

Úvodní část je věnována aspektům působících na vysokonapětové motory. Následně jsou popsány rozhodující parametry pro charakterizování stavu strojů. Další kapitola ukazuje metody pro zjišťování parametrů charakterizující stav motorů. Stěžejní část práce je zaměřena na měření pomocí VLF s porovnáním s 50 Hz pro zjištění rozdílů mezi danými měřeními a návrhem mobilního zařízení pro diagnostiku vysokonapětových motorů.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2015-020 "Technologické a materiálové systémy v elektrotechnice".

1 Aspekty působení provozních a klimatických podmínek na vysokonapěťové motory

Již při návrhu elektrického zařízení se musí dbát na specifikace od zákazníka. Je velice důležité si uvědomit, jestli dané elektrické zařízení bude pracovat v tropických oblastech, kde působí větší vlhkost, či jestli bude muset vydržet v horském podnebí velké množství silných větrů a bouří. Může docházet k většímu výskytu prachu, písku či působení živých organismů (biodeteriorace). V samotném elektrickém zařízení dochází k činnostem, které v průběhu času negativně ovlivňují chod stroje, ať už se jedná o korozi materiálu, dielektrické ztráty či částečné výboje. V následujících stránkách si podrobně objasníme vybraná spektra aspektů působících na elektrická zařízení.

1.1 Klimatické podmínky

Země se dělí na různé klimatické pásy neboli oblasti na zemském povrchu se stejným charakterem makroklimatu. Každý z nich je specificky svými činiteli a většinou se jedná o jeden či dva hlavní činitele (vlhkost, teplota atd.), které byli vyhodnoceni jako rozhodující degradační činitelé. Z důvodů, že elektrická zařízení obsahují velké množství rozdílných materiálů reagujících na stejný činitel odlišným způsobem, vznikl vědní obor s názvem Elektrotechnická klimatotechnologie, která se vyvinula z vědního oboru klimatotechnologie. Jedná se o vědu, která se zabývá působením důsledků klimatických činitelů na elektrická zařízení a elektrotechnických materiálů v jejich provozních prostředí, které se určuje podle základních podnebných pásů. V následující části si představíme základní klimatické pásy a jejich hlavní charakteristiky.

Chladné podnebí – F neboli studené podnebí. Chladnému podnebí odpovídá většina oblastí, které se vyskytují nad šedesátou rovnoběžkou severní šířky. Jako hlavní činitel na elektrotechnická zařízení v této oblasti je působení nízkých teplot. Průměrná teplota v nejchladnějších měsících zůstává pod $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nejteplejší nepřesahuje $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Minimální teplota prakticky neklesá pod hranici $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vlhkost vzduchu se pohybuje od 1 až 10 g/m^3 .

Mírné podnebí – N se nachází z velké části na západě Severní Ameriky, v celé Evropě a na malé části Jižní Ameriky, z velké části zasahuje i do střední Asie a jižní Austrálie. Elektrotechnická zařízení zde pracují většinou bez větších potíží, které by byly způsobené daným pásmem. V zimě se zde pochybují teploty v rozmezí $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v létě mezi

+15 °C až +25 °C. Teploty zde nikdy neklesají pod -30 °C a nejvyšší teploty dosahují hodnot +32 °C. Vlhkost vzduchu se pochybuje mezi 2-14 g/m³.

Tropické suché neboli aridní – TA se vyskytuje hlavně v severní polovině Afriky, ve střední Asii, ve velké části střední Austrálie a na východním cípu Jižní a Severní Ameriky. Na zařízení zde působí obzvláště velmi vysoká teplota, která může maximálně dosahovat k hodnotě 55 °C, avšak minimální teplota může klesat i k extrémním -30 °C. Měsíční absolutní vlhkost je mezi 2-18 g/m³.

Tropické vlhké podnebí neboli humidní – TH se nachází především v džunglích a savanách střední Afriky, jižního cípu Severní Ameriky, jihovýchodní Asii, Oceánii, severní části Austrálie či severní poloviny Jižní Ameriky. Typické znaky jsou dlouhodobé vysoké vlhkosti vzduchu se současným působením vysokých teplot a slunečního záření. Střední teplota během roku neklesá pod +18 °C, nejnižší teploty se vyskytují kolem 0 °C a maximální teploty kolem 40 °C. Měsíční vlhkost vzduchu se pochybuje kolem 20 g/m³, ale v ojedinělých případech může dosahovat až 30 g/m³ po dobu půl roku.

Subtropické – TS neboli subtropické vlhké a semihumidní odpovídá části východní Austrálie, jihovýchodní Afriky, jihovýchodní Asie, části jihovýchodní oblasti Jižní a Severní Ameriky a oblastem ve střední Asii. Působí zde obzvláště střídavé působení velké absolutní vlhkosti vzduchu s vysokými teplotami. Minimální teplota málokdy klesne pod -5 °C, maximální teplota vystoupí až k 50 °C. Průměrná denní teplota během dne se většinou nemění o více než 20 °C. V dané oblasti dochází ke značnému kolísání absolutní vlhkosti vzduchu a může dosahovat maximálně až k hodnotám 40 g/m³.

Mezi další dva podnebné pásy patří horské podnebí a oceánské podnebí, které nemá specifické písmenné označení. Horské podnebí je charakterizované oblastmi nadmořské výšky nad 2000-2500 metrů a vyznačuje se značnými poklesy průměrné teploty okolo 5-7 °C na každých 1000 metrů výšky. Celkové změny denních teplot mohou dosahovat až 40 °C. S rozdílem výšky se mění i tlak a hustota vzduchu a je zde velké množství silných větrů a bouřek. Oceánské podnebí zahrnuje oblasti moří a oceánů, ale i úzké pobřežní pásy a klima menších ostrovů. Projevuje se zde vysoká relativní vlhkost vzduchu a velké množství soli ve vzduchu. Teplotně se dané podnebí příliš nemění. [1]

Tab.1 Přehled klimatických oblastí [2]

	Mírné podnebí N	Tropické suché TA	Tropické vlhké TH	Subtropické TS	Chladné F
Maximální teplota	+35 °C	+55 °C	+40 °C	+50 °C	+25 °C
Minimální teplota	-30 °C	-10 °C	-3 °C	-5 °C	-60 °C
Absolutní vlhkost vzduchu	2-14 g/m ³	2-18 g/m ³	>20 g/m ³	>30 g/m ³	0.1-10 g/m ³
Roční srážky	200-600 mm	200-400 mm	600-10 000 mm	200 – 1 000 mm	-

1.1.1 Teplota

Teplotu považujeme za převládající vliv ve všech tropických oblastech. V subtropických oblastech se počítá s teplotou o hodnotě kolem 55 °C vzhledem k vlastní teplotě technického zařízení a nejvyšší teplotou v klimatické oblasti. Pro většinu zemí, kde je mírné klima, bereme teplotu okolo 40 °C a ve vzácných případech 35 °C. V tropických oblastech uvažujeme s teplotou 35 °C kvůli slunečnímu záření, jež je významně pohlcováno vodními parami ve vzduchu.

Z důvodů vysokých teplot dochází ke změnám elektrických a jiných vlastností, ať už se jedná o vzrůst rezistivity, objemové změny materiálu či poklesu pružnosti látek. Dochází k urychlení stárnutí organických materiálů. Životnost izolantů se exponenciálně zhoršuje při vyšších teplotách, kdy i malé zvýšení vede k velmi rychlému procesu stárnutí → Montsingerovo pravidlo stárnutí, které ukazuje, že při zvýšení teploty o 8 stupňů se doba života zkrátí o polovinu.

Další problém vzniká při velmi rychlém snížení teploty, kdy povrch předmětu ozářený sluncem v tropech může dosáhnout k teplotě až 100 °C a vlivem deště se může prudce ochladit až o 60-80 °C, kdy dochází k popraskání izolátorů či skokové změně elektrických a mechanických vlastností. [3]

1.1.2 Vlhkost vzduchu

Jedná se o jednu z nejzávažnějších forem znehodnocování materiálů hlavně ve vlhkých oblastech tropů a subtropů. Je zapříčiněna vlivy okolního prostředí a klimatem, které určuje množství výparů z půdy a vodních zdrojů. Dochází ke zhoršení elektrických vlastností izolantů, které ztrácejí svojí izolační schopnost. Na povrchu může vzniknout vrstvička nečistot a vody, která vede ke zmenšení elektrického odporu izolantů a ke snížení elektrické pevnosti. Zhoršení mechanických vlastností je také problém v prostředí s vyšší vlhkostí, se

kterým se musí počítat. Naopak malá vlhkost může způsobovat vysychání izolantů a změnu jejich objemu či deformace.

Při rychlých změnách vlhkosti se může uvnitř elektrických zařízení objevovat voda z důvodů kondenzace vodních par (důsledek odvodňovacích žlábků či otvorů). V neposlední řadě vlhkost způsobuje korozi izolantů a kovů. Laky mohou měknout, zpráškovatět či se stát lepkavými. [3, 4]

1.1.3 Písek a prach

Písek a prach se vyskytuje ve všech podnebných páslech země a obzvlášť v oblastech savan, pouští a v tropických suchých oblastech se s větrem roznáší do oblastí kolem nich. Pro přenos prachu stačí jen vánek či vzdušný proudy horkých dnů, ale pro tzv. pouštní bouři je potřeba velmi silný vítr, který dokáže písek zanést do vzdálených oblastí (jsou případy pozorované i v České republice). Prach je nesen ve velkých výškách a potom pomalu klesá k zemi, z toho důvodů je ve vzduchu obsaženo jeho velké množství. Nejlehčí prachové částice k zemi neklesají, ale zůstávají v ovzduší.

Písek a prach škodí elektrotechnickým zařízením třemi způsoby. Prvním z nich jsou nežádoucí chemické účinky. Prach přitahuje malé množství vody a spolu s působením vlhkosti spouští kyselé anebo zásadité reakce. Oleje jsou díky němu okysličovány molekulami kyslíku, které se vyskytují na prachových částicích, a mnohdy prach přispívá i k biologické korozi podporou plísní, které může obsahovat. Urychluje tím korozi kovů, izolantů, laků a jiných materiálů. Prach usazený na lakovaných plochách narušuje povrch prasklinkami a jeho postupným zmatněním.

Druhou možností jsou jeho sedimentační účinky. Usazování na izolantech přispívá ke zhoršení vodivosti a následnému možnému přeskoku. Pokud je v prachu obsažena částice soli, je schopna s vodou vytvořit vrstvičku elektrolytu. Prach usazený na kontaktech a spínačích zvyšuje přechodový odpor kontaktních ploch, jehož důsledkem je zahřívání a následný vznik elektrického oblouku.

Posledním způsobem jsou abrazivní účinky. Prachové a pískové částice obrušují povrchy materiálů, které jsou vystavené větrům, či způsobují rychlejší opotřebování vnitřních částí točivých zařízení. Malé částičky prachu ovlivňují i citlivosti měřicích přístrojů. [1,3]

1.1.4 Záření

Absorbovaná část slunečního záření vyvolává fotochemickou změnu v organických látkách (zejména v makromolekulárních). Pro elektrotechnické materiály jsou nejvíce škodlivé záření ultrafialové a infračervené. Ultrafialové záření ($\lambda=400-1 \text{ nm}$), které je ve slunečním záření obsaženo přibližně 7 %, nejčastěji škodí v tropických oblastech na pryži a epoxidové pryskyřici, kterým způsobuje rozpraskání a vytváření trhlinek na povrchu. Dále způsobuje ztvrdnutí a zkřehnutí některých materiálů či změnu barvy.

Infračervené záření $\lambda=760 \text{ nm-mm}$ je ve slunečním záření okolo 45 % a je viníkem nadměrného zahřívání materiálů dosahující teploty na svém povrchu až 100 °C. Tato teplota je závislá na sklonu osvětlované plochy, druhu materiálu, tepelné vodivosti, tvaru či její barvě. Vytváří se předpoklady pro degradaci vlastností materiálů a možnosti tepelného průrazu. [1,3]

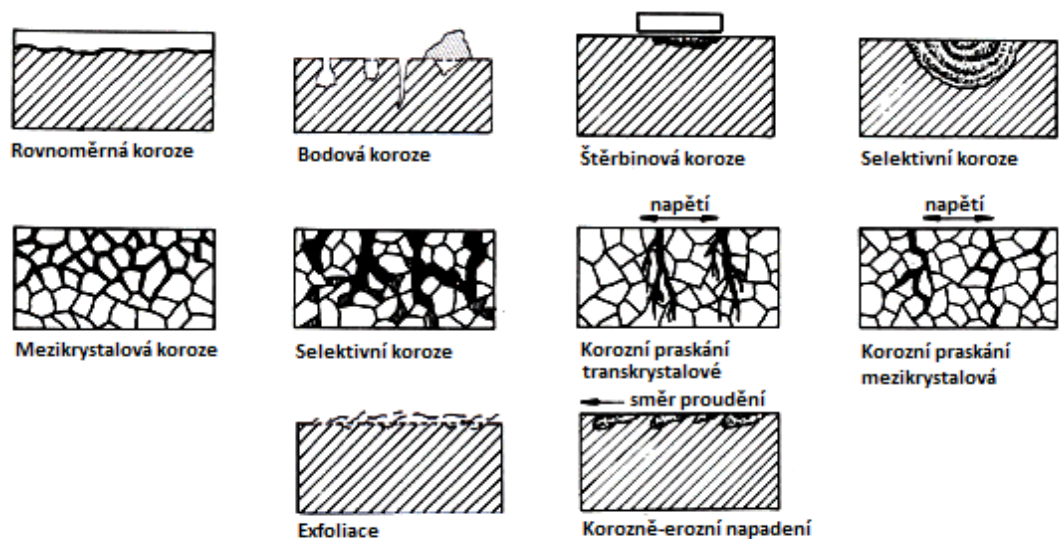
1.2 Koroze

Koroze je postupné, samovolné rozrušení kovů či nekovových organických i anorganických materiálů vlivem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím. Korozi podléhají prakticky všechny materiály, a to nejen kovy či slitiny (řada definic omezuje pojem koroze pouze na kovy). Vyskytuje se i u anorganických materiálů (sklo, beton atd.), u materiálů organických (pryž, plasty atd.), textilu a dalších. Problémy s korozi způsobuje značné ekonomické ztráty. Ať se jedná o ztráty přímé, kdy se elektrická zařízení chrání před účinky korozi, jejich náklady na opravy či úplné vyřazení, či ztráty nepřímé, které jsou způsobeny zastavením výroby v důsledku poškození zařízení. Rozrušování materiálu způsobuje chemický, fyzikální (eroze, abraze, opotřebení) a biologický vliv prostředí. Pro kvantifikaci rovnoměrné koroze používáme vzorec pro korozní rychlost, který ukazuje změnu hmotnosti či hloubky průniku koroze vztažené na jednotku času (viz Vzorce 1.2.1 a 1.2.2). [5]

$$r_{corr} = \frac{\Delta m}{t} \quad [\mu\text{g.m}^2.\text{rok}^{-1}] \quad \dots \text{ztráta hmotnosti vlivem koroze (1.2.1)}$$

$$r_{corr} = \frac{h}{t} \quad [\mu\text{m.rok}^{-1}] \quad \dots \text{hloubka koroze (1.2.2)}$$

Pro korozní inženýrství jsou hodnoty korozní rychlosti vyšší nežli 1 mm za rok prakticky nepřijatelné. Často je udávána horní hranice odolnosti 0,1 mm za rok, což platí většinou pro rovnoměrnou korozi a použití kovu na 10-20 let. Mnohem menší korozní rychlost budeme chtít pro kovy, které jsou používány jako výztuže v betonu, či kovy, které se vkládají do lidského těla (kyčelní kloub atd.). Podle rozsahu odlišujeme korozi celkovou (rovnoměrnou), bodovou (lokalizovanou) a další (viz Obrázek 1). [5]



Obr. 1 Základní druhy koroze [6]

1.2.1 Atmosférická koroze

Atmosférická koroze je řazena mezi elektrochemické druhy a je příčinou až 80 % všech ztrát způsobených korozi (velká plocha je vystavena působení atmosféry). Jelikož interakce suchého vzduchu s materiálem za běžných teplot je zcela zanedbatelná, vzniká atmosférická koroze jen při určité vlhkosti atmosféry. Při vysoké vlhkosti dochází ke vzniku dostatečného filmu elektrolytu na povrchu materiálu nutného pro průběh korozní reakce (nejagresivnější bývá elektrolyt vznikající při mlze). Pro nižší vlhkost není korozní rychlost nulová, ale je takřka zanedbatelná.

Atmosférickou korozi kovů ovlivňují také obsahy mnohých látek, ať se jedná o chloridy, tuhé látky (prach), oxidy dusíku, přízemní ozon, oxid siřičitý atd. Korozní působení atmosféry je dáno tzv. dobou odvlhčení, což znamená dobu, pro kterou je vlhkost atmosféry nadkritická za teplot, kdy je povrchový elektrolyt kapalný. Atmosférická koroze způsobuje úbytek materiálu, netěsnosti (perforace), změny geometrie a jakosti povrchu, změny pracovních parametrů. [5]

1.3 Biodeteriorace

Biodeteriorace je chápána jako působení živých organismů na změnu vlastností materiálů. Pro daný jev se používají názvy jako mikrobiální koroze, biologická degradace, biodegradace či biodeteriogeneze. Biodeteriorace sleduje mechanismy znehodnocování materiálů, možnosti jejich ochrany, zvýšení spolehlivosti a životnosti. Organismy, které způsobují změny materiálu, nazýváme biodeteriogeny a dělíme je na mikrodeteriogeny (plísňe, houby či agresivní bakterie) a makrodeteriogeny (hmyz, obratlovci, členovci).

