



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék - Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

Tóth Zoltán

TRANSZFORMÁTOR DIAGNOSZTIKA UHF RÉSZKISÜLÉS MÉRÉSSEL

Transformer diagnostics by the means of UHF partial discharge
measurements

Konzulens

Cselkó Richárd

Dr. Németh Bálint

Göcsei Gábor

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract	5
Köszönetnyilvánítás	6
1 Bevezetés	7
2 A részkisülés mérés elhelyezése a transzformátor diagnosztikai módszerek között	9
2.1 Transzformátor diagnosztikai módszerek	10
2.1.1 Olajvizsgálat	10
2.1.2 Hibagáz analízis	11
2.1.3 Szigetelési ellenállásmérés	12
2.1.4 Abszorpciós tényező	13
2.1.5 Visszatérő feszültség mérés (RVM) [6][9].....	13
2.1.6 Kapacitás, dielektromos veszteségi tényező [6]	16
2.1.7 Frekvencia impedancia karakterisztika (FRA)	17
2.1.8 Fokozatkapcsoló vizsgálata	18
2.2 Részkisülések vizsgálata.....	19
3 Az UHF (Ultra-High Frequency) részkisülés méréssel kapcsolatos kutatások...	22
3.1 Részkisülés mérés nagyfrekvenciás (UHF) tartományban [20]	22
3.2 Részkisülés helyének lokalizálása nagyteljesítményű transzformátoroknál nagy sávszélességű RF detektálással [21].....	23
3.3 Részkisülés diagnosztika és elektromos berendezések szigetelési állapotfelmérése [22]	23
3.4 Aktuális transzformátor állapotmonitoring trendek [12]	23
3.5 Részkisülés helyének detektálása nagyteljesítményű transzformátoroknál UHF és akusztikus mérésekkel [23].....	25
3.6 Részkisülés detektálás és azonosítás UHF technikára alapozva légmodellekben [24]25	
3.7 Összegzés.....	26
4 Jelterjedés és csillapodás szigetelőanyagokban	27
4.1 Elméleti háttér.....	28
4.2 Mérési elrendezés és eredmények értékelése.....	30
4.2.1 Csúcs-sík elrendezés	31
4.2.2 Csúcs-sík elrendezés – az összeállítás elmozdítása	33

4.2.3 Csúcs-sík elrendezés – szigetelő behelyezése az elrendezésbe	34
4.2.4 Transzformátoron végzett mérés próbatermi környezetben	37
4.3 Összegzés.....	39
5 Olajok nagyfrekvenciás viselkedése	40
5.1 Mérési összeállítás	40
5.2 Mérés elméleti háttere.....	41
5.3 Mérés kiértékelése	45
5.3.1 Hagyományos ásványi olaj	47
5.4 Konklúzió.....	48
6 Összefoglalás és kitekintés a további fejlesztésekre és mérésekre.....	50
Irodalomjegyzék.....	51
Ábrajegyzék.....	53
Táblajegyzék.....	55
Függelék.....	56

Összefoglaló

TDK dolgozatomban transzformátor diagnosztikával foglalkozom, ennek egy speciális, Magyarországon egyelőre kevésbé alkalmazott változatával, az UHF részkisülés méréssel. Dolgozatom célja ennek a módszernek a bemutatása és alkalmazása különböző olajmintákon.

A transzformátorok az átvitel és elosztó hálózat legfontosabb és legdrágább elemei. Meghibásodásuk miatt akár egész országrészek energiaellátása kerülhet veszélybe. Nagyon fontos a folyamatos karbantartás és az ellenőrzés, hogy az esetleges hibákat még a súlyosabb kár kialakulása előtt meg tudjuk szüntetni. Egy transzformátor üzembiztonságának egyik fő eleme az olaj-papír szigetelés. Az ebben kialakuló helyi meghibásodások kimutatására és lokalizálására alkalmas az UHF részkisülés mérés. A módszer alkalmazhatóságának egyik kritikus pontja, hogy a kisülések jelei az olajon keresztül terjedve eljussanak a szenzorokig. Ennek megállapításához szükséges az olaj nagyfrekvenciás viselkedésének megállapítása. Az általam bemutatott és alkalmazott módszer az olaj impedanciájának a mérésén alapul nagyfrekvenciás jellel. Ennek segítségével számolható az olaj frekvenciafüggő (komplex) permittivitása. Ezzel számíthatóvá válik, hogy a kisülések által keltett jelek mérhetőek lesznek-e. A méréseim során különböző típusú új és használt transzformátor olajokat hasonlítottam össze ezzel a módszerrel.

A Nagyfeszültségű Laboratóriumban kismintákon elvégzett tesztek segítségével validálom a modellek valóságosságát.

Abstract

In my work I deal with transformer diagnostics and one of its special methods, currently not applied in Hungary, UHF partial discharge measurement. My goal is to introduce this method and its application on various oil samples.

Transformers are the most important and expensive parts of the distribution and transmission network. Their failure may endanger the energy supply of large areas. Therefore their maintenance and condition monitoring is of utmost importance, so that the defects can be eliminated before they grow to a failure. The most important part of a transformer with respect to reliability is its oil-paper insulation. Local defects formed here can be detected and located by the means of UHF partial discharge measurement. The applicability of the method relies heavily on the signals to propagate to the sensors via the oil. To determine this, the high frequency behavior of the oil must be understood. The presented method relies on the measurement of the impedance of the oil at high frequency. With this, the (complex) frequency dependent dielectric constant of the oil can be determined. This allows the calculation whether the PD signals can be measured or not.

During the measurements new and used oils of various types has been compared. In the High Voltage Laboratory, measurements have been carried out on mock-ups in order to validate the models.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni konzulensemnek, Cselkó Richardnak, hogy munkám színvonalas megírásában, a téma mélyebb megismerésében segített.

Köszönöm Dr. Németh Bálintnak, a BME Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Laboratórium vezetőjének, hogy rendelkezésemre bocsátotta az eszközöket és munkámban segített.

Nem utolsó sorban köszönöm Szűcs Lászlónak, a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék munkatársának, hogy a számítások elméleti háttéréhez különböző forrásokat és technikai segítséget nyújtott.

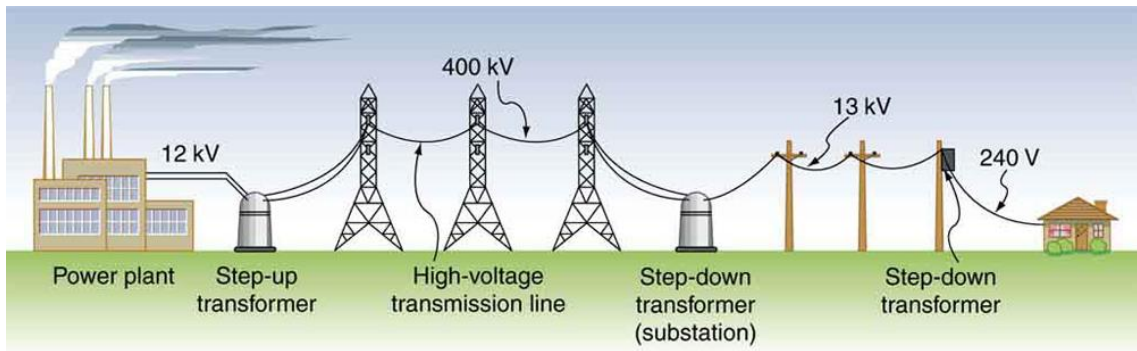
Illetve szeretném köszönetemet nyilvánítani Dr. Tamus Ádámnak, a Villamos Energetika Tanszék docensének a Siemens transzformátortelepén végzett részkisülés-vizsgálatért.

1 Bevezetés

Napjainkban az energiaátvitel során bekövetkező kisebb kiesések is nagyobb területen bekövetkező áramkimaradást eredményezhetnek, mely mind gazdasági, mind felhasználói oldalról negatívum. Az energiaszolgáltatás/átvitel folyamatos fenntartásához elengedhetetlen a rendszeres időközönkénti diagnosztikai vizsgálatok elvégzése.

Az átviteli hálózaton az alábbi egységeken jelentkezhet probléma:

- transzformátorok,
- megszakítók,
- szakaszolók,
- áram- és feszültségváltók,
- sodronyok,
- távvezetékoszlopok,
- szigetelők.



1-1. ábra Az energiaútja a termelőtől a fogyasztóig [1]

Mint az a felsorolásban is látható, számos meghibásodási pont van csak az átviteli hálózat oldalán, s ez még az elosztó hálózatot nem is érinti. Az átvitel egyik

legfontosabb egysége normál üzem¹ közben a nagyfeszültségű transzformátorok. Ezen eszközök hatásfokának² parányi, 0,01%-os változása is már tetemes pluszköltséget eredményez.

Köztudott, hogy a legtöbb villamosenergia termelő, szállító, illetve szolgáltató vállalat az utóbbi évtizedekben új helyzettel találta magát szemben, mint például jelentős szervezeti átalakulások mentek végbe, egyre kevesebb szakértő áll rendelkezésre az eszközállomány menedzselésére, nyomás nehezedik rájuk költségek csökkentésére, jelentős a 20-30 évet meghaladó korú berendezések száma, melyeket csak a koruk miatt lecserélni egyértelműen nem lenne gazdaságos. A villamos berendezések gazdaságos üzemeltetéséhez igen fontos tehát, hogy a helyszínen, illetve a laboratóriumban elvégzett vizsgálatok alapján döntést lehessen hozni a berendezések jóságáról, e nagy értékű egységek szigetelési állapotáról, vagyis szükség van-e valamilyen beavatkozásra (pl. karbantartásra, helyszíni vagy gyári javításra, felújításra), ill. esetleg az egység teljes cseréje esedékes. [8]

Mindezek fényében kijelenthető, hogy nem csak üzem- és biztonsági szempontokból, gazdasági szempontból is fontos a folyamatos eszközdiagnosztika. Dolgozatomban transzformátorolaj nagyfrekvenciás vizsgálatát végzem el, hogy ezek alapján következtetéseket lehessen levonni a későbbiekben az egyes hibák és hibahelyek pontosabb és mihamarabbi észleléséhez.

¹ normál üzem [2]: Teljesíthetők a biztonsági, minőségi és optimum követelmények. A frekvencia és a feszültség az irányított hálózat minden pontján megfelelő (nincs határérték-túllépés).

² [3]A veszteség az egész megtermelt energiamennyiség 0,38%-a, ami kb. 122GWh.

2 A részkisülés mérés elhelyezése a transzformátor diagnosztikai módszerek között

A nagyfeszültségű hálózati berendezések időszakos, ill. folyamatos (monitoring jellegű) szigetelés állapot ellenőrzésének célja lényegében olyan vizsgálatsorozatok végrehajtása üzemzavarok ill. meghibásodások megelőzése, vagy legalább azok számának csökkentése érdekében, ami egyúttal minimalizálhatja a karbantartási, felújítási, végső soron az üzemeltetési költségeket is. [8]

A nagyteljesítményű transzformátorok és generátorok a villamosenergia rendszer legértékesebb berendezései. A rendszer üzembiztonsága szempontjából kiemelt fontosságú, hogy ezen egységek váratlan kiesésének száma a lehető legkisebb legyen. Az üzembiztonságot nagymértékben befolyásolja a szigetelés állapota, így villamosenergia rendszer megfelelő minőségen történő rendelkezésre állása szempontjából kiemelt fontosságú, hogy a villamosenergia rendszer két legértékesebb berendezése megfelelő hatékonyságú, korszerű szigetelés állapot ellenőrzési rendszerrel rendelkezzen. [8]

Napjainkban számos transzformátor diagnosztikai módszer létezik már. Ezek külön-külön alkalmazása hibás következtetésekre adhatnak okot. A következő néhány bekezdésben létező roncsolásmentes módszerek elméleti háttérét mutatom be, hogy az általam használt részkisülések mérésen alapú technológia elhelyezésre kerülhessen.

[4] A részletezés előtt egy összefoglaló lista:

- Olajvizsgálat
- Hibagáz analízis
- Szigetelési ellenállásmérés
- Abszorpciós tényező
- Visszatérő feszültség mérés (RVM)
- Impedancia frekvencia jelleggörbe
- Kapacitás, dielektromos veszteségi tényező
- Részkisülés

- Rezgésmérés
- Zaj
- Termovíziós vizsgálat
- Belső hőmérséklet (Hot-spot)
- On-line monitoring rendszerek

A fentebb felsorolt lista közül néhányat kiemelve részletesen is bemutatok.

2.1 Transzformátor diagnosztikai módszerek

2.1.1 Olajvizsgálat

A legfontosabb szempont, hogy a szigetelőolaj megtartsa a gyári tulajdonságait az üzemeltetésük során. Mivel üzemi idejük alatt számos külső, környezeti hatások érhetik (üzemi hőmérséklet, villamos erőtér, nedvesség), így az eredeti állapotukhoz képest a fizikai-kémiai tulajdonságaik megváltozhatnak. [8]

Az általános olajvizsgálatok célja az olaj állapotának felmérése, illetve üzemképességének felmérése. Az ásványolaj-alapú szigetelőolajok vizsgálandó jellemzőit az MSZ IEC 60422 9 szabvány[5] tárgyalja.

Hogy az olaj megfelel-e az üzemelés folytatásához, a következő tényezőkből dönthető el:

- szín és külső,
- átütési feszültség,
- dielektromos veszteségi tényező,
- víztartalom,
- semlegesítési szám,
- mechanikai szennyezés,
- üledék,
- teljes gáztartalom,
- határfelületi feszültség,
- kinetikai viszkozitás,

- lobbanáspont
- folyáspont,
- sűrűség,
- oxidáció gátló tartalom és oxidációs stabilitás.

Ezekhez tartozó szabványokat az 2. számú melléklet (6.1.1./1. táblázat) tartalmazza. [6] Az olaj állapotellenőrzése során kapott eredmények kiértékelése a szigetelőolaját minősítés szempontjából négy osztályba sorolja:

1. osztály: az olaj folyamatos használatra alkalmas, határértékei megfelelnek
2. osztály: az olajt kondicionálni kell, külseje zavaros vagy szennyezett, víztartalma nagyobb, átütési feszültsége kisebb, mint a berendezésre megadott határérték
3. osztály: regenerálást igényel, amit a mechanikai szennyezés, az üledéktartalom, a semlegesítési szám vagy a dielektromos veszteségi tényező határértéktől való eltérése mutat
4. osztály: olajat cserélni kell, jellemzői és határértékei rosszak, minősége kezeléssel sem javítható. [5][6]

2.1.2 Hibagáz analízis

Az olajban oldott gázok elemzése az egyik legfontosabb állapot ellenőrzési módszer a helyi túligénybevételek kimutatására. Az új detektorok megjelenése, a szakértői rendszerek fejlődése, stb. lehetővé teszik, hogy a hibagázanalízis eddigi jó eredményei ne csak off-line, hanem on-line monitoring rendszerként is rendelkezésre álljanak. [8]

Az olaj-papíros szigetelésben megjelenő helyi túligénybevételek miatt hibagázok keletkeznek, melyek az olajba oldódva különböző, de a még korai stádiumában lévő hibák felismerését segítik elő. A magas, helyi hőmérsékletű igénybevételek (kis- és nagyáramú villamos kisülések) következtében a transzformátorban lévő szerves szigetelést rongálja, és így az igénybevétel fajtájától függően különböző gázok keletkeznek. [7]

A hibagáz analízis vizsgálata laboratóriumban, gázkromatográffal történik. A vizsgálat kiértékelését számos szabvány és intézkedési terv segíti, valamint a félvezetők

és a szenzortechnika fejlődésével egyre pontosabb eredményeket lehet kapni. Utóbbinak a fejlődési iránya főleg monitoring üzemmódban érvényesül. [7]

Az olajból úgy kell mintát venni, hogy az olajban oldott gázok változás ne történjen. A vizsgálati eredmény pontos kiértékelhetőségének érdekében a hibagázok maradéktalanul az olajban maradjanak, más, idegen gázok hozzájuk ne kerülhessen. A gázkromatográfiás vizsgálatokhoz kb. 200 ml olaj levétele szükséges, amiből akár három különböző vizsgálat is elvégezhető. A mintaként levett olaj fontos adatokat hordoz magában, így annak gondtalan kezelése hamis és félrevezető eredményeket produkálhat, amelyek felesleges és káros intézkedéseket jelentenének az üzemeltetőnek. [7]

A gázarányok hibakódjaiból lehet meghatározni az igénybevételek jellegét. Egyes tipikus meghibásodásokkor bizonyos gázoknak kulcsszerepük van a hibák kialakulását illetően, jellegzetes gázarányokat produkálnak. Bizonytalan esetekben a Key gázmódszer alkalmazása hasznos, segítséget adhat a gáztermelő folyamatok kimutatására. Az IEC arány módszer használatakor megállapítható, hogy nem szerepel minden gáznak külön-külön a kombinációja (hibák között időben átfedés van, hiba jellegének meghatározása nehézségekkel járhat), így további információra van szükség a végleges diagnózis meghatározására. [6]

2.1.3 Szigetelési ellenállásmérés

A szigetelési ellenállás mérése a legegyszerűbben elvégezhető állapotellenőrző mérések közé tartozik, ezáltal ez az egyik leggyakoribb mérési módszer. Az olaj-papír szigetelésű transzformátorok szigetelése a nedvességtartalomtól és az öregedési folyamatoktól függ. A transzformátor élettartamának időbeni lefolyása során a papír és az olaj öregedési termékei megváltoztatják a szigetelési ellenállás értékét, azonban a nedvességtartalom jóval nagyobb mértékben befolyásolja azt.

