

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Vícekanálové měření částečných výbojů

Multi-Channel Partial Discharge Measurement

Bakalářská práce

BACHELOR'S THESIS

KRISTÝNA KÖNIGOVÁ

Vedoucí bakalářské práce: ING. RADEK PROCHÁZKA, Ph.D.

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Kristýna Königová**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Vícekanálové měření částečných výbojů**

Pokyny pro vypracování:


1. Popis teorie částečných výbojů v izolačních systémech elektrických strojů, měřicích systémů a sledovaných veličin.
2. Možnosti vícekanálového měřicího systému při měření a vyhodnocování výbojové činnosti.
3. Praktické ověření možností vícekanálového měření částečných výbojů v laboratoři vysokých napětí.

Seznam odborné literatury:

- [1] J. Kuffel, Kuffel E., and W.S. Zaengl., High Voltage Engineering Fundamentals. Elsevier Science, 2000.
- [2] K. Záliš, Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů, Academia, 2006
- [3] Omicron MPD600 documentation

Vedoucí: Ing. Radek Procházka, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018


doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

Anotace

Měření částečných výbojů je jednou z důležitých diagnostických metod, která se v současné době čím dál více využívá. Tato práce se zabývá synchronním vícekanálovým měřením z teoretického hlediska, co je částečný výboj, jak vzniká a jeho měření. Dále je rozvedena problematika vyhodnocování takového měření s důrazem na 3PARD – 3-phase amplitude relation diagram, metodu synchronního vícekanálového měření. Obliba této metody měření roste zejména kvůli jednoduššímu odstraňování šumu. Poslední část práce se zabývá konkrétním experimentálním měřením s cílem ověřit funkci a spolehlivost vícekanálové metody a její vhodnost pro třífázová měření.

Abstract

Partial discharge measurement is one of the important diagnostical methods and nowadays its use is increasing. This thesis focuses on synchronous multi-channel measurement from a theoretical perspective, what is partial discharge, how it is formed and its measurement. Further, it elaborates the issue of evaluating this type of measurement with emphasis on 3PARD - 3-phase amplitude relation diagram, method of synchronous multichannel measurement. The popularity of method of measurement rises because of simpler noise removal. The last part looks at a specific experimental measurement with the goal to prove multichannel method reliability and its suitability for three-phase measurement.

Klíčová slova

elektrický výboj, částečný výboj, cluster, 3PARD, synchronní vícekanálové měření částečných výbojů

Key words

electrical discharge, partial discharge, cluster, 3PARD, synchronous multi-channel partial discharge measurement

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 27.5.2016

.....

Kristýna Königová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Radku Procházkovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady, vynaložený čas a pevné nervy při opakovaném měření v laboratoři.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Kapacitní model dutinky [11]	4
Obrázek 2 - Náhradní schéma.....	4
Obrázek 3 - Tvoření 3PARD z napěťových pulzů [10]	11
Obrázek 4 - Cluster	12
Obrázek 5 - Schéma měření.....	14
Obrázek 6 - Kalibrační schéma	16
Obrázek 7 - Obrázec částečných výbojů	17
Obrázek 8 – Clusterový diagram pro model dutinky připojený na fázi L1	18
Obrázek 9 – Clusterový diagram pro model dutinky připojený na fázi L2	18
Obrázek 10 – Clusterový diagram pro model dutinky připojený na fázi L3	19
Obrázek 11 - Průběh napětí a výbojů při měření na dutince	20
Obrázek 12 – Clusterový diagram pro model hrot - deska připojený na fázi L1	21
Obrázek 13 - Clusterový diagram pro model hrot - deska připojený na fázi L2	21
Obrázek 14 - Clusterový diagram pro model hrot - deska připojený na fázi L3	21
Obrázek 15 - Průběh napětí a výbojů při měření na uspořádání hrot - deska	22
Obrázek 16 – Clusterový diagram pro kombinaci modelů dutinky a hrot - deska	23
Obrázek 17 - Průběh napětí a výbojů dutinka na L1+ hrot - deska na L3.....	23

Seznam zkratek

SF ₆	fluorid sírový
μs	mikrosekunda, jednotka času
U	napětí
pC	pikocoulomb, jednotka náboje
s	sekunda, jednotka času
kV	kilovolt, jednotka napětí
VN	vysoké napětí
ns	nanosekunda, jednotka času
V	volt, jednotka napětí
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice

OBSAH

ÚVOD	1
1. ELEKTRICKÝ VÝBOJ	2
2. ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	4
2.1 Vliv částečných výbojů na izolaci	5
3. MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	7
3.1 Měření částečných výbojů on-line	9
3.2 Okolní rušení při měření částečných výbojů	9
3.3 Vícekanálové měření částečných výbojů	10
3.3.1 3-Phase Amplitude Relation Diagram	11
3.3.2 3-Phase Time Relation Diagram	12
3.3.3 3-Phase Channel Frequency Relation Diagram	12
4. LABORATORNÍ MĚŘENÍ	14
4.1 Použité přístroje	14
4.2 Schéma měření	14
4.3 Postup měření	15
4.3.1 Kalibrace náboje a napětí	16
4.4 Popis měření	18
ZÁVĚR	25
POUŽITÁ LITERATURA	26

Úvod

Provoz vysokonapěťových elektrických strojů je náročný na bezpečnost a spolehlivost. Důležitými komponenty jsou z tohoto hlediska použité izolační materiály a jejich aktuální stav. Většina zařízení selhává právě proto, že má poškozenou izolaci. Vyhodnocení stavu izolace elektrického zařízení je v současné době možné zjistit mnoha diagnostickými metodami. Jednou z nich je právě měření částečných výbojů, které při provozu zařízení mohou vznikat v izolaci. Vznik částečných výbojů může být projevem poruchy a stárnutí izolace a v dlouhodobém horizontu může snížit její izolační vlastnosti a vést až k selhání zařízení. Měření částečných výbojů je dle normy ČSN EN 60270 Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů součástí vysokonapěťových zkoušek. Každý stroj má předepsanou hladinu částečných výbojů, která smí být zjištěna, aby byl stroj v souladu s požadavky normy.

Bakalářská práce se zabývá teoretickým popisem částečných výbojů v izolačních systémech elektrických strojů, měřicích systémů a sledovaných veličin. Popisuje elektrický výboj a jeho vznik jako fyzikální jev, dále je popsána teorie částečných výbojů, podmínky vzniku a možnosti jejich měření se zaměřením na popis metody vícekanálového měření a vhodnosti jejího použití. Práce dále popisuje existující metody vyhodnocování částečných výbojů se zaměřením na třífázový amplitudový diagram, kdy jsou možnosti jeho použití práce prakticky ověřeny v závěru.

Experimentální měření probíhalo v Laboratoři vysokých napětí, Katedry elektroenergetiky, ČVUT v Praze. V třífázovém měřicím obvodu byly umístěny dva různé přípravky simulující poruchy izolačních systémů elektrických strojů. Na objektech byly snímány důležité veličiny, jako je aplikované napětí a elektrický náboj, které jsou pomocí počítačového programu dále zaznamenávány a zpracovány do clusterového diagramu. Díky použitému zobrazení lze určit, na kterém kanálu se porucha nachází. Cílem této práce je ověřit funkčnost této metody a to, jak bude systém reagovat na umístění poruch na různé kanály a jak se tyto kombinované poruchy projeví v clusterovém diagramu.

1. Elektrický výboj

Elektrickým výbojem nazýváme jevy, které vznikají při průchodu elektrického proudu plynem. Plyn obsahuje volné elektricky neutrální částice, které se vlivem elektrického pole ionizují a jsou usměrněny ve směru působení tohoto pole. Tak vzniká elektrický proud. Elektrickým výbojem je myšleno vytvoření vodivé dráhy mezi dvěma body o různém elektrickém potenciálu v médiu, ve kterém se oba body nachází. Cílem je potenciály vyrovnat. Pokud je přívod elektrického náboje kontinuální, výboj je trvalý, v opačném případě vzniká výboj dočasný.

Médium může být plyn, kapalina nebo pevná látka. Plynné médium bývá nejčastěji vzduch (jako příklad můžeme uvést výboj na vedení ve venkovní elektrické rozvodně) nebo například SF₆, který se používá jako izolační médium nebo médium na zhášení elektrických oblouků. Kapalné látky se využívají ve velkých výkonových transformátorech, kde je jádro ponořeno do minerálního oleje. Malé přístrojové transformátory mohou být zality v epoxidové pryskyřici, což je příklad média pevného.

Aby mohlo dojít k výboji, obvykle musí být na katodě zdroj elektronů. Vzduch je za normálních podmínek nevodivý, a proto je potřeba ionizačního činidla, aby byl umožněn průchod proudu. Tímto činidlem mohou být různá záření (ultrafialové, rentgenové, gamma, atd.), zvýšená teplota nebo silné elektrické pole. Neutrální atomy jsou ionizovány, elektron je uvolněn z atomu a ten se stává elektricky kladně nabitým. Počítejme, že v plynu se nachází neutrální a nabitě částice. Tyto částice se volně pohybují a dochází ke srážkám. Pokud je kinetická energie částic malá, dochází ke srážkám pružným. Při těchto srážkách se mění pouze kinetická energie, tedy směr a velikosti rychlostí částic. Pokud budeme nabitě částice urychlovat v elektrickém poli, budou mít kinetickou energii rovnu

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

kde:

E_K je kinetická energie částice,

m hmotnost částice,

v rychlost částice.