V daném procesu je pasivní činitel technický materiál a aktivní činitel je biodeteriogen. Pokud je daný materiál potravou, mluvíme o tzv. asimilačním poškození. Není-li hlavním zdrojem živin, jedná se o disimilační poškození. Důležitým prvkem pro mikrobiální korozi je vnější prostředí, které ovlivňuje samotnou existenci biodeteriogenů. Ideální prostředí pro mikrodeteriogeny je při teplotě okolo 25-35 °C, vlhkosti 95-100 %, nízkém proudění vzduchu z důvodu vysušování materiálu či znesnadňování usazování na povrchu a pH 4-10. [7]

Biodeteriorace se skládá ze tří částí:

Infekce - dochází k navození stálého kontaktu mezi materiálem a biodeteriogenem

Inkubace - etapa od infekce, až po období zjevných symptomů

Manifestace - projevy biodeteriorace jsou zjevné a představují nebezpečí poškození materiálu

1.4 Mechanické vlivy

Při provozu dochází k působení velkých mechanických sil na celý systém elektrického zařízení. Zde si uvedeme názorné tři ukázky.

Uvolněná tyč v drážce - tyč vinutí je pevně uložena v drážce s co největší přesností a pevně zaklínována, každý sebemenší pohyb vede k poškození polovodivého nátěru na tyči, v principu k jeho střídavému přibližování a oddalování od železa statoru. Dochází zde ke shromažďování náboje na vzniklé kapacitě vzduchové mezery mezi státorem a tyčí. Při následném dotyku dojde k vybití náboje. Uvedeným dějem dochází k úplnému odstranění polovodivého nátěru z povrchu tyče a povrch tyče není uzemněn ani nepřímou. Nejčastější případ je prošoupaní izolace volnými výztuhami. [7,28]

Uvolnění plechů statoru - při uvolnění stažení magnetického obvodu dochází ke vzájemnému pohybu plechů vůči sobě. Vzájemné působení plechů postupně ničí izolační bariéru a může dojít k vodivému kontaktu. Při odstranění vodivého nátěru dochází ke zvětšení ztrát vířivými proudy a k lokálnímu oteplení, které může vést až k natavení magnetického obvodu. [7]

Vibrace čel vinutí - kvůli uvolnění výztuže nebo zhoršení její pevnosti vznikají vibrace v čelech vinutí (konce vinutí mimo drážku statoru). Dochází zde k popraskání a olupování izolace tyče vedoucí k jejímu průrazu. Mechanické namáhání daných tyčí může vést i k porušení těsnosti chladicího okruhu a k následnému úniku chladicího média do prostoru stroje. [7].

1.5 Dielektrické ztráty

Pojem dielektrické ztráty se užívá při posuzování kvality izolantu. Jde o množství elektrické energie, která se změní vlivem dějů odehrávajících se uvnitř izolačního materiálu na nežádoucí (většinou) tepelnou energii, kvůli níž se izolační materiál zahřívá. Vznik dielektrických ztrát závisí na jednotlivých izolantech (druh, struktura, skupenství, vlastnosti), na chemickém složení. Většina používaných izolantů jsou více či méně nehomogenní. Nehomogenity vznikají v průběhu výroby, zpracováním izolantu, vlivem provozního namáhání a mnoho materiálů jsou nehomogenní již svojí podstatou (vrstvené a kompozitní materiály). Můžou se na nich vytvářet prostorové náboje, částečné výboje a dochází ke zvětšení dielektrických ztrát.

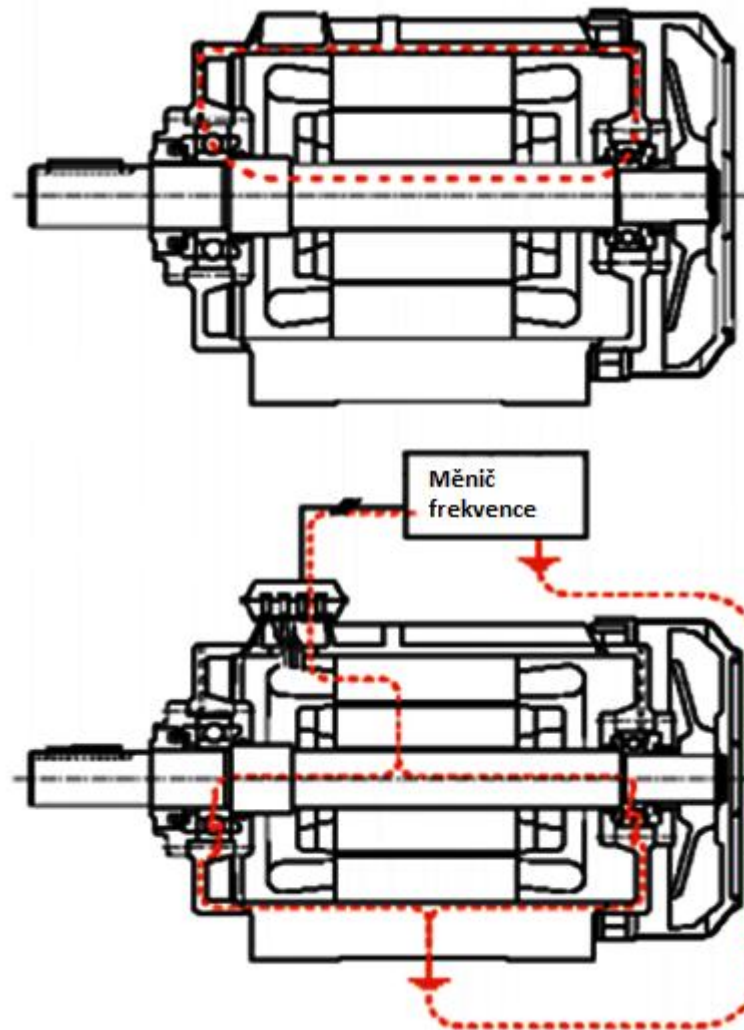
Příčinou dielektrických ztrát jsou pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje obsažených v materiálu, výbojová činnost, polarizační pochody. Celkové dielektrické ztráty zahrnují vodivostní, polarizační a ionizační ztráty. Vodivostní ztráty se vyskytují u všech dielektrik a závisí na vnitřní a vnější povrchové vodivosti. Podstatou jsou srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky. Polarizační ztráty jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. Velikost daných ztrát závisí na jejich kmitočtové a teplotní závislosti závisící na druhu polarizace. Ionizační ztráty se vyskytují u plynů a také u pevných a kapalných dielektrik, u kterých se vyskytují plynové bublinky. Oteplování jednotlivých prvků izolačního systému je zapříčiněno i vlivem provozu – proudové zatížení vodičů, četnost spínání, časové využití a dobou trvání přechodových jevů (rozběhy, brzdění). [15]

1.6 Ložiskové proudy a hřídelové napětí

U elektrických strojů, zvláště velkých výkonů, dochází v některých případech ke vzniku hřídelových napětí a následným ložiskovým proudům. Jsou to nežádoucí projevy nesymetrie magnetických a elektrických veličin elektrických strojů pracujících v běžných provozních stavech nebo např. statickou elektřinou vznikající třením suché páry v turbíně. Působí degradaci na ložiskách (poškození povrchu vyjiskřením až k vytavení kompozice), zkracuje jejich životnost, zvyšuje tepelné namáhání a následně možnou havárii. Jejich účinky nikdy nelze odhadnout dopředu.

Zdrojem hřídelových napětí může být elektrická energie, která je přivedena ke stroji nedopatřením (např. svařovací kabely), z důvodu poruchy či fyzikálními procesy, které probíhají ve stroji samovolně. Příčinou může být i nesymetrie elektrického a magnetického obvodu elektrického stroje z důvodů nedokonalosti výrobních, technologických nebo i provozních záležitostí (nerovnoměrná vzduchová mezera, nedostatečně izolované upevňovací šrouby, nelineární magnetický obvod), takové nesymetrie vyvolají pulzaci magnetického toku a jeho střídavá složka indukuje v hřídeli střídavé napětí. Následně můžeme naměřit hřídelové napětí mezi dvěma konci hřídele či mezi hřídelí a zemí.

Důsledkem hřídelových napětí je vznik ložiskových proudů. Průchod proudu vyvolává poškození valivých ložisek v místě styku mezi oběžnými drahami vnitřního a vnějšího kroužku a valivými tělisky. Tyto proudy vznikají až při určité velikosti napětí, které je dáno průrazným napětím olejové nebo tukové vrstvičky mezi troucími se částmi ložiska. Pro průrazné napětí mazací vrstvičky se uvádí 0,5 V. Degradální účinky procházejícího proudu závisí na proudové hustotě (velmi malá kontaktní plocha kuličky a kroužku). Hodnoty kolem 0,5 A/mm² již znamenají poškození ložiska. Vytváří se kráterky jak na oběžné dráze, tak i na valivých tělesech, nastane lokální roztavení povrchu. Vydrolí se malé částičky roztaveného materiálu a materiál se vytvrdí a zkřehne. Dochází k lokálnímu rozložení maziva.

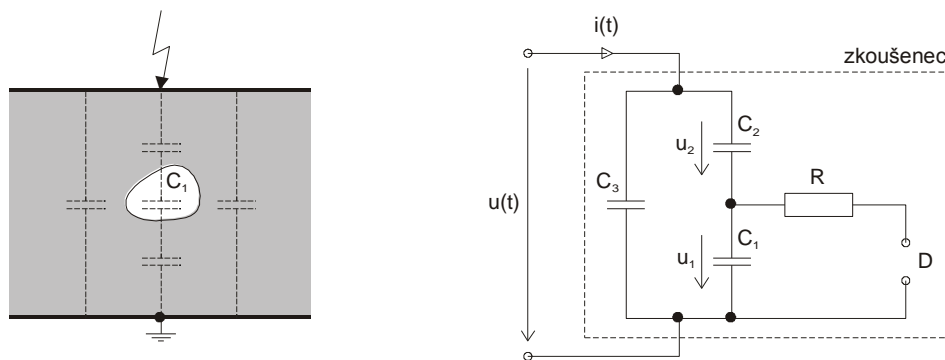


Obr. 2 Obvod ložiskových proudů [9]

Na vzniku ložiskových proudů se podílejí i kapacity kabelů a statických měničů. Při používání frekvenčních měničů dochází k napěťovým pulzům a nenulový součet okamžitých hodnot napětí způsobuje existenci proudových strmých nabíjecích a vybíjecích pulzů způsobených kapacitami mezi vinutím a kostrou statoru. Pokud je kostra motoru nevhodně uzemněna, začne proud procházet cestou nejmenšího odporu a může vést přes ložiska motoru. Dalšími důvody ložiskových proudů mohou být poruchové proudy, zkrat, průrazy vinutí či zavlčený proud (nevhodné připojení svařovacích kabelů přes konstrukční části-stroj se neotáčí a dochází k lokálnímu poškození). [9] [16]

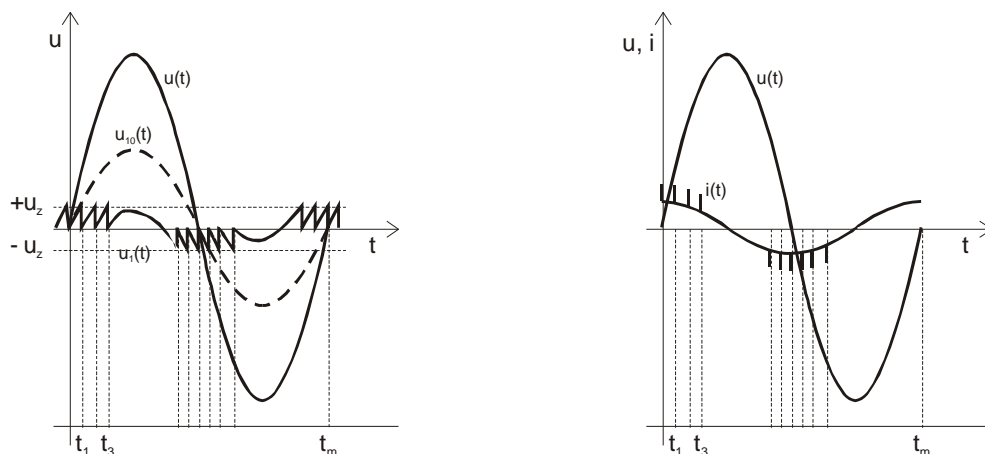
1.7 Částečné výboje

Při úplném průrazu jsou obě elektrody spojeny nízko odporovým výbojem a celá izolace je proražena. Při neúplném průrazu je proražena jen část izolace a vytvoří se tzv. částečný výboj. Důsledkem částečných výbojů je vznik malých dutinek vyplněných plynem uvnitř izolace, které mohly vzniknout v důsledku výroby, při degradaci izolace, účinkem velkého lokálního elektrického namáhání či mechanickém namáhání. Takové výboje se objevují jako impulzy s dobou trvání menší nežli $1 \mu\text{s}$, při dlouhodobém působení dochází k rychlejší degradaci materiálu.



Obr. 3 Dutinka v dielektriku a náhradní schéma [19]

Na obrázku 4 je znázorněné dielektrikum s dutinkou a náhradní obvod tohoto objektu, kde C_1 je kapacita dutinky, C_2 je kapacita zdravého dielektrika v sérii s dutinkou a C_3 kapacita zkoušence paralelně se sériovou kombinací C_1 a C_2 . Po přiložení střídavého napětí $u(t)$ na svorky bude průběh proudu a napětí podobný, jako je na obrázku 4, kde $u_{10}(t)$ je napětí na kapacitě C_1 , pokud nedojde k průrazu v dutince, a napětí $u_{1(t)}$ je napětí za podmínky, že k průrazu dochází při konstantním zapalovacím napětí. [19]



Obr. 4 Graf ukazující průběh napětí dutinky, ve které dochází výbojům [8]

Proudový impuls vyvolaný vlivem částečných impulzů se v obvodu projeví jako přerozdělení náboje na příslušných kapacitách. Následně zdroj dodává do obvodu ve velmi krátkém čase náboj, který kompenzuje úbytek napětí vyvolaný výbojem. [10, 19]

Účinky částečných výbojů

Elektroerozivní účinky - působením elektrického oblouku v dutince, který je-li napájen, si vytvoří vodivou cestu. Ničivý účinek mají též elektrony a ionty, které bombardují stěny dutinky, čímž dochází k erozi stěn a následně se dutinka postupně zvětšuje a při pokračující erozi může dojít k průrazu.

Tepelné účinky - přímým důsledkem částečných výbojů může být tepelná nestabilita. Neustálým opakováním částečných výbojů dochází k oteplování izolantu a klesá hodnota napětí tepelného průrazu.

Chemické účinky - vznikají při déle trvajícím elektrickém namáhání. Ze začátku chemické reakce vznikají ve vlhkostech a v produktech odloučených ve vzduchu. Výsledkem jsou plynné, kapalné a pevné vedlejší produkty, které následně difundují do okolního pevného dielektrika a vytváří vodivé oblasti. Obsahují-li dutinky kyslík, vytváří výboje v dutince ozon, který má intenzivní oxidační účinky. Oxidy dusíku a ozon mohou vytvářet kyselinu dusičnou (při vysokých teplotách), která je velmi agresivní. [14]

1.7.1 Parametry částečných výbojů

Pro kvantifikaci částečných výbojů je potřeba určit měřitelné charakteristické parametry, které jsou důležité pro porovnání měření prováděných na elektrickém zařízení po určitém čase. Jedná se o zdánlivý výkon, následně o četnost impulzů, střední proud částečných výbojů, počáteční napětí částečných výbojů a zhašecí napětí částečných výbojů.

Zdánlivý náboj - zdánlivý náboj je udáván v jednotkách pC a označuje se písmenem q . Jde o náboj, který zdroj dodává ve velmi krátkém čase mezi svorky zkoušeného objektu a měl by na měřicím přístroji způsobit stejnou výchylku jako proudový impuls částečného výboje. Nerovná se množství lokálně působícího náboje v místě výboje, vztahy těchto nábojů mohou být ve stejném objektu rozdílné. Jde o základní diagnostický parametr pro měření a vyhodnocování částečných výbojů.

Vyhodnocení zdánlivého náboje:

$<10^4$ pC	pro normální provoz stroje, prohlídky po 2-3 letech
$<10^4, 2 \cdot 10^4$) pC	pro normální provoz, diagnostické měření po 1 roce. Pro nalezení zdroje částečných výboje použít metodu lokalizace
$<2 \cdot 10^4, 10^5$) pC	pro normální provoz, diagnostické měření po půl roce. Pro nalezení zdroje částečných výbojů použít metodu lokalizace
$<10^5$ pC	výskyt nebezpečné výbojové aktivity. Normální provoz. Diagnostické měření provádět co nejčastěji - maximálně po půl roce. Doporučuje se oprava stroje. Pro lokalizaci zdroje částečných výboje použít lokalizační metodu. [15]

Dané informace jsou pro vyhodnocování zdánlivého náboje pro tyče statoru. Norma pro stroje neexistuje (nereálné - každý stroj je jiný). Existují pouze doporučení provozovatelů či servisních organizací. [23]

Četnost impulzů – četnost impulzů je poměr mezi celkovým počtem impulzů v určitém časovém intervalu a daným intervalem. Je označováno jako n a udává se v $n \cdot s^{-1}$. V praxi se určují předem dané impulzy, které přesáhly úroveň předepsaného rozsahu.