A szigetelési ellenállás mérése elsősorban a komoly hibák kimutatására szolgál, azonban a szigetelés öregedéséről nem szolgál pontos információval. Ahhoz, hogy a berendezés megfelelő besorolást kapjon, a mért értékeknek megadott határértékek felett kell lenniük. (KöF oldalon: 200 M Ω , NaF oldalon: 1 G Ω) A mérést fázisonként kell elvégezni, míg a mérésben részt nem vevő fázisokat, valamint az üzemszerűen földelt fémszerelvényeket le kell földelni.

A vizsgálat során egyenfeszültséget alkalmaznak, amelynek nagysága 1000, 2500 és 5000V lehet, amik közül a legnagyobb feszültségértéket kell választani úgy, hogy a próbafeszültséget ne haladja meg. A szigetelési ellenállás közelítő értékét a feszültség és a szivárgó áram pillanatértékének hányadosa alapján lehet kiszámítani. [7]

Probléma merül fel a szivárgó áram estében, mivel az áram értékét a szigetelés mérete, geometriája befolyásolja. A feszültség rákapcsolása után a kapacitív összetevő rövid idő alatt lecseng, ezt követően a szivárgó áramot a polarizációs és vezetési áram alkotja. A tényleges szigetelési ellenállás a vezetési összetevőből határozható meg. Mivel emellett a polarizációs tényező is jelen van, ami időben változik, ezért az eredő ellenállás értéke nem állandó. Azt az értéket tekintik szigetelési ellenállásnak (R_{sz}), ami a mérőműszerről a 60. másodpercben leolvassuk.

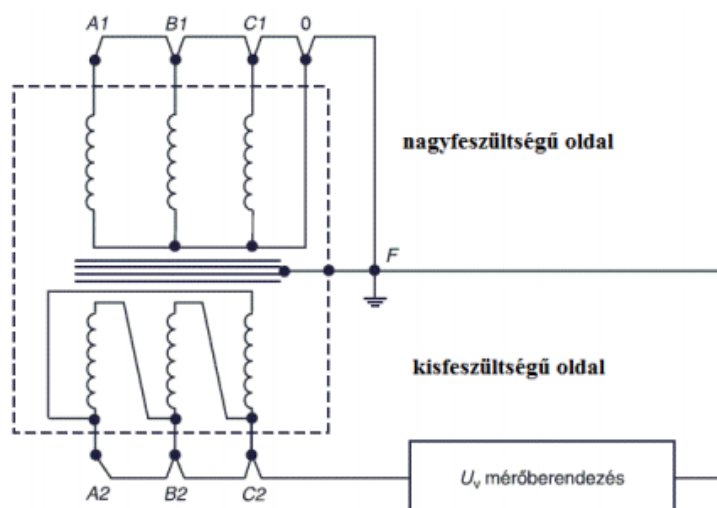
2.1.4 Abszorpció tényező

A szigetelési ellenállásmérés 15. és 60. másodpercében leolvasott értékeinek hányadosa. Értéke a vezetéstől és a polarizációtól együttesen függ.

2.1.5 Visszatérő feszültség mérés (RVM) [6][9]

A szigetelőanyagokban fellépő üzemi igénybevételek és az őket érő külső hatások olyan fizikai és kémiai folyamatokat indítanak, melyek módosítják az anyag molekuláris szerkezetét. Ez a módosulás befolyásolja a villamos szilárdságot illetve az anyagban fellépő dielektromos jelenségeket (vezetés, polarizáció).

A visszatérő feszültség mérése során az olaj-papír szigetelés polarizációs spektrumát szeretnénk meghatározni. Az egyes időállandójú polarizációs folyamatok intenzitása jellemzi a szigetelés állapotát. A vizsgálatához egyenfeszültséget használunk. Az alábbi ábrán látható a mérési elrendezés.



2-1. ábra RVM mérési elrendezés [9]

A vizsgálat során rövidre zárjuk és földeljük a nagyfeszültségű oldalát a transzformátornak. A kisfeszültségű oldalt szintén rövidre zárjuk és ide kapcsoljuk a vizsgáló feszültséget. Ezen elrendezés következtében a mérési folyamat kevésbé zavarérzékeny a kisfeszültségű oldalon található rövidebb átvezető szigetelőknek köszönhetően.

A mérés megkezdése után t_t töltési ideig egyenfeszültséggel töltjük a szigetelést. A feszültség rákapcsolásakor a különböző időállandójú polarizációs folyamatok egyszerre kezdenek kifejlődni. Az i -edik polarizációs folyamat kifejlődését leíró egyenlet:

$$P_i = 1 - e^{-\frac{t_t}{\tau_i}} \quad (2-1)$$

ahol P_i az i -edik polarizációs folyamat értéke

t_t töltési idő

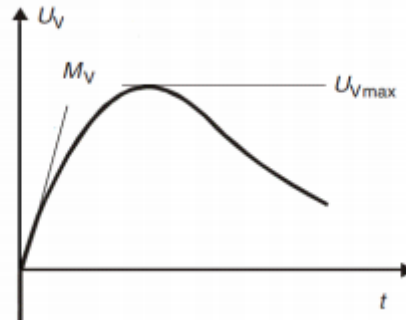
τ_i i -dik polarizációs folyamat időállandója

Tehát a töltés során a t_t töltési időnél kisebb, vagy azzal nagyjából megegyező időállandójú polarizációs folyamatokat aktivizáljuk. A töltési idő lejártá után t_k kisütési ideig rövidre zárjuk a szigetelést. Ekkor az i -edik polarizáció

$$P'_i = P_i e^{-\frac{t_k}{\tau_i}} \quad (2-2)$$

értékre fejlődik vissza. Ennek következtében a kisütési időnél kisebb, vagy azzal összemérhető időállandójú polarizációs folyamatokat dezaktiváljuk. A t_k kisütési idő

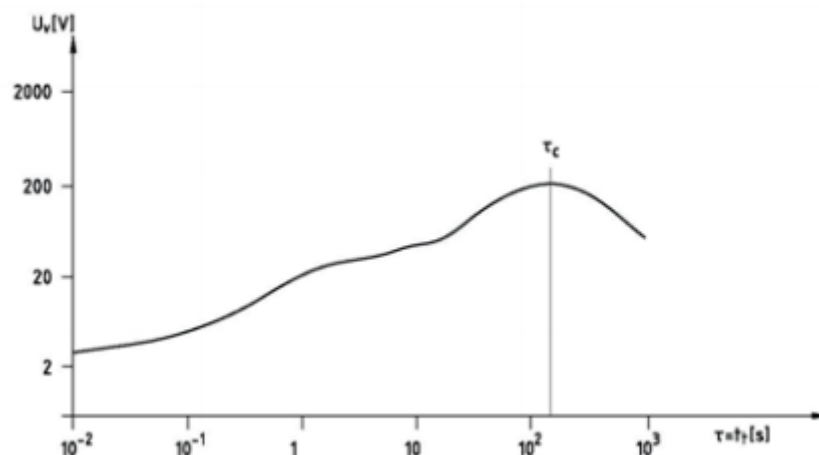
letelte után a $t_t > t > t_k$ időállandójú polarizációs folyamatok lesznek többé-kevésbé aktivizált állapotban. A töltési és kisütési idő hányadosa tetszőlegesen megválasztható. Levezethető, hogy a mérés során kapott polarizációs spektrum maximum helye akkor adja meg a domináns időállandó értékét, ha $k = t_k / t_t = 0,578$. Ehhez a legközelebb $k=0,5$ áll, mint könnyen kifejezhető arány. Így a gyakorlatban $t_t / t_k = 2$ aránnyal dolgoznak.



2-2. ábra Visszatérő feszültség görbe [6]

Az aktiválva maradt polarizációs tagok a rövidzár megszűnését követően tölteni kezdik a geometriai kapacitást, ezáltal feszültséget hoznak létre (2-2. ábra), melyet visszatérő feszültségnek nevezünk.

Az RVM mérés során az U_{vmax} visszatérő feszültség maximumát keressük, miközben a töltési időt változtatjuk 0,02 s és 10000 s tartományban. Az egyes feszültség maximumokat ábrázolva a hozzájuk tartozó időállandó értékkel kapjuk az eredő RVM görbét (2-3. ábra).

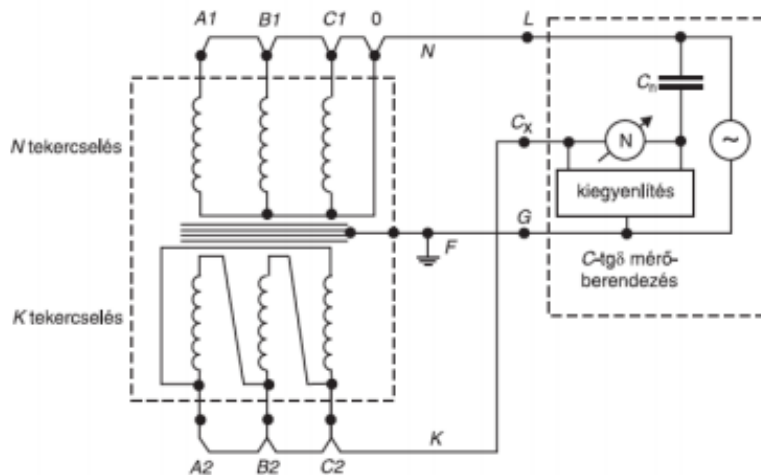


2-3. ábra Eredő RVM görbe [6]

Látható, hogy a görbe monoton növekvő jellegű, egy domináns (centrális) időállandóval rendelkezik: τ_c . Korábbi mérések és gyakorlati tapasztalatok alapján megállapítható az RVM görbék kapcsolata a szigetelés állapotával.

2.1.6 Kapacitás, dielektromos veszteségi tényező [6]

A következő ábra (2-4. ábra) mutatja a transzformátorok szigetelési kapacitásának és dielektromos veszteségi tényezőjének ($\text{tg}\delta$) mérési elrendezését. A dielektromos veszteségi tényező a vezetési, és a polarizációs folyamatokból származó veszteségeket is tartalmazza. A mérőfeszültség és a vizsgálati idő függvényében meghatározhatóak a transzformátorok tekercsei, illetve a tekercsek és a föld közötti kapacitások és veszteségi tényezők. Speciálisan, erre a célra kialakított mérőhíd segítségével történik az átvezető szigetelők kapacitásának és veszteségi tényezőjének mérése. A $\text{tg}\delta$ hirtelen ugrása a feszültség-idő függvényében a szigetelés romlását mutatja. Egy jó szigetelés veszteségi tényezője a feszültség függvényében nem változik, vagy csak kis mértékben nő.



2-4. ábra Transzformátor kapacitásának és dielektromos veszteségi tényezőjének kapcsolási vázlata [10]

A mérés értékét az befolyásolja, hogy az olaj-papír szigetelésű transzformátor szigetelési rendszere – olaj és az olajjal átitatott papír – milyen elrendezésben és arányban van jelen. Emiatt ugyan azon a transzformátoron, de különböző kivezetések között mért értékek különbözhetnek egymástól. További befolyásoló tényezők a hőmérséklet és a nedvességtartalom, valamint az öregedés, melyek növekedésével, illetve előrehaladtával a veszteségi tényező növekszik. A $\text{tg}\delta$ értéke nem igazán

érzékeny az alacsonyabb nedvességtartományban lévő papírok esetében a változások kimutatására, az értékek alig különböznek egymástól. Azonban a már erősen elnedvesedett szigetelés ezzel a gyors állapotellenőrzési vizsgálattal kimutatható.

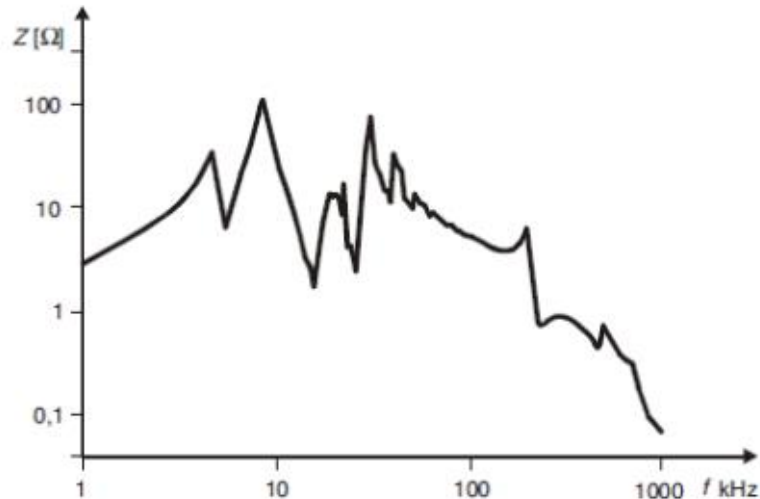
A dielektromos veszteségi tényező vizsgálatok a transzformátor szigetelésének állapota megfelelő, ha a mért veszteségi tényező értéke kisebb, mint $60 \cdot 10^{-4}$. Ha a tg δ értéke $60 \cdot 10^{-4}$ – $200 \cdot 10^{-4}$ közötti, akkor még megfelelőnek tekinthető a transzformátor szigetelése, azonban a többi alapméréssel együtt kell figyelembe venni a minősítését. A vizsgálat szempontjából nem megfelelő értékelést kap az a transzformátor, ha az értéke $200 \cdot 10^{-4}$ felett van.

A nagyfeszültségű átvezető szigetelőinek állapota akkor tekinthető megfelelőnek, ha a nagyfeszültségű átvezető szigetelők összehasonlított kapacitás értékei között az eltérés kisebb, mint 5%. A kapacitás és dielektromos veszteségi tényező értékének növekedése ipari frekvencián kevésbé érzékenyen jelzi a transzformátorok szigetelésének romlását, mint a visszatérő feszültség időállandó szerinti eloszlásának és centrális időállandójának változása.

2.1.7 Frekvencia impedancia karakterisztika (FRA)

A transzformátor aktív része a tekercs és a vasmag, amely induktivitásokból, kapacitásokból és ellenállásból álló összetett rendszert alkot (RLC hálózat). Minden menetnek van öninduktivitása, valamint a többi menethez kölcsönös induktivitásokkal kapcsolódik. Kapacitív csatolás a menetek és a tárcsák, illetve a tekercsek közt lép fel. Ezek az elemek határozzák meg a tekercs eredő, frekvenciafüggő impedanciáját. Az induktivitás és a kapacitás is függ az anyagtól, geometriától. Ha a tekercsek meneteinek a geometriai elrendezése megváltozik, akkor az elemi induktivitások és kapacitások értékei is megváltoznak, így megváltozik az eredő impedancia frekvenciafüggése is. A tekercs impedancia frekvencia jelleggörbéjének változása felhasználható a tekercs fellazulásának és egyéb deformációnak kimutatására. Tehát a Frekvencia Válasz Analízis (FRA [17]) mérés segítségével vizsgálhatjuk meg a tekercsekben kialakuló geometriai változásokat. [7]

Mérési elrendezés szempontjából különböző FRA mérések vannak, de mindegyik mérés a tekercset vizsgálja a frekvencia függvényében. Az FRA mérőműszer méri a frekvencia függvényében az impedancia abszolút értékét és fázisát. A következő ábra (2-5. ábra) bemutat egy FRA jelleggörbét:



2-5. ábra Transzformátor tekercs impedancia-frekvencia jelleggörbe [6]

Az eredmény kiértékelhető a mérés során kapott transzformátor impedanciájának a frekvencia spektrumából. A korábbi mérések során kapott görbék összehasonlításával értékelhető a tekercsek állapota. Összehasonlíthatóak az azonos oldalakon mért fázisok eredményei, korábbi évek mérési tapasztalatai, valamint az azonos típusú transzformátorok FRA mérési görbéi. Csak azonos állapotban felvett görbék hasonlíthatóak össze.