Pokud se tato kinetická energie zvětší nad určitou hodnotu, začne docházet ke srážkám nepružným, kdy dochází ke změně vnitřní struktury částic. Letící nabitá částice při srážce s atomem vybudí přeskok elektronu na vyšší energetickou hladinu. To se stane v případě, že

kinetická energie letící částice je menší, než energie potřebná k ionizaci. Pokud je kinetická energie větší, než ionizační energie, při srážce dojde k odtržení elektronu od atomu a dojde k ionizaci. K ionizaci může dojít více způsoby, pokud je kinetická energie větší než ionizační, dochází k nárazové ionizaci, pokud je menší, nastává postupná ionizace. Dalšími typy ionizace jsou například tepelná nebo fotoionizace. Fotoionizace probíhá kolem nás neustále vlivem kosmického záření. K ionizaci dojde tehdy, pokud je energie fotonu

$$E = hf \tag{2}$$

větší, než ionizační energie.

Elektrické výboje můžeme rozdělit podle několika kritérií. Základní dělení je na samostatný a nesamostatný výboj. Výboj nazýváme samostatný, pokud k vzniku výboje stačí pouze přiložené napětí na elektrodách. Pokud je k ionizaci potřeba dalšího zdroje, jedná se o výboj nesamostatný. Další možné dělení je podle homogenity pole, kde výboj vzniká, na částečné a úplné. Dále pak podle délky trvání na přechodné a ustálené. Poslední klasifikace je podle tlaku okolí. Za normálního tlaku dělíme výboje na jiskrový, korónu a obloukový. Při sníženém tlaku vzniká výboj doutnavý, kterého se využívá ve světelné technice.

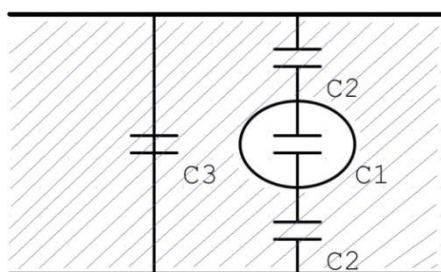
Pokud se zaměříme na přeskoky v namáhané izolaci, můžeme rozlišit přeskok úplný a neúplný. Při úplném přeskoku obě elektrody spojí výboj, který překlene celou izolaci. Tato izolace napěťové namáhání nevydržela a byla proražena. Pokud se část izolačního materiálu prorazí a část si svojí elektrickou pevnost zachová, mluvíme o neúplném přeskoku. Právě částečný průraz v plynném izolantu se také nazývá částečný výboj. Výše zmíněná koróna se také řadí do částečných výbojů.

2. Částečné výboje

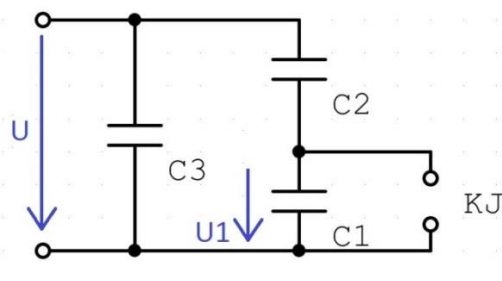
Částečný výboj je lokalizovaný elektrický výboj, který překlene izolaci mezi vodiči jenom částečně a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Jsou důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na jejím povrchu a vytvářejí proudové (napěťové) impulzy, které trvají méně než $1 \mu\text{s}$ [2]. Částečný výboj obvykle vzniká uvnitř dutinek, trhlin v rámci pevného dielektrika na rozhraní vodič-izolant v rámci kapalných nebo pevných látek nebo v bublinkách kapalných dielektrik. Dále se také mohou vyskytnout na rozhraní jednotlivých izolačních materiálů. Vzhledem k tomu, že jsou částečné výboje omezeny pouze na část izolace, výboj je schopen překonat vzdálenosti mezi elektrodami pouze částečně. Částečné výboje uvnitř materiálů obvykle vznikají v plynu plněných dutinkách, které se nachází v dielektriku. Tyto dutinky mohou vzniknout při výrobě, například nepřiměřenou rychlostí plnění (zalévání měřicího transformátoru epoxidem), při nepřiměřeném napěťovém namáhání nebo následkem stárnutí izolace. Vzhledem k tomu, že je relativní permitivita prázdného prostoru podstatně menší než okolního dielektrika, je elektrické pole napříč prázdným prostorem podstatně větší než přes stejnou vzdálenost v dielektriku. Pokud se napětí v této dutince zvýší na hladinu zápalného napětí, začnou vznikat částečné výboje.

Rozlišujeme tři typy částečných výbojů [11]. Vnější částečné výboje mohou vznikat v plynech u elektrod malých rozměrů, příkladem může být koróna [5]. Vnitřní částečné výboje jsou výboje v plynu plněných dutinkách, které se nachází v pevném izolantu. Třetím typem jsou povrchové výboje, takzvané klouzavé výboje, které vznikají na rozhraní plynného a pevného izolantu.

Všechny typy částečných výbojů lze popsat zjednodušeným modelem a náhradním schématem [5]. V modelu vystupují tři kapacity, C_1 , C_2 , C_3 , kde C_1 je kapacita vzduchové dutinky, C_2 je kapacita izolace, která nebyla poškozena v sérii s dutinkou, C_3 je kapacita zbytku izolantu. Náhradním schématem je kapacitní dělič, pro který můžeme psát rovnici, kde U_1 je napětí na vzduchové dutince a U je přiložené napětí:



Obrázek 1 - Kapacitní model dutinky [11]



Obrázek 2 - Náhradní schéma

$$U_1 = \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} U = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U \quad (3)$$

Pro zjednodušení můžeme předpokládat, že zhašecí napětí $U_h = 0$. Při výboji v dutince klesne hodnota napětí U na U_v , pak z rovnosti náboje můžeme psát:

$$(C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}) U = (C_3 + C_2) U_v \quad (4)$$

Když vyjádříme U_v , dostaneme

$$U_v = U \frac{C_3(C_1 + C_2) + C_1 C_2}{(C_1 + C_2)(C_2 + C_3)} \quad (5)$$

Po dosažení rovnice (1) a předpokladu, že $U_1 = U_{1Z}$ (zapalovací):

$$U_v = \frac{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}{C_2(C_3 + C_2)} U_{1Z} \quad (6)$$

Tuto rovnici budeme dále používat v kapitole 3, kde díky ní budeme moci vypočítat, jak velký úbytek napětí výboj v dutince vyvolá. To bude při měření částečných výbojů užitečné k výpočtu důležitého parametru, kterým je zdánlivý náboj.

2.1 Vliv částečných výbojů na izolaci

Jakmile jsou částečné výboje přítomny, i když přerušovaně, poškození izolace se v průběhu času stále zvyšuje. Například výboje v dutinkách způsobují erozi materiálu, což vede ke zvýšenému výskytu částečných výbojů. Proces se může při nečasné detekci stále zhoršovat až na hranici snášení napětového namáhání izolace a další výboj může způsobit její poškození. Pokud jsou v místě zapojena zařízení pro detekci a ochranu, které v případě nebezpečí zařízení odpojí, bude docházet k výpadkům činnosti, což u velkých strojů rozhodně není žádoucí. Jakmile jsou detekovány částečné výboje vyšší, než je přípustné, zvyšuje se bezpečnostní riziko při dalším provozu.

Vlivy můžeme rozdělit na tři druhy, které ovšem probíhají současně. Rozlišujeme elektro-erozivní, chemické a tepelné účinky [11]. Elektro-erozivní účinky jsou následkem vytvoření vodivé dráhy při výboji. Při častém opakování částečných výbojů dochází k prodloužení této dráhy tím, že dochází v izolaci k čistě elektrickému průrazu. Protože jsou částice v dutince za působení elektrického pole ionizovány a urychlovány polem, narážejí do stěn dutinky a způsobují její erozi. Tím se dutinka zvětšuje a postupně může dojít k průrazu celého izolačního materiálu.

Protože při elektrickém výboji ve vzduchu vzniká ozón, který má silné oxidační účinky, hovoříme o chemických účincích. Ozón může dále reagovat s okolím a tvořit další agresivní sloučeniny, které budou dál nabourávat strukturu izolantu. Pokud se izolant těmito vlivy začne rozkládat, mohou vzniklé produkty vytvářet vodivé cesty, což vede k celkovému průrazu.

S častějším se opakováním výbojů dochází k oteplení materiálu, což vede ke snížení hladiny napětí tepelného průrazu. Tepelné účinky samy o sobě mají velký dopad, chemické jsou jimi urychlovány.

Pokud výboje vznikají na povrchu, jsou snadněji detekovatelné, než uvnitř materiálu. Částečné výboje uvnitř pevných a kapalných izolantů patří k těm nebezpečnějším, proto můžeme říct, že výboje vzniklé na venkovním vedení nejsou tolik nebezpečné jako ty vzniklé v kabelovém vedení.

Výroba a její technologie sice stále postupují kupředu, ale nehomogenitám v materiálu vzniklým při výrobě se zabránit nedá. Proto se z hlediska bezpečnosti musí hodně dbát na detekci částečných výbojů, aby se předešlo případné škodě.

3. Měření částečných výbojů

Při měření částečných výbojů zjišťujeme tyto parametry: zdánlivý výboj q , součtový náboj za časový interval Q , četnost výbojů n , počáteční (zapalovací) napětí U_i , zhášecí napětí U_h a výkon částečných výbojů P [11].

Zdánlivý náboj je náboj, který je-li injektován ve velmi krátkém čase mezi svorky zkoušeného objektu ve zkušebním obvodu, by měl na měřicím přístroji zobrazit stejnou výchylku jako vlastní proudový impuls částečného výboje. Je udáván v pC. Patří mezi základní diagnostické parametry pro vyhodnocování částečných výbojů. Pokud chceme zjistit hodnotu zdánlivého náboje, využijeme toho, že výboj v dutince vyvolá úbytek napětí ΔU .

$$\Delta U = U - U_V \quad (7)$$

Dosadíme rovnici (4) a (1), po úpravě dostaneme

$$\Delta U = \frac{C_2}{C_2 + C_3} U_{1Z} \quad (8)$$

Když vyjádříme zdánlivý výboj q pomocí úbytku napětí ΔU a celkové kapacity, dostaneme za předpokladu, že $C_1, C_2 \ll C_3$ vztahy

$$q \cong C_3 \Delta U \quad (9)$$

$$\Delta U \cong \frac{C_2}{C_3} U_{1Z} \quad (10)$$

A po vyjádření dostaneme

$$q \cong C_2 U_{1Z} \quad (11)$$

Součtový náboj je součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivých nábojů během určitého času [11]. Značí se Q a měříme ho v pC. Četností impulzů vyjadřujeme poměr impulzů zaznamenaných ku době trvání záznamu. Značí se n a udává se v s^{-1} .