Střední proud částečných výbojů – střední proud částečných výbojů je součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i při zvoleném intervalu T_{ref} dělený daným intervalem. Je označováno jako I a udává se v jednotkách $C \cdot s^{-1}$ či μA . [15]

M je počet výbojů v časovém intervalu T_{ref}

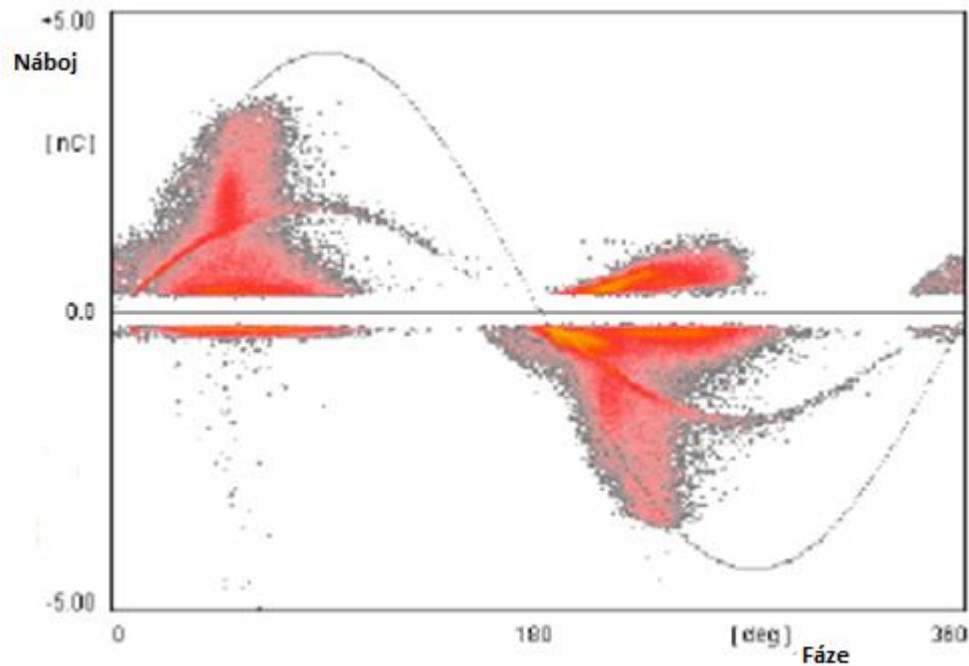
$<10 \mu A$	normální provoz. Diagnostické měření výbojové činnosti provádět jednou za 2-3 roky
$<10,20) \mu A$	normální provoz. Diagnostické měření výbojové činnosti provádět jednou za rok
$<20,50) \mu A$	normální provoz. Diagnostické měření provádět jednou za půl roku. Doporučená prohlídka stroje.
$>50 \mu A$	výskyt nebezpečné výbojové činnosti. Diagnostické měření provádět v co nejkratších intervalech (maximálně po půl roce). Doporučuje se oprava stroje. [15]

Počáteční napětí částečných výbojů - jde o přiložené napětí, kde se ve zkoušeném objektu pozoruje opakující se částečné výboje (obvykle se určuje, pro jakou hodnotu se začnou měřit částečné výboje). Jinými slovy jde o napětí, kdy částečné výboje přesahují předepsanou hodnotu.

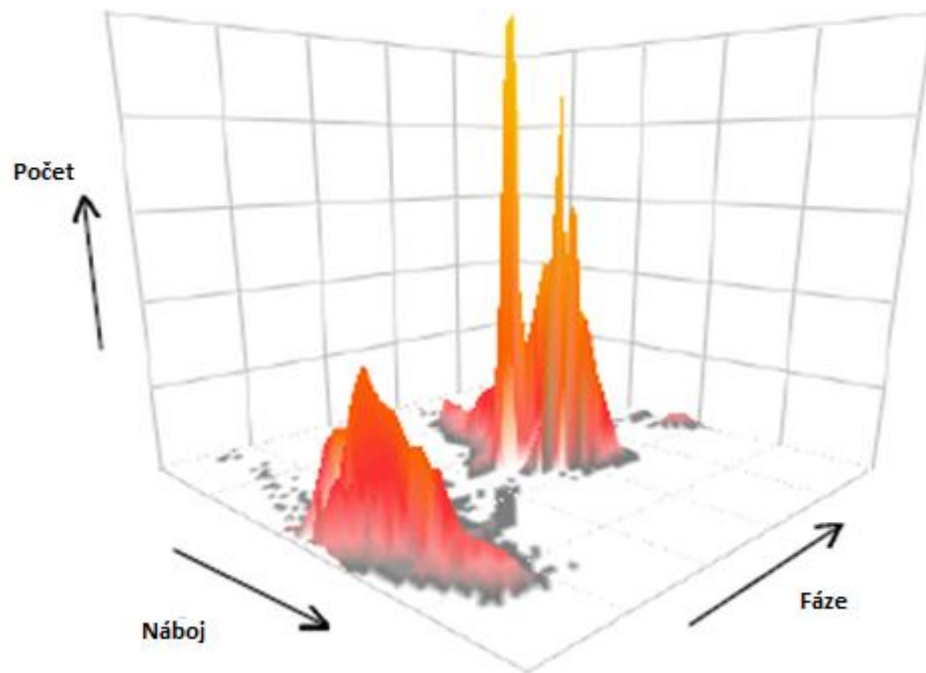
Zhášecí napětí částečných výbojů - jde o napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje. [15]

Srovnávací parametry částečných výbojů - pro sledování výbojové činnosti a rizika havárie je potřeba mít možnost porovnat rozvoj (zvětšení) částečných výbojů v závislosti na čase neboli porovnat parametry, které byly naměřeny například 2 roky od sebe. Obvykle jsou měřeny off-line a vyneseny do grafu v závislosti na přiloženém napětí U a dané křivky jsou následně vyhodnocovány. Při výskytu velkého nárustu nebo skoků v grafech na křivkách lze sledat výskyt částečných výbojů. Naměřené napěťové závislosti se následně porovnávají se závislostmi z předcházejícího měření a při změně tvaru křivek se následně zjišťuje změna stavu izolačního systému. [15]

Zobrazení částečných výbojů - amplituda, polarita a pozice fáze charakterizují impuls částečného výboje. Na obrázku tzv. ϕ -g-n vzoru je každý impuls částečného výboje zobrazen jako malá tečka, která koresponduje s amplitudou náboje (osa Y) a pozici fáze (osa X). Frekvence výskytu je kódovaná v barvě. Další možnost prezentování částečných výbojů je pomocí 3D modelů (viz Obrázek 5 a 6)



Obr. 5 Zobrazení částečných výbojů (ϕ -g-n vzoru – 2D)



Obr. 6 Zobrazení částečných výbojů (φ -g-n vzoru – 3D)

Další možností vyhodnocení částečných výbojů jsou tzv. Lissajousovy obrazce (viz Obrázek 7)

A) Popis - pulsy stejné velikosti v jedné půlperiodě symetricky okolo napětového maxima. Se zvyšováním napětí narůstá počet pulsů, ale jejich velikost se nemění.

Typ výboje – uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v plynech. Jestliže se pulsy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se pulsy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.

B) Popis - pulsy v obou půlperiodách symetricky okolo napěťových maxim; v jedné půlperiodě pulsy větší, v druhé půlperiodě větší počet menších pulsů stejné velikosti. Se zvyšováním napětí počet pulsů narůstá.

Typ výboje – uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v kapalných izolantech. Jestliže se velké pulsy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulsy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.

Typ	Osciloskopický obraz
A	
B	
C	
D	
E	

Obr. 7 Lissajousovy obrazce [17]

C) Popis - pulsy mezi průchody nulou napětí a vrcholy v obou půlperiodách. Pulsy v obou půlperiodách mají přibližně stejnou velikost.

Typ výboje – dutinky v pevném izolantu. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu. Dotyk izolovaných vodičů. Výboje na povrchu bez galvanického spojení. Neuzemněné kovové části měřícího obvodu.

D) Popis - pulsy mezi průchody nulou napětí a vrcholy v obou půlperiodách. Pulsy v jedné půlperiodě jsou vyšší než pulsy v druhé půlperiodě.

Typ výboje – dutinky v pevném izolantu a elektrod. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu u elektrod. Jestliže se velké pulsy objevují v kladné půlperiodě, jsou výboje na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulsy objevují v záporné půlperiodě, jsou výboje na zemním potenciálu.

E) Popis – pulsy symetricky kolem obou průchodů nulovým napětím.

Typ výboje – špatný kontakt mezi kovovými částmi nebo mezi polovodivými (odporovými) vrstvami.

2 Rozhodující parametry pro charakterizování stavu motorů

2.1 Nabíjecí proudy

Nabíjecí proud stroje nese ve svém průběhu informace o povaze napájeného zařízení a o jeho stavu. Nabíjecí proud není čistě sinusový, ale je deformován řadou vyšších harmonických složek. Ve stroji se přirozeně objevují vlivem konstrukce (frekvence vznikající rozložením vinutí do diskretních drážek), jiné mohou být projevem určitých odchylek (závad) od normálního stavu stroje. Jakmile dojde v elektrickém či magnetickém obvodu stroje k jakékoliv nesymetrii, stane se zdrojem přídavného elektromagnetického pole, který se v ideálních podmínkách ve stroji neobjevuje. Daná pole jsou spjatá s určitým místem závady (nesymetrie), rychlost jejich otáčení je různá od rychlosti synchronní a deformují výsledné pole ve stroji a také průběh napájecího proudu. Matematickými prostředky (Fourierovy transformace) lze odhalit tyto deformace a zjistit konkrétní poruchu stroje. Projev konkrétní poruchy v obraze Fourierovy transformace je charakteristický a nezáměnný, avšak v případě většího množství defektů je potřeba k jejich rozpoznání určitá zkušenost.

Druhy závad vysokonapěťového motoru

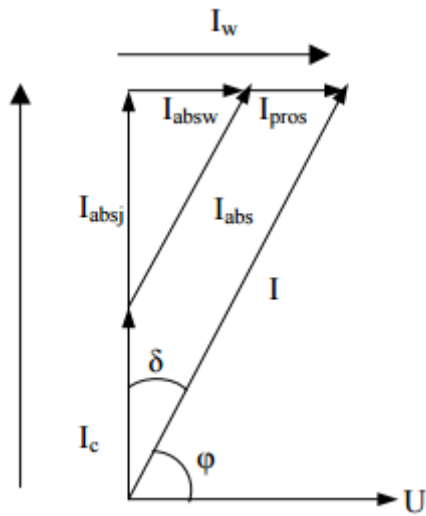
- Elektrická nesymetrie rotorového vinutí (přerušeni tyče či kruhy klece, zkraty u vinutí rotoru)
- Magnetická nesymetrie (statická a dynamická excentricita rotoru, přesycení)
- Elektrická nesymetrie statorového vinutí (přerušeni či zkraty v různé konfiguraci)
- Mechanické příčiny (špatné ustavení, nevyvážení rotoru, rázy z poháněného mechanismu) [16]

2.2 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel neboli ztrátový úhel dielektrika. Je to veličina, která charakterizuje izolant z hlediska dielektrických ztrát. Měření ztrátového činitele se běžně používá k monitorování stavu izolace elektrických zařízení. Je to úhel, který svírá vektor proudu reálné kapacity izolace s vektorem proudu ideálního kondenzátoru. V případě dokonalé izolace by tento proud byl pouze kapacitní a fázový posun by byl 90° , avšak v praxi se nesetkáme s ideální izolací. Z toho důvodu obsahuje proud procházející dielektrikem také činnou složku a fázový posun je menší než 90° .

Pro ztracený výkon následně platí

$$P_z = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg} \delta \quad (2.2.1)$$

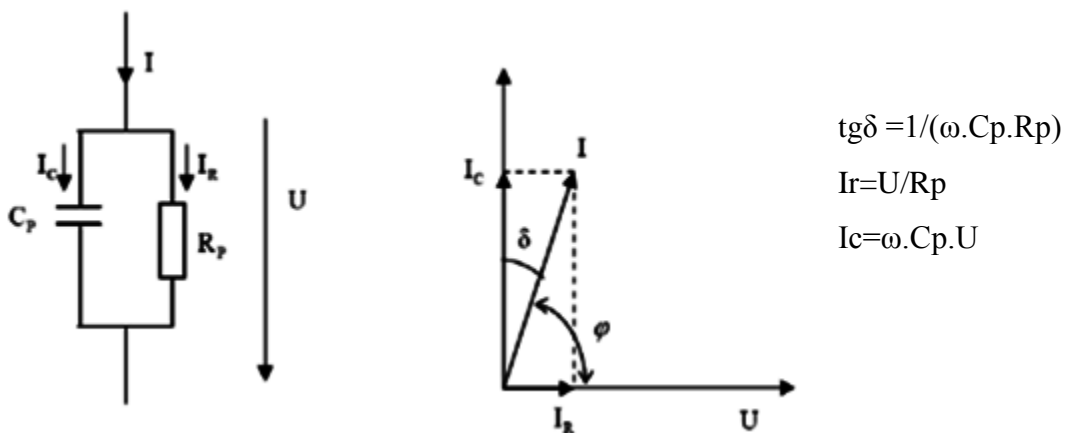


- I_c kapacitní proud
- I nabíjecí proud geometrické kapacity
- I_a absorpční proud
- I_{absj} jalová složka absorpčního proudu
- I_{absw} činná složka absorpčního proudu
- I_{pros} vodivostní složka

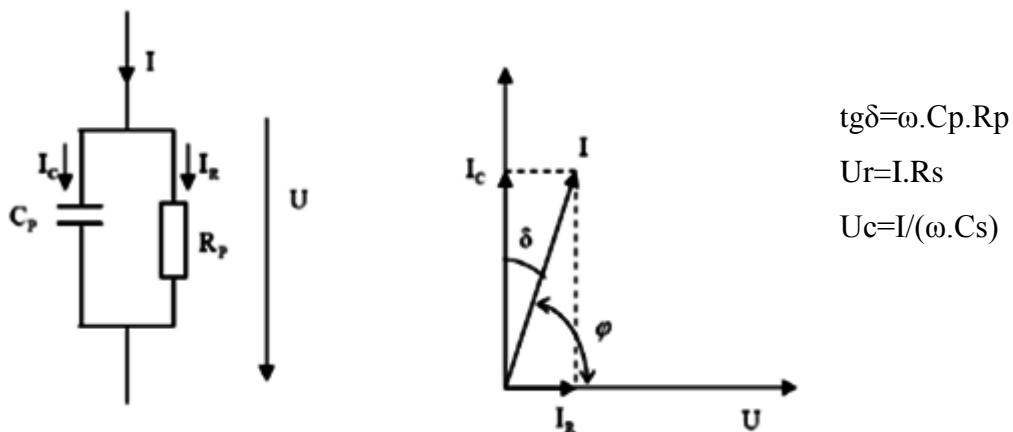
Obr. 8 Fázorový diagram reálného dielektrika [18]

Z fázorového diagramu lze poznat, že čím více se bude reálný kondenzátor blížit ideálnímu, tím menší bude úhel δ . Tangenta úhlu δ se nazývá ztrátový činitel, kterým nelze zjistit přímo lokální místo zhoršení izolace. Metoda dává cenné údaje při sledování celkového opotřebení izolace pomocí určování dielektrických ztrát.

Pro popis chování technického dielektrika z hlediska ztrátového činitele se využívají ekvivalentní náhradní obvody. Jsou tvořeny sériovým nebo paralelním spojením kondenzátoru s ideálním bezztrátovým dielektrikem a ohmického odporu. Parametry jsou takové, aby reprezentovaly dielektrické ztráty.



Obr. 9 Paralelní model ztrátového úhlu δ [18]



Obr. 10 Sériový model ztrátového úhlu δ [18]

Napěťová závislost ztrátového činitele - při zvyšování napětí dochází ke zvýšení pohyblivosti nosičů nábojů až do napětí (ionizačního kolena), kdy se zvýší hodnota ztrátového činitele vlivem částečných výbojů. Velikost $\text{tg}\delta$ závisí na druhu izolace, celkové stupni degradace, navlhnutí a počtu lokálních slabých míst.

Frekvenční závislost ztrátového činitele – při zvyšování frekvence se ztrátový činitel zvyšuje až do doby, dokud dipólové momenty stíhají sledovat změny působícího elektrického pole. Od jisté frekvence molekuly nezvládají sledovat změny a ztrátový činitel klesá. [18,19]

2.3 Částečné výboje – rozmístění

Vyskytují se v izolacích vodičů elektrických zařízení, mezi izolací a vodičem, mezi kovovou konstrukcí stroje a izolací nebo na povrchu izolace. Nevyhneme se jim na rozhraní dvou dielektrik nebo při nedostatečném uzemnění. Částečné výboje rozdělujeme podle místa výskytu:

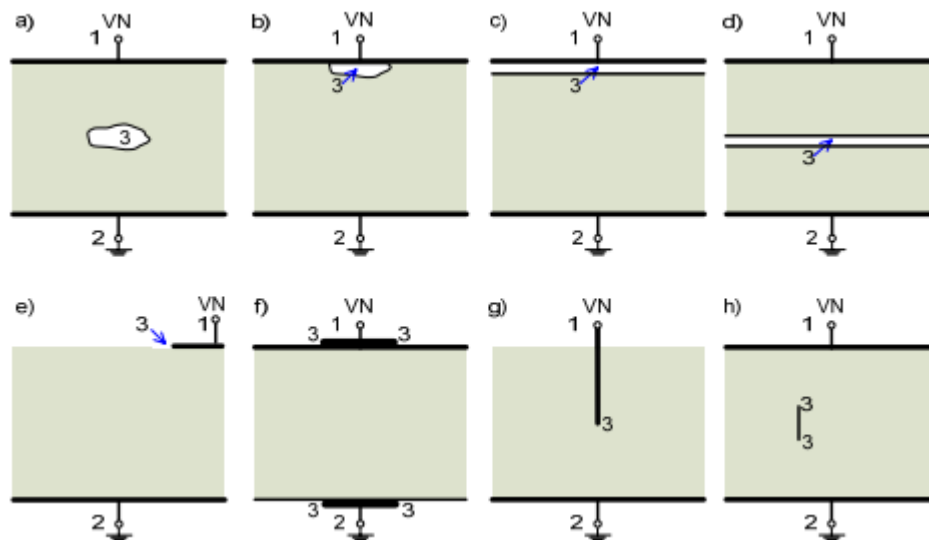
Vnitřní (interní) částečné výboje – jsou částečné výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným izolantem, jako jsou například výboje v pevném izolantu anebo v plynných dutinkách.