Rövidzárási impedancia mérés végezhető a frekvencia függvényében, ha transzformátor azonos oszlopán lévő másik tekercset rövidre zárjuk. Vizsgálati eredmények szerint az „üresjárási” impedancia mérés a tekercs deformációjára, míg az azonos oszlopon lévő két tekercs közti elmozdulásra a rövidzárási mérés az érzékenyebb. [26]

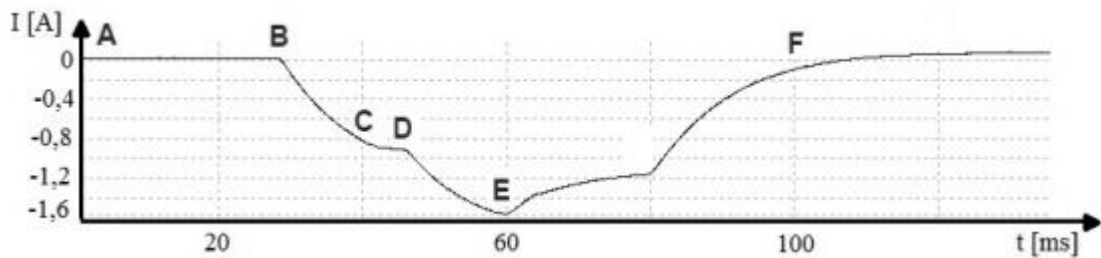
2.1.8 Fokozatkapcsoló vizsgálata

Ahhoz, hogy a megfelelő értékek között lehessen tartani a hálózati feszültség szintet a szekunder oldalon (fogyasztók felé nézve), a transzformátorokban a nagyfeszültségű oldalon kialakítottak egy szabályozó tekercset, ami több ponton van megcsapolva, és itt történik a feszültség szabályozás. Ennek az elrendezésnek az oka, hogy a primer oldalon jóval kisebb az áramerősség, mint a szekunder oldalon. Napjainkban hosszirányú szabályozás történik. (Régebben kereszt szabályozás volt.) Mivel függőleges irányú a főtekercs fluxusa, így ugyanolyan irányú fluxust kialakítva, közös magra tekercselik az úgynevezett szabályozó tekercset. Az egyes fokozatok

megcsapolásai között a terhelés alatti fokozatkapcsoló kapcsol át, azaz lehetőség van az üzem alatti áttétel változtatására. [8]

A fokozatkapcsoló három fő részből tevődik össze:

1. fokozatválasztó kapcsoló,
2. irányváltó kapcsoló
3. és terheléskapcsoló.



2-6. ábra Fokozatkapcsoló áramának időfüggvénye [6][27]

A fenti grafikonon (2-6. ábra) látható feljegyzett szakaszok az áram irányát mutatja meg, amelyek a következők: A-B: főérintkező, B-C: első érintkező, C-D: két érintkező, D-E: második érintkező, E-F: főérintkező.

A mérési eredmények kiértékelése (MSZ EN 60076-1) információt ad a fokozatkapcsoló érintkezők állapotáról és a mechanikus szerkezetek kopásáról. A motor áramfelvétele a hajtás és a fokozatkapcsoló esetleges szorulásáról, nehézkes járásáról számol be. Ennek az állapotellenőrzési vizsgálat eredménye akkor megfelelő, ha a teljes kapcsolási tartományban nem merül fel semmilyen rendellenesség, vagy arra utaló jel.[6]

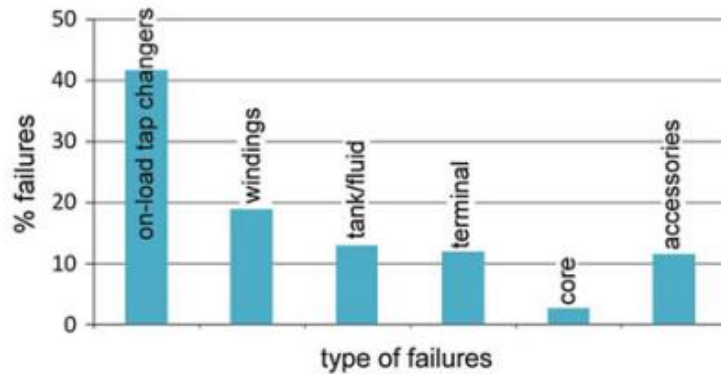
2.2 Részkisülések vizsgálata

A részkisülések jelenléte és nagysága a szigetelő állapotának minőségi jellemzője. Rövid távon ugyan nem befolyásolják a villamos szilárdságot, azonban hosszú távon romboló hatást fejtenek ki, elsősorban szerves szigetelőanyagokban. A részleges kisülések vizsgálata a szigetelés roncsolásmentes ellenőrzését teszi lehetővé. A részleges kisülések által keltett fizikai jelenségek változatossága (villamos, hang, fény) többféle vizsgálati módszert tesz lehetővé. [11]

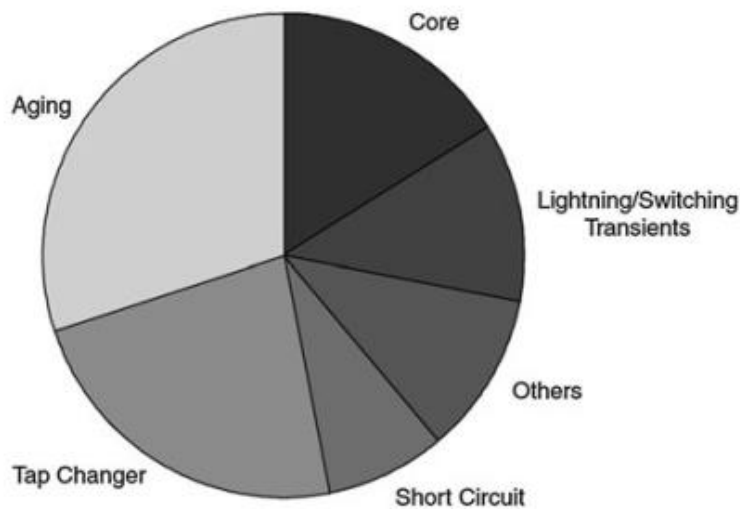
A 2-7. ábra bemutatja, hogy üzemben lévő transzformátor esetén hol következik be a legnagyobb valószínűséggel valamilyen rendellenes működés. Mint az látható a

legtöbb hibaok a mechanikai komponenseknél fordulhat elő. Úgy mint a terhelés alatti fokozatkapcsoló vagy épp a hűtőrendszer.

A 2-8. ábra jól szemlélteti, hogy melyek azok a tényezők, amik nagyban befolyásolják az üzembiztos működést. Ebből a szempontból kiemelkedik a kor, a fokozatváltó és különböző kapcsolási tranziensek hatásai (villámcsapás, kapcsolási jelenségek).



2-7. ábra Transzformátorokban bekövetkező hibák helyei [12]



2-8. ábra A transzformátorokban bekövetkező hibák lehetőségei Dél-Afrikában. Reproduced with kind permission ©IET 2012 [12]

A diagnosztikai vizsgálatokat nagyban befolyásolja, hogy az eredményekhez szükséges mérési eljárás milyen körülmények között, milyen gyakran végezhető el. Mint az fentebb már említésre került az olajvizsgálatok nagy előnye, hogy a minta bármikor levehető és bármilyen tulajdonság meghatározható a rendelkezésre álló laborberendezésektől függően. A papirosból viszont minta csak a transzformátor

kikapcsolásával és a szigetelőanyag tönkretételével vehető. A mérések olajvizsgálatok esetében laborvizsgálatok, míg a papiros esetében a transzformátor kapcsain is végrehajtható mérésekből áll. [11]

3 Az UHF (Ultra-High Frequency) részkisülés mérésrel kapcsolatos kutatások

Ebben a fejezetben szeretnék kiemelni pár a témában kiemelkedő részletességű cikket, illetve tanulmányt. Röviden összefoglalom, hogy vizsgálataik és eredményeik milyen irányba mennek el az UHF vizsgálatot illetően.

3.1 Részkisülés mérés nagyfrekvenciás (UHF) tartományban [20]

A tanulmány a részkisülések mikrohullámú (UHF) tartományban történő vizsgálatával foglalkozik. Célja a részkisülés helyének minél pontosabb lokalizációja zajos környezetben.

Az elektromágneses UHF mérési technika jó SNR-t (Signal to Noise Ration³) biztosít, mivel a jelek és a zavaró hatások hatásosan árnyékolt. Egy új módszer lehetőséget ad a hibahely azonosítására gáz-szigetelésű alállomásokon frekvencia tartománybeli vizsgálatára. Az újítás a Fourier-transzformáció eltolási törvényén alapul. Két szenzortól származó szuperponált jel egymásra hatás okozta interferencia jelenség információt ad a jelek közti időbeli eltérésről.

A helyszíni részkisülés-méréshez használt monopól antenna egy hengerben kerül elhelyezésre a kábelcsatlakozásoknál, miközben a kábel feszültség alatt van. Ilyen módon zajos környezetben is elvégezhető a mérés. A részkisülés-mérés különböző 72kV-os kábelcsatlakozók lettek kipróbálva nem árnyékolt laboratóriumi környezetben.. A helyszíni mérések a működés alatt megmutatták, hogy nagy potenciál rejtőzik az állapotfelmérés ilyen formájában. A különböző PD fajták elkülönítése az UHF szenzorok által nagyteljesítményű transzformátorok esetében a leeresztő nyíláson oldható meg.

³ SNR: jel-zaj viszony

A tanulmányban más tanulmányokra hivatkozva állítják, hogy UHF tartománybeli részkiülés vizsgálattal az összes PD mérhető és detektálható.

3.2 Részkiülés helyének lokalizálása nagyteljesítményű transzformátoroknál nagy sávzélességű RF detektálással [21]

Ez a tanulmány a fő problémát az nagyteljesítményű transzformátorok UHF tartományban végzett részkiülés-vizsgálatnál a részkiülés helyének beazonosítását tartja. Az elektromágneses hullámoknak a különböző anyagösszetételű komponenseken más és más sebességgel képesek áthaladni és eljutni a szenzor antennájáig. Az 1GHz-től 5GHz-ig terjedő frekvencia tartományban történik a mérés, mivel hogy az RF tartományban a nagy felfutási idejű komponensek kapnak szerepet.

A szerzők rengeteg egyszerűsítést alkalmaznak. Több közülük meglátásom szerint hibás eredményhez vezethet. Ilyen például a távolságok meghatározásánál a másodfokú két ismeretlenes egyenletrendszer (hiperbola egyenletének megoldása) lineárisra egyszerűsítése. A hiba 16cm-re került elhelyezésre és cm-es volt az eltérés állításuk szerint, ami bárhog is nézzük elég magas ilyen kis távolság esetében.

3.3 Részkiülés diagnosztika és elektromos berendezések szigetelési állapotfelmérése [22]

A cikk kitér az elmúlt 20 évben kutatott a részkiüléssel vizsgálatokra a elektromos szigetelők vizsgálatánál (legyen az megszakító, transzformátor vagy kábel, vagy éppen egy motor vagy generátor állórész tekercselés). A cikk szerint a technológia mellette szól az alacsony költség, mivel a szenzorok olcsón beszerezhetőek. Viszont egy elég nagy tartományban mérni képes oszcilloszkópra van szükség, mely a költségeket képes megemlíteni.

A fentiek függvényében mutatja be a különböző részkiülés-vizsgálati módszereket.

3.4 Aktuális transzformátor állapotmonitoring trendek [12]

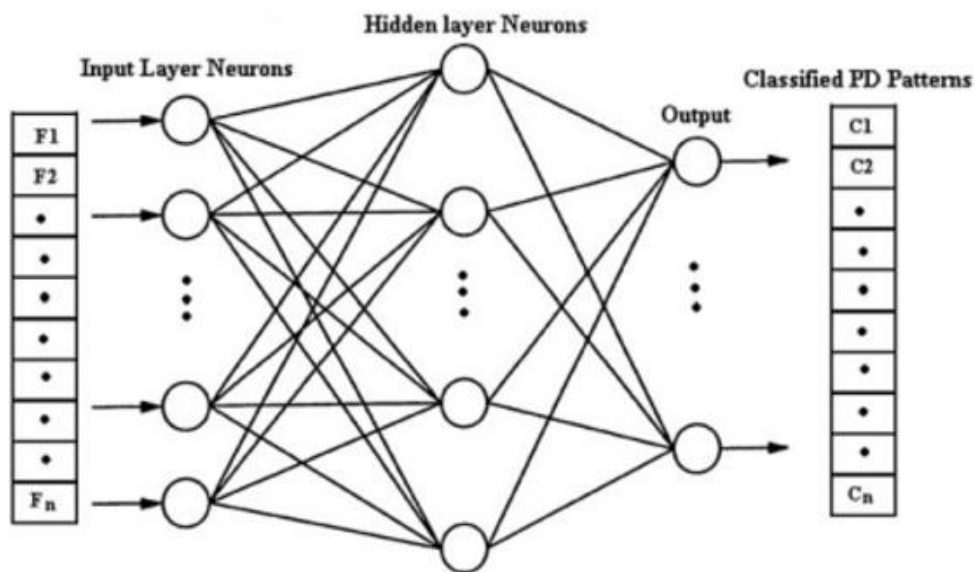
A tanulmány elég részletesre sikeredett. Sorra veszi a lehetséges hibákat és azok különböző mérési módszereit. Többek között kitér a transzformátor

- életkorára, illetve életkorral előjövő meghibásodásokra

- kémiai változásokra az olajban
- szerkezeti torzulásokra

mint befolyásoló tényezőre. A rendelkezésre álló adatok alapján egy neurális hálózat (3-1. ábra) segítségével diagnosztikai döntés és beavatkozó rendszert mutat be. Kitér az

- áram-, feszültségimpulzus általi tesztelésre,
- frekvencia-válasz analízisre.



3-1. ábra Példa neurális hálózatra [12]

Ezekon kívül részletesen kitér a részkisülések vizsgálatára is. Többek között leírja a mérés menetét, az előnyöket és hátrányokat részletezi. Bemutatásra kerül a különböző technológiák kombinációs lehetőségei. Ilyen például a többszenzoros részkisülés helyének lokalizációja. A tanulmányban 3 szenzorral vezeti le a módszert. Itt viszont meg kell jegyezni, hogy véleményem szerint ez nem megoldható. Ismeret a szenzorok pozíciója, illetve a térben és időben⁴ legközelebbi szenzornál a jel

⁴ térben és időben: értem ez alatt, hogy nem biztos, hogy helyben legközelebbi szenzorhoz jut el a jel leghamarabb a transzformátorban lévő különböző permittivitású és permeabilitású komponensek miatt, ami a jel áthalad.

megjelenésének pillanata és ehhez képest a többi érzékelőn a megjelenés közti differencia. Azaz az ismeretlenek sorban:

$$(x_s \ y_s \ z_s)$$

$$t_1$$

Négy ismeret áll rendelkezésünkre négy egyenletre. Tehát csak a paraméteresen oldható meg, vagy szükséges még egy szenzor használata.

3.5 Részkisülés helyének detektálása nagyteljesítményű transzformátoroknál UHF és akusztikus mérésekkel [23]

A tanulmány a részkisülések nemkonvencionális detektálási módszereivel foglalkozik nagyteljesítményű transzformátorok esetén. Az UHF PD mérés önálló PD detektálási mérésneként használható. Mind helyszíni, mind pedig off-line diagnosztikára használható. Főleg zajos környezetben lehet nagy segítségre pl. gáz szigetelőkben keletkező kisülések azonosítására.

Az UHF jelek terjedési idejéből a részkisülés térbeli elhelyezésére nyílik alkalom. Emellett különböző mérhető amplitúdók is segítik a pozíció azonosítását. Mindazonáltal ritkán áll rendelkezésre transzformátoroknál három olajtartály nyílás a szenzorok számára, emiatt szükséges akusztikus vizsgálati módszerrel is kiegészíteni.

A tanulmány először az alapokat részletezi, majd két tanulmányt mutat be.

3.6 Részkisülés detektálás és azonosítás UHF technikára alapozva légmodellekben [24]

Az UHF részkisülés detektálási technika nem csak légszigetelésű megszakítókban használható, nem csak léghözegben fordulhatnak elő részkisülések, hanem más szigetelőkben, mint például olajban. A tapasztalatok szerint részkisülés háromhelyen jöhet létre:

1. dielektrikumban,
2. dielektrikumon kívül,
3. illetve a dielektrikum felületén.

A részkisülések jeleit az 100MHz-1500MHz közötti tartományban detektálhatjuk, s minden eddigi mérés általában 20GHz-es mintavételi rátával történik.

3.7 Összegzés

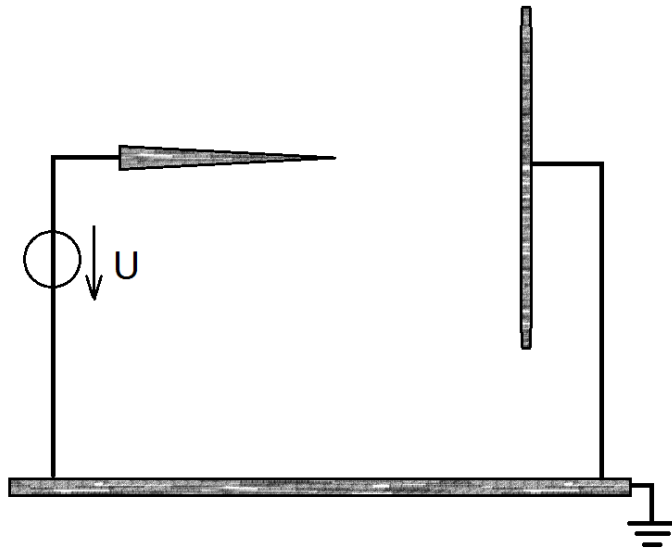
A fenti cikkek mindegyikéről elmondható, hogy a transzformátor diagnosztika nagyfrekvenciás tartományban történő vizsgálatát mint kiegészítő vagy akár helyettesítő eljárásként tekintik. Előfordul a cikkek között két helymeghatározási módszer is, mely közül a hiperbolikus megoldást tudom elképzelni mint lehetséges megvalósítást. A linearizációs egyszerűsítés sajnos akkora hibával számolható, hogy az ellehetleníti a pontos helymeghatározást. Ez a fajta módszer csak léghözegű megszakítók PD vizsgálata során alkalmazható nagy biztonsággal.