Počáteční napětí, nebo také napětí zapalovací U_i je nejnižší hodnota napětí v kV, které musíme přiložit na svorky objektu, aby byly pozorovány částečné výboje [11]. Tato hodnota se podle normy hledá postupným zvyšováním napětí až na předepsanou úroveň, kde by se podle normy částečné výboje měly začít objevovat. Zhášecí napětí je oproti tomu napětí, při kterém se částečné výboje přestávají objevovat. V souladu s normou je napětí snižováno z hodnoty, kde se částečné výboje vyskytují, a hledá se hodnota, kdy již výboje nejsou pozorovány.

Dalším důležitým parametrem je výkon částečných výbojů. Je možné ho určit přímým měřením nebo výpočtem z naměřených hodnot napětí a zdánlivého náboje.

Měření částečných výbojů lze provádět mnoha metodami, a to buď neelektrickými, nebo elektrickými [11]. Základní rozdělení těchto metod může být provedeno jako:

Metody neelektrické:

- Akustická detekce
- Chemická detekce
- Optická detekce
- Termoelektrická metoda
- Rentgenová metoda

Elektrické metody:

- Měření ztrátového činitele
- Metoda postupné vlny
- Měření rušivých elektrických polí
- Galvanická metoda
- Metoda induktivně vázané sondy
- Metoda diferenciální elektromagnetické sondy
- Drážková sonda
- Kapacitní a induktivní snímač

Jak je patrné z výše uvedeného rozdělení možných metod měření částečných výbojů je mnoho a každá se hodí pro jiný případ. Obecně platí, že v současnosti je snaha využívat takových metod, které umožňují výbojovou činnost měřit za provozu (on-line), bez nutnosti odpojení elektrického zařízení.

Optické a akustické detekce se využívá spíše u vnějších a klouzavých výbojů, kdy je potřeba speciální technika, jako jsou přístroje pro noční vidění, směrové mikrofony atd. Chemické detekce se využívá hlavně u kapalin a jiných plynů než vzduch. Příkladem tedy mohou být olejové transformátory nebo zařízení s elektroizolačním plynem SF₆. Pokud hovoříme o akustické metodě, rozumí se tím ultrazvuková metoda. Je vhodná hlavně pro určení místa, kde výboje vznikají. Protože přístroje mají poměrně dobrou citlivost, snímače lze umístit jak dovnitř nádoby tak vně. Tato metoda je vhodná pro aplikaci na transformátorech za provozu, protože elektrické metody nejsou z důvodu velkých elektromagnetických rušení dobře uplatnitelné.

Elektrických metod je velké množství, každá z nich má svoje výhody a nevýhody. V napájecí síti vznikají působením částečných výbojů malé proudové impulzy, jejichž

vyhodnocování je základem pro všechny elektrické metody měření [5]. Protože citlivost elektrických metod je značně vyšší, než neelektrických, jsou stále více využívány v praxi. Dále můžeme metody rozdělit na lokalizační a globální. Cílem lokalizačních metod je zjistit místo, kde se částečné výboje vyskytují. Pomocí metod globálních zjišťujeme výbojovou činnost v celém měřeném objektu a používáme je hlavně na monitorování celkového stavu izolace. Obě tyto metody se navzájem doplňují. Většina elektrických metod patří mezi metody lokalizační. Pouze metoda galvanická je metodou globální.

3.1 Měření částečných výbojů on-line

On-line metody jsou v současnosti mnohem více žádané s ohledem na spolehlivost a bezpečnost elektrických zařízení. Hlavní výhoda spočívá v tom, že po detekci je možné dále sledovat vývoj a pokud je to nutné, naplánovat dostatečně dopředu případnou odstávku a opravu. Další výhodou je, že při on-line měření není celý systém nerovnoměrně napětově zatěžován. Při měření se sběr diagnostických dat provádí za provozu stroje, tedy při jmenovitém napětí. Z tohoto důvodu je nutné použít dalších podpůrných diagnostických metod, kdy například u točivých elektrických strojů je sledováno oteplení v rotoru a statoru, vibrace statorového vinutí a aktivity částečných výbojů ve statorovém vinutí. Nejčastěji bývá měření prováděno pomocí induktivních nebo kapacitních sond.

Pokud je potřeba navrhnout vhodné on-line diagnostické měření, musí se dbát na tyto požadavky [11]:

- Aplikovatelnost při provozu stroje
- Bezpečnost stroje a okolí, včetně obsluhy
- Vyhodnocování bude přizpůsobeno okolním možnostem – získávání dat, možné rušení.

Právě rušení je jedním z nejřešenějších problémů, který se při měření částečných výbojů může nacházet.

3.2 Okolní rušení při měření částečných výbojů

Při měření velmi citlivými přístroji je problémem jakýkoliv zdroj rušení, protože velmi znehodnocuje data. Nelze ho však jednoduše potlačit či odstranit, protože nikdy nepochází jen z jednoho zdroje. Všechny části měřicího obvodu mohou být zdroji rušení, některé více, některé méně zanedbatelnými. Mezi zdroje rušení můžeme řadit regulované zdroje napájení, vysokonapěťový zdroj, přívody a elektrody, vazební kondenzátory, elektromagnetické vlny

rádiových vysílačů, rušení z VN sítě atd. [11]. V případě měření ve stíněné laboratoři VN v budově ČVUT FEL jsme ověřili, že i zapnutá klimatizace může silně ovlivnit měření částečných výbojů.

Rušení může splývat se samotnými impulzy nebo je superponováno na měřené veličiny. Proto by podle normy měla být hladina šumu nižší, než polovina předepsané přípustné hladiny částečných výbojů [2].

Rušení lze rozdělit podle jeho původu na vnější a vnitřní. Vnější je způsobeno externími zdroji rušení, například již výše zmíněnou klimatizací, vysílači, spínacími prvky. Tuto hladinu šumu lze snadno zjistit, pokud měření provedeme bez přivedeného napětí. Potom lze na přístroji nastavit, že tuto určitou hladinu chceme potlačit a výsledkem bude téměř nezarušený signál. Vnitřní napětí je způsobeno zdroji, které se nachází uvnitř měřícího obvodu, jsou jimi například přívody, měřící transformátory. Rušení z pravidla roste se zvyšujícím se zkušebním napětím. Toto rušení lze odstranit nainstalováním vhodných filtrů. Podle tvaru jej pak dělíme na impulzní a harmonické. Impulzní lze velice snadno zaměnit se samotnými částečnými výboji. Vyskytují se náhodně a pokrývají široké frekvenční spektrum.

Rušení přívodů a okolních strojů a přístrojů lze v případě měření v laboratoři vyřešit stíněním měřícího zařízení. Rušení ze sítě pak použitím vysokonapěťových filtrů, které jsou zařazeny do napájecích obvodů. Dále je možné využít numerickou filtraci, kdy je počítačový program schopen odstranit rušivé impulzy. Jednou z možností je statistické vyloučení náhodných rušivých impulzů. Na naměřeném signálu se stanoví dolní hranice, pod kterou je určeno, že všechny vzorky jsou rušení. Pokud je stanovena hladina šumu 2 pC jako, všechny menší impulzy jsou vyřazeny. Jako vyhovující jsou vybrány ty impulzy, které budou splňovat nastavené procentuální rozmezí z vypočteného zdánlivého náboje [11]. Existují však i jiné druhy měření, které využívají k odstranění rušení jiných metod.

3.3 Vícekanálové měření částečných výbojů

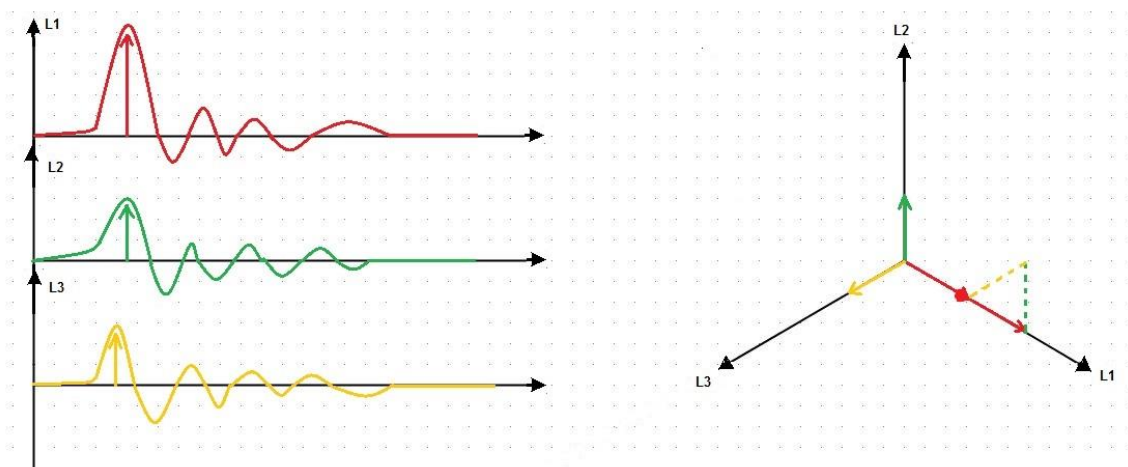
Protože při měření částečných výbojů je důležitá vysoká citlivost přístrojů, je také nutné co nejlépe eliminovat případné rušení. Pokud se měření provádí ve stíněné laboratoři na zařízení, které není v provozu, není to takový problém. Při měření na kabelovém vedení nebo velkých transformátorech však toto již není možné. Mimo laboratoře je nutné vypořádat se s šumem, který zkresluje naměřená data, která je pak obtížné vyhodnotit. Pro zlepšení kvality naměřených dat, lze využít analogových a numerických filtrů, ale k úplnému potlačení šumu nikdy nedojde [4]. Existuje však metoda, díky které je možné oddělit částečné výboje od šumu. Metoda vícekanálového měření má dvě hlavní výhody, již zmíněnou separaci

výbojů od rušení a dále pak synchronní měření na více místech najednou. Je tedy možné proměřit v jednom čase například všechny tři fáze třífázového transformátoru nebo při použití více měřicích jednotek lze měřit zároveň na několika místech dlouhého vysokonapěťového kabelového vedení [3].