Vnější (externí) částečné výboje – jsou částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení jako jsou například doutnavé výboje či koróna. Vyskytují se

na místech při silné nehomogenitě elektrického pole kolem ostrých hran či výstupků na povrchu elektrod.

Povrchové částečné výboje – jsou částečné výboje v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného izolantu (např. klouzavé výboje).

Na obrázku lze vidět různé druhy částečných výbojů dle jejich polohy



- | | |
|---|--|
| a) Vzduchová bublina v izolaci | e),f) Povrchová resp. Klouzavé výboje |
| b) Vzduchová bublina pod elektrodou | g) Rozhraní jehlová elektroda – izolant |
| c),d) Vzduch mezi dvěma vodivými plochami oddělenými dielektrikem | h) Rozhraní jehlová elektroda - pevný či kapalný izolant |

Kde 1,2 značí elektrody a 3 je místo výskytu částečného výboje

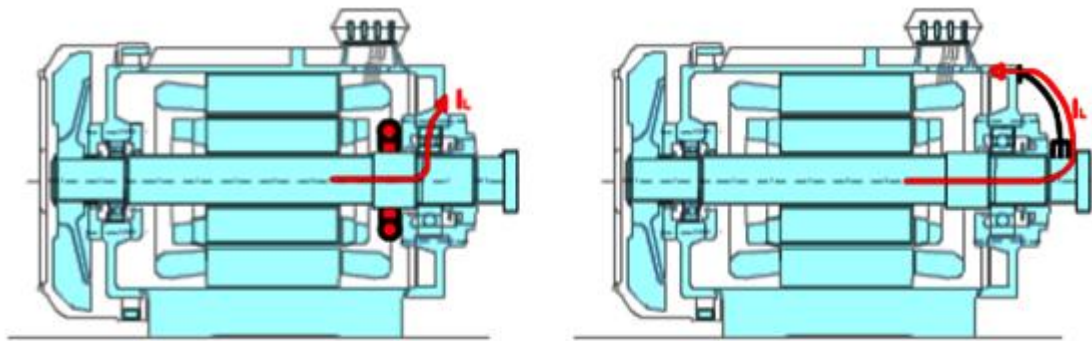
Obr. 11 Druhy částečných výbojů dle jejich polohy [14]

Částečné výboje postupně ničí většinu izolačních systémů, způsobují zkrácení životnosti a postupné snižování elektrické pevnosti až k průrazu. Částečné výboje, i když jsou energeticky málo náročné, způsobují svým opakováním škodlivý vliv na izolaci. Lze považovat všechny částečné výboje za nebezpečné a záleží na materiálu a umístění zdroje výbojové činnosti. Z hlediska citlivosti materiálu na částečné výboje můžeme rozdělit materiály na dvě základní skupiny. Materiály jako porcelán či slída jsou vysoce odolné a ani dlouhodobé působení nezpůsobuje velké nebezpečí. Na druhou stranu vysokomolekulární materiály jako jsou polyetylen (PE), zesítěný polyetylen (XLPE), polytetrafluoretylen (PTFE neboli teflon) jsou na částečné výboje velmi citlivé a z dlouhodobého hlediska dochází až k průrazu izolace. [15, 23, 24]

3 Metody pro zjišťování parametrů charakterizujících stav motorů

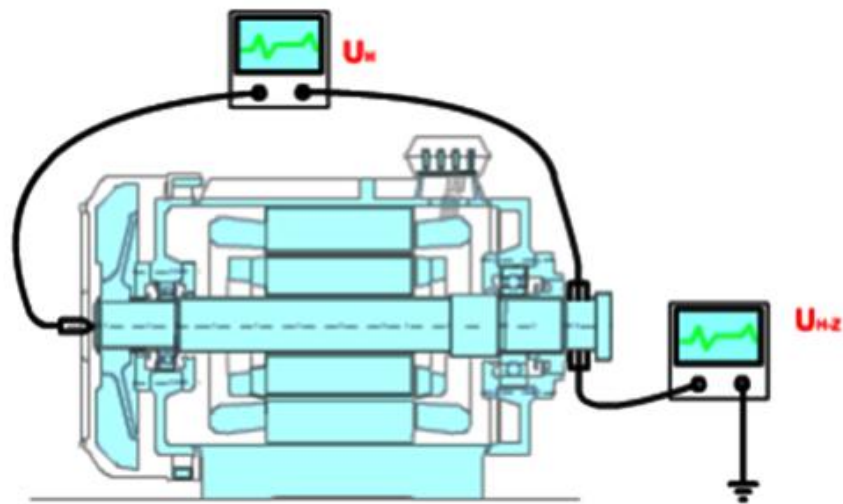
3.1 Měření hřídelových napětí a ložiskových proudů

Z mechanických uzlů stroje je při změně napájení nejvíce v ohrožení ložisko. Proudění, které z různých důvodů vznikají ve stroji, se uzavírají přes ložisko a způsobují zrychlené opotřebení. Měření ložiskových proudů je velmi obtížné z důvodů složitosti umístění proudových čidel do obvodu procházejícího proudy. Jelikož velikost proudů roste s velikostí výkonu elektrického stroje, bude měření zdánlivě jednodušší u strojů větších výkonů. Nejvhodnější místo pro měření je hřídel stroje. Při měření se musí dát pozor na ovlivnění výsledků vlivem rozptylového magnetického pole stroje. To vyžaduje demontáž stroje a většinou konstrukční úpravy štítů nebo jejich částí. Jako čidlo lze použít Rogovského cívku nebo axiálně vinutou vzduchovou cívku. U malých strojů vzniká problém s umístěním cívky do obvodu z důvodů malého prostoru mezi rotorovým paketem a štítem. Praxe ukazuje i malou věrohodnost naměřených údajů, jelikož do signálu od čidla i čidla samotného se přenáší rušení (kapacitní i induktivní vazbou). [16,20]



Obr. 12 Vložení čidla proudu do motoru a převedení proudu ložiskem vně motoru [16]

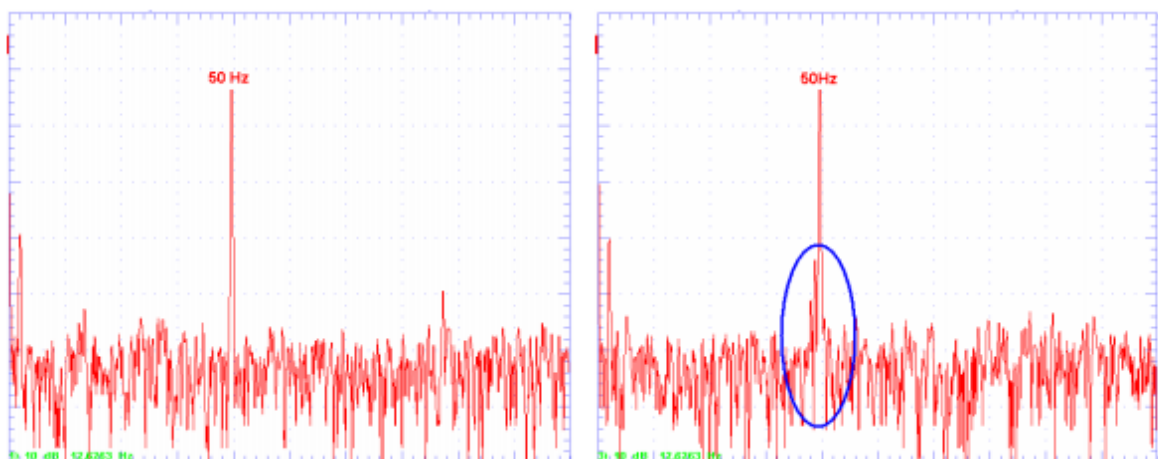
Měření hřídelových napětí je jednodušší. Myslíme tím měření napětí na hřídeli U_h a napětí mezi hřídelí a potenciální zemí U_{h-z} . Prvotně nás zajímá velikost hřídelového napětí, ale pomocí analýzy můžeme odhalit i další závady stroje. Impedanční vlastnosti měřících sond je nutné přizpůsobit impedanci měřeného obvodu. Měřicí přístroj musí být galvanicky oddělen. [16,20]



Obr. 13 Měření hřídelových napětí a napětí na hřídeli [16]

3.2 Měření a analýza napájecího proudu stroje

Analýzou napájecího proudu můžeme zpětně dojít až k příčině deformace, nesymetrie napájecího proudu. Měření probíhá při chodu stroje a stroj se nemusí odpojovat od sítě či jakkoliv demontovat. Měření se provádí bezkontaktně bez nutnosti zásahu do napájecího obvodu pomocí klešťových měřicích transformátorů proudu či proudových čidel. U velkých strojů lze použít měřicí transformátory proudu pro ochrany. Rozsah frekvence se pohybuje od nuly až k dvacetinásobku frekvence první harmonické napájení, tudíž vyhovuje většina komerčně využívaných čidel proudu. Výsledkem měření je frekvenční spektrum proudu. Pro vyhodnocení naměřeného spektra je potřeba znalostí o měřeném stroji jako počet pólů, zatížení, skutečné otáčky při měření atd. [16]



Obr. 14 Spektrum napájecího proudu bez závad a s nesymetrií v rotoru [16]

3.3 Polarizační index – p_i

Po připojení dielektrika na stejnosměrné napětí není dielektrikum schopné sledovat skokovou změnu napětí. Nenabije se okamžitě a s určitým zpožděním se bude i vybíjet. Důvodem je dielektrická relaxace – zpomalená odezva dielektrika na působení elektrického pole. Časová změna dielektrika se projeví i časově proměnným proudem. Obvodem následně protéká i_d – dobíjecí proud, který má dvě složky

$$i_d(t) = i_a(t) + i_v(t) \quad (3.3.1)$$

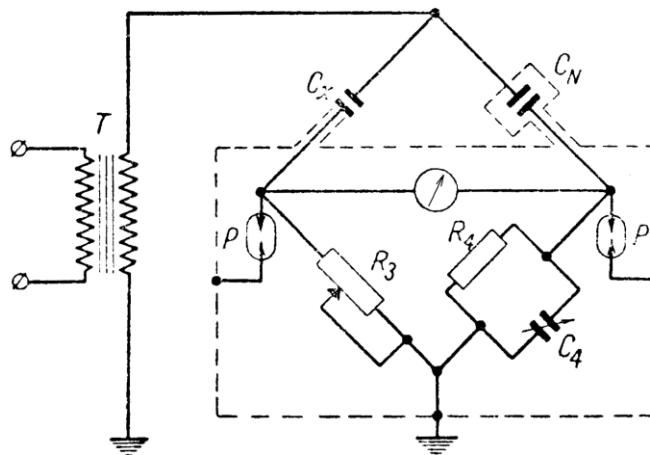
$i_a(t)$ je absorpční proud, který zahrnuje součet polarizačních proudů odpovídajících jednotlivým relaxačním polarizacím probíhajícími v dielektriku. $i_a(t)$ je časově proměnný a postupně klesá k nule; $i_v(t)$ je vodivostní proud a k jeho ustálené hodnotě se postupně blíží hodnota dobíjecího proud i_d . U suchých a neporušených izolantů je hodnota vodivostního proudu i_v extrémně malá a na čase nezávislá. U zvlhlé izolace se silně uplatňuje iontová vodivost a je potřeba uvažovat s časovou závislostí vodivostního proudu $i_v(t)$.

Jedním z parametrů pro hodnocení stavu izolace je tzv. polarizační index. Jde o bezrozměrnou veličinu, která využívá pro popis stavu izolace časovou proměnnou absorpčního proudu i_a . Při měření se zkoumá izolační stav ve dvou po sobě jdoucích časových intervalech. Jednominutový p_{i1} je definován jako poměr izolačního stavu v 15. a 60. vteřině po přiložení napětí. Používá se také desetiminutový p_{i10} , jenž používá hodnoty z první a desáté minuty. U suché a nijak poškozené izolace je vodivostní proud i_v mnohem menší nežli absorpční proud i_a a polarizační index je výrazně větší než jedna (u dobrých izolantů se ocitáme u hodnot 3-6). U vlhké či vadné izolace je vodivostní proud i_v poměrně větší a polarizační index se blíží jedné. Minutový polarizační index je definován vztahem 3.3.2, kde $i_d(15)$ a $i_d(60)$ jsou hodnoty dobíjecího proudu v 15. a 60. sekundě po připojení napětí a $R_i(60)$ a $R_i(15)$ jsou příslušné hodnoty izolačního odporu.

$$p_{i1} = R_i(60)/R_i(15) = i_d(15)/i_d(60) \quad (3.3.2)$$

3.4 Měření ztrátového činitele - Scheringův můstek

Nejpoužívanější metoda pro měření ztrátového činitele je Scheringův můstek skládající ze dvou hlavních částí. První z nich je vysokonapěťový prostor a druhá část slouží k vyvažování. Dohromady se jedná o vysokonapěťovou zkušebnu. Galvanické oddělení obou částí tvoří vzorek v příslušném elektrodovém systému a kapacitní normál. Vysokonapěťový kondenzátor je použitý jako kapacitní normál o hodnotě kolem 100 pF se ztrátami $\text{tg}\delta < 10^{-5}$. Napěťový zdroj nesmí být v oblasti používání zdrojem výbojové činnosti. Nízkonapěťová část slouží k vyrovnání můstku pomocí odporové a kapacitní dekády R_3 a C_4 . Vyrovnání indikuje nulový indikátor - N. Před započítím měření je potřeba eliminovat parazitní kapacity potenciálním regulátorem, který je k můstku dodán. Scheringův můstek lze upravit do podoby čtyřkapacitního můstku, který se odlišuje tím, že má ve všech větvích kapacitní normál a je schopen přesnějších měření. [18,21]



Obr. 15 Scheringův můstek [10]

Pro vyvážení můstku musí být splněny následující podmínky rovnováhy

$$R_e[Z_1Z_4]=R_e[Z_2Z_3] \quad (3.4.2)$$

$$I_m[Z_1Z_4]=I_m[Z_2Z_3]$$

$$\text{tg}\delta=\omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (3.4.3)$$

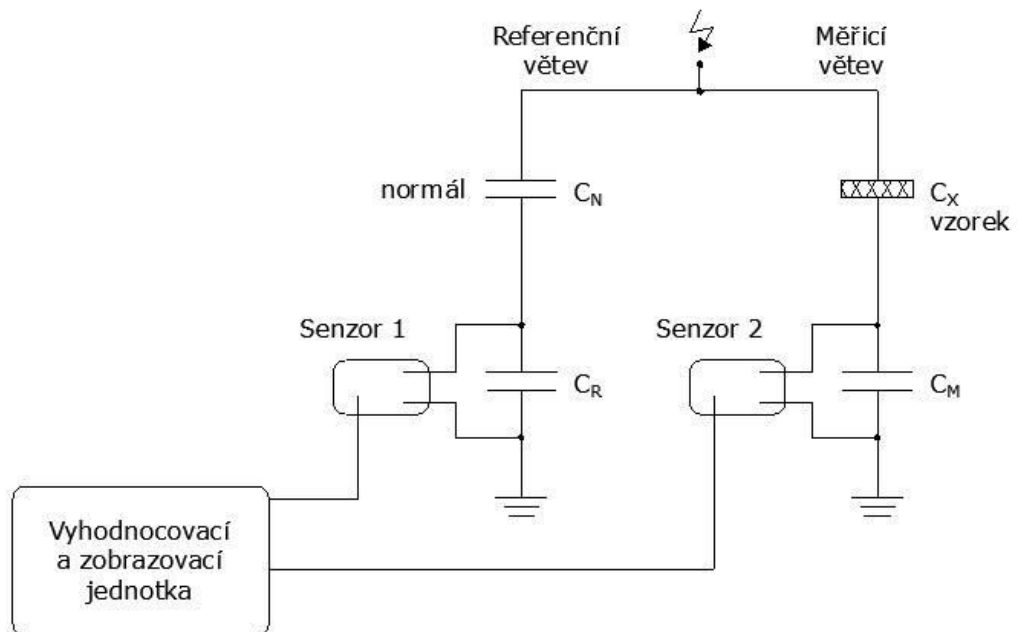
Dále platí

$$C_x=C_N \cdot R_4/R_3 \quad (3.4.4)$$

Při vyvážení platí daný vzorec

$$\frac{R_1}{j\omega C_4} = \left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) \cdot \frac{R_3 \cdot \frac{1}{j\omega C_3}}{R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}} \quad (3.4.5)$$

Automaticky můstek pro měření dielektrických ztrát - můstek slouží k automatickému zobrazení $\text{tg}\delta$, C_x a U_{zk} . Větve můstku jsou kapacitními děliči – vysokonapěťové C_x a C_n , nízkonapěťové C_m a C_r . C_m a C_r jsou hrubě nastaveny tak, že dělicí poměry větve jsou stejného řádu. Ztrátový činitel se určuje z fázového úhlu mezi napětími, která se objeví na C_m a C_r . Tato napětí jsou digitalizována senzory 1. a 2. Digitalizované signály jsou přenášeny optickými kabely do PC, kde jsou vypracovány s použitím Fourierovy transformace. Z dělicího poměru větve se určuje C_x . Velkou výhodou je použití i kondenzátorů v nízkonapěťové části a tím se eliminují chyby vzniklé příčnými (parazitními) kapacitami. [12]



Obr. 16 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát [12]

3.5 Měření částečných výbojů – kalibrace a rušení

Kalibrace je nezbytnou součástí při měření částečných výbojů a provádí se před začátkem měření. Z důvodů kapacit v měřicím obvodu a parazitních kapacit dochází mezi zkoumaným objektem a měřicím zařízením ke zkreslení pulsů částečných výbojů. To se projevuje změnou tvarů pulsů částečných výbojů. Dochází i k impedančnímu nepřízpusobení ke zmenšení přeneseného náboje. Měřicí obvod je nutno kalibrovat a vlastní měření přizpůsobit dle kalibračních hodnot.