Az olaj dielektromos állandójának figyelembe vételével már kevesebben kalkulálnak. Pedig a jelterjedés során jelentős tényező. A szigetelő olajok átlagos relatív dielektromos állandója – mely a frekvencia függvényében gyengén változik – körülbelül 2, nagyban befolyásolja ($\frac{1}{\sqrt{2}}$ -ed részére csökkenti) a jelterjedés mértékét.

Összességében elmondható, hogy az UHF-en alapuló részkisülés vizsgálat előtt nagy jövő áll, számos kutatási lehetőség áll még a szakma előtt.

4 Jelterjedés és csillapodás szigetelőanyagokban

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy az UHF tartományban végzett részkisülés-vizsgálati módszer a legegyszerűbb esetben hogyan valósul meg, illetve a változások milyen hatásokkal járnak. Mindezt levegő közegben csúcs-sík elrendezés (4-1. ábra) esetén vizsgálom. Ezt követően pedig egy próbatermi mérés eredményeit elemzem, hogy a laboratóriumi méréseimmel összehasonlíthassam.



4-1. ábra Csúcs-sík elrendezés

Az elrendezés gyakorlati megvalósítását a 4-2. ábra mutatja. A mérés során a csúcs elektródát a próbatranszformátor kivezetésére, a sík elektródát pedig a közös földpontra kapcsolom. A mérést minden esetben $73\pm 1\text{kV}$ váltakozó feszültségen végzem. Mérem a transzformátor és a szenzorokon megjelenő feszültség jelalakot. Az első pár mérés alkalmával a trigger szint és osztásarányok beállítása történik. Amennyiben minden kalibrálás megtörtént, megkezdhető a mérés.

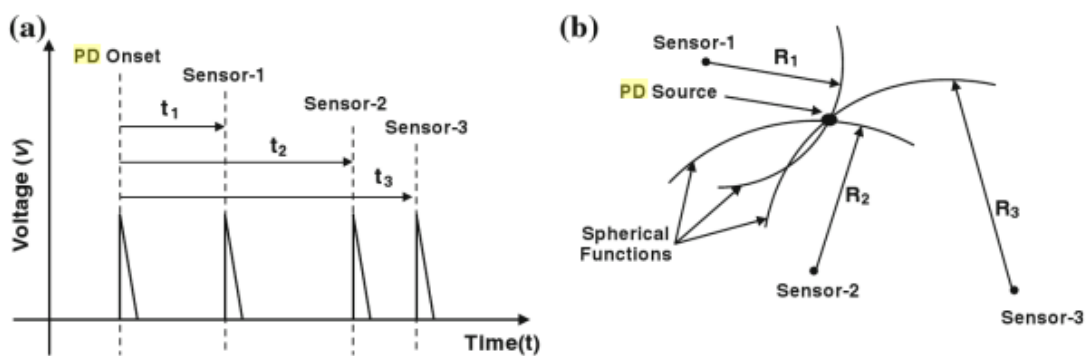


4-2. ábra Az elrendezés a gyakorlatban

4.1 Elméleti háttér

Mint azt már a korábbi fejezetekben részletezni kezdtem, a részkiülések helyének detektálása számos problémába ütközhet. Ilyen probléma lehet például

- a nem megfelelő mintavétel számú mérés,
- a hiperbolikus egyenletrendszerek megoldása,
- a részkiülés helyének meghatározása egy adott ϵ hibán belül,
- a transzformátor belső szerkezetének helytelen ismerete,
- a szigetelők állapotának téves ismerete.



4-3. ábra a) a részkiülések megjelenése a különböző csatornákon; b) az időkből a részkiülés helyének meghatározása [12]

$$(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2 = (v_s t_1)^2 \quad \{4-1\}$$

$$(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2 = (v_s t_2)^2 \quad \{4-2\}$$

$$(x_s - x_3)^2 + (y_s - y_3)^2 + (z_s - z_3)^2 = (v_s t_3)^2 \quad \{4-3\}$$

Amennyiben ismert, hogy mennyi idő telt el míg a részkisülés keltette elektromágneses hullámok a szenzorokig elértek, úgy 3 szenzor mindösszesen elegendő, mely három egyenletet ({4-1}, {4-2}, {4-3}) ad. A detektálás nehézsége viszont, hogy ismeretlen a kiindulási időpont, csak a forráshoz közelebbi szenzoron megjelenő jel időpontjához tudunk viszonyítani. Emiatt elengedhetetlen még egy műszer felszerelése. Ennek megfelelően az egyenletrendszer:

$$(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2 = (v_s t_1)^2 \quad \{4-4\}$$

$$(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2 = (v_s (t_1 + \Delta t_{21}))^2 \quad \{4-5\}$$

$$(x_s - x_3)^2 + (y_s - y_3)^2 + (z_s - z_3)^2 = (v_s (t_1 + \Delta t_{31}))^2 \quad \{4-6\}$$

$$(x_s - x_4)^2 + (y_s - y_4)^2 + (z_s - z_4)^2 = (v_s (t_1 + \Delta t_{41}))^2 \quad \{4-7\}$$

A fenti egyenletrendszer ({4-4},{4-5}, {4-6}, {4-7}) csak akkor ad egyértelmű megoldást amennyiben a mérésünk pontos. Ennek kiküszöbölésére egy adott hibán belüli megoldás keresése a cél, mely numerikus számítási módszerekkel oldható csak meg.

A fenti módszeren kívül a jel spektruma is segítségünkre lehet. Egy jól ismert összefüggés, az eltolási tétel⁵ alapján felírhatjuk a {4-8}-as egyenletet.

$$F\{ f(t - c) \}(j\omega) = e^{-j\omega c} F\{f(t)\}(j\omega) \quad \{4-8\}$$

Az összefüggésből könnyen kiolvasható, ha egy jel az időtartományban a másik jelhez képest késik, úgy a jel frekvenciatartománybeli jelalakja a nem eltolthoz képest

⁵ Eltolási tétel: Ha $f \in \Lambda$, akkor $F\{f(t - c)\}(j\omega) = e^{-j\omega c} L\{f(t)\}(j\omega)$.

az amplitúdó spektrumának értékei csökkennek. Ezen módszerben rejülő lehetőségeket egy későbbi alkalommal szeretném részletesebben is kutatni.

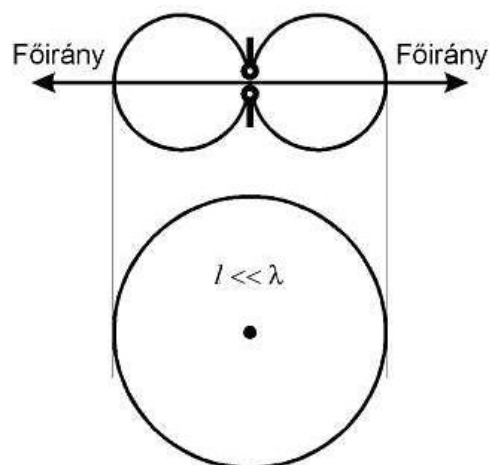
4.2 Mérési elrendezés és eredmények értékelése

A részkisülések detektáláshoz az alábbi ábrán (4-4. ábra) szemléltetett antennákkal történik. Az dipólantennák [25] elméletben a 350MHz-835MHz tartományban alkalmasak a mérések elvégzésére.

A későbbiekben célom, hogy külön-külön mind a négy szenzort laboratóriumi mérések során sugárzási karakterisztikáiról (4-5. ábra) pontos képet kapjak. Ez amiatt is elengedhetetlen, mivel a mérések során az egyik pont földelésre kerül, azaz aszimmetrikus táplálásúvá válik. A mérés során mindvégig azonos hosszúságú 50Ω-os koaxiális kábeleket használtam. Ez szintén a jelterjedési idő miatt fontos.



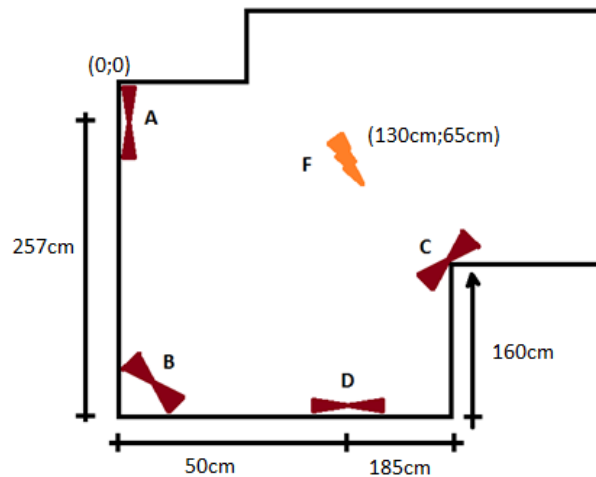
4-4. ábra A mérésekhez használt antennák



4-5. ábra Dipólantenna karakterisztikája [19]

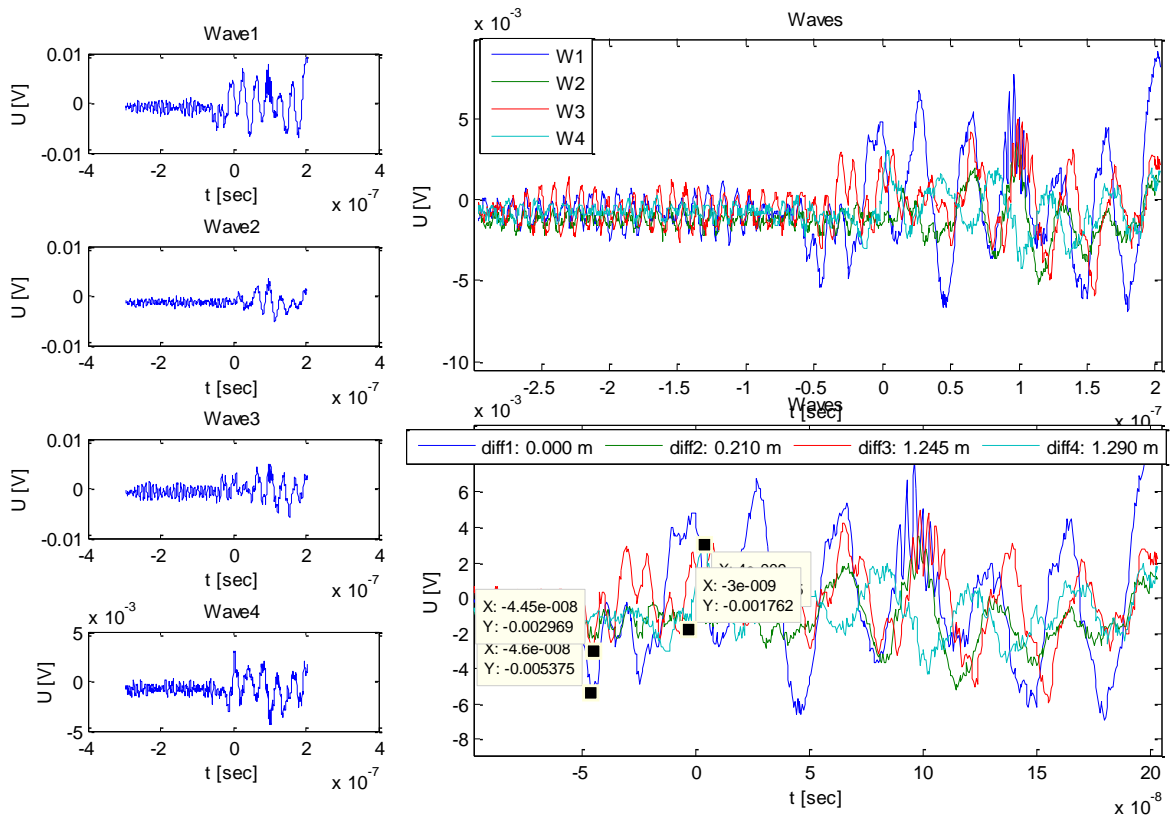
4.2.1 Csúcs-sík elrendezés

Az első mérési elrendezést (4-6. ábra) úgy alakítottam ki, hogy a szenzorok (A-B-C-D) a csúcs-sík elrendezéstől (F) véletlenül se essenek ugyanakkora távolságra. Ennek az az értelme, hogy a jelterjedések közötti időkülönbségek az első számítások során – amikor a hiba elég nagy lehet –, kitűnjenek a jelek közötti időbeli eltolódások és a mért eredmények hitelessége vizsgálható legyen.



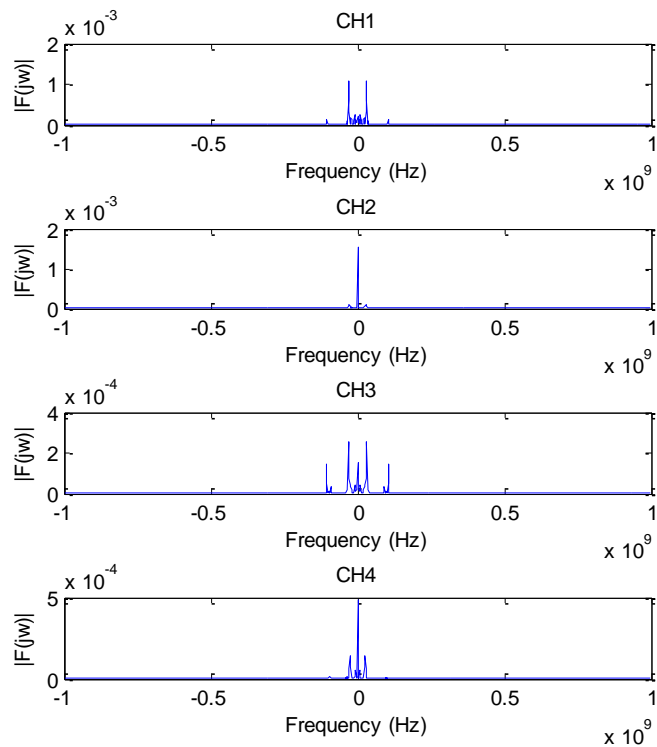
4-6. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben, D magasság: 190cm

A következő ábrán (4-7. ábra) a mért jelalakokat ábrázoltam. Jól látható, hogy az egyes jelalakok közötti időbeli eltérés szépen kirajzolódik. Összehasonlítva a fenti (4-6. ábra) és a lenti (4-7. ábra) ábrákat, azt kapjuk, hogy valóban a szenzorok a részkisülés történének helyétől távolságai szerint tolódtak el, mint az várható is volt.



4-7. ábra A kapott jelalakok

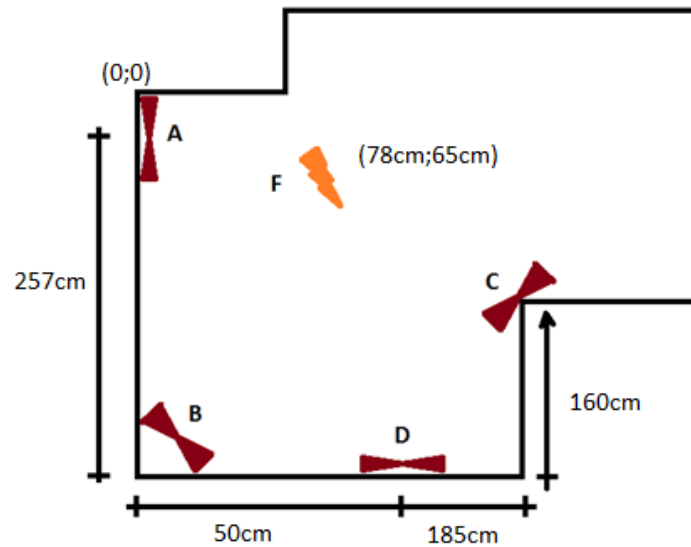
Az alábbi ábrán (4-8. ábra) a jel amplitúdó spektrumát ábrázolta, ez a későbbi mérésekkel való összehasonlításnál válik fontossá.