Při měření je možné využít tři metody vyhodnocení dat: 3PARAD – 3-Phase Amplitude Relation Diagram (třífázový amplitudový diagram) [3], 3PTRD - 3-Phase Time Relation Diagram (tři fázový časový diagram)[9] a 3CFRD - 3-Phase Channel Frequency Relation Diagram (tři kanálový frekvenční diagram)[3].

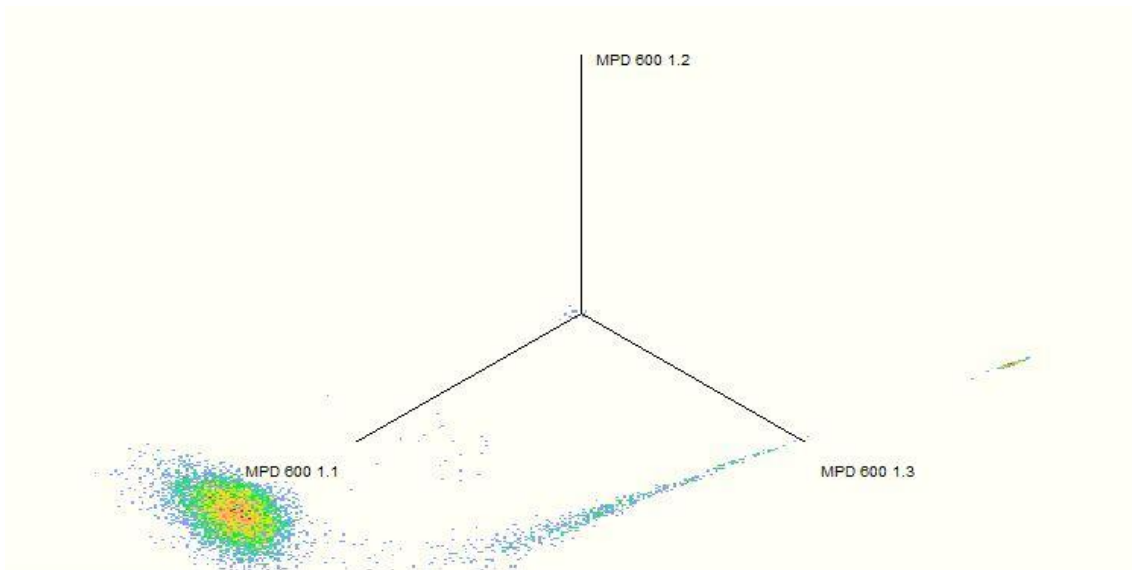
3.3.1 3-Phase Amplitude Relation Diagram

Třífázový amplitudový diagram zobrazuje vztah amplitud jednotlivého pulzu v jedné fázi a nežádoucích signálů generovaných v druhých dvou fázích. Naměřené hodnoty náboje se zlogaritmují a dále převedou na vektor. Ve vektorovém diagramu vektory sečteme a výsledkem je jeden bod, který symbolizuje částečný výboj.



Obrázek 3 - Tvoření 3PARAD z napěťových pulzů [10]

Při měření se tento postup opakuje mnohokrát, čímž dostaneme koncentrované skupiny bodů, tzv. clusterů. Pokud je odezva na L2 a L3 stejně velká, bod vznikne na ose L1. Pokud není symetrická, bod se posune mimo osu. Body clusterů výbojů se nejčastěji nacházejí v blízkosti os diagramu, šumové clustery jsou v počátku os diagramu nebo těsně vedle něj. Tím se velmi zjednodušuje odstranění šumu [9]. Díky pozici clusteru v diagramu je možné určit, ve které fázi se částečné výboje nachází. Pokud se clusterů u jedné fáze nachází více, značí to větší množství poruch [10].



Obrázek 4 - Cluster

3.3.2 3-Phase Time Relation Diagram

Pokud se zdroj částečných výbojů nachází ve větší vzdálenosti od snímače, dochází k vyrovnání amplitudy přímé a amplitud nežádoucích signálů, což vede k umístění clusterů blízko z počátku, kde se také nachází cluster šumu. Tím je téměř nemožné rušení oddělit. Zároveň zde probíhá efekt dolní propusti [3], což nás nutí k měření při nízkých frekvencích. Při nich dochází k tomu, že nemůžeme zanedbat časové zpoždění z důvodu jeho velikosti, které vznikne mezi vznikem výboje a jeho detekcí. Čas přenosu je přímo úměrný vzdálenosti zdroje výbojů.

Proto byl vyvinut 3PTRD, tří fázový časový diagram (v originále 3-phase time relation diagram). Je podobný 3PARD, liší se pouze výpočtem vektorů. Pro vynesení vektoru do diagramu potřebujeme znát bod a úhel, který vektor svírá s osou. Tyto údaje je možné vypočítat právě z naměřených časových zpoždění.

3.3.3 3-Phase Channel Frequency Relation Diagram

3-phase channel frequency relation diagram (tří kanálový frekvenční diagram) je výhodný v tom, že k měření nepotřebujeme tři nezávislé měřicí jednotky. Při měření je potřeba nastavit tři různé frekvenční propusti, jednu pro nízké frekvence a dvě pro vyšší [3]. Stejně jako 3PARD metoda nakládá s třemi synchronními amplitudami z jednotlivých fází, 3CFRD koreluje s výstupy jednotlivých pásmových propustí. Při dobrém zvolení hodnot propustí dochází při měření k okamžitému odstranění superponovaného rušení. Výsledkem je opět diagram s clusterly, jehož sestavení se podobá 3PARD. Metoda využívá faktu, že jednotlivé typy částečných výbojů a druhy rušení mají rozdílná frekvenční spektra. Je tedy možné šum od výbojů rozeznat z grafu frekvenčního spektra.

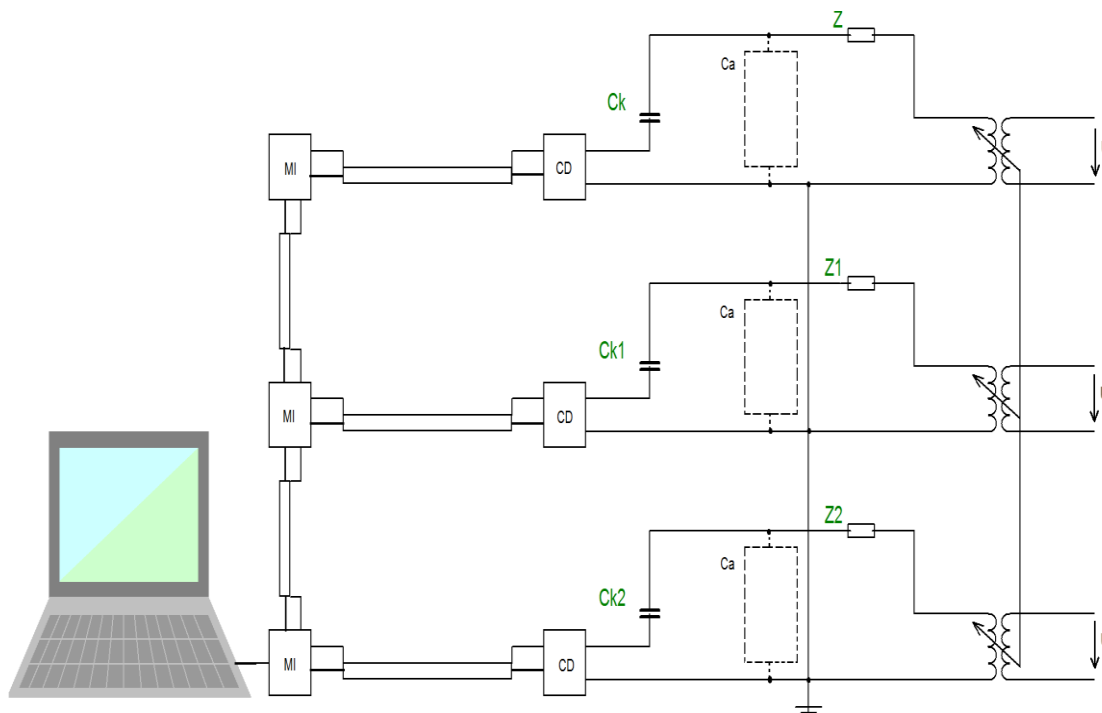
4. Laboratorní měření

Cílem měření v Laboratoři vysokých napětí je prakticky ověřit vliv synchronního vícekanálového měření na potlačení šumu při využití MPD 600 od firmy OMICRON a dále vyhodnocení výbojové činnosti pomocí 3PAR.D.