Používají se fyzikální kalibrátory, které vytvářejí impulzy obvykle v plynném prostředí a užívají se v laboratořích jako normály částečných výbojů pro kalibraci měřidel, nebo elektronické kalibrátory, které vytvářejí impulzy pomocí derivačního kondenzátoru, jenž z obdélníkového průběhu vytvoří jehlovité impulzy, které jsou tvarem podobné částečným výbojům. Velikost kalibračního náboje u točivých strojů dosahuje hodnot až 10 000 pC a pro netočivé stroje se pohybuje od 2 do 1 000 pC. Kalibrační náboj by měl odpovídat velikosti hodnot, které předpokládáme při měření částečných výbojů, měl by být nezávislý na kapacitě zkoušeného objektu a provádí se při nulovém napájecím napětí.

Stabilita a funkčnost kalibrátoru se zjišťuje dvěma metodami. Alternativní metoda provádí integraci proudového impulsu produkovaného kalibrátorem, většinou digitálním osciloskopem s vestavěnými matematickými funkcemi. Referenční metoda kalibrační náboj porovnává s nábojem referenčního generátoru. Měření musí probíhat se stejným měřicím přístrojem. [15, 29]



Obr. 17 Ukázka kalibrace [22]

I při měření částečných výbojů dochází k rušení, které znevažuje výsledky měření. Mezi zdroje rušení spadají částečné výboje v ústrojí měřicího přístroje, rádiové, radioreléové, radiolokační vysílače a koróna na přípojnicích. Rušení se dá vyhnout co nejvhodnějším měřicím prostředím. Je velice náročně (prakticky nemožné) měřit částečné výboje v oblasti, kde stále dochází k výrobě (měřit generátor, když v okolí je v provozu náhradní), či vlivem dopravní nemožnosti používat dlouhé kabely mezi subjektem měření a měřicími přístroji. Rušení dělíme podle jeho charakteru.

Rušení harmonického charakteru - rušivé signály způsobené tyristorovými prvky. Obsahují složky, které jsou celistvými násobky napájecí frekvence.

Rušení impulzního charakteru - signály náhodně se vyskytující přes široké frekvenční spektrum. Na měřicí přístroje působí stejně jako částečné výboje.

Rušení dělíme podle zdroje rušení

Vnější rušení - jsou způsobená externími zdroji, jsou nezávislá na napětí měřeného objektu. Lze je detekovat pomocí ultrazvukového detektoru.

Vnitřní rušení - jsou způsobená interními zdroji a zpravidla rostou se zvyšujícím se zkušebním napětím. Důvodem jsou částečné výboje v měřicím obvodu nebo výboje na přívodech vysokého napětí, nedokonale uzemněné předměty, blízké vodivé předměty a mnoho dalších. [8]

3.6 Měření VLF

Při zkoušení a diagnostice vysokonapěťových motorů je potřeba si uvědomit problém s dopravou zkoušeného zařízení k místu měřicího zařízení, nebo nutnosti dopravy rozměrného měřicímu zařízení k místu měření. To je v některých případech buď obtížné, nebo velmi nákladné (nutnost demontáže stroje, nemožnost dopravy ke stroji, který je zabudován v obtížně přístupném místě nebo v kobce - místnosti provozu)

Pro nepřístupná elektrická zařízení (motory, generátory), které není možno demontovat a provést diagnostické měření ve zkušebnách nebo instalovaná v místě nedostupném pro vyzkoušení zdrojem 50 Hz (v porovnání se zdrojem nízké frekvence je zdrojem násobně hmotnějším) se rozšiřuje možnost diagnostiky a zkoušení zařízením zdrojem velmi nízkého kmitočtu (VLF). Používání a doporučené postupy pro zkoušku VLF jsou uvedeny v IEEE normě 433-2009 (IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery with High Voltage at Very Low Frequency), která obsahuje všechny potřebné informace pro měření, ať se jedná o dodatkové informace k měření olejově chlazených

motorů či informace k zápisu. Napěťový zdroj, měřicí přístroje a zkoušky musí být v souladu s ČSN EN 60060-3 technika zkoušek vysokým napětím čl.9 Zkoušky napětím velmi nízkého kmitočtu. V současné době problematika měření VLF u vysokonapěťových motorů není důkladně probádaná a často se vychází z poznatků o měření VLF u kabelových svazků.

Obecně je počet částečných výbojů za periodu pro různé frekvence stejný a nemělo by se dosahovat rozdílných výsledků. V praxi se měří částečné výboje při $f=50$ Hz po dobu 30 s a pro $f=0,1$ Hz po dobu 1 000 s. Doba 1 000 s (cca 16 min) je dostatečně dlouhá pro určení velikosti a polohy ČV. Měření lze provádět i při frekvencích 0,01 Hz, 0,02 Hz a 0,05 Hz, avšak v praxi je málo využívána. [23,24]

Porovnání velikostí zdrojů VN pro $f=50$ Hz a $f=0,1$ Hz

V následujícím vzorci můžeme vidět změnu reaktance vlivem rozdílné frekvence.

$$X_{c50}=1/\omega C=1/(2\pi fC)=1/(2\pi 50C) \quad (3.6.1)$$

$$X_{c0,1}=1/\omega C=1/(2\pi fC)=1/(2\pi 0,1C) \quad (3.6.2)$$

$$X_{c0,1}/X_{c50}=50/0,1=500 \quad (3.6.3)$$

Pro stejné napětí bude proud pro $f=0,1$ Hz 500krát menší nežli pro $f=50$ Hz. Výkon zdroje bude také 500krát menší. Z toho vyplývá menší hmotnost zdroje. Změnou frekvence se změni i velikost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, jak vyplývá ze vztahu

$$\text{tg } \delta=1/(\omega CR)=1/(2\pi fCR) \quad (3.6.4)$$

Pokud by byl ztrátový činitel úměrný jen frekvenci, zvětšil by se 500krát ($f=0,1$ Hz vůči $f=50$ Hz). Ve skutečnosti se mění i odpor vzhledem k délce periody $T=1/f$.

Délka čtvrtiny periody pro $f=0,1$ Hz je 2,5 vteřiny a délka čtvrtiny periody po $f=50$ Hz je 5 ms. Čím větší je délka periody, tím je odpor R větší. V praxi se ztrátový činitel zvětší jen cca 1,5–3,5krát.

Porovnání zdrojů pro $f=50$ Hz a $f=0,1$ Hz v praxi

Vezmeme-li do úvahy kabel o délce 3 km s kapacitou cca $1 \mu\text{F}$ a vinutí statoru v HDG Lipno I s kapacitou cca $0,8 \mu\text{F}$, jedná se řádově o obdobné kapacity a pro porovnání dostačující.

Reaktance, proud zdroje, výkon zdroje:

$$\text{Reaktance} \quad X_{c60} = 1 / (2 * \pi * 60 * 10^{-6}) = 2 \, 650 \, \Omega \quad (3.6.5)$$

$$\text{Proud zdroje} \quad I = U / X_{c60} = 53000 / 2650 = 20 \, \text{A} \quad (3.6.6)$$

$$\text{Výkon} \quad S = U * I = 1,06 \, \text{MVA} \quad (3.6.7)$$

$$\text{Hmotnost zdroje} \quad \text{cca } 400 \, \text{kg}$$

Proud I pro $f=0,1$ Hz je 600 krát menší nežli pro $f=60$ Hz

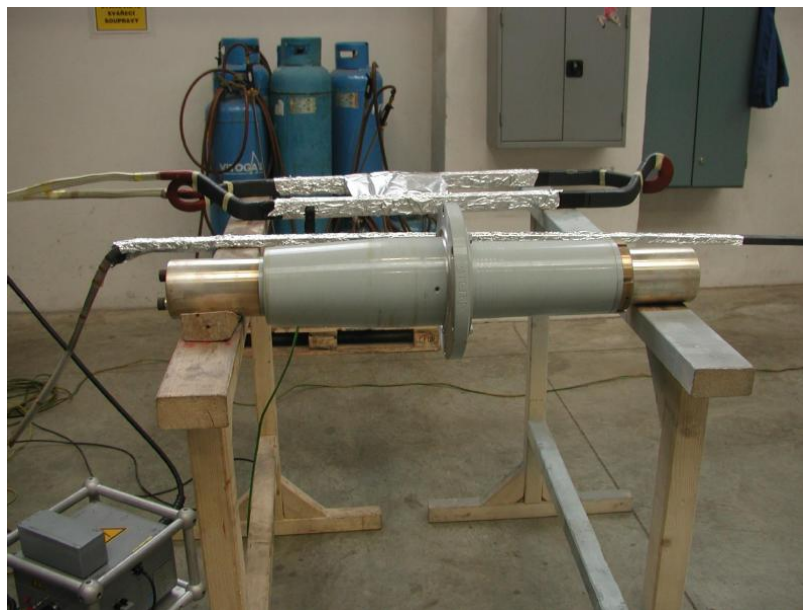
$$\Rightarrow I = 20 / 600 = 0,03 \, \text{A} \quad (3.6.8)$$

$$\text{Výkon} \quad S = 53000 * 0,03 = \text{cca } 1,8 \, \text{kVA} \quad (3.6.9)$$

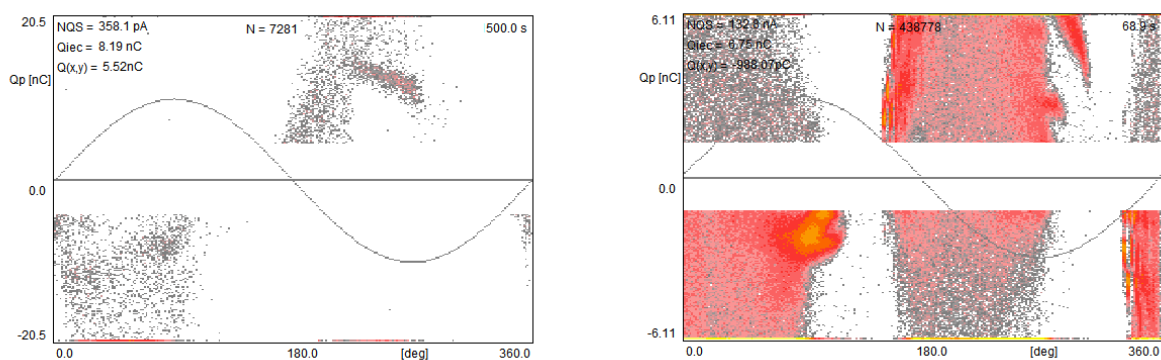
$$\text{Hmotnost} \quad \text{cca } 50 \, \text{kg}$$

3.7 Měření ČV a $\text{tg}\delta$ ve firmě tg 1.SERVIS-ENERGO, s.r.o.

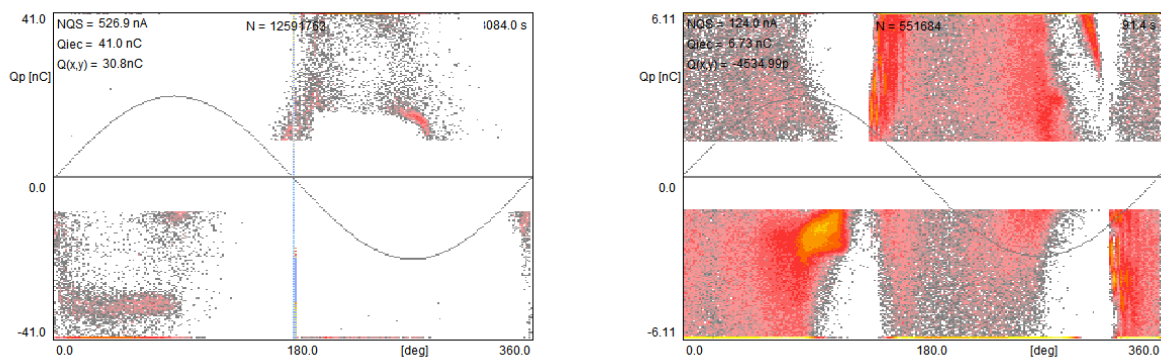
Měření probíhalo ve firmě 1.SERVIS-ENERGO, s.r.o. v lednu roku 2013 za účelem zjištění chování přístroje pro měření částečných výbojů VLF v porovnání s měřením při $f=50$ Hz. Pro měření byly vybrány 3 náhodné vzorky – statorová tyč, průchodka a cívka z elektrárny Kamýk. Informace o daných vzorcích nejsou podstatné z důvodu, že při měření je důležité porovnání dvou měřících procesů. Při měření pomocí VLF v délce cca 1000 s měly být obrazce částečných výbojů dostatečně vypovídající.



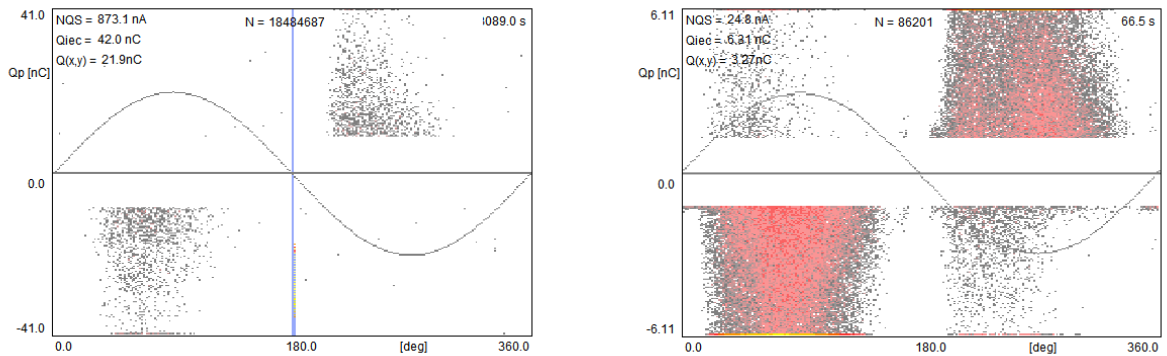
Obr. 18 Vzorky pro měření částečných výbojů při $f=0,1$ Hz a $f=50$ Hz



Obr. 19 Tyč - matice částečných výbojů při $f=0,1$ Hz a $f=50$ Hz (při napětí 4,4 kV)



Obr. 20 Tyč - matice částečných výbojů při $f=0,1$ Hz a $f=50$ Hz (při napětí 6,3 kV)



Obr. 21 Cívka - matice částečných výbojů při $f=0,1$ Hz a $f=50$ Hz (při napětí 4,4 kV)

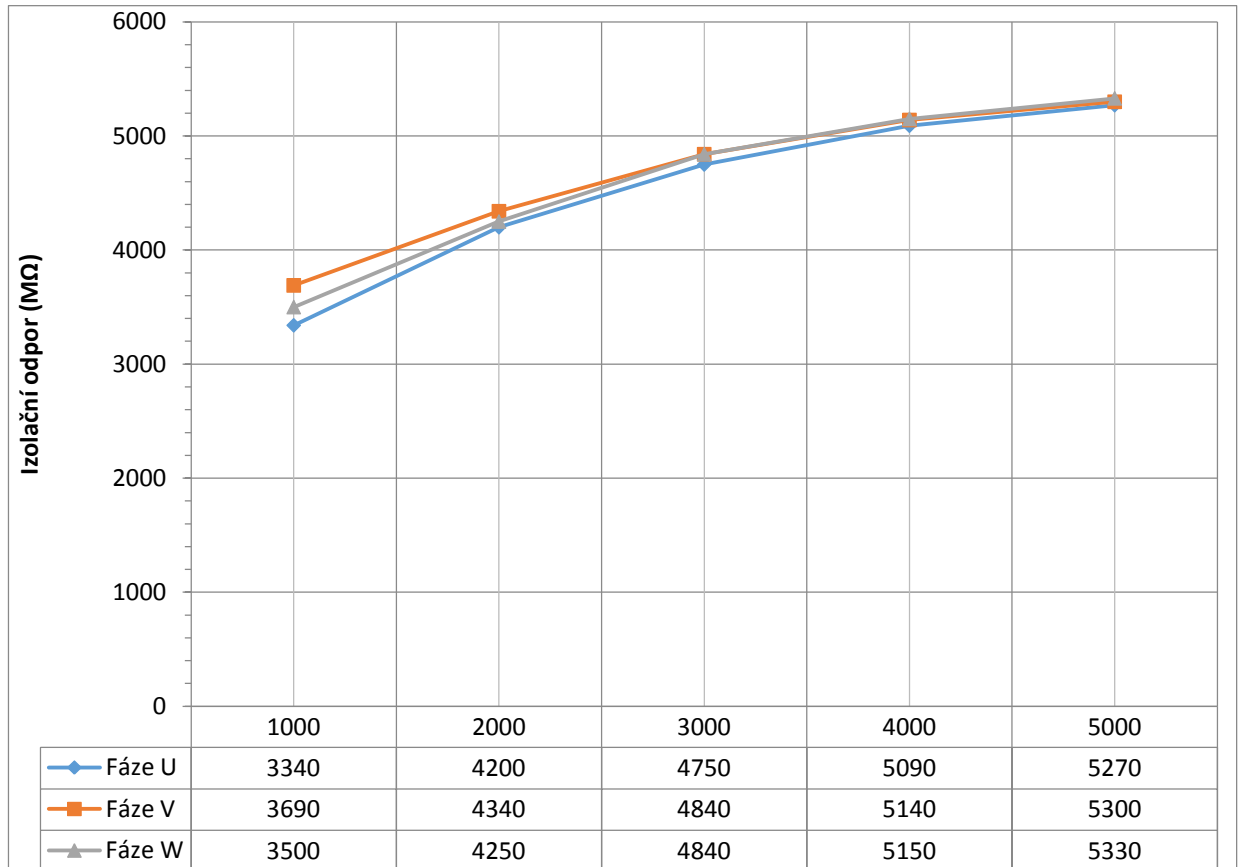
Tab. 2 Porovnání hodnot ztrátového činitele při $f=0,1$ Hz a $f=50$ Hz