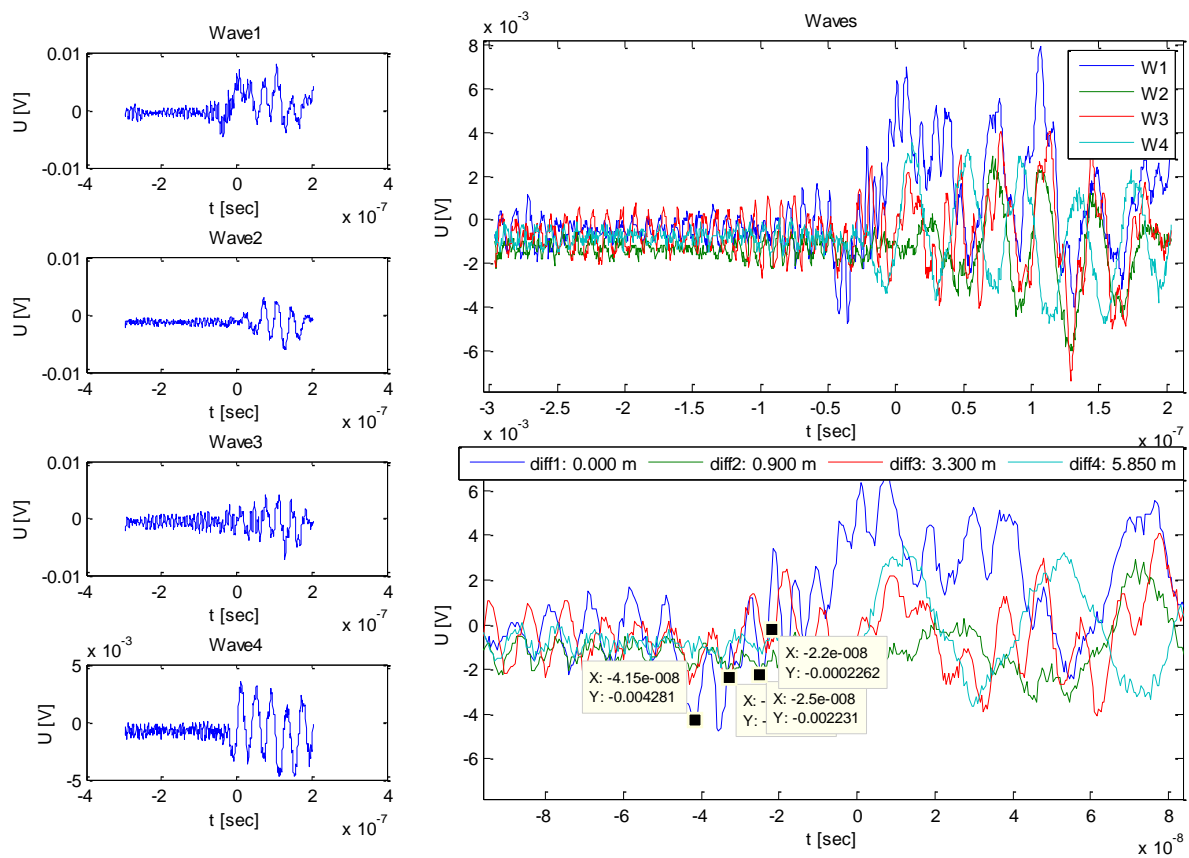
4-8. ábra A jelek amplitúdó spektruma

4.2.2 Csúcs-sík elrendezés – az összeállítás elmozdítása

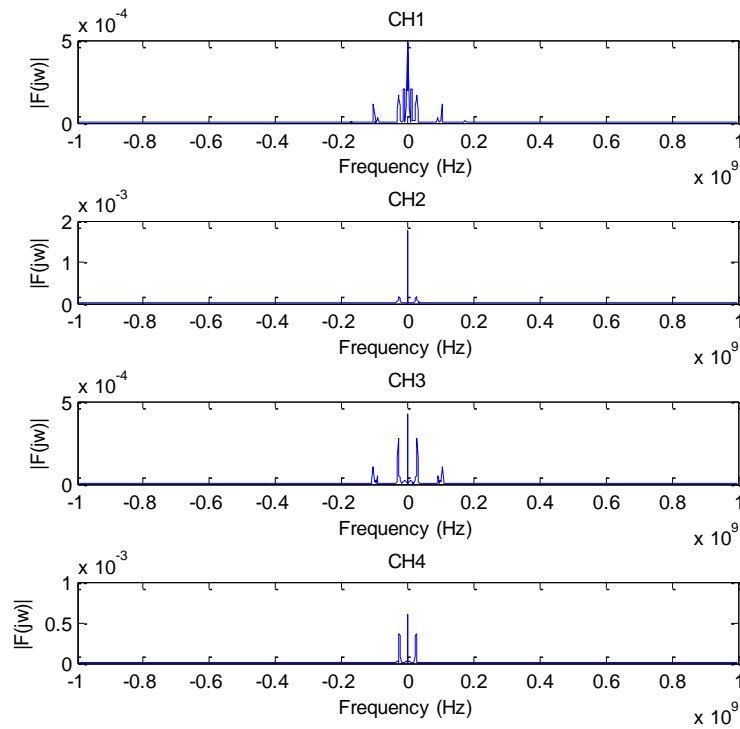
Ebben az elrendezésben úgy módosítottam az összeállítást, hogy a PD-forrást az egyik szenzorhoz (A) közelebb helyeztem el.



4-9. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben



4-10. ábra A kapott jelalakok



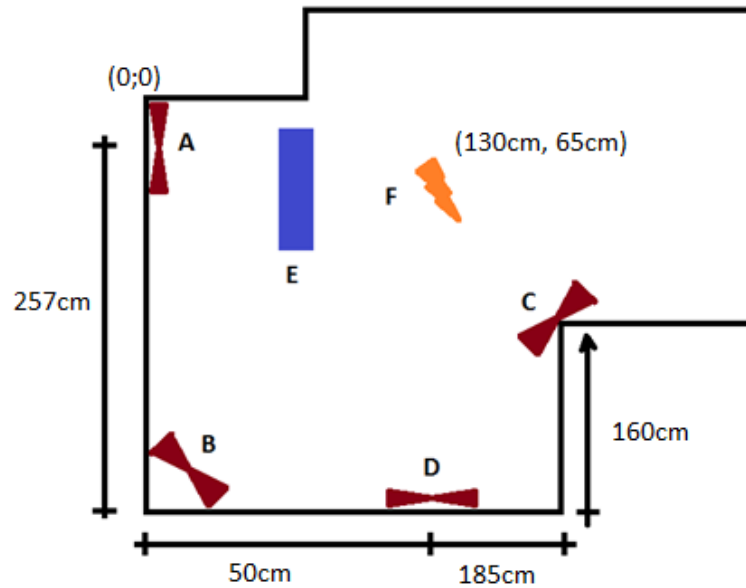
4-11. ábra A jelek amplitúdó spektruma

Az ábrát (4-10. ábra) tanulmányozva látható, hogy a távolságok közelítőleg a várt értékeknek megfelelően változtak. Tehát amely ponthoz közelebb került a csúcs-sík elrendezés, ott a táv megtételéhez szükséges idő is csökkent.

A számított értékekből közvetlenül következtetni lehetett a részkisülés, az elektromágneses hullámok forrásának helyére.

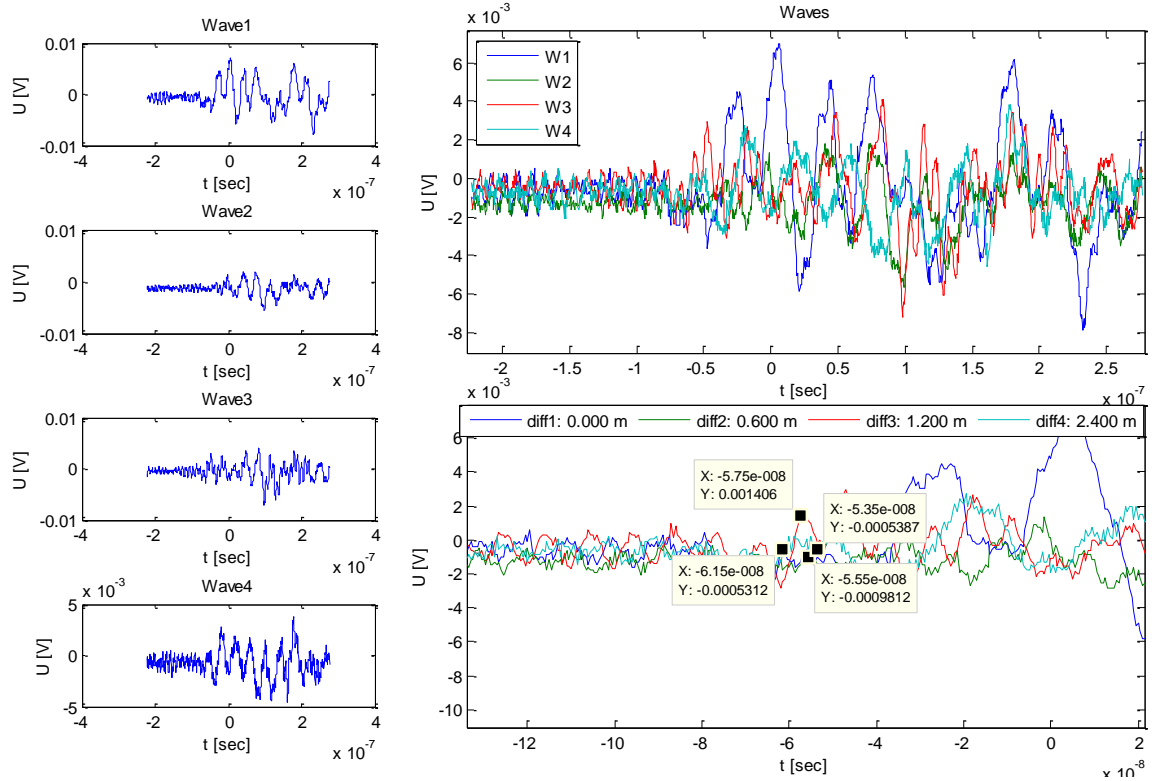
4.2.3 Csúcs-sík elrendezés – szigetelő behelyezése az elrendezésbe

Ebben az esetben úgy alakítottam át az 4.2.1-es fejezetben kialakított elrendezést, hogy szigetelő közeget (E pont) helyeztem az A és F pontok közé. A szigetelő közeget egy olajjal töltött PVC cső.

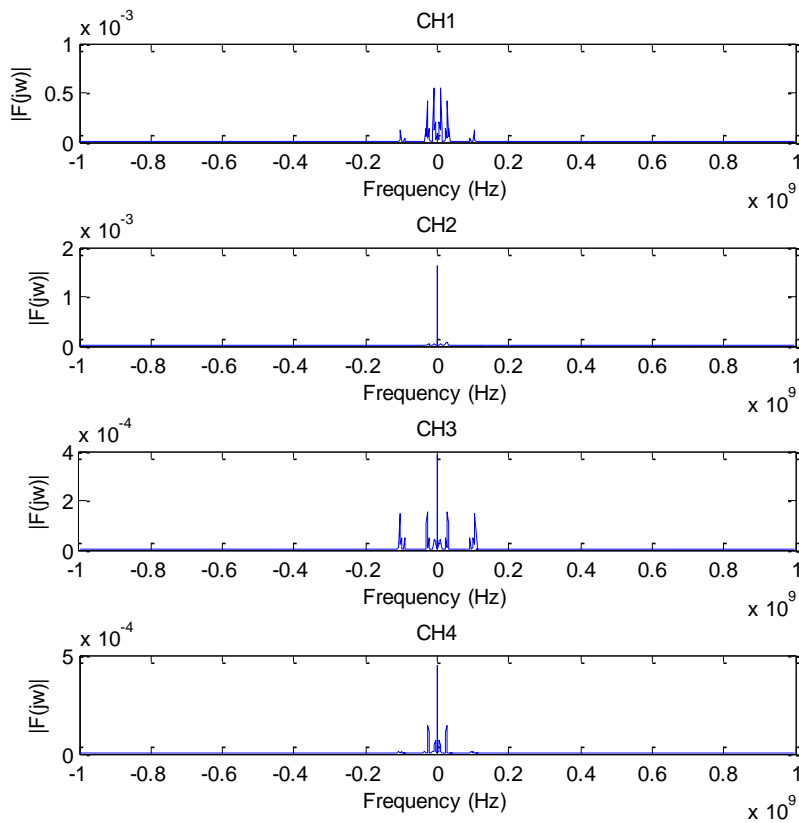


4-12. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben

Ebben a kialakításban (4-12. ábra) szintén a vártnak megfelelően alakultak az értékek. Az A ponthoz viszonyított többi (B, C, D) pontokba történő eljutási idő csökkent (4-13. ábra) miközben az elrendezés nem változott, ami arra ad következtetni, hogy az A pontba való jelterjedési idő megnövekedett. Ez is igazolva a feltevést, miszerint a jelek terjedési idejéből és a közeleg permittivitásának ismeretében közvetlenül következtetni lehet a részkisülés, az elektromágneses hullámok forrásának helyére. Tehát szükséges a különböző olajok tulajdonságainak ismerete a pontos mérések elvégzéséhez.



4-13. ábra A kapott jelalakok



4-14. ábra A jelek amplitúdó spektruma

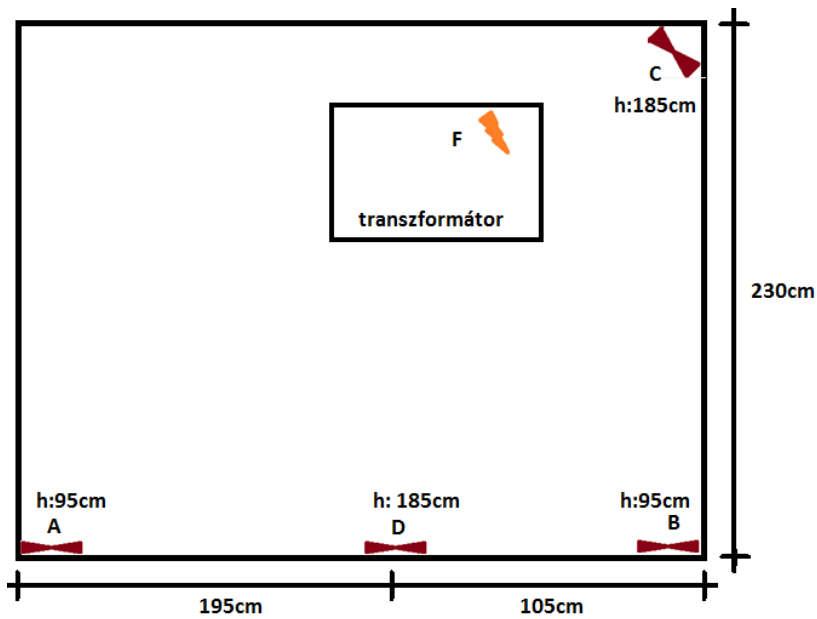
4.2.4 Transzformátoron végzett mérés próbatermi környezetben

Lehetőségem nyílt egy próbatermi mérésre is a Siemens csepeli transzformátortelepén. A részkisülés előidézését egy elektróda kivezetésével hoztuk létre (4-15. ábra). A próbaterem árnyékolt tér, így a külső zajok mértéke elenyésző. A feszültséget mindaddig emeltük, míg a begyújtás meg nem történt. Ekkor a következő ábrának (4-17. ábra) megfelelő jelalakokat mértem.