4.1 Použité přístroje

- Software pro vyhodnocení - OMICRON Software for MPD and MI
- 3x MPD 600
- 3x Měřicí impedance CPL 542
- 3x Vazební kondenzátor MCC 210L, výstup 100kV, $f = 50$ Hz
- MCU 502
- 3x Měřicí transformátor proudu, 35 kV/100 V
- Regulační transformátor, 3x 0 - 250 V
- Model dutinky v epoxidové pryskyřici
- Uspořádání hrot - deska ve vzduchu
- Externí kalibrátor Tettex Instruments, $10 \cdot 10^4$ pC

4.2 Schéma měření



Obrázek 5 - Schéma měření

MI	měřicí přístroj MPD 600
CD	vazební zařízení CPL 542
Ck, Ck1, Ck2	vazební kondenzátor MCC 210L
Ca	zkoušený objekt
Z, Z1, Z2	filtr
U	vysokonapěťový zdroj

4.3 Postup měření

Obvod je třeba zapojit podle schématu v normě [2], pro naše měření je aktualizované schéma na obr. 5. Protože v Laboratoři vysokých napětí není k dispozici vyhovující třífázový zdroj, použili jsme třífázově napájený regulační transformátor, za který jsme dále připojili tři stejné vysokonapěťové měřicí transformátory s převodem 35 kV/100 V, napájené ze strany nižšího napětí. Tím jsme získali tři nezávislé fáze, na kterých jsme mohli odděleně měřit zkoušené objekty. Na každé větvi byl připojen vazební kondenzátor MCC 210L, který má nejvyšší přípustné napětí 100 kV a jehož míra rušení na 100 kV nepřesahuje 1 pC [6]. Dále následuje měřicí impedance, jejíž výstup je připojen pomocí optických kabelů do měřicí jednotky MPD 600. Měřicí jednotka má rozlišení jednotlivých výbojů menší než 2 ns a výrobce deklaruje rušení systému menší než 0,015 pC [8]. Všechny tři jednotky jsou spojeny do série optickým kabelem, vedoucí do řídicí jednotky MCU 502, která funguje jako řadič sběrnice [7] a je spojena s počítačem přes USB kabel. Pro měření a vyhodnocování částečných výbojů je určen software - OMICRON Software for MPD and MI. Tento program umožňuje měření až několik desítek jednotek MPD 600 synchronně a dále vyhodnocení pomocí několika variant, například 3CFRD a 3PTRD. Pro účely našeho měření budeme používat vyhodnocení pomocí 3PARD.

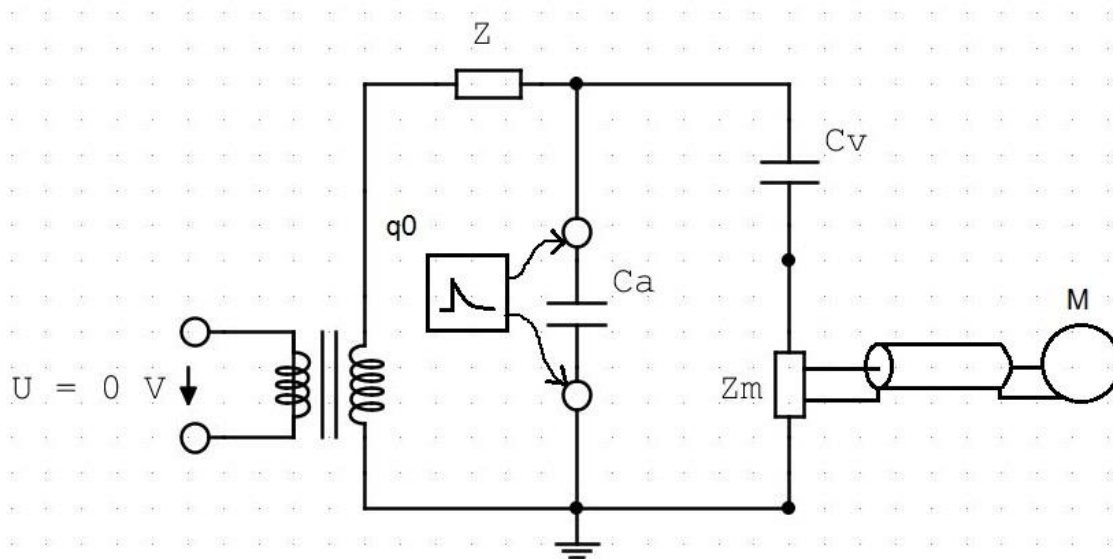
Měřit budeme dva objekty, model dutinky a uspořádání hrot – deska. Model dutinky je představitelem vnitřní poruchy v zařízení s pevnou izolací, například vysokonapěťový transformátor zalitý v epoxidové pryskyřici. Uspořádání hrot – deska představuje jakýkoliv hrot nebo hranu vodiče, kde vznikne koróna při velkém napěťovém rozdílu hrot – okolí. V první části změříme hladinu částečných výbojů pro každý objekt na jednotlivých fázích, v druhé části ověříme, jak bude systém reagovat, pokud budou na různých kanálech různé poruchy, tedy zda se měření na jednotlivých fázích ovlivňují nebo ne. V obou případech nás bude zajímat, jestli se to projeví ve výsledném diagramu.

Před začátkem měření se nejdříve musí provést kalibrace napětí a náboje.

4.3.1 Kalibrace náboje a napětí

Před samotným měřením je nutno kalibrovat měřicí systém. V závislosti na kapacitách měřícího obvodu dochází cestou mezi měřícími svorkami objektu a vstupem do měřiče ke zkreslení pulzů částečných výbojů a vlivem ztrát na impedancích i ke zmenšení přeneseného náboje. Proto musíme kalibrovat a měření pak korigovat na kalibrační hodnoty. Kalibraci je nutno provést před každým měřením na již sestaveném obvodu včetně připojeného měřeného objektu. Elektronický kalibrátor generuje pulzy, které se podobají impulzům částečných výbojů. Je třeba držet se těchto zásad:

- Kalibrátor musí být funkční, mít platný kalibrační list
- Kalibrační náboj by měl být řádově stejný, jako hodnota částečných výbojů, kterou očekáváme
- Velikost kalibračního náboje by neměla být závislá na kapacitě zkoušeného zařízení



Obrázek 6 - Kalibrační schéma

U	vysokonapěťový zdroj
Z	filtr
q_0	kalibrátor injektující impulzy
C_a	zkoušený objekt
C_v	vazební kondenzátor
Z_m	vstupní impedance měřícího systému
M	měřící přístroj

Kalibrátor připojujeme podle schématu na obrázku 4 [2]. Pulzy, které generuje kalibrátor, mají náboj q_0 při zapojení sériově ke známé kapacitě C_0 a vysílaného obdélníkového napětí U_0

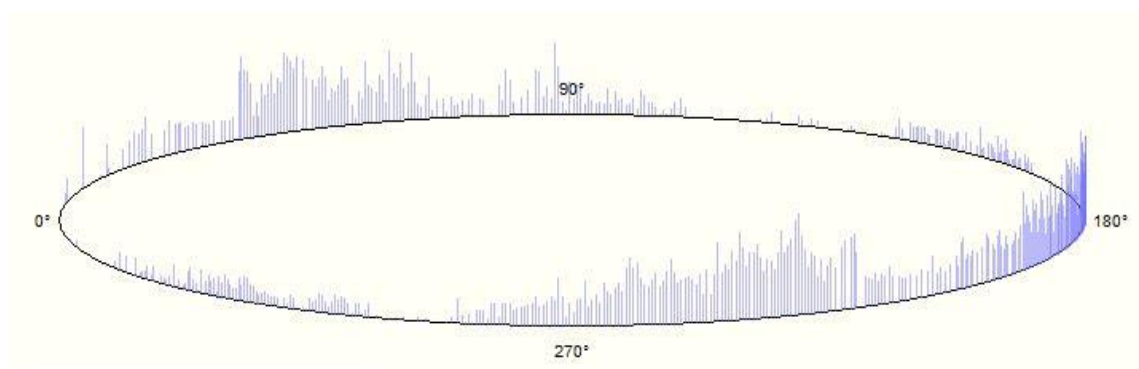
$$q_0 = C_0 U_0 \quad (12)$$

Kalibrační koeficient K_{q0} je pak vyjádřen jako podíl kalibračního pulzu a údaje na měřicím přístroji.

$$K_{q0} = \frac{q_0}{A_{qi}} \quad (13)$$

Hodnota tohoto koeficientu závisí na parametrech celého obvodu, proto musíme kalibrovat na již zapojeném obvodu tak, jak bude zapojen během následujícího měření.

Pro určení typu částečných výbojů je vhodné zobrazit částečné výboje na křivce napájecího napětí. Jedná se o „kruhový diagram“, kde 0 značí průchod napětí nulou.



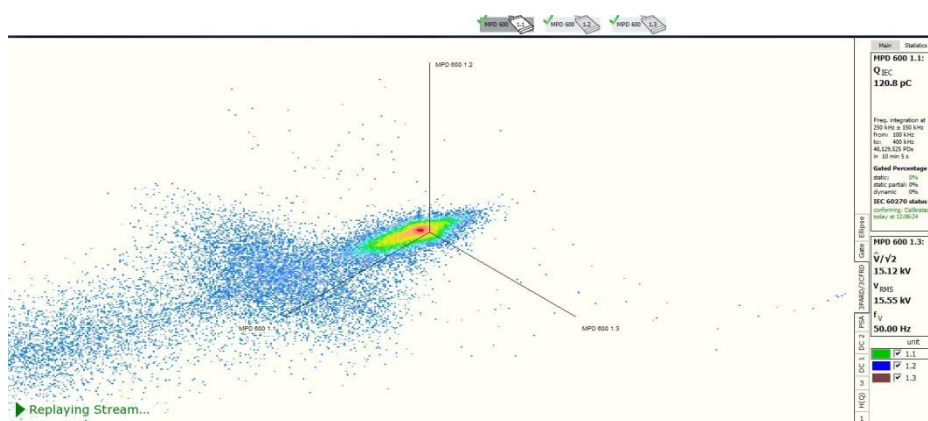
Obrázek 7 - Obrázec částečných výbojů

Ke kalibraci jsme použili elektronický kalibrátor, který vysílá pulzy do měřícího obvodu, a pak jsou dále zpracovány měřicím zařízením. Paralelně k měřenému objektu bylo nutno připojit kalibrátor nastavený na citlivost v mezích jednotek až stovek pC, podle toho, jaké hodnoty očekáváme. Pro měřená zařízení jako například transformátory jsou hodnoty předepsané normou [2]. Celá měřící soustava musí být zapojena tak, jak se na ní bude potom měřit s tím rozdílem, že nesmí být připojena na napětí. Kalibrátor pak injektuje do svorek zkušebnímu objektu napěťové impulzy o dané hodnotě. Program pak vypočítá převodní konstantu, díky které pak odečítáme správné hodnoty. Kalibrovat jsme museli jak náboj, tak napětí.