	$f=0,1$ Hz	$f=50$ Hz	Podíl	U [kV]
Průchodka	0,275	0,106	2,5943	2
	0,328	0,121	2,7107	4
	0,336	0,136	2,4706	6
	0,352	0,132	2,6667	8
	0,362	0,128	2,8281	10
Statorová tyč	0,0251	0,00431	5,8237	2
	0,0284	0,0109	2,6055	4
	0,0363	0,0156	2,3269	6
	0,0488	0,0167	2,9222	8
	0,062	0,02	3,1000	10
Cívka-Kamýk	0,0495	0,0267	1,8539	2
	0,0605	0,0325	1,8615	4
	0,0715	0,0298	2,3993	6
	0,0788	0,0346	2,2775	8
	0,0913	0,0392	2,3291	10
		průměr	2,7180	

Z uvedeného měření můžeme konstatovat, že výsledná měření částečných výbojů pro $f=0,1$ Hz a $f=50$ Hz nejsou identická. Lze říci, že není vhodné, aby se porovnávala měření z roku 2005 při $f=50$ Hz a měření z roku 2010 při $f=0,1$ Hz, jelikož dochází k jiným výsledkům. V maticích částečných výbojů pozorujeme při měření VLF i velký vliv rušení z důvodu provozu ostatních elektrických zařízení během měření (ve formě průrazu při 180°). Ovšem v ideálních podmínkách je rušení při měření VLF nižší, protože je výstup vytvořen z DC napětí a nepřenáší se rušivé signály v síti 50 Hz. Z uvedené tabulky Tab. 2 můžeme vidět, že ztrátový činitel průměrně zvětší 2,72krát při $f=0,1$ Hz oproti $f=50$ Hz (dle zkušeností se hodnota pohybuje v rozmezí 1,5 – 3,5).

3.8 Měření turbogenerátoru v Žilině

Dne 16.10.2014 byla provedena diagnostika generátoru v nejmenované společnosti v Žilině při teplotě 24,9 °C a relativní vlhkosti ovzduší 77,4 % pomocí zdroje VLF . Jednalo se o generátor Škoda z roku 1982.



Obr. 22 Napěťová závislost izolačního odporu vinutí statoru generátoru

Při podmínce, že poslední naměřená hodnota musí být ≥ 75 % první, jsme došli k výsledku, že daný stroj vyhověl. Daná podmínka byla dána od zákazníka.

Tab. 3 Izolační stav generátoru (5000V DC), polarizační index

	R_{iz15} [MΩ]	R_{iz60} [MΩ]	pi [-]
U – zem	1270	3590	2,83
V – zem	1240	3490	2,81
W – zem	1230	3520	2,86
U – V	2840	8020	2,82
V – W	3390	9090	2,68
W - U	2670	7230	2,71

V následující tabulce 4 můžeme vidět výsledky měření. V prvním sloupci je napětí odstupňované po 20 % vůči U_n . V dalším sloupci již naměřené hodnoty pro $\text{tg}\delta$. Třetí sloupec ukazuje procentuální změnu mezi naměřenými hodnotami ztrátového činitele, který se využije pro zhodnocení správné funkčnosti stroje a v posledních dvou sloupcích naměřená kapacita a náboj stroje

Tab. 4 Měření $\text{tg}\delta$ a C při 0,1 Hz (VLF)

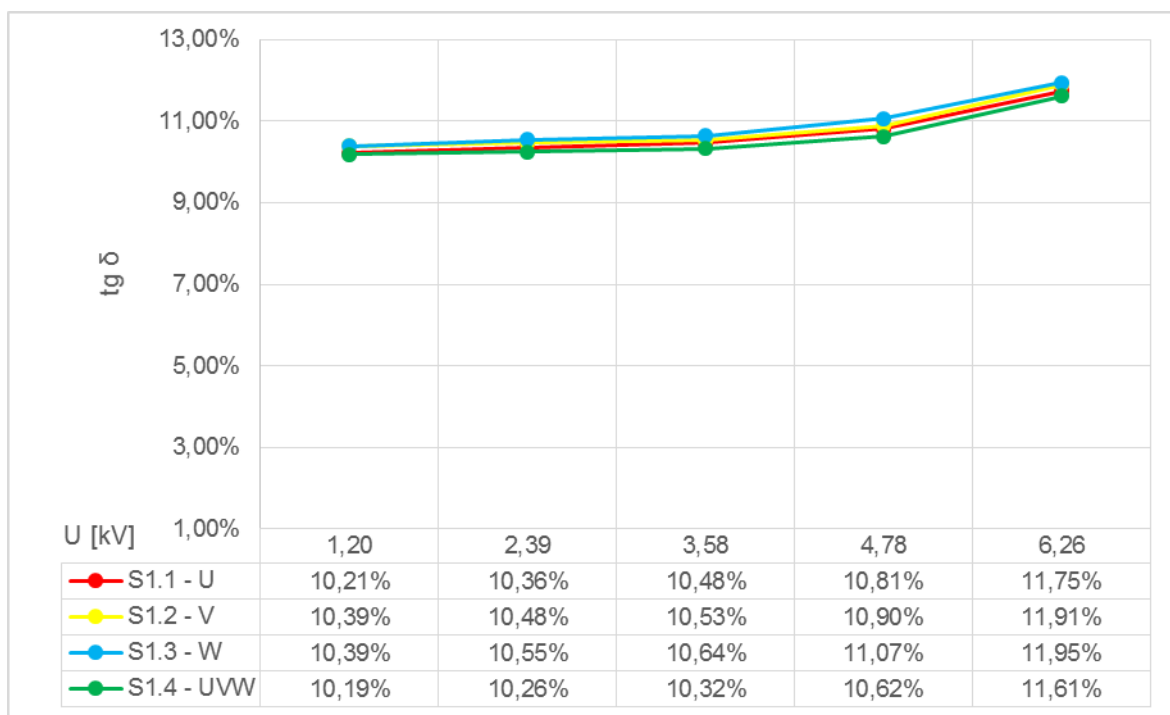
Fáze U				
U [kV]	$\text{tg}\delta$	$\Delta(\text{tg}\delta)$	C_x [nF]	Q [pC]
1,20	10,21%	0,00%	86,21	434
2,39	10,36%	0,15%	86,32	695
3,58	10,48%	0,11%	86,39	2434
4,78	10,81%	0,33%	86,61	7043
6,26	11,75%	0,94%	87,52	11304
Fáze V				
U [kV]	$\text{tg}\delta$	$\Delta(\text{tg}\delta)$	C_x [nF]	Q [pC]
1,19	10,39%	0,00%	86,94	260
2,38	10,48%	0,09%	86,99	434
3,58	10,53%	0,05%	87,02	1913
4,77	10,90%	0,37%	87,26	7391
6,25	11,91%	1,01%	88,25	11043
Fáze W				
U [kV]	$\text{tg}\delta$	$\Delta(\text{tg}\delta)$	C_x [nF]	Q [pC]
1,19	10,39%	0,00%	88,25	173
2,38	10,55%	0,16%	88,30	383
3,57	10,64%	0,09%	88,36	1391
4,76	11,07%	0,44%	88,69	7217
6,24	11,95%	0,87%	89,56	10956
Fáze UVW				
U [kV]	$\text{tg}\delta$	$\Delta(\text{tg}\delta)$	C_x [nF]	Q [pC]
1,19	10,19%	0,00%	253,38	357
2,38	10,26%	0,07%	253,61	469
3,57	10,32%	0,07%	253,76	1607
4,75	10,62%	0,30%	254,47	3125
6,23	11,61%	0,99%	257,25	9910

V tabulce 5 jsou uvedeny předem dané podmínky pro diagnostiku stroje.

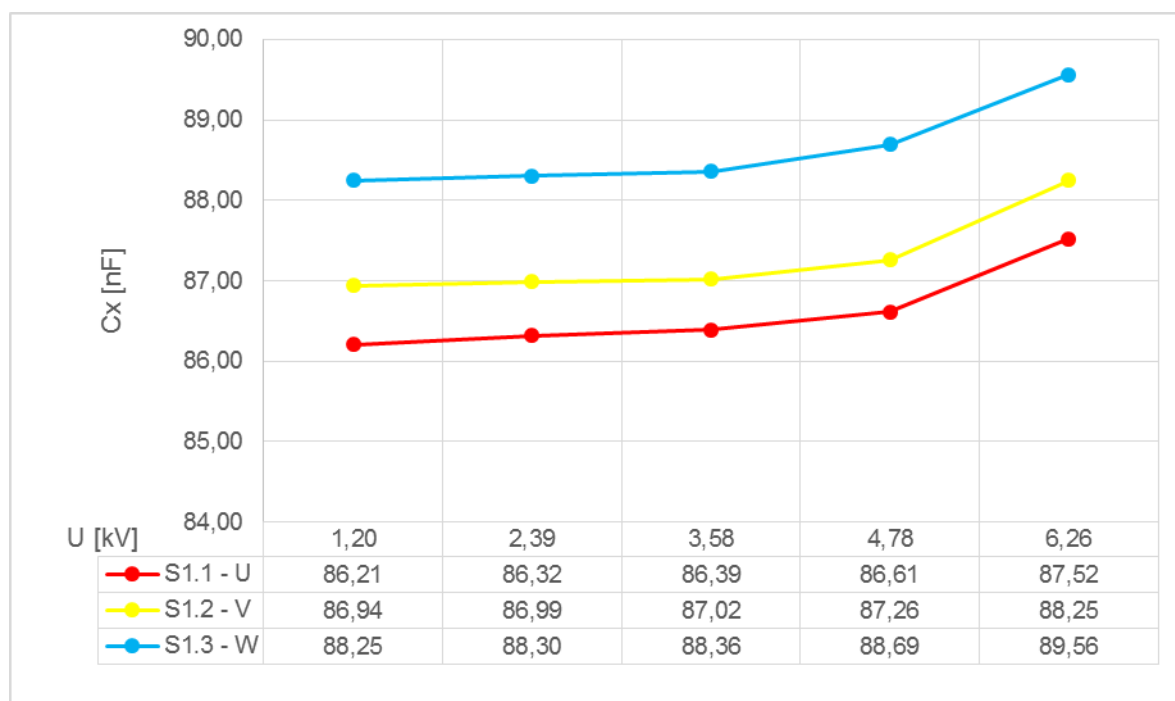
- ztrátový činitel nesmí být menší nebo roven 12 % při $0,2U_n$
- rozdíl ztrátového činitele pro $0,6U_n$ a $0,2$ nesmí přesáhnout 1,5 %
- max. rozdíl mezi po sobě měřenými ztrátovými činiteli nesmí přesáhnout 1,5 %
- rozdíl mezi kapacitou při $1,0U_n$ a $0,2U_n$ nesmí být větší nežli 1,5 %

Tab. 5 Vyhodnocování výsledků z měření $\text{tg}\delta$ a C při 0,1 Hz (VLF)

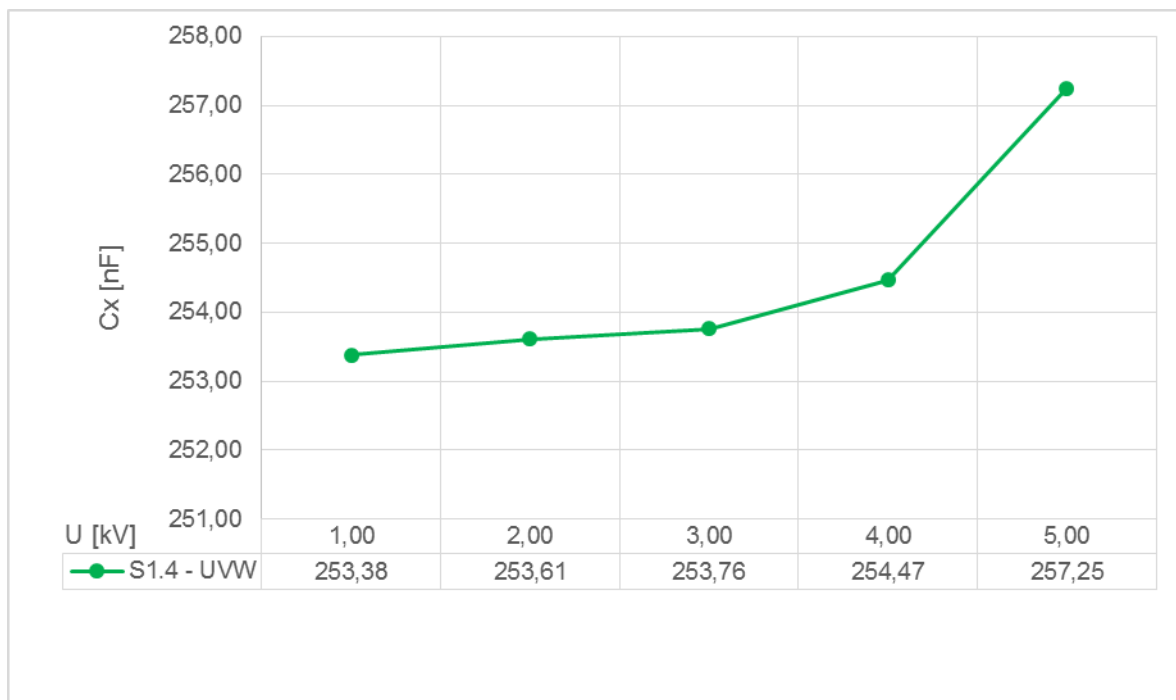
Fáze U			
kritérium	hodnota	doporučení	vyhovující
$\text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	10,21 %	$\leq 12 \%$	ANO
$\text{tg}\delta_{0,6\text{Un}} - \text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	0,26 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
Max $\Delta \text{tg}\delta$	0,94 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
$\Delta C(1,0; 0,2)$	1,5 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
Fáze V			
kritérium	hodnota	doporučení	vyhovující
$\text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	10,39 %	$\leq 12 \%$	ANO
$\text{tg}\delta_{0,6\text{Un}} - \text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	0,14 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
Max $\Delta \text{tg}\delta$	1,01 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
$\Delta C(1,0; 0,2)$	1,5 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
Fáze W			
kritérium	hodnota	doporučení	vyhovující
$\text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	10,39 %	$\leq 12 \%$	ANO
$\text{tg}\delta_{0,6\text{Un}} - \text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	0,24 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
Max $\Delta \text{tg}\delta$	0,87 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
$\Delta C(1,0; 0,2)$	1,5 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
Fáze UVW			
kritérium	hodnota	doporučení	vyhovující
$\text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	10,19 %	$\leq 12 \%$	ANO
$\text{tg}\delta_{0,6\text{Un}} - \text{tg}\delta_{0,2\text{Un}}$	0,14 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
Max $\Delta \text{tg}\delta$	0,99 %	$\leq 1,5 \%$	ANO
$\Delta C(1,0; 0,2)$	1,5 %	$\leq 1,5 \%$	ANO