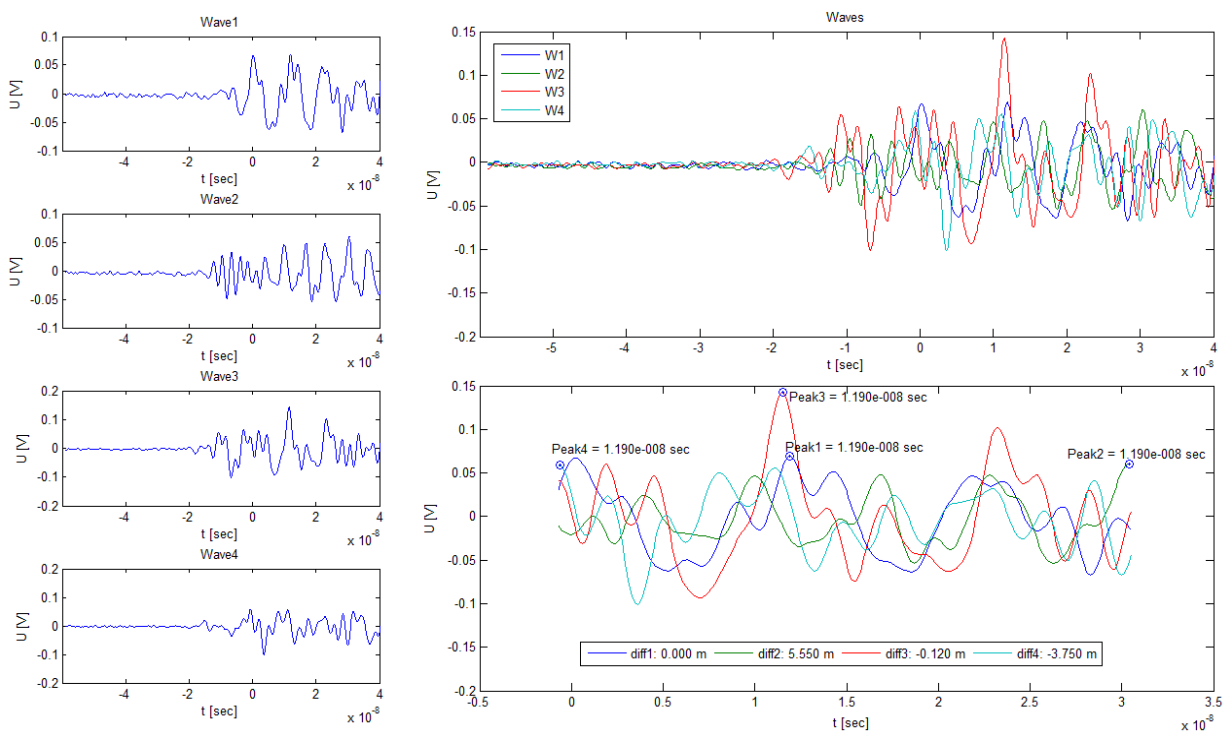
4-15. ábra Hibahely generálás a transzformátorban elektróda kivezetésével

A jelalakokból (4-17. ábra) a gyújtási idők és az azonos csúcsokhoz tartozó idők jól megfigyelhetők. A jobb oldali ábrán külön ki is emeltem ezeket a pontokat. Leolvasható belőle, hogy az CH1-hez képest a CH2 és CH4 közelebb helyezkedett el és a CH2 távolabb. Tehát a mérésünk által igazolódni látszik, hogy a módszer alkalmas lehet transzformátorok ilyesfajta diagnosztikájára. Azonban ne feledjük el, hogy ezen mérések laborkörülmények között születtek. Szükséges tehát mindenféleképpen terepen végzett ellenőrző mérések végzése is, hogy az elméletben és laboratóriumi körülmények között működő módszer validálva legyen.

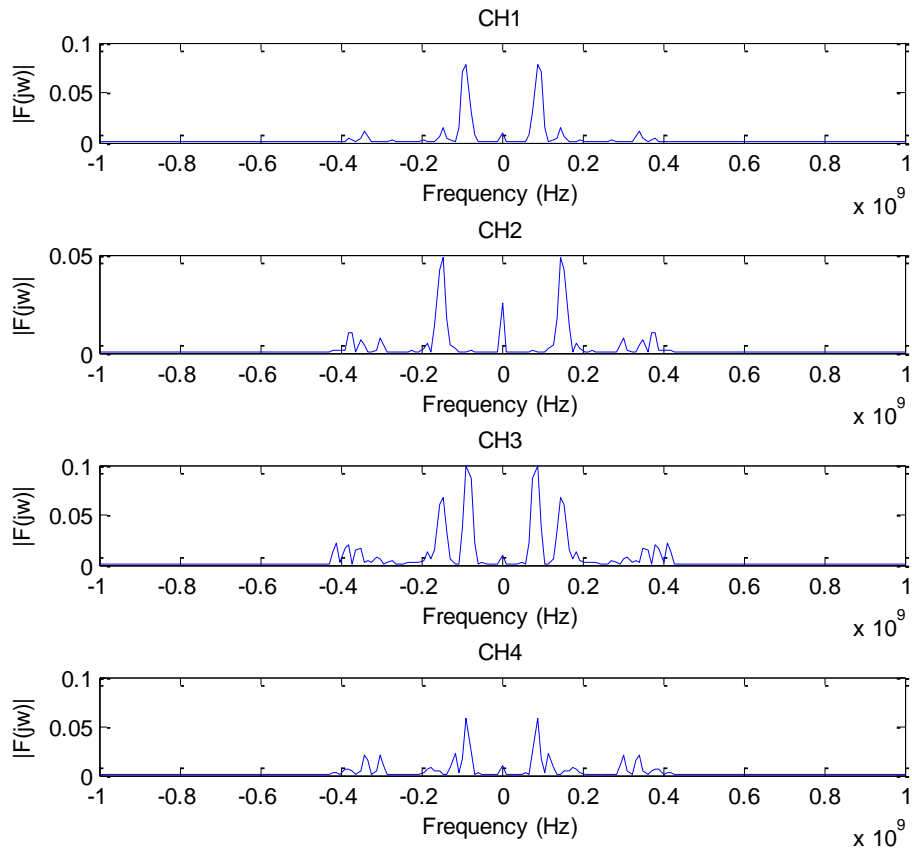


4-16. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben

A kutatásom későbbi céljai között szerepel, hogy zajos környezetben is elvégezzem számításaimat. Remélem ehhez a szükséges eszközök (leselejtezéshez közel álló, de még működő transzformátor) a rendelkezésemre állnak majd.



4-17. ábra A mért jelalakok



4-18. ábra Frekvenciatartománybeli vizsgálat

4.3 Összegzés

Összességében elmondható, hogy a távolságok változása a várt értékeknek megfelelően történt. Tehát amely ponthoz közelebb került a csúcs-sík elrendezés, ott a táv megtételéhez szükséges idő is csökkent, illetve dielektrikum beiktatásával a terjedési sebesség csökkent. Tehát a mérésünk által igazolódni látszik, hogy a módszer alkalmas lehet transzformátorok nagyfrekvenciás tartományban történő részkiüléseinek detektálására, a transzformátor diagnosztikájára. Azonban ne feledjük el, hogy ezen mérések laborkörülmények között születtek, a terepi alkalmazás során számos további kérdést (külső zavarok, jelszintek stb.) meg kell még oldani.

5 Olajok nagyfrekvenciás viselkedése

A kutatási munkám során a következő típusú transzformátorolajok vizsgálatát tűztem ki célul:

1. ásványi olaj
2. szintetikus észter olaj
3. természetes észter olaj

Az a mérési módszer inicializálását ásványi olajon végeztem el, melynek részletezése a következő alfejezetekben kerül sor.

Az olaj dielektromos állandójának mérése a későbbi kutatásokban válik fontossá, amikor üzemben lévő nagyteljesítményű transzformátorokon végzem el a különböző vizsgálatokat. Mint azt már egy korábbi fejezetben is említtem, a különböző komponensű anyagok határfelületén az elektromágneses hullám egy része visszaverődik (reflektálódik), míg másik része tovább halad a másik közegben, de ott már egy elektromágneses szempontból is különböző anyagban, melyben a terjedés hullámhossza és maga az anyag hullámimpedanciája is más. Ez a változás viszont nagyban befolyásolja a lokalizáció pontosságát és eredményességét, mivel a megváltozott hullámhossz következtében a levegőben terjedő hullámnál lassabban és emiatt több idő szükséges ugyanakkora táv megtételéhez.

A következő fejezetekben a mérés menetét, elméleti háttérét és azok eredményeit részletezem.

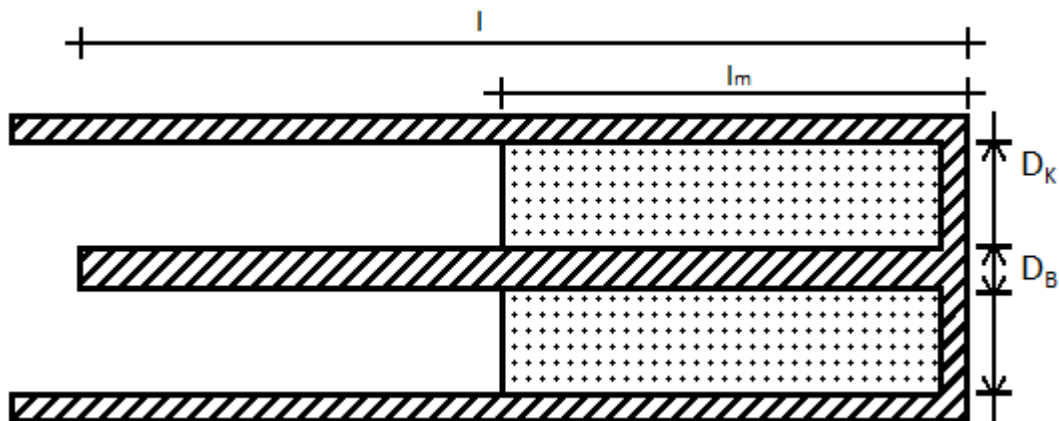
5.1 Mérési összeállítás

A mérés elvégzéséhez elengedhetetlen volt egy házilag gyártott koaxiális csőtápvonal (5-1. ábra), mely mérőeszköz legyártása során nagyon fontos a precíz munka. Sajnos a mérés egyik hátulütője, hogy egy kicsiny eltérés is téves eredményekhez vezethet. A következő fejezetben részletesen bemutatott összefüggések alapján belátható, hogy a pontos eredmény számításánál a legérzékenyebb a tangens és tangens hiperbolikus függvény. Mindkét esetben $|\alpha| \leq 45^\circ$ tartományon kívül az értékek hirtelen növekedésnek indulnak. Tehát törekedni kell a pontos hosszmérésre.

Mint azt később részletezem is, az első prototípusnál adódtak gondok (konstrukciós és méretezési).



5-1. ábra A mérésnél használt koaxiális csőtápvonal



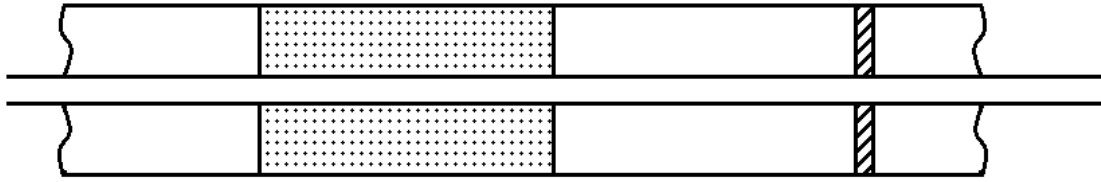
5-2. ábra Anyaggal töltött rövidre zárt koaxiális elrendezés

A fenti ábrán (5-1. ábra, 5-2. ábra) szemléltetett eszközt egy 50 ohmos mérőfejjel zárjuk le, s azt csatlakoztatjuk a mérőeszközhöz. A mérések során három különböző mérési kompozíció került lemérésre:

1. üres csőtápvonal,
2. félig töltött csőtápvonal,
3. tele töltött csőtápvonal.

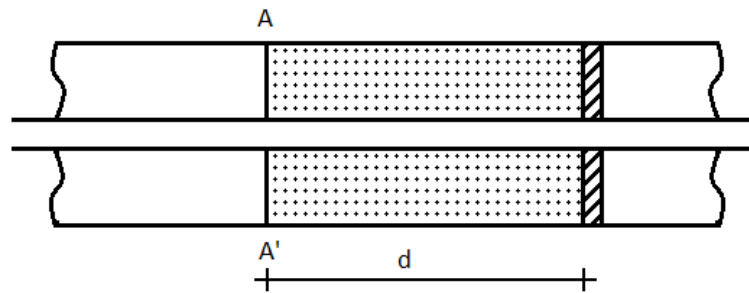
5.2 Mérés elméleti háttere

A rövidzárral lezárt tápvonalon történő mérés általános esetét mutatja az 5-3. ábra. A tápvonal egy szakaszát megtöltjük a mérendő anyaggal a lezárástól dl távolságra. Továbbra is feltesszük, hogy csak az alapmódus terjed a hullámvezetőn, valamint hogy az elektromos térerősségnek csak a terjedésre merőleges komponense létezik. Ezek mellett az anyagot továbbra is homogénnek és izotrópnak tekintjük. [15]



5-3. ábra Minta elhelyezése rövidre zárt tápvonalon

A fent említett módszer egy speciális változata, amikor a mintát a rövidzár mellé helyezzük, vagyis $\Delta l = 0$. Egy ilyen elrendezést mutat az 5-4. ábra. Ennek a mérési módszernek vitathatatlan érdeme az összeállítás egyszerűsége, illetve más módszerhez képest, hogy alkalmas por és folyékony szigetelők vizsgálatára is. Viszont a transzcendens egyenletek megoldása nehézséget okozhat a számítások során. [14]



5-4. ábra Rövidzári oldalon anyaggal kitöltött rövidre zárt tápvonal

[15] A bemenetre vett reflexiótényező az A – A' síkban

$$r'_{11} = r_{11} e^{j\phi} = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (5-1)$$

ahol Z_i az A – A' síkban fellépő bemeneti impedancia

Z_0 a koaxiális tápvonal hullámimpedanciája.

[15] A bemeneti impedancia a relatív permittivitás függvényében

$$Z_i = Z_0 \frac{\tanh\left(2\pi d \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\lambda}\right)}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5-2)$$

A komplex dielektromos állandó és permeabilitás az anyag veszteségeit is magába foglaló anyagállandók. Ezen mennyiségek módosítja a hullám egyenleteket, mintegy lehetőséget adva azoknak általánosabb esetben is – elektromos és mágneses – történő megoldására. [15]

A komplex relatív dielektromos állandó definíció szerint:

$$\varepsilon_k = \frac{\varepsilon}{l} - j \operatorname{tg} \delta_E = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{l} - j \operatorname{tg} \delta_E \quad (5-3)$$

ahol ε az anyag dielektromos állandója

ε_r az anyag relatív dielektromos állandója

$\operatorname{tg} \delta_E = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}$ az anyag elektromos veszteségi tényezője

σ az anyag fajlagos vezetőképessége

A komplex relatív dielektromos állandó

$$\varepsilon_{kr} = \frac{\varepsilon_r}{l} - j \operatorname{tg} \delta_E \quad (5-4)$$

A relatív permeabilitást mindvégig egynek veszem, feltételezve, hogy a különböző olajminták mágneses tulajdonságai elhanyagolhatók.

[15] Az anyaggal (levegő, olaj, stb.) töltött koaxiális tápvonal hullámimpedanciája:

$$Z_{Hm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_k}{\varepsilon_k}} \ln \frac{D_K}{D_B} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}} \ln \frac{D_K}{D_B} \quad (5-5)$$

ahol μ_k komplex permeabilitás

ε_k komplex dielektromos állandó

D_K külső átmérő

D_B belső átmérő

$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$ vákuum esetén a hullámimpedanciája

[15] A terjedési együttható ebben az esetben:

$$\gamma_m = j\omega \sqrt{\mu_k \varepsilon_k} = j\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \sqrt{\mu_{kr} \varepsilon_{kr}} = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\mu_{kr} \varepsilon_{kr}} = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon_{kr}} \quad (5-6)$$

ahol $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ szabadtéri hullámhossz

ε_{kr} komplex relatív dielektromos állandó

μ_{kr} komplex relatív permeabilitás

$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ fénysebesség vákuumban

f a mérési frekvencia [14]

A koaxiális tápvonal hullámimpedanciája és terjedési együtthatója nem ismert, méréssel meg kell határozni. A rövidre zárt anyaggal nem töltött tápvonalra felírt egyenletek és a mért bemeneti impedancia alapján egyértelműen meghatározható:

$$Z_{H,levegő} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}} \ln \frac{D_K}{D_B} = \frac{60}{\sqrt{1}} \ln \frac{10\text{cm}}{3\text{cm}} \approx 72,128\Omega \quad (5-7)$$

$$\gamma_{levegő} = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon_{kr}} = j \frac{2\pi f}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \sqrt{1} = jf20,944 \cdot 10^{-9} \frac{\text{rad}}{\text{m}} \quad (5-8)$$

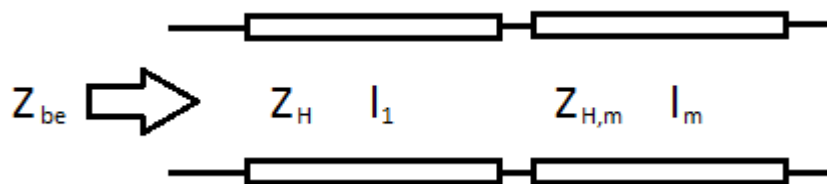
A mérés során mérjük a vizsgálandó anyaggal töltött tápvonal rövidzársi bemenő impedanciáját.

$$Z_{H,olaj} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}} \ln \frac{D_K}{D_B} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}} \ln \frac{10\text{cm}}{3\text{cm}} \approx \frac{72,128}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}} \Omega \quad (5-9)$$

$$\gamma_{levegő} = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon_{kr}} = j \frac{2\pi f}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \sqrt{\varepsilon_{kr}} = jf20,944 \cdot 10^{-9} \sqrt{\varepsilon_{kr}} \frac{\text{rad}}{\text{m}} \quad (5-10)$$

A különböző komponensek mindegyikénél három mérést végzek el az alábbiak alapján:

1. üres tápvonal,
2. olajjal félig töltött tápvonal,
3. olajjal tele töltött tápvonal.