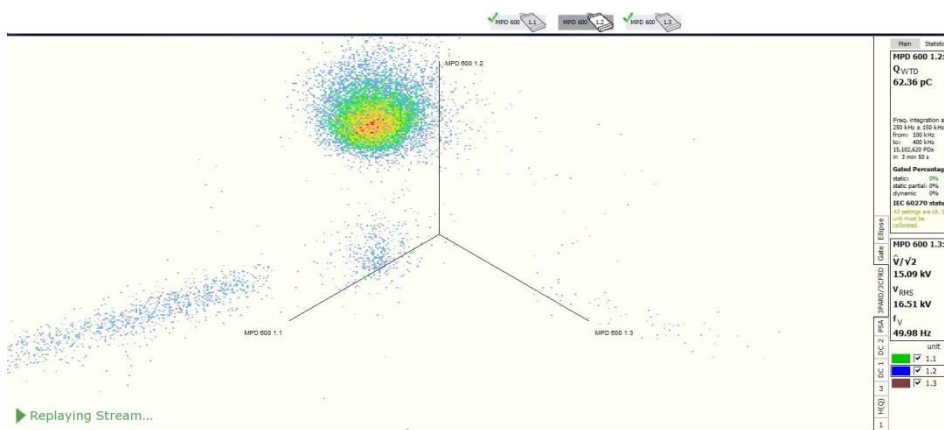
Napětí bylo kalibrováno pomocí napěťové měřící sondy a multimetru. Cílem kalibrace je, aby měřící program měřil na všech kanálech stejnou hodnotu napětí. Pomocí multimetru jsme odečetli za vysokonapěťovými transformátory přesně nastavenou hodnotu napětí, tuto hodnotu jsme zadali do programu a ten vypočítal převodní konstantu.

4.4 Popis měření

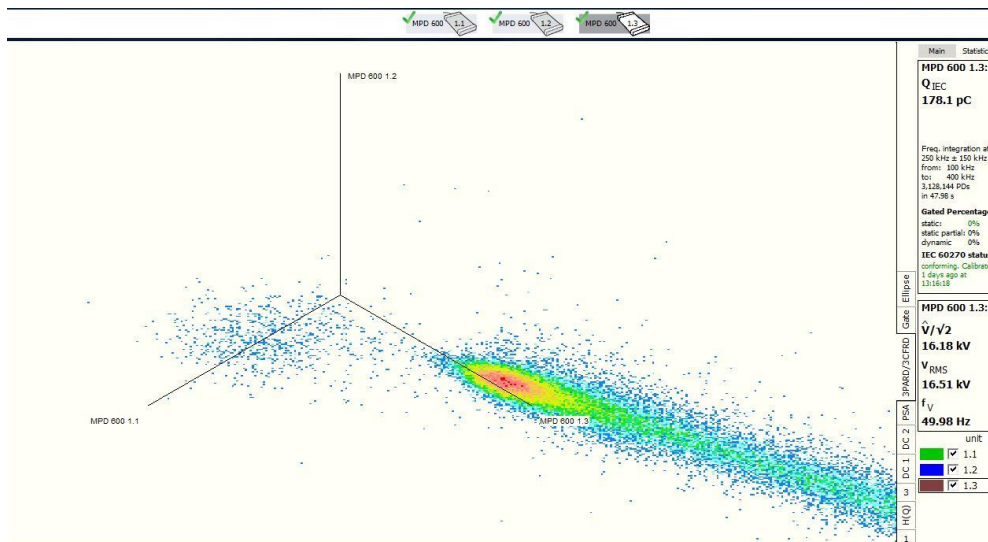
Prvním testovaným objektem je model dutinky v pevné izolaci – epoxidové pryskyřici. Zkušební napětí se pohybovalo okolo 15 kV, protože k zapálení výbojů bylo potřeba vyšší zapalovací napětí. Jeho zjištění však nebylo předmětem měření. Postupně jsme dutinku připojovali na jednotlivé fáze a výsledkem jsou tři clusterové diagramy. Hodnota naměřeného náboje se pohybovala okolo 200 pC.



Obrázek 8 – Clusterový diagram pro model dutinky připojený na fázi L1

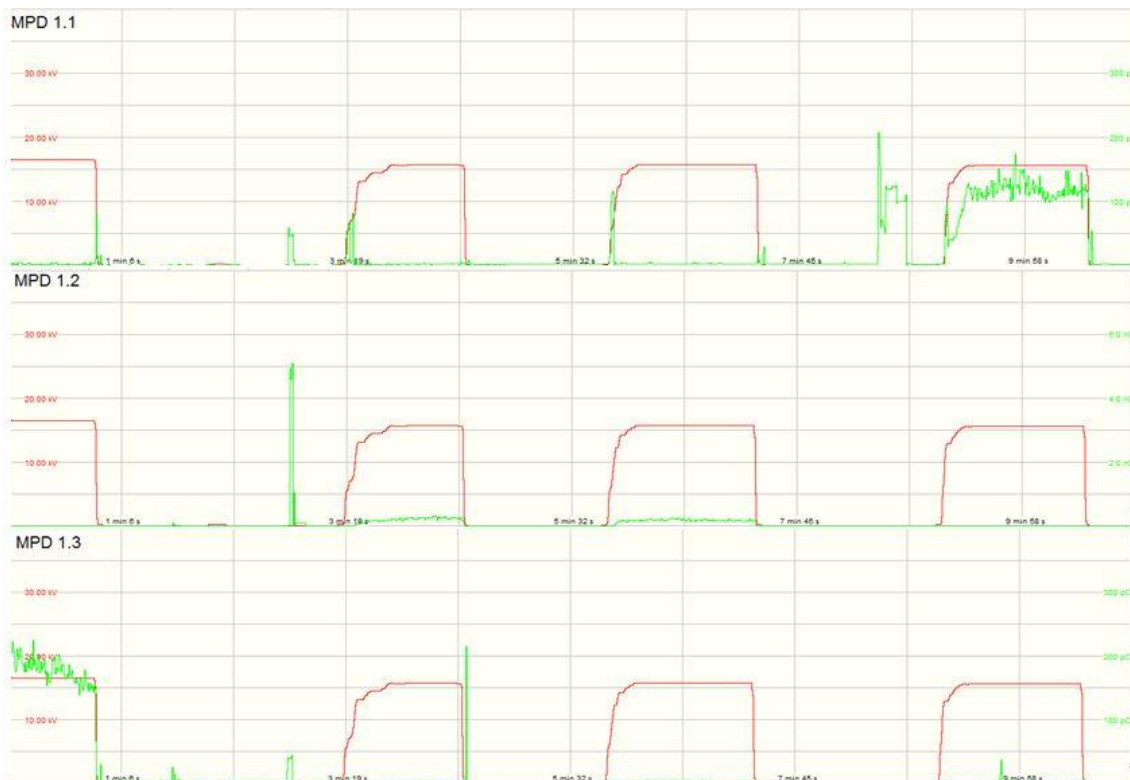


Obrázek 9 – Clusterový diagram pro model dutinky připojený na fázi L2



Obrázek 10 – Clusterový diagram pro model dutinky připojený na fázi L3

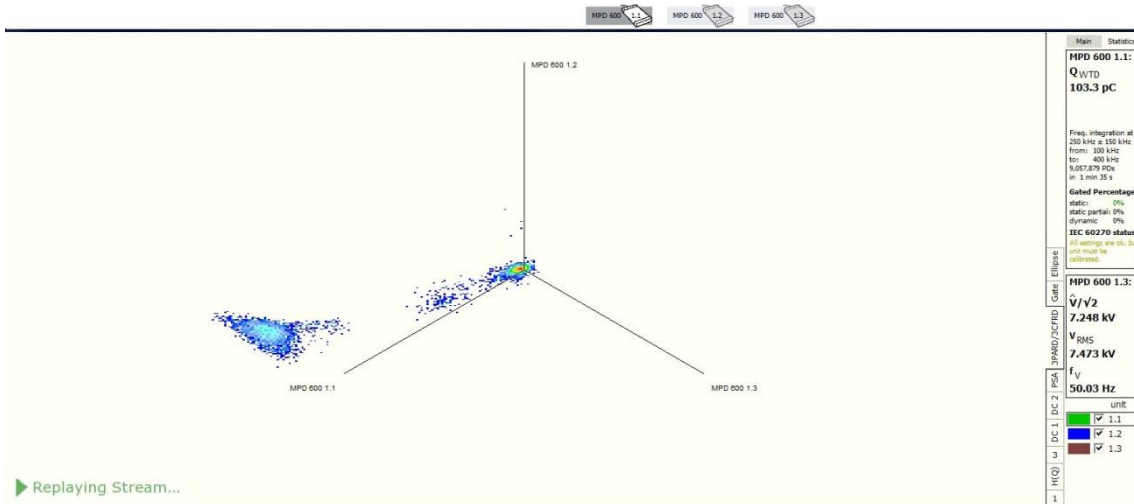
Při pohledu na tyto tři diagramy je velmi dobře rozeznat, na které fázi se dutinka, námi simulovaná porucha, nachází. To je při online měření jedna z podstatných výhod. Výboje, které se nachází přímo ve středu souřadnic, mimo osy nebo ve velmi řídkých slucích, můžeme považovat za šum, který je způsoben například zvýšenou hladinou částečných výbojů v transformátorech a okolním rušením. Před začátkem měření jsme naměřili pozadí cca. 2 pC, které jsme v nastavení programu potlačili, všechny výboje s nábojem menším než 2 pC nebyly zobrazeny v naměřených datech. Při přivedení napětí do zkušebního obvodu jsme však zjistili, že na dvou fázích hodnota 2 pC nestačí a šum se objevuje. Vyšší hodnotu jsme již nenastavovali.