Obr. 23 Grafické vyjádření tg δ v závislosti na napětí

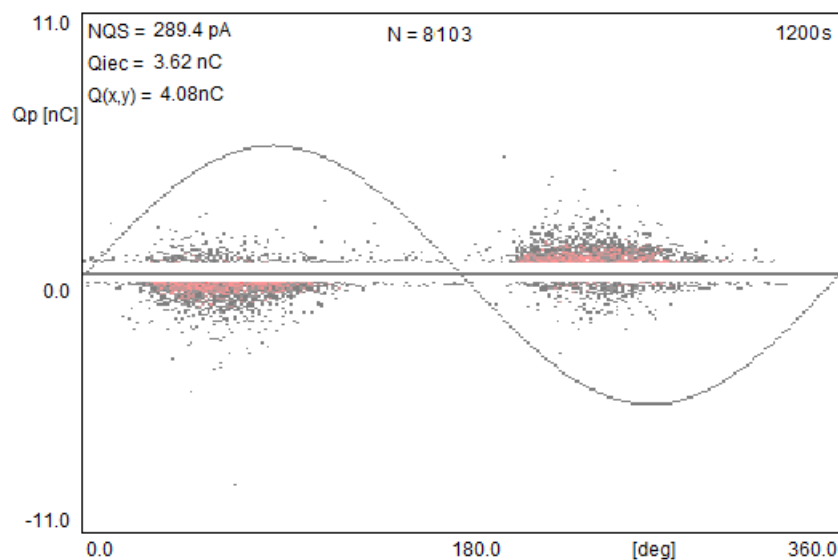


Obr. 24 Grafické vyjádření C v závislosti na napětí

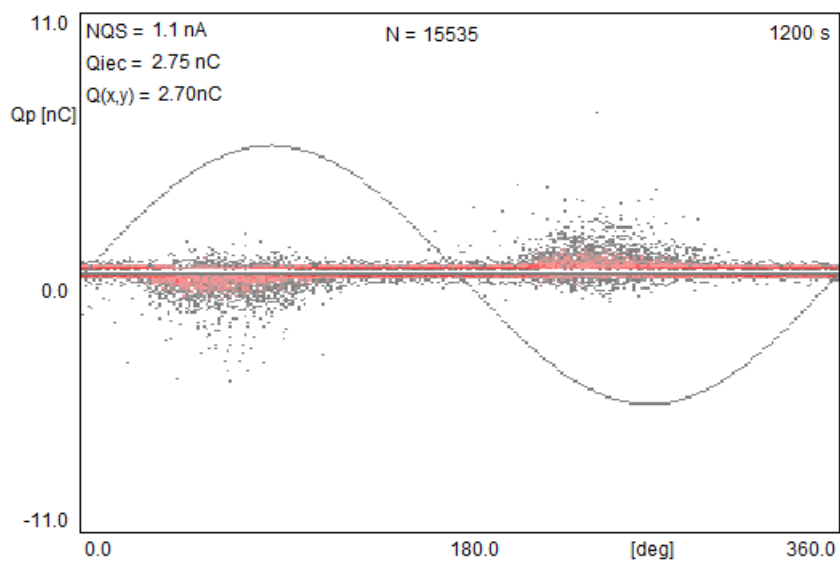


Obr. 25 Grafické vyjádření C v závislosti na napětí

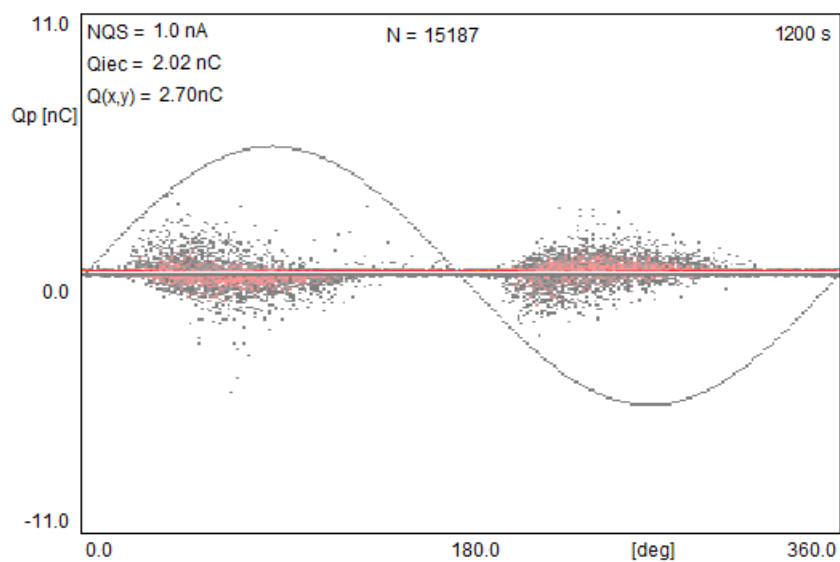
Na následujících obrázcích lze vidět záznamy částečných výbojů vitnutí tgδ Žilina pomocí VLF po dobu 1200 s



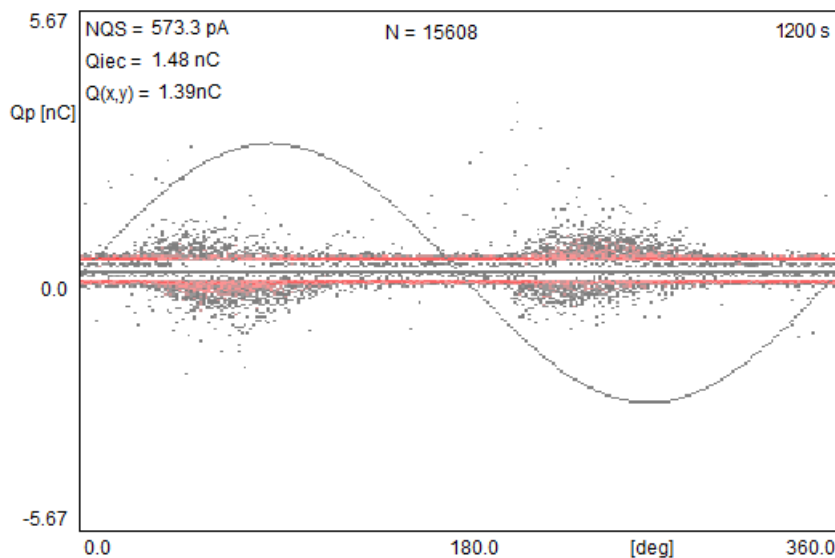
Obr. 26 Fáze U - Měření částečných výbojů při 0,1 Hz (VLF) – 1200 s



Obr. 27 Fáze V - Měření částečných výbojů při 0,1 Hz (VLF) – 1200 s



Obr. 28 Fáze W - Měření částečných výbojů při 0,1 Hz (VLF) – 1200 s


Obr. 29 Fáze UVW - Měření částečných výbojů při 0,1 Hz (VLF) – 1200 s

Tab. 6 Základní parametry při měření částečných výbojů a jejich doporučené meze

Fáze U		hodnota	doporučení	vyhovující
Qp [pC]	vrcholový náboj	1910	< 12 000	ANO
Qiec [pC]	ekvivalentní náboj	3620	< 10 000	ANO
NQS [pA]	proud výbojů	289,4	-	-
N [-]	četnost výbojů	8103	-	-
PDIV [V]	zapalovací napětí ČV	2590	$\geq 0,5 U_f$	ANO
Fáze V				
Qp [pC]	vrcholový náboj	1910	< 12 000	ANO
Qiec [pC]	ekvivalentní náboj	2750	< 10 000	ANO
NQS [pA]	proud výbojů	1100,0	-	-
N [-]	četnost výbojů	15535	-	-
PDIV [V]	zapalovací napětí ČV	2839	$\geq 0,5 U_f$	ANO
Fáze W				
Qp [pC]	vrcholový náboj	2700	< 12 000	ANO
Qiec [pC]	ekvivalentní náboj	2020	< 10 000	ANO
NQS [pA]	proud výbojů	1000	-	-
N [-]	četnost výbojů	15158	-	-
PDIV [V]	zapalovací napětí ČV	3108	$\geq 0,5 U_f$	ANO
Fáze UVW				
Qp [pC]	vrcholový náboj	2410	< 18 000	ANO
Qiec [pC]	ekvivalentní náboj	1480	< 15 000	ANO
NQS [pA]	proud výbojů	573	-	-
N [-]	četnost výbojů	15608	-	-
PDIV [V]	zapalovací napětí ČV	2935	$\geq 0,5 U_f$	ANO

Celková zhodnocení měření

- 1) Izolační stav statoru generátoru – vyhovuje
- 2) Měření izolačního odporu rotoru generátoru a výpočet polarizačního indexu - vyhovuje
- 3) Měření napěťové závislosti izolačního odporu statoru – vyhovuje
- 4) Měření kapacity, ztrátového činitele – vyhovuje
- 5) Měření částečných výbojů statorového vinutí – vyhovuje

Doporučení

- 1) Zjištěn poměrně nízký izolační stav vinutí rotoru generátoru – možnou příčinou je vysoká relativní vlhkost ovzduší ve strojovně. Doporučujeme před najetím stroje sušení při běhu naprázdno.
- 2) Sledovat stav rotoru – mezizávitové zkraty, v některé z příštích revizí uvažovat o převinutí rotoru a spojit s kontrolou obručí.

Použité přístroje

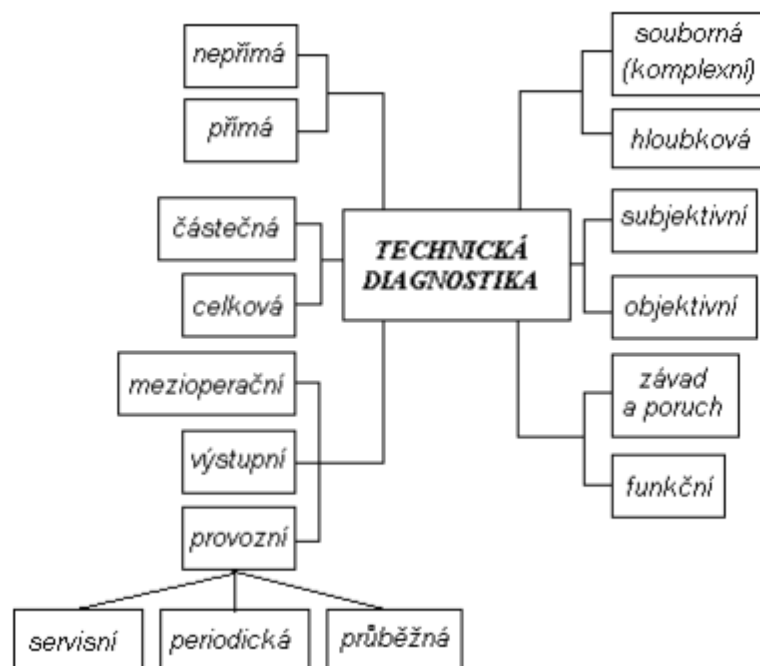
- VN zdroj VLF34E-NF, High Voltage, ev. č. 1-000094
- Měřicí souprava ICMflex 30 kV, 5 A, Power Diagnostix Systems, ev. č. 1-000095
- Rázový generátor 12 kV PKG212A, č. 6-000461

<i>Nejistota měření:</i>	<i>Napětí:</i>	$0,03*U$
	<i>Náboj:</i>	$0,3 pC+0,03*q$
<i>Přesnost měření:</i>	<i>tg δ:</i>	$0,01\%$

4 Mobilní zařízení pro diagnostiku vysokonapěťových motorů

4.1 Technická diagnostika

Technická diagnostika poskytuje objektivní informace o provozním stavu elektrických strojů či o potřebě jejich případné údržby a průběhu doby života. Zavedením technické diagnostiky se snižují náklady na údržbu (výměna olejů, náhradní díly atd.) a patří mezi základní atribut ovlivňující bezpečnost provozu. Technická diagnostika je obor zabývající se metodami a prostředky zjišťování technického stavu objektu (obzvlášť především u bez demontážní a nedestruktivní diagnostice). Diagnostikování se rozlišuje na funkční a testovací. Při testovací diagnostice jsou na vstup sledovaného objektu přiváděny stimulační signály. To umožňuje lokalizovat poruchy. Předpokládá se, že testovací signál nenarušuje běžný provoz objektu. Při funkční diagnostice jsou vyšetřovány měřicí signály senzorů při běžném či zvlášť nastaveném provozním režimu objektu. Funkční diagnostika je zpravidla vestavěna do sledovaného objektu. Dále můžeme technickou diagnostiku rozdělit dle [25,26,27]



Obr. 30 Rozdělení technické diagnostiky [27]

Mezi základní pojmy technické diagnostiky patří:

Diagnóza - diagnóza je vyhodnocování provozuschopnosti objektu za daných podmínek (zjišťování stavu objektu) a vede k řešení základních úloh. Zjišťuje detekci poruchy, což znamená identifikaci poruchy objektu a nebo jeho části a dále lokalizaci poruchy, která určuje místo poruchy objektu.

Prognóza - odhaduje chování diagnostikovaného objektu v následujícím období.

Geneze - sleduje vývoj vlastnosti diagnostikovaného objektu. Analyzuje příčiny poruch nebo předčasné zhoršení technického stavu objektu.

Diagnostické prostředky - jsou technická zařízení (senzory, testery atd.), pracovní postupy pro analýzu a vyhodnocení diagnostického objektu, personál nutný pro diagnostické řešení.

Diagnostický systém - jedná se o soubor činností a opatření pro zajištění bezporuchového stavu diagnostikovaného zařízení. Rozdělujeme na ON-LINE, jenž vyhodnocuje technický stav objektu za provozu, a OFF-LINE, kdy diagnostikujeme objekt mimo provoz.

Diagnostická veličina je nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu či jeho části. Jedné příčině může odpovídat několik následků a naopak. [25,26,27]

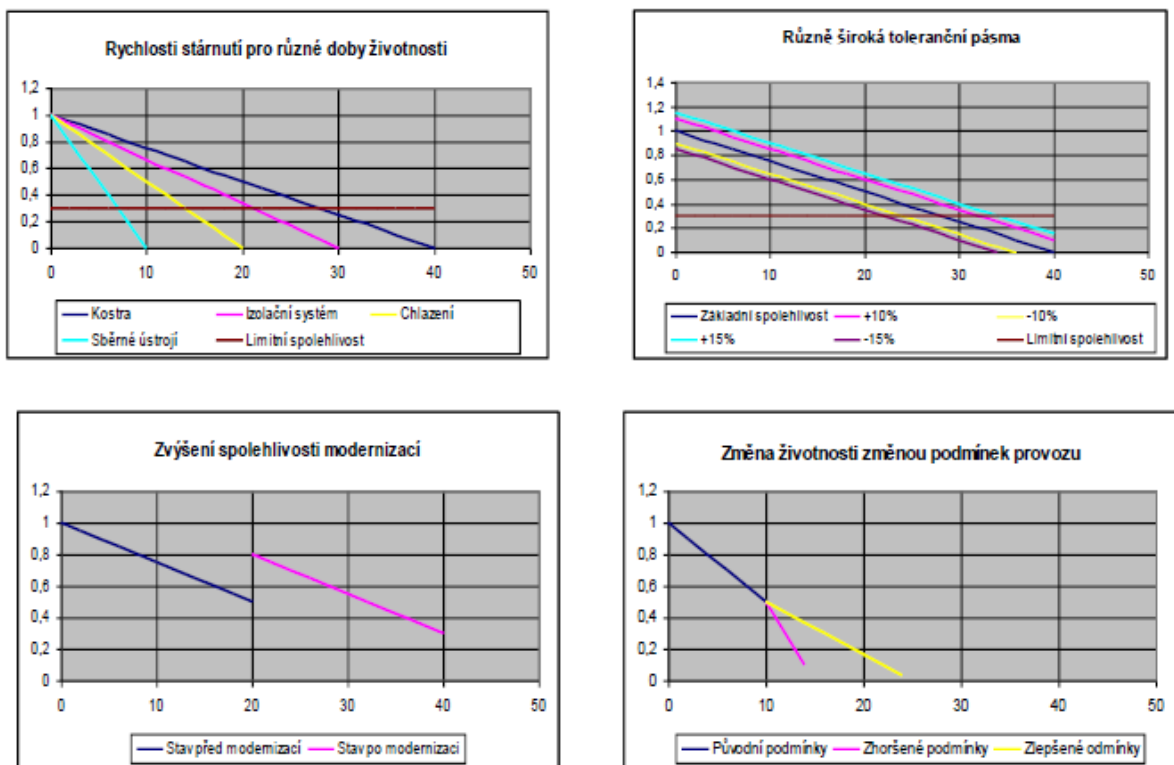
Spolehlivost je nutná obzvláště u energetických celků i z důvodu bezpečnosti a je podmíněna:

- Pečlivou technickou přípravou
- Použitím jakostních materiálů
- Vysoce kvalitním dílenským zpracováním
- Provedení náročných zkoušek a testů
- Kvalitní instalací na příslušných lokalitách
- Dodržováním provozních a bezpečnostních předpisů

V průběhu realizace výroby až k ukončení provozu stroje je potřeba zajistit spolehlivost zařízení (izolačního systému stroje). Stručná ukázka potřebných kroků:

- Konstrukční a technologická příprava
- Jakost vstupních materiálů
- Dílenské zpracování
- Mezioperační kontroly
- Výstupní kontroly
- Konečně a předávací zkoušky

- Protokol a předávací dokumentace
- Instalace zařízení
- Uvádění do provozu
- Přejímací zkoušky
- Sledování za provozu – Diagnostika
- Provozní deník
- Plán kontrol, zkoušek a oprav
- Korekce odstávek dle stavu zařízení



Obr. 31 Ukázka problematiky provozní diagnostiky v čase

Na obrázku 31 vidíme problematiku provozní diagnostiky v čase. Můžeme vidět na obrázku – Rychlosti stárnutí pro různé doby životnosti, že nejcitlivějším místem v řetězci podsystemu elektrického zařízení jsou izolační systémy následovaná chlazením. Pro provoz zařízení musíme počítat s různými tolerančními pásy životnosti, které závisí na kvalitě údržby, správného návrhu stroje, pravidelného servisu atd. Vidíme, že elektrická zařízení po modernizaci mohou být v provozu o desítky let déle nežli bez časného zásahu, protože včas chycená závada následně nezpůsobí řetězovou reakci vedoucí až k možnému zničení. V případě zhoršení provozních podmínek (znečištěné prostředí, zvýšená teplota okolí atd.)

dochází i ke změně životnosti elektrického zařízení. U moderních průmyslových výrobků se lze s technickou diagnostikou setkat častěji nežli dříve z důvodů bezpečnosti a snížení nákladů. Nová technika umožňuje snáze realizovat technickou diagnostiku jako součást samotných strojů. Vhodným schématem údržby založené na průběžné diagnostice lze předcházet poruchám objektů a optimalizovat náklady na jejich životní cyklus. [25,26,27]

4.2 Požadavky na mobilní diagnostické zařízení

Základním požadavkem pro mobilní diagnostické zařízení je, aby měření parametrů u elektrických strojů bylo umožněno i v místech nepřístupných pro dovoz vysokonapěťových zdrojů průmyslového kmitočtu (mimo cesty pro převoz autem znamená dlouhé vedení vysokonapěťového kabelu a s tím spojené problémy s rušením signálů a bezpečnosti při měření). Požadavky pro mobilní diagnostické zařízení jsou :

- Možnost dopravy osobním automobilem k měřenému objektu (budově)
- Hmotnost jednotlivých komponentů do 40 kg pro snadný přenos ,v ruce
- Připojení zdroje i v nepřístupných místech napájením 230 V do cca 10 A
- Robustnost konstrukce dovolující dopravu jednotlivých komponentů bez poškození

Zkoušení a diagnostika generátorů a zvláště VN motorů jsou obvykle omezeny nutností dopravy zkoušeného zařízení k místu měření, nebo nutností dopravy rozměrného zařízení k místu měření. To je v některých případech buď obtížné, nebo velmi nákladné (nutnost demontáže stroje, nemožnost dopravy k stroji, který je zabudován v obtížně přístupném místě nebo kobce - místnosti provozu).