5-5. ábra Rövidre zárt csőtápvonal helyettesítő képe

A bemeneti impedancia meghatározása:

$$Z_{be} = Z_{H,m} \frac{Z_T + Z_{H,m} \tanh(\gamma_m l_m)}{Z_{H,m} + Z_T \tanh(\gamma_m l_m)} \quad (5-11)$$

Rövidre zárt ($Z_T = 0$) esetben:

$$Z_{be} = Z_{H,m} \tanh(\gamma_m l_m) \quad (5-12)$$

Ez alapján a fenti esetekben a bementi impedanciák a következő képen adódnak

$$Z_{be1} = Z_{H,levegő} \tanh(\gamma 2 l_m) = Z_{H,levegő} j \operatorname{tg}(\beta (2 l_m + l_1)) \quad (5-13)$$

$$Z_{be2} = Z_{H,levegő} \frac{Z_{H,olaj} \operatorname{th}(\gamma_{olaj} l_m) + Z_{H,levegő} \operatorname{tg}(\gamma_{levegő} (l_m + l_1))}{Z_{H,levegő} + Z_{H,olaj} \operatorname{th}(\gamma_{olaj} l_m) \operatorname{tg}(\gamma_{levegő} (l_m + l_1))} \quad (5-14)$$

$$Z_{be3} = Z_{H,levegő} \frac{Z_{H,olaj} \operatorname{th}(\gamma_{olaj} 2 l_m) + Z_{H,levegő} \operatorname{tg}(\gamma_{levegő} l_1)}{Z_{H,levegő} + Z_{H,olaj} \operatorname{th}(\gamma_{olaj} 2 l_m) \operatorname{tg}(\gamma_{levegő} l_1)} \quad (5-15)$$

Észrevehető, hogy a fenti egyenleteknél egy l_1 tényező is megjelenik. Ez amiatt szükséges, mivel a műszerrel az egész mérési berendezés hosszát mértük meg, amibe a mérőfej is beletartozik. Ennek elhagyása a számítás során kellően nagy hibát okozhat.

Ezen kívül ismert az alábbi összefüggés a hullámterjedésre (x. egyenlet fent):

$$\gamma = \alpha + j \beta = \alpha + j \frac{\omega}{c} = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{kr}} \quad (5-16)$$

Tehát az esetünkben:

$$\gamma_{levegő} = j \beta = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (5-17)$$

$$\gamma_{olaj} = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{kr}} \quad (5-18)$$

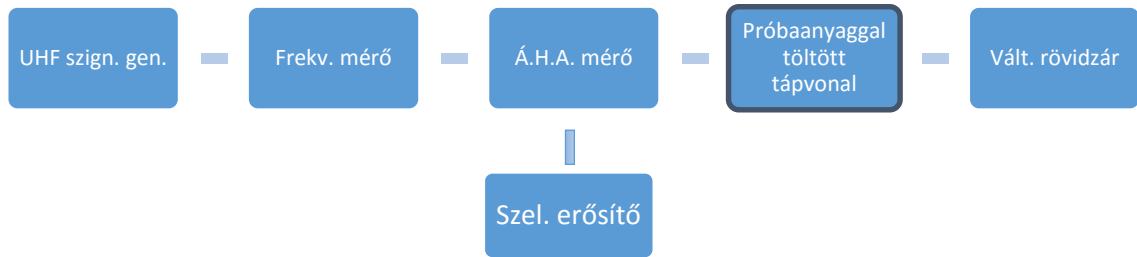
Illetve a számítások során felhasználva a következő összefüggést:

$$j \operatorname{tg}(x) = \operatorname{th}(j x) \quad (5-19)$$

A fentiek fényében az ismeretlenek: ϵ_{kr} .

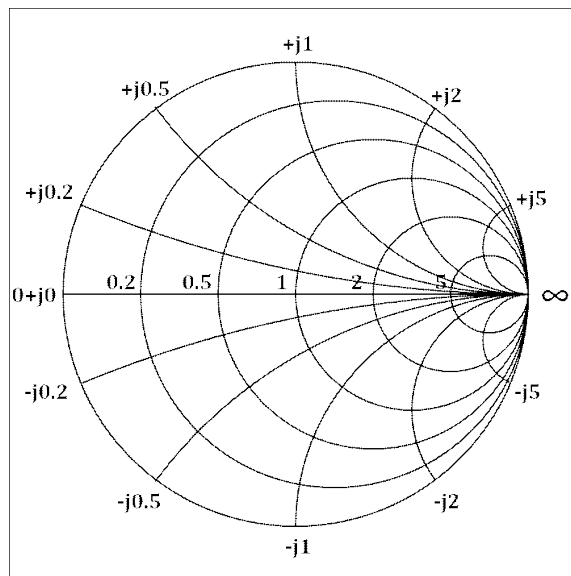
5.3 Mérés kiértékelése

A mérés kiértékelésének folyamatát az 5-6. ábra szemlélteti. Egy úgy nevezett nagyfrekvenciás jelgenerátor segítségével jelet továbbítunk a tápvonalba, s ennek a jelnek a reflektálásából a műszer egy impedanciát ad vissza, illetve Smith-diagramon ábrázolja.

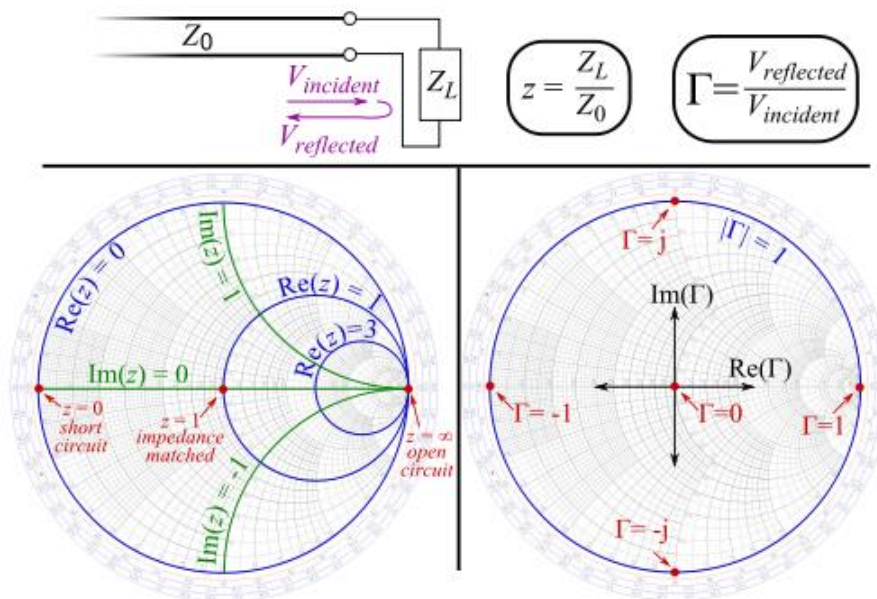


5-6. ábra A mérés elvi elrendezése [16]

A Smith-diagram (5-7. ábra) a nagyfrekvenciás technikában, főleg lezáró impedancimérések során fontos. Képet ad a mérésről, nem szükséges további ismeret az elrendezésről, hogy feltűnjön, ha a mért érték eltér a várttól. A diagram (5-7. ábra) a lezáró impedancia értékét a különböző frekvenciák függvényében mutatja. A mért értékek digitális kiírására sajnos technikai okok (a műszer csak floppy-siket fogad el) miatt nem volt mód. Esetünkben az ábrázolt értékek a Smith-diagram külső köréhez nagyon közel helyezkedtek el. A pontos illeszkedés azért sem lehetséges, mivel semelyik komponens sem ideális, veszteségek lépnek fel a rendszerben.



5-7. ábra Smith-diagram [17]



5-8. ábra Smith-diagram értelmezése [18]

5.3.1 Hagyományos ásványi olaj

Mérésemhez hagyományos ásványi transzformátor olajt használtam. Terveim között van, hogy más nem ásványi, tehát észter típusú olajokkal is elvégezzem. Az észter olajokról röviden annyit szeretnék most megemlíteni, hogy a következő évtizedekben nagyon nagy jövőt tudok elképzelni. Egyik nagy előnye az ásványihoz képest, hogy megújuló erőforrások révén újratermelhető, illetve a környezetkárosító hatása minimális (Vízzel érintkezve lebomlik a természetben rövid időn belül).

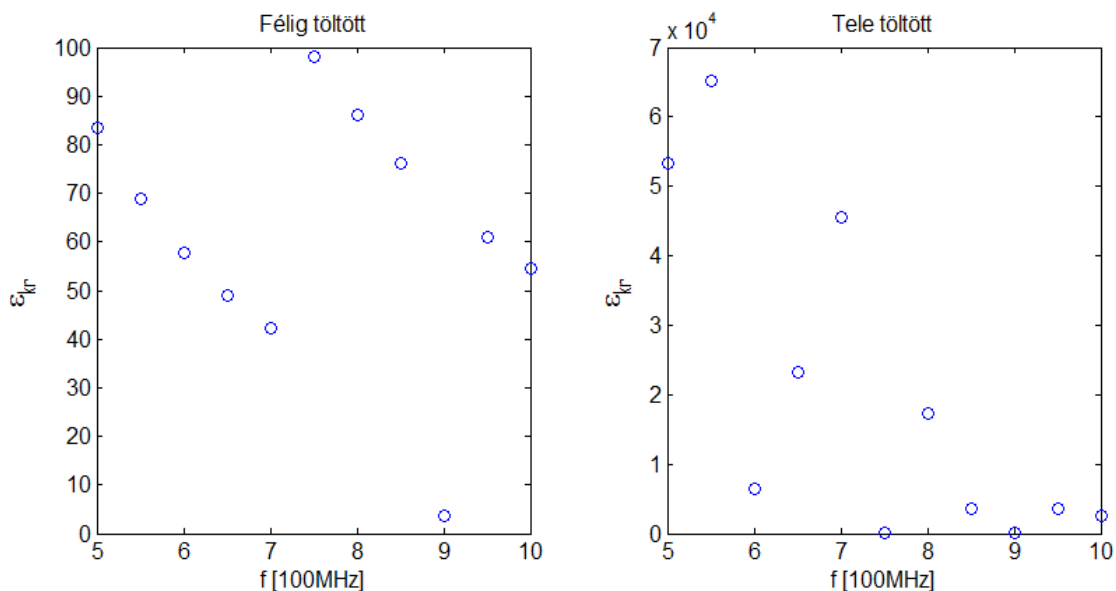
f [MHz]	üres		félig		tele	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im
500	0,5	-123	3,4	-131	4,8	-48,5
550	2,1	-103	3,7	-86,5	4,9	-33,1
600	5,8	-90,7	11	-64,9	7,2	-24,6
650	3,1	-81,5	11,8	-51,5	7,1	-15,5
700	0	-75,1	8,6	-42,7	6,6	-6,1
750	8,5	-66,4	6,8	-30,9	5,5	5,1
800	1,2	-56,2	6,9	-3	7,7	17,5
850	2,7	-53,3	7,2	9	9,4	38,7
900	5,6	-51,1	7,9	26,4	19,2	96,8
950	3	-48,4	17,1	55	350	251
1000	1	-45,5	50,4	108,1	54	-172

5-1. táblázat A műszerrel mért impedanciák

A fenti egyenleteket felhasználva valósítja meg a függelékhez csatolt Matlab kód is, mely lefuttatásával a következő eredmények adódnak.

f [MHz]	$\epsilon_{kr}(2)$		$ \epsilon_{kr} $	ϕ	$\epsilon_{kr}(3)$		$ \epsilon_{kr} $	ϕ
	Re	Im			Re	Im		
500	82	-1	82,01	-0,7°	4305	-24	4305	-0,3°
550	68	0	68,00	0,0°	48892	-21	48892	0,0°
600	57	-1	57,01	-1,0°	7016	-14	7016	-0,1°
650	48	-1	48,01	-1,2°	7016	-13	7016	-0,1°
700	41	-1	41,01	-1,4°	16376	-13	16376	0,0°
750	96	0	96,00	0,0°	90	0	90	0,0°
800	85	0	85,00	0,0°	12537	-9	12537	0,0°
850	75	0	75,00	0,0°	11469	-8	11469	0,0°
900	67	0	67,00	0,0°	5186	-4	5186	0,0°
950	60	1	60,01	1,0°	2797	0	2797	0,0°
1000	53	-1	53,01	-1,1°	2380	-1	2380	0,0°

5-2. táblázat A komplex permittivitás értékei és abszolút értéke



5-9. ábra A komplex relatív dielektromos állandó abszolút értékének változása a frekvencia függvényében

A fenti táblázatban (5-2. táblázat) értékei a várt $\epsilon_r \cong 2$ értékhez képest jelentősen eltér. Az okokat mint azt már az 5.1-es fejezetben elkezdtem részletezni, a pontos hosszak meghatározásában keresendő.

5.4 Konklúzió

A mérés előkészítése, lebonyolítása és utána a kiértékelése számos, eddigi tanulmányaim alatt még elő nem jött problémákat hozott felszínre. Betekintés kaphattam egy másik szakirány és annak a területemen felbukkanok problémák egy

alternatív megoldására. A feladatom során rájöttem, hogy a pontosabb mérés érdekében a következők szükségesek feltétlenül:

- zavaró tényezők jobb kizárása
- pontosabb hossz meghatározás
- kevesebb elhanyagolás, egyszerűsítés (permeabilitás figyelembevétele)

Mikrohullámú tartományban történő mérés nagyobb pontosságot követel meg. A 300MHz-1GHz tartományban a legkisebb hullámhossz 0,3m, amely a berendezés hosszánál nagyobb.

A első generációs mérőeszköz sajnos konstrukciós problémákkal küszködött, mint például:

- nem megfelelő zárás (kismértékű, de a méréseket jelentősen befolyásoló csöpögés)
- a cső levágásakor az esetleges végelzáróval történő hosszkorrekció (azért szükséges, hogy a mérőfej és a koaxiális tápvonal ere pontosan illeszkedjen, ne legyen diszkontinuitási pont) nem lett beleszámítva és visszamérni sem lehetett, csak közelíteni
- a tömítés anyaga nem megfelelő, az olaj gyorsan bontja, lyukacsossá téve az anyagszerkezetét, mely csöpögéshez vezet

6 Összefoglalás és kitekintés a további fejlesztésekre és mérésekre

A mérések során számos új tapasztalatra tehettem szert, mind elméleti, mind pedig gyakorlati téren egyaránt. Számos mérés technikai problémával találkozhattam és járhattam a kiküszöbölésüknek utána. Ezen kívül a mérések és kiértékelésük mögötti matematikai problémák is mind-mind a korábbi és jelenlegi tanulmányaim során megtanultak használatát követelték meg.

Az olajok permittivitásának (dielektromos állandójának) nagyfrekvenciás impedancia-méréssel történő meghatározása előtt nagy jövőt látok. A diagnosztikai vizsgálatoknál mintavételezésre használt olaj ilyen módon történő ellenőrzése is elképzelhető lehetne.

Az elektromágneses hullámok a villamos szakmában mindenhol jelen vannak. Van ahol zajként jelentkeznek, mint esetünkben is. Viszont ezek a zajok a transzformátor állapotáról hasznos információkat képesek biztosítani.

Tervezem, hogy a méréseket észter típusú olajokra is elvégzem, mely olajok elterjedése nagyteljesítményű transzformátoroknál a fenntartható és környezetbarát üzemeltetés miatt elengedhetetlenné válik a közeljövőben. Ezen felül, amennyiben módom lesz rá, leselejtezés előtt álló transzformátoron is szeretném kipróbálni a finomított számítási eljárásokat.