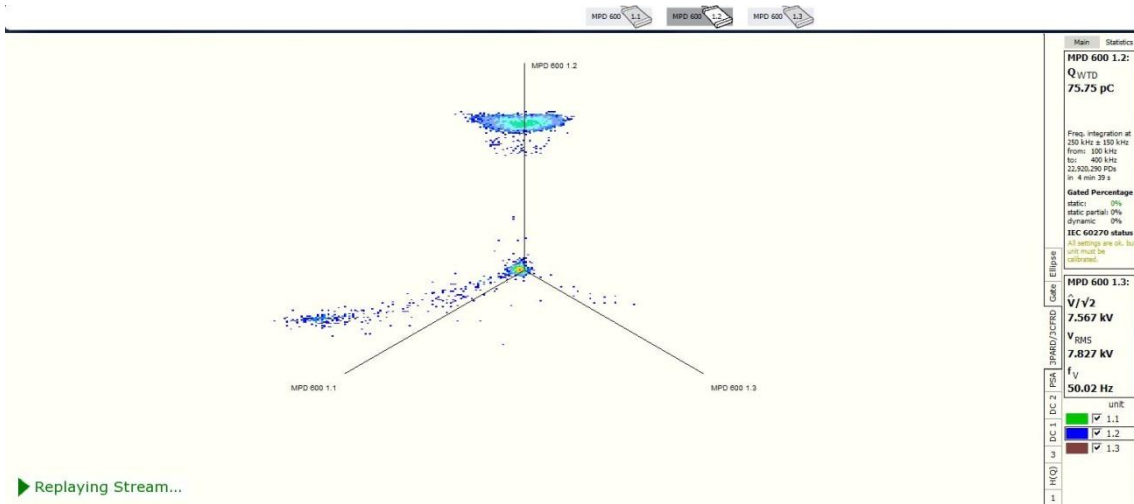
Obrázek 11 - Průběh napětí a výbojů při měření na dutince

Na obrázku 11 je velmi dobře vidět, že na té fázi, kde byla připojena dutinka, se nacházely výboje, na zbylých dvou je pouze šum. Červenou barvou je zobrazeno napětí v kV, zelenou náboj v pC. Při prvním měření se dutinka nachází na L3, na dalších dvou na L2, poslední měření je na L1. Zákmity náboje, které jsou vidět při nulovém napětí, jsou následkem přemísťování dutinky z jedné fáze na druhou a jinou manipulací uvnitř v obvodu, kdy se měřící zařízení neodpojují.

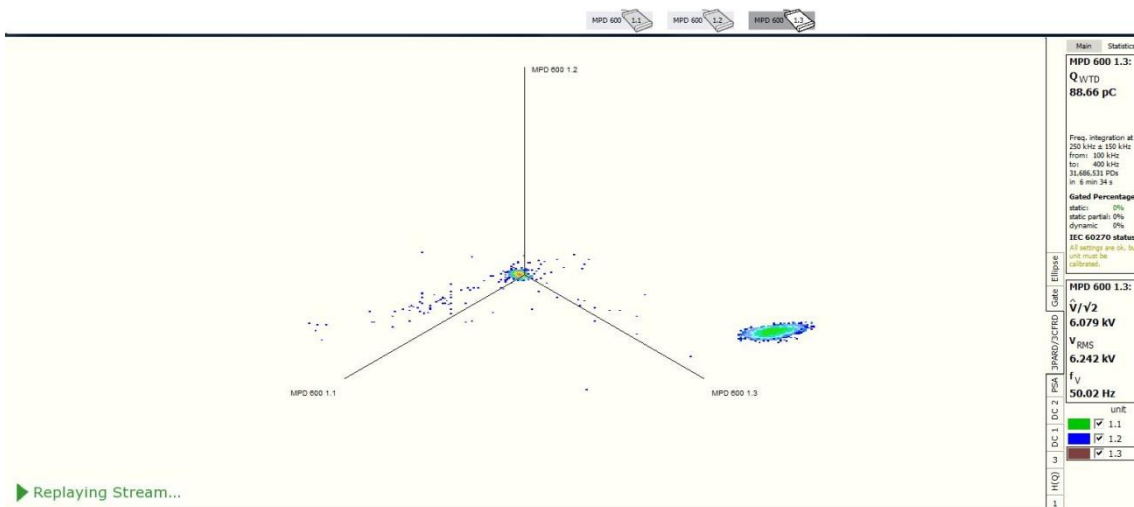
Dalším objektem bylo uspořádání hrot – deska, kde přiložením VN vznikne koróna. Koróna ve vzduchu má díky nižší elektrické pevnosti, která je 3 kV/mm, nižší zapalovací napětí v porovnání s modelem dutinky. Proto námi zvolené zkušební napětí bylo nižší než u dutinky a to okolo 7 kV. Naměřená hladina částečných výbojů se pohybovala okolo 100 pC.



Obrázek 12 – Clusterový diagram pro model hrot - deska připojený na fázi L1

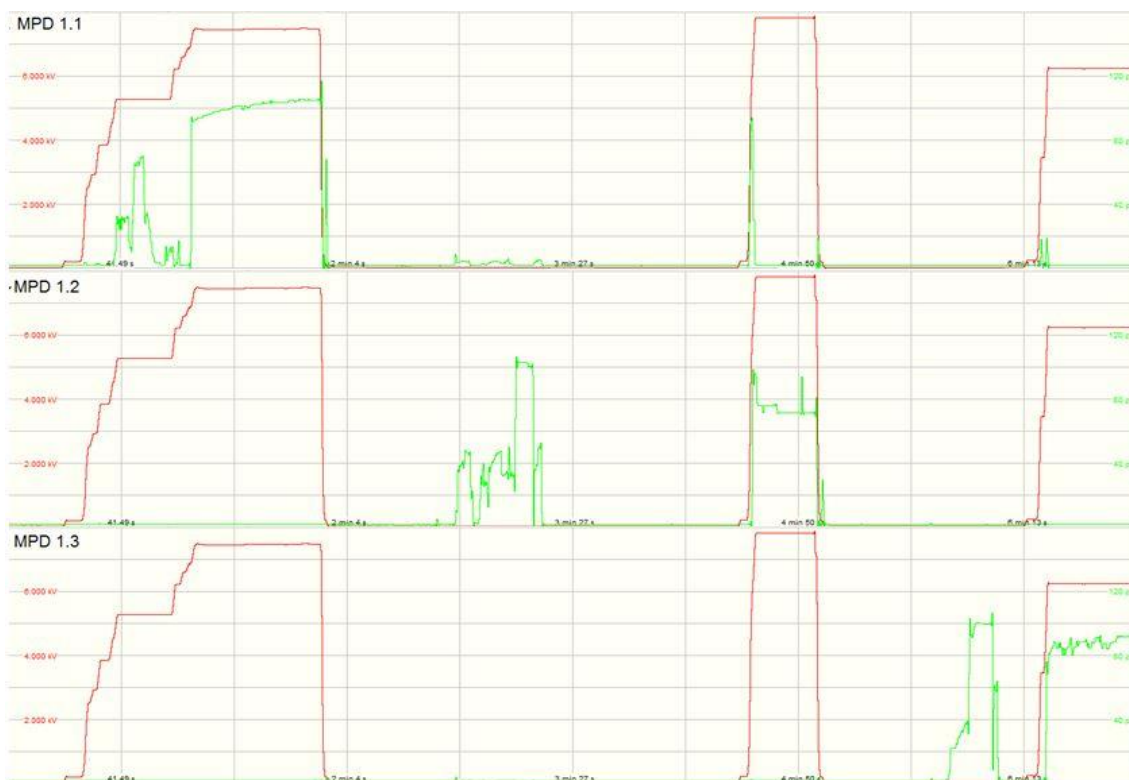


Obrázek 13 - Clusterový diagram pro model hrot - deska připojený na fázi L2



Obrázek 14 - Clusterový diagram pro model hrot - deska připojený na fázi L3

Opět je vidět, že shluk bodů představujících jednotlivé částečné výboje, se nachází poblíž té osy, kam byl hrot připojen. Panel vpravo na obrázcích ukazuje zkušební napětí okolo 7 kV a náboj 75-100 pC. Dále stojí za povšimnutí shluk přímo ve středu souřadnic, o kterém víme, že představuje šum. Díky menšímu zkušebnímu napětí není míra zarušení tak velká jako u dutinky.