Pro nepřístupná elektrická zařízení (motory, generátory), které není možno demontovat a následně provést diagnostická měření ve zkušebnách, nebo pro zařízení instalovaná v místě nedostupném pro vyzkoušení zdrojem 50 Hz (v porovnání se zdrojem nižších frekvencí zdrojem násobně hmotnějším) je možno provádět diagnostiku a zkoušení zařízení zdrojem velmi nízkého kmitočtu (VLF). Použití těchto zdrojů umožní provádění diagnostických měření za podmínky snížení potřebného výkonu napájecího zdroje v poměru 1:500 při požití zdroje 0,1 Hz. Podle daných podmínek byly vybrány přístroje popsány níže, které splňují veškeré předešlé podmínky.

Pro měření je doporučeno převoz pomocí užitkového vozu s dostatečnou kapacitou. Příkladem může být Ford Transit Courier s úložným prostorem o objemu 2,3 m³ s využitelnou plochou 2,59 m a s možností zabudované sklopné přepážky pro větší garanci bezpečnosti převozu (viz Obrázek 32). K místu měření je potřeba pouze přenos v ruce (přístroje jsou na kolečkách a tím se snižuje náročnost pro obsluhu). Pro elektrické připojení není potřeba speciálních adapterů a v obalu jsou přístroje velmi robustné. [23,30]



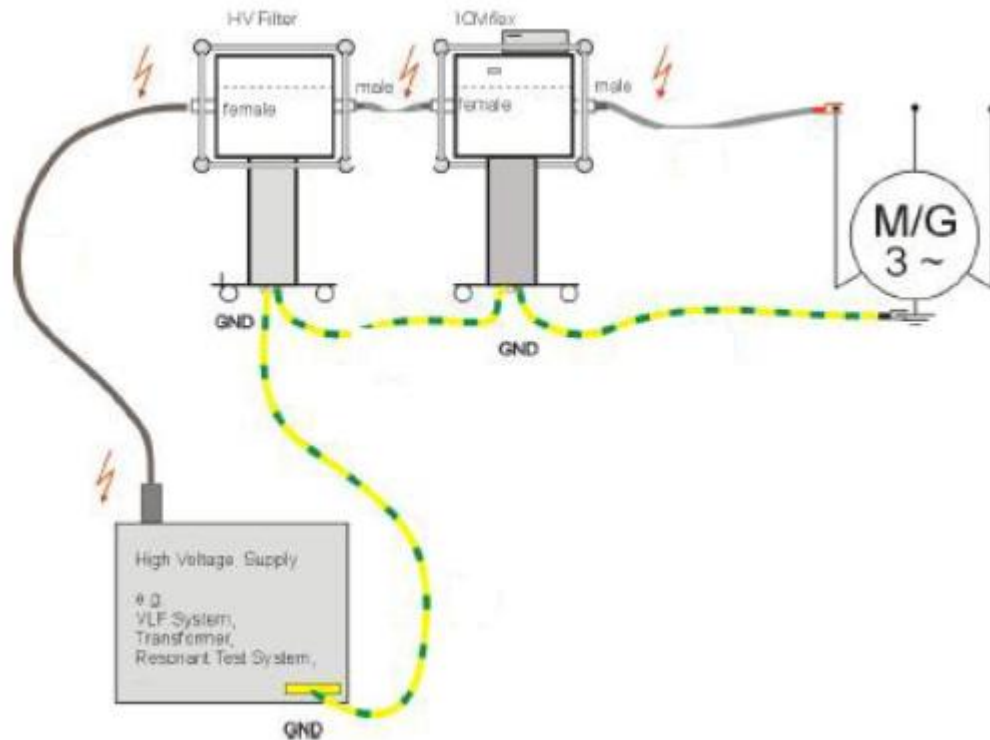
Obr. 32 Užitkový vůz pro převoz měřících přístrojů [30]

4.3 ICM flex – měřící zařízení pro PD a tgδ

ICM flex je unikátní měřící zařízení pro měření částečných výbojů a ztrátového činitele. Byl vyvinut za účelem zjednodušení měřících systému a jejich kombinací. Vhodný pro měření vysokonapěťových motorů, generátorů, kabelů a pro vysokonapěťové laboratoře. Používá se zejména pro měření přímo na místě. Funguje s jakýmkoliv pevným či přenosným zdrojem vysokého napětí. Kompletní systém je zobrazen na Obr. 33. Skládá se z referenčního kondenzátoru C_n , dále dvou paralelních kondenzátorů C_{sn} a C_{sx} , odděleného obvodu pro měření částečných výbojů a bateriový modul. Pokud měření částečných výbojů není žádáno, nebude daný modul zapojený do měření. Pro systém nad 30 kV je hlavní okno obklopeno hliníkovými elektrodami pro vyhlazení elektrického pole.

Komunikace může probíhat pomocí bluetooth či přes optický kabel. Všechny naměřené hodnoty následně budou k dispozici na počítači pomocí ICMflex programu. Dvě napětí

mohou být měřena. U_x jako kapacitní dělič mezi vnější kapacitou testovacího objektu C_x a vnitřní kapacitou C_{sx} . Referenční napětí U_n je poskytováno pomocí kapacitního děliče C_n/C_{sn} . Průběhy obou napětí lze sledovat v grafech. Korelace obou signálů následně poskytuje další výsledky jako $tg\delta$, účinník a kapacita C_x . [22,23,24]

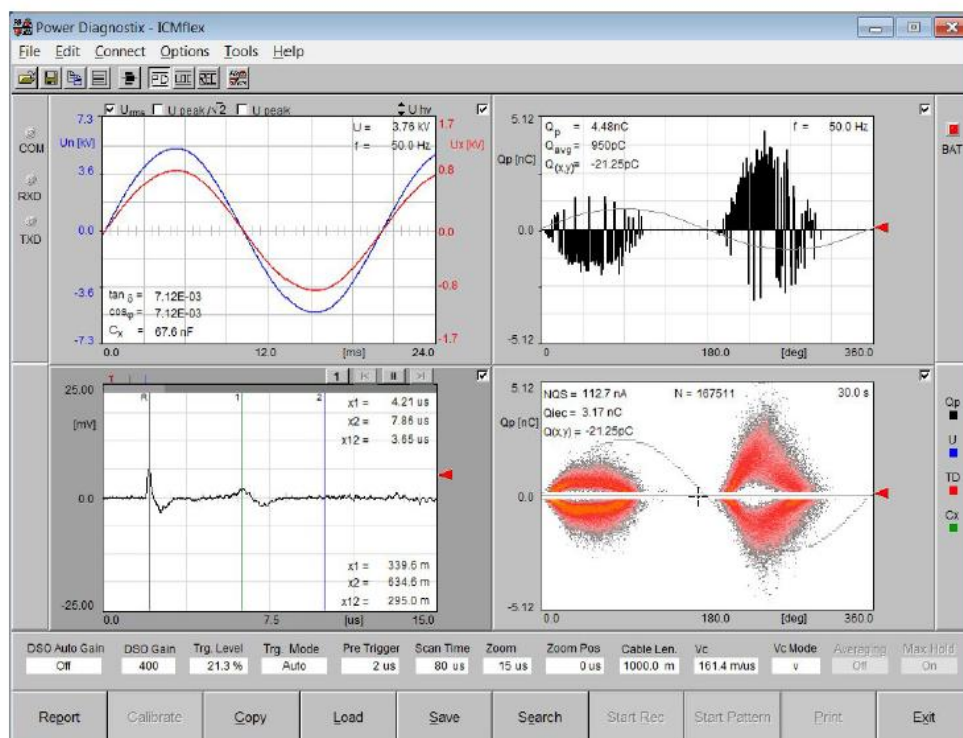


Obr. 33 Zapojení měřícího zařízení ICM flex [22]

Technické parametry

Napájení ze sítě:	Napájeno z baterie
Požadavky pro napájení:	cca 20 VA
Provoz:	Dálkové ovládání, ICMflex software
PD vstupní impedance:	10 kW // 50 pF (PD) 50 W (PD LOC)
PD vstupní citlivost:	< 200 μ V
PD min. zastavení (-6 dB):	40, 80 or 100 kHz (řízeno softwarem)
PD max. zastavení (-6 dB):	250, 600 or 800 kHz (řízeno softwarem)
PD A/D převodník:	8 bit (\pm 7 bit)
PD lokace (TDR):	8 bit, 100 MS

Přesnost lokalizace:	1 m + 0.1 % of the cable length
Měření napětí:	16 bit, 100 MS
Tgδ rozlišení:	5×10^{-5}
Tgδ přesnost:	1×10^{-4}
Synchronizace:	Externí na referenční napětí
Rozsah synchronizace:	20 Hz–510 Hz (normální režim) 0.1 Hz, 0.05 Hz, 0.02 Hz (VLF)
Provozní teplota:	0–55 °C (bez kondenzace)
Rozhraní:	Bluetooth (921 kBit/s)
Optické vlákno:	Sériová linka (921 kBit/s)



Obr. 34 Displej pro měření částečných výbojů [22]

4.4 VLF-34E - 34 kV VLF tester

Vysokonapěťový zdroj splňující požadavky pro testování kabelů až do 25 kV. Je lehký, kompaktní a přenosný. Používá se pro měření částečných výbojů a tgδ. Použití v rozmezí $f=0,1-0,01$ Hz. Po doplnění modulem TD je tento přístroj schopen měřit tgδ samostatně.

Technické parametry

Napětí:	24 000 V AC rms (ef.), sinusový průběh 0-34 000 V AC špičkové napětí 34 000 V DC 34 000 V obdélníkový průběh
Frekvence:	0,1 až 0,01 Hz
Zátěž:	0.5 μ F / 0.1 Hz / 34 kV 1.0 μ F / 0.05 Hz / 34 kV 5.0 μ F / 0.01 Hz / 34 kV
Váha zdroje:	21 kg (500x305x458 mm)



Obr. 35 34 kV VLF Tester [28]

Přístroj je kompaktní, v odolném krytu, přizpůsobený pro dopravu. Ukládání jednotlivých měření ve vnitřní paměti, možnost přenášení dat přes USB. Je přizpůsoben pro měření v podmínkách teplot -5 až 45 °C, skladování v teplotách -20 až 70 °C. Nastavení a průběh měření je možné ovládat pomocí Wi-Fi přijímače na PC s nainstalovaným programem. Přístroj splňuje všechny podmínky požadavků na diagnostické zařízení napsané výše. [23, 28]

Závěr

Tato diplomová práce se věnuje mobilním zařízením pro diagnostiku vysokonapěťových motorů. Úvodní část je věnována problematice provozních a klimatických aspektů, jež působí na vysokonapěťové motory. Následně jsou podrobně popsány rozhodující parametry charakterizující stav motorů a diagnostické metody pro zjišťování těchto parametrů.

Praktická část diplomové práce se zabývá měřením pomocí zdroje VLF (velmi nízké frekvence). Při měření turbogenerátoru v Žilině je dokázáno, že pomocí VLF je možné diagnostikovat elektrické stroje užitím klasických diagnostických metod (polarizační index, ztrátový činitel, částečné výboje atd.).

Následující část se zaměřuje na výsledky měření částečných výbojů a ztrátového činitele pomocí zdroje VLF a tyto výsledky jsou posléze porovnány s klasickým zdrojem se síťovým kmitočtem 50 Hz. Získané výsledky měřících vzorků ukazují rozdílné hodnoty ztrátového činitele v průměru 2,72krát při $f=0,1$ Hz oproti $f=50$ Hz (dle zkušeností jsou hodnoty od 1,5 – 3,5). Při měření částečných výbojů docházelo ke zkreslení výsledků při měření VLF z důvodů velkého rušení provozu ostatních elektrických zařízení v hale (ve formě průrazu při 180°). Z uvedených výsledků vyvozujeme závěr, že není vhodné srovnávat výsledné hodnoty získané rozdílnými způsoby měření (VLF a 50 Hz). Je doporučeno pro diagnostiku specifického motoru používat vždy konkrétní metodu a v nejlepším případě se stejnými přístroji.

Použitá literatura

- [1] RYCHTERA, M., BARTÁKOVÁ, B. *Tropikalizace elektrických zařízení*. 1. Vydání, Praha: SNTL, 1960
- [2] SLAVKOVÁ, P. M. *Klimatotechnologické faktory ovlivňující elektrotechnické materiály*. PLZEŇ-ZČU, vedoucí práce – MORWITZOVÁ, G., bakalářská práce, 2010, 27 s.
- [3] KUDLÁČEK, I. *Degradační procesy*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1994, 171 s. ISBN 8001010988
- [4] BLAHNÍK, R. *Teorie vlivu vlhkosti na izolanty*. 1. vyd. Praha: Statní pedagogické nakladatelství, 1969
- [5] BARTONÍČEK, R. *Koroze a protikorozi ochrana kovů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1966, 719 s.
- [6] *Korozní inženýrství* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [cit. 2014-14-12]. Dostupné z http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/obr/O084.gif
- [7] MUSIL, Z. *Mikrobiologická rizika v technice prostředí*. BRNO-VUT, vedoucí práce – KOLÁBEK, Z. bakalářská práce, 2010, 59 s.
- [7] DVOŘÁK, M. *Moderní metody sledování degradace izolačních systémů velkých elektrárenských točivých strojů*. ČESKÉ BUDĚJOVICE-PF, vedoucí práce – ŠERÝ, M., bakalářská práce, 2010, 61 s.
- [8] DOUSEK, L. *Částečné výboje při pulzním namáhání*. PLZEŇ-ZČU. Vedoucí práce – PALÁN, R. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE, 2010, 36 s.
- [9] CHMELÍK, K. [online] *Ložiskové proudy a jejich degradační působení* [cit. 2014-14-12]. Dostupné z http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25552
- [10] LAURENC, J. *Podklady pro zpracování měření částečných výbojů*. Předmět-Teorie vysokého napětí, 2012, ZČU-FEL
- [11] ŠAVEL, J. *Elektrotechnologie*. 4. rozšířené vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 314 s. ISBN 978-80-7300-190-2.
- [12] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [13] HASSDENTEUFEL, J. A KOL. *Elektrotechnické materiály*. 2. vyd. Bratislava: ALFA – vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1978. 607 s.
- [14] HAVLÍČEK, T. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*. BRNO-VUT, vedoucí práce – AUBRECH, V., BOUŠEK, J. dizertační práce, 2009, 150 s.

- [15] ZÁLIŠ, K. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: ACADEMICA, 2015, 135 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [16] BERNAT, P. *Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor*. OSTRAVA, odborný školitel – CHMELÍK, K. autoreferát doktorské disertační práce, 2006, 42 s.
- [17] DVOŘÍK, M. *Moderní metody sledování degradace izolačních systémů velkých elektrárenských točivých strojů*. ČESKÉ BUDĚJOVICE, vedoucí práce – ŠERÝ, M. bakalářská práce, 2010, 61 s.
- [18] MENTLÍK, V. POLANSKÝ, R. *Materiály z výuky DPS*. 2015, ZČU-FEL
- [19] KREJNICKÝ, P. *Diagnostika měřících transformátorů VN*. ZČU-FEL, vedoucí práce – LAURENC, J. diplomová práce, 2011, 73 s.
- [20] CHMELIK, K. POSPIŠILÍK, J. FOLDYNA, J. *Ložiskové proudy v elektrických strojích*. 1. vyd. VŠB-TU Ostrava, 2008, 186 s. ISBN 978-80-7225-290-9.
- [21] MENTLÍK, V. *Diagnostika elektrických zařízení a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [22] Power Diagnostix Systems GmbH. *ICMflex-Partial Discharge Detector, PD Fault Locator, and Tan Delta Measurement System*. Aachen – User Manual, 59 s.
- [23] NOVÁK, M. *Ústní sdělení*. [cit. 2014/2015]
- [24] I.SERVIS ENERGO, s.r.o. *Interní materiály*. [cit. 2014/2015]
- [25] *Technická diagnostika* [online]. [cit. 2015-01-02].
Dostupné z http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28810
- [26] BLATA, J. *Metody technické diagnostiky*. VSB - Ostrava, 2011, 27 s.
- [27] VDOLEČEK, F. *Spolehlivost a technická diagnostika*. VUT – BRNO, 2002, 49 s.
- [28] VLF-34E 34kV VLF Tester . HIGH VOLTAGE – VLF HIPOT INSTRUMENTS.
Technical data
- [29] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů*. Český normalizační institut. 2007, Praha
- [30] *Příslušenství FORD* [online]. [cit. 2015-12-04].
Dostupné z <http://www.prislusenstvi-ford.cz/cz/cs>