Irodalomjegyzék

- [1] http://philschatz.com/physics-book/resources/Figure_24_07_02.jpg (2015.08.17.)
- [2] https://vet.bme.hu/sites/default/files/tantargyi_fajlok/k%2C%202014/09/02%20-%202013%3A35/verir_02A-2_rendszer%C3%A1llapotok.pdf (2015. 08. 17.)
- [3] http://www.mvm.hu/hu/szakmai-informaciok/statisztikai-adatok/Documents/mvm_stat_hu_julius23_webre_legutolso.pdf, 24.oldal (2015.08.17.)
- [4] **Vörös Csaba:** *Transzformátor állapot tényező diagnosztikai kiértékelő rendszer fejlesztése*, 2013
- [5] **MSZ IEC 60422:** *Villamos berendezésekben alkalmazott ásványolaj-alapú szigetelőolajok ellenőrzési és kezelési útmutatója*, Budapest, 2000
- [6] **Luspay Ödön:** *Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata*, Magyar áramszolgáltatók egyesülete, ISBN: 9630041804, Budapest, 2000
- [7] **Garai Gergő:** *Főelosztó hálózati transzformátorok állapotellenőrzési vizsgálatai*, 2014
- [8] **Csépes Gusztáv:** *Villamos főberendezések üzembiztonságának egyszerű és gazdaságos növelése a szigetelések állapotellenőrzésével, a diagnosztika sajátosságai és legújabb eredményei*, <http://www.insulationdiagnostics.com/userfiles/csepeg1.pdf> (2015.10.20.)
- [9] **Csépes Gusztáv,** *RVM diagnosztika előadás*, Göd, 2013.01.17.
- [10] **Nagy Krisztián Zoltán:** *A visszatérő feszültség mérés kiértékelésének vizsgálata*, 2014
- [11] **Cselkó Richard:** *Részkiülés-vizsgálat a kábeldiagnosztikában*, 2008
- [12] **S. Chakravorti, D. Dey and B. Chatterjee:** *Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers: Theory*, ISBN 978-1-4471-5549-2, Springer-Verlag London, 2013
- [13] **Dobsa Máté:** *Transzformátor állapot tényező szakértői rendszer fejlesztés lehetőségei*, 2014
- [14] *Szakmai beszámolóv – Ferrit vastagréteg integrált áramkörök 1.*, 2010 <https://hvt.bme.hu/~hosszus/FERFIT/BME%20FERFIT%202010%20eves%20beszamolo.pdf> (2015.október)
- [15] **Műszaki közlemények**, XVI. évfolyam, 3. szám, Budapest, 1970
- [16] **Műszaki közlemények**, XVI. évfolyam, 4. szám, Budapest, 1970

- [17] Smith-diagram,
https://www.google.hu/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAcQjRxqFQoTCP-M57np3cgCFYjTFAodCDoGeg&url=http%3A%2F%2Fwww.mantaro.com%2Fresources%2Fimpedance_calculator.htm&psig=AFQjCNGHp8w6ZUA2L-WE4LfbzqmQOxjgcw&ust=1445869388708777 (2015.10.25.)
- [18] **Wikipédia**, *Smith chart*,
https://en.wikipedia.org/wiki/Smith_chart#/media/File:Smith_chart_explanation.svg (2015.10.25.)
- [19] **hamWiki**, *Dipól*, <http://wiki.ham.hu/images/4/4a/Dip2.jpg> (2015.10.25.)
- [20] **Tenbohlen, D. Denisov, S.M. Hoek and S.M. Markalous**: *Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range*,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4712656> (2015.10.12.)
- [21] **Z. Tang, C. Li, X. Cheng and W. Wang**: *Partial Discharge location in Power Transformers using Wideband RF Detection*,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4027713> (2015.10.10.)
- [22] **G. C. Stone**: *Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment*,
<https://books.google.hu/books?id=Vyq5BAAAQBAJ&pg=PA111&lpg=PA111&dq=Ray+Bartnikas+PD+UHF&source=bl&ots=xUMpy4Hqkw&sig=mc6O28tW0efZeYt6p8Cyg95XWU&hl=hu&sa=X&ved=0CB4Q6AEwAGoVChMIkpC-zI7OyAIVi1sUCh0Z9wGT#v=onepage&q=Ray%20Bartnikas%20PD%20UHF&f=false> (2015.10.05.)
- [23] **Coenen and S. Tenbohlen**: *Location of PD Sources in Power Transformers by UHF and Acoustic Measurements*,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6826381> (2015.10.20.)
- [24] **D. Duan, P. Wang, L. Han, Y. Lu and W. Li**: *PD Deteczion and Recognition Based on UHF Method for Typical Models in Air*,
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6826381> (2015.10.21.)
- [25] **Hung-Cheng Chen, Bo-Yan Chen, Cheng-Chien Kuo and Meng-Hung Chao**: *UHF Micro-Strip Antenna Design for Partial Discharge Detection of Gas Insulated Switch*, 2011 7th Asia-pacific International Conference of Lightning, (2011.11.01-04.)
- [26] **Csépes Gusztáv**, Handzó Péter: *Transzformátorok mechanikai állapotának ellenőrzése rezgésméréssel*, X. Szigetelésdiagnosztikai Konferencia, Esztergom, 2010.10.20-22.,
http://www.insulationdiagnostics.com/index.php?page=item&item_id=20&lang=HU (2015.10.01.)
- [27] *Fokozatkapcsoló kapcsolási karakterisztika felvétele (MT-3 műszerrel)*,
http://www.insulationdiagnostics.com/index.php?page=item&item_id=45&lang (2015.10.06.)

Ábrajegyzék

1-1. ábra Az energiaútja a termelőtől a fogyasztóig [1]	7
2-1. ábra RVM mérési elrendezés [9]	14
2-2. ábra Visszatérő feszültség görbe [6].....	15
2-3. ábra Eredő RVM görbe [6].....	15
2-4. ábra Transzformátor kapacitásának és dielektromos veszteségi tényezőjének kapcsolási vázlata [10].....	16
2-5. ábra Transzformátor tekercs impedancia-frekvencia jelleggörbe [6].....	18
2-6. ábra Fokozatkapcsoló áramának időfüggvénye [6][27]	19
2-7. ábra Transzformátorokban bekövetkező hibák helyei [12]	20
2-8. ábra A transzformátorokban bekövetkező hibák lehetőségei Dél-Afrikában. Reproduced with kind permission ©IET 2012 [12].....	20
3-1. ábra Példa neurális hálózatra [12]	24
4-1. ábra Csúcs-sík elrendezés	27
4-2. ábra Az elrendezés a gyakorlatban	28
4-3. ábra a) a részkisülések megjelenése a különböző csatornákon; b) az időkből a részkisülés helyének meghatározása [12]	28
4-4. ábra A mérésekhez használt antennák	30
4-5. ábra Dipólantenna karakterisztikája [19].....	30
4-6. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben, D magasság: 190cm ..	31
4-7. ábra A kapott jelalakok.....	32
4-8. ábra A jelek amplitúdó spektruma.....	32
4-9. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben.....	33
4-10. ábra A kapott jelalakok.....	33
4-11. ábra A jelek amplitúdó spektruma.....	34
4-12. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben.....	35
4-13. ábra A kapott jelalakok.....	36
4-14. ábra A jelek amplitúdó spektruma.....	36
4-15. ábra Hibahely generálás a transzformátorban elektróda kivezetésével	37
4-16. ábra Az elrendezés és a szenzorok pozíciója a mérőtérben.....	38
4-17. ábra A mért jelalakok	38
4-18. ábra Frekvenciatartománybeli vizsgálat	39

5-1. ábra A mérésnél használt koaxiális csőtápvonal	41
5-2. ábra Anyaggal töltött rövidre zárt koaxiális elrendezés	41
5-3. ábra Minta elhelyezése rövidre zárt tápvonalon	42
5-4. ábra Rövidzári oldalon anyaggal kitöltött rövidre zárt tápvonal	42
5-5. ábra Rövidre zárt csőtápvonal helyettesítő képe	44
5-6. ábra A mérés elvi elrendezése [16]	46
5-7. ábra Smith-diagram [17].....	46
5-8. ábra Smith-diagram értelmezése [18].....	47
5-9. ábra A komplex relatív dielektromos állandó abszolút értékének változása a frekvencia függvényében	48

Táblajegyzék

5-1. táblázat A műszerrel mért impedanciák	47
5-2. táblázat A komplex permittivitás értékei és abszolút értéke	48

Függelék

1. Permittivitás meghatározása

```
clear all
%close all
clc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ismert paraméterek
Zbelmert = [0.5-j*123 ...
2.1-j*103 ...
5.8-j*90.7 ...
3.1-j*81.5 ...
0-j*75.1 ...
8.5-j*66.4 ...
1.2-j*56.2 ...
2.7-j*53.3 ...
5.6-j*51.1 ...
3-j*48.4 ...
1-j*45.5 ];

Zbe2mert = [3.4-j*131 ...
3.7-j*86.5 ...
11-j*64.9 ...
11.8-j*51.5 ...
8.6-j*42.7 ...
6.8-j*30.9 ...
6.9-j*3 ...
7.2+j*9 ...
7.9+j*26.4 ...
17.1+j*55 ...
50.4+j*108.1 ];

Zbe3mert = [4.8-j*48.5 ...
4.9-j*33.1 ...
7.2-j*24.6 ...
7.1-j*15.5 ...
6.6-j*6.1 ...
5.5j*+5.1 ...
7.7+j*17.5 ...
9.4+j*38.7 ...
19.2+j*96.8 ...
350+j*251 ...
54-j*172];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

j = sqrt(-1);
j2pi = j*(2*pi);
Z0 = 120*pi;
l = 105.5/1000;
lm = 103/2/1000;
l1 = l-2*lm;
DK = 10/1000;
```



```

DB = 3/1000;
c = 3*10^8; %fénysebesség
f = [500:50:1000]*10^6;

%ismeretlenek
syms epsz_kr

%üres csőtápvonal paraméterei
ZH_lev = 60*reallog(DK/DB);
beta_lev = 2*pi*f/c;
gamma_lev = j*beta_lev;

%töltött csőtápvonal paraméterei
ZH_olaj = ZH_lev/sqrt(epsz_kr);
gamma_olaj = gamma_lev.*sqrt(epsz_kr);

%%%%%%%%% ÜRES %%%%%%%%%%
%a bemeneti impedancia, meg kell egyeznie a mérttel
Zbe_1 = ZH_lev * tan(beta_lev*(2*lm+l1));

%%%%%%%%% FÉLIG TÖLTÖTT %%%%%%%%%%
%bementi hullámimpedancia
Zbe_olaj = ZH_olaj .* tanh(gamma_olaj*lm);
szam2 = Zbe_olaj + ZH_lev.*tan(beta_lev*(lm+l1))*j;
nev2 = ZH_lev + Zbe_olaj.*tan(beta_lev*(lm+l1))*j;
Zbe_2 = ZH_lev .* szam2 ./ nev2;

%%%%%%%%% TELE TÖLTÖTT %%%%%%%%%%
%bementi hullámimpedancia
Zbe_olaj = ZH_olaj .* tanh(gamma_olaj*2*lm);
szam3 = Zbe_olaj + ZH_lev.*tan(beta_lev*l1)*j;
nev3 = ZH_lev + Zbe_olaj.*tan(beta_lev*l1)*j;
Zbe_3 = ZH_lev .* szam3 ./ nev3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% EGYENLETRENDSZER MEGOLDÁSA %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
epsz_kr2 = 0;
for i=1:1:length(Zbe2mert)
EQ1 = [num2str(real(Zbe2mert(1,i))) '=' char(Zbe_2(1,i)) ];
E = solve( EQ1, 'epsz_kr' );
epsz_kr2 = [epsz_kr2;double(E)];
end

epsz_kr3 = 0;
for i=1:1:length(Zbe3mert)
EQ2 = [num2str(real(Zbe3mert(1,i))) '=' char(Zbe_3(1,i)) ];
E = solve( EQ2, 'epsz_kr' );
epsz_kr3 = [epsz_kr3;double(E)];
end

[epsz_kr2(2:length(Zbe2mert)+1,1) epsz_kr3(2:length(Zbe3mert)+1,1)]
figure(1)
subplot(1,2,1);
plot(f,abs(epsz_kr2(2:length(Zbe2mert)+1,1)),'-o')
title('Félig töltött')
xlabel('f [100MHz]')
ylabel('\epsilon_k_r')

```

```
set(gca, 'FontSize', 12)
subplot(1, 2, 2);
plot(f, abs(epsz_kr3(2:length(Zbe2mert)+1, 1)), '-o')
title('Tele töltött')
xlabel('f [100MHz]')
ylabel('\epsilon_k_r')
set(gca, 'FontSize', 12)
```

2. Pozíció meghatározásához használt kódok

```
%L:\toto_peni_save\MERESEK

close all
clear all
clc

%fájl megnyitása
waves = getWave4();

%adatok kirajzolása
[Peak1, PeakIdx1] = max(waves(:,2)); %findpeaks
[Peak2, PeakIdx2] = max(waves(:,3)); %findpeaks
[Peak3, PeakIdx3] = max(waves(:,4)); %findpeaks
[Peak4, PeakIdx4] = max(waves(:,5)); %findpeaks

c = 3e8;

figure(1)
subplot(4,3,1)
plot(waves(:,1),waves(:,2))
title('Wave1');
ylabel('U [V]');
xlabel('t [sec]');
xlim([-6e-8 4e-8]);
%text(waves(PeakIdx1,1), Peak1, sprintf('Peak = %0.3e', Peak1));
subplot(4,3,4)
plot(waves(:,1),waves(:,3))
title('Wave2');
ylabel('U [V]');
xlabel('t [sec]');
xlim([-6e-8 4e-8]);
%text(waves(PeakIdx2,1), Peak2, sprintf('Peak = %0.3e', Peak2));
subplot(4,3,7)
plot(waves(:,1),waves(:,4))
title('Wave3');
ylabel('U [V]');
xlabel('t [sec]');
xlim([-6e-8 4e-8]);
%text(waves(PeakIdx3,1), Peak3, sprintf('Peak = %0.3e', Peak3));
subplot(4,3,10)
plot(waves(:,1),waves(:,5))
title('Wave4');
ylabel('U [V]');
xlabel('t [sec]');
xlim([-6e-8 4e-8]);
%text(waves(PeakIdx4,1), Peak4, sprintf('Peak = %0.3e', Peak4));

indis = min([PeakIdx1 PeakIdx2 PeakIdx3 PeakIdx4]);
indis_end = max([PeakIdx1 PeakIdx2 PeakIdx3 PeakIdx4]);

subplot(4,3,[2 3 5 6])
plot(waves(:,1),waves(:,2),...
     waves(:,1),waves(:,3),...
     waves(:,1),waves(:,4),...
     waves(:,1),waves(:,5))
```

```

        title('Waves');
        ylabel('U [V]');
        xlabel('t [sec]');
        xlim([-6e-8 4e-8]);
        legend( 'W1', 'W2', 'W3', 'W4')
subplot(4,3,[8 9 11 12])
    plot( waves(indis-1:indis_end+1,1),waves(indis-
1:indis_end+1,2),...
        waves(indis-1:indis_end+1,1),waves(indis-
1:indis_end+1,3),...
        waves(indis-1:indis_end+1,1),waves(indis-
1:indis_end+1,4),...
        waves(indis-1:indis_end+1,1),waves(indis-1:indis_end+1,5))
    hold on
    plot(waves(PeakIdx1,1),waves(PeakIdx1,2), '-o')
    hold on
    plot(waves(PeakIdx2,1),waves(PeakIdx2,3), '-o')
    hold on
    plot(waves(PeakIdx3,1),waves(PeakIdx3,4), '-o')
    hold on
    plot(waves(PeakIdx4,1),waves(PeakIdx4,5), '-o')
    hold off
    text(waves(PeakIdx1,1), Peak1, sprintf('Peak1 = %0.3e sec',
waves(PeakIdx1,1)), 'Color', 'k');
    text(waves(PeakIdx2,1), Peak2, sprintf('Peak2 = %0.3e sec',
waves(PeakIdx1,1)), 'Color', 'k');
    text(waves(PeakIdx3,1), Peak3, sprintf('Peak3 = %0.3e sec',
waves(PeakIdx1,1)), 'Color', 'k');
    text(waves(PeakIdx4,1), Peak4, sprintf('Peak4 = %0.3e sec',
waves(PeakIdx1,1)), 'Color', 'k');

    legend( sprintf('diff1: %0.3f m', (waves(PeakIdx1,1)-
waves(PeakIdx1,1))*c),...
           sprintf('diff2: %0.3f m', (waves(PeakIdx2,1)-
waves(PeakIdx1,1))*c),...
           sprintf('diff3: %0.3f m', (waves(PeakIdx3,1)-
waves(PeakIdx1,1))*c),...
           sprintf('diff4: %0.3f m', (waves(PeakIdx4,1)-
waves(PeakIdx1,1))*c),...
           'Orientation','horizontal');
    %title('Timedifference');

%%% FFT

figure(2)
subplot(4,1,1)
fftz([waves(:,1) waves(:,2)])
title('CH1');
ylabel('|F(jw)|');
xlim([-1e9,1e9])
subplot(4,1,2)
fftz([waves(:,1) waves(:,3)])
title('CH2');
ylabel('|F(jw)|');
xlim([-1e9,1e9])
subplot(4,1,3)
fftz([waves(:,1) waves(:,4)])
title('CH3');
ylabel('|F(jw)|');
xlim([-1e9,1e9])
subplot(4,1,4)

```

```
fftz([waves(:,1) waves(:,5)])
title('CH4');
ylabel('|F(jw)|');
xlim([-1e9,1e9])
% az első érték az idő, a másik pedig az amplitúdó az adott pontban
```

3. Oszcilloszkópból kimentett adatok importálása

```
function [waves] = getWave4()

[FileName, PathName, FilterIndex] = uigetfile(...
    { '*.csv', 'CSV-files (*.csv)'; ...
      '*.*', 'ALL Files (*.*)' }, ...
    'Select files');

FID_1 = fopen(fullfile(PathName, char(FileName)), 'r');

owtsraw_1 = textscan(FID_1, '%s %s %s %s %s', 'delimiter', ',', '');

%fejléc nélkül az adatok kiolvasása

k=length(owtsraw_1{1,1});

i=k;
while strcmp(owtsraw_1{1,1}(i,1), 'second') == 0
    i = i-1;
end
i = i+1;

meresieredmeny_1 = [owtsraw_1{1,1}([i:k],1), ...
    owtsraw_1{1,2}([i:k],1), ...