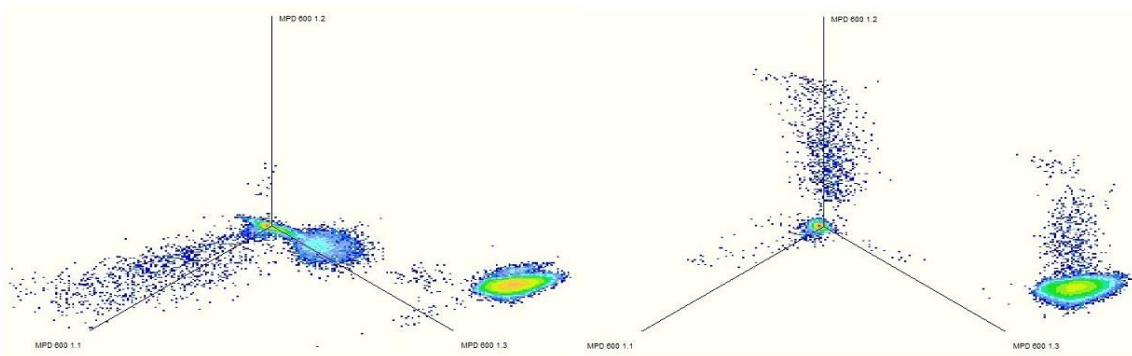


Obrázek 15 - Průběh napětí a výbojů při měření na uspořádání hrot - deska

Na obrázku 15 je velmi dobře vidět, že se nám v nastavení programu podařilo nastavit ideální potlačení šumu, tedy při měření na jedné fázi se na druhých dvou nezobrazuje téměř žádná výbojová aktivita. Zákmity při nulovém napětí jsou opět následkem manipulace s objektem.

Původně bylo v plánu ještě jeden zkušební objekt – hrot v oleji. Ale díky vysoké elektrické pevnosti oleje jsme museli od tohoto objektu upustit, protože zde měla koróna příliš vysoké zapalovací napětí. Použité transformátory by sice s tímto napětím neměly problém, nicméně míra zarušení jimi způsobená by byla natolik velká, že by to znehodnotilo výsledky měření.

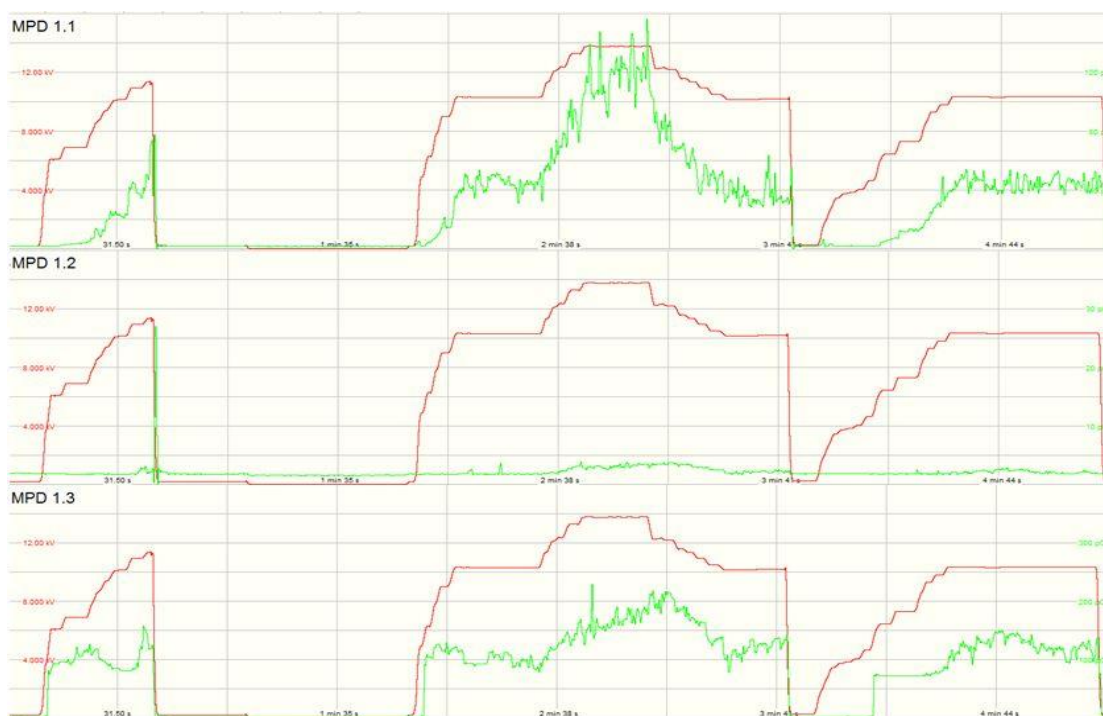
Poslední částí měření bylo připojit na každou fázi jiný objekt. Protože jsme olej nepoužívali, byly obsazeny pouze dvě fáze, na třetí nebyl připojen žádný objekt.



Obrázek 16 – Clusterový diagram pro kombinaci modelů dutinky a hrot - deska

Na obrázku 16 jsou pro srovnání zobrazeny dvě měřené varianty. Hrot – deska se nachází na L3, kde je velmi pěkně zobrazen cluster s mírným zarušením. Dutinka je v levé části obrázku na L1, v pravé části na L2. Z důvodu nižšího zapalovacího napětí koróny bylo možné použít nižší zkušební napětí 6 kV, ale pak se neobjevovaly výboje v dutince. Proto jsme nastavili napětí kolem 13 kV, kdy dutinka už reagovala, ale výbojová činnost na koróně ještě nebyla natolik silná. Opět je ve středu souřadné soustavy vidět šumový cluster.

Dalším viditelným rozdílem mezi dutinkou a hrotem je vzhled clusteru v diagramu. Zatímco hrot vypadá jako ovál s jasným středem, kde je intenzita výbojů nejvyšší, a která se směrem od středu snižuje, dutinka je pouze shluk bodů.



Obrázek 17 - Průběh napětí a výbojů dutinka na L1+ hrot - deska na I3

Z grafů je vidět, že měření bylo opakováno třikrát, protože jsme hledali nejlepší hladinu napětí, kdy v dutince bude patrná výbojová činnost a naopak na hrotu nebude moc intenzivní. Na fázi L2, kde není připojen žádný objekt, můžeme pozorovat pouze hladinu šumu.

Závěr

Částečné výboje vznikají v izolaci při připojení stroje nebo přístroje na vysoké napětí. Ať bude výroba sebezpečnější, nelze se jim vyhnout. Proto je důležitý jejich monitoring během chodu zařízení, aby se předešlo případným haváriím.

Jedním z možných měření je synchronní vícekanálové měření, které může buď probíhat na více fázích zároveň, nebo v případě kabelu na více místech jedné fáze. Ze tří možných vyhodnocovacích metod jsme se zaměřili na 3PARC, která se hodí více pro měření na strojích, kde nehraje roli vzdálenost mezi měřicími zařízeními. Výsledkem takového měření je diagram, kde jsou částečné výboje znázorněny jako clustery a lze určit, na které fázi se porucha nachází.

Tuto metodu jsme se rozhodli ověřit v Laboratoři vysokých napětí, ČVUT FEL v Praze, kde jsme simulovali poruchy na jedné nebo dvou fázích. Poruchy izolačních systémů byly simulovány pomocí přípravku s uměle vytvořenou dutinkou a přípravkem s uspořádáním elektrod hrot – deska. Dutinka představuje vnitřní poruchu v izolačním materiálu, hrot představuje všechny vnější částečné výboje, které mohou při chodu stroje v provozu vznikat.

Z provedených měření je patrné, že pokud se měřicí program dobře nastaví a obvod je správně zkalibrován, je tato metoda vícekanálového měření částečných výbojů velmi spolehlivá. Při připojení dutinky nebo hrotu na vybranou fázi se v clusterovém diagramu zobrazily naměřené částečné výboje na dané fázi. Dále jsme zjistili, že měření se vzájemně neovlivňují, například při naměřené hladině 100 pC na fázi L1 byla naměřena na fázi L2 a L3 pouze hladina šumu, která zde byla již před počátkem měření. Při simulaci kombinace poruch na různých fázích bylo zjištěno, že se poruchy navzájem neovlivňují a v diagramu se opět zobrazily na očekávaných fázích. Ověřili jsme, že při připojení objektu na vybranou fázi, je při měření a vyhodnocování správná odezva v podobě clusteru na odpovídající fázi. Pokud se před samotným měřením zjistí hladina šumu, lze tuto hodnotu potlačit a dostaneme diagramy bez rušení, z kterých je velmi dobře zjištělná případná porucha.

Použitá literatura

- [1] CPL 542/543, Datasheet, OMICRON, https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/CPL-542-543-Datasheet-ENU.pdf
- [2] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Český normalizační institut, 2001.
- [3] KOLTUNOWICZ, Wojciech a Ronald PLATH. Synchronous multi-channel PD measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2008, **15**(6), 1715-1723 [cit. 2016-04-29]. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712676. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4712676>
- [4] KRAETGE, Alexander, Kay RETHMEIER, Michael KRUGER a Paul WINTER. Synchronous multi-channel PD measurements and the benefits for PD analyses. In: *IEEE PES T&D 2010* [online]. IEEE, 2010, s. 1-6 [cit. 2016-04-11]. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484343. ISBN 978-1-4244-6546-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5484343>
- [5] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [6] MCC Datasheet, Datasheet, OMICRON, https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/MCC-Datasheet-ver-3-ENU.pdf
- [7] MCU 502/504 and MPP 600 Datasheet, Datasheet, OMICRON, https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/MCU-MPP-Datasheet-ENU.pdf
- [8] MPD 600 Brochure, Datasheet, OMICRON, https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/MPD-600-Brochure-ENU.pdf
- [9] RETHMEIER, K., A. KRAETGE, B. VANDIVER, C. BALKON, W. KALKNER a R. PLATH. Separation of Superposed PD Faults and Noise by Synchronous Multi-Channel PD Data Acquisition. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* [online]. IEEE, 2008, s. 611-615 [cit. 2016-04-29]. DOI: 10.1109/ELINSL.2008.4570406. ISBN 978-1-4244-2091-9. ISSN 1089-084x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4570406>

[10] RETHMEIER, K., Benton VANDIVER, A. OBRALIC, W. KALKNER a R. PLATH. Benefits of synchronous multi-channel PD measurements. In: *2007 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* [online]. IEEE, 2007, s. 819-823 [cit. 2016-04-29]. DOI: 10.1109/CEIDP.2007.4451561. ISBN 978-1-4244-1481-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4451561>

[11] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-X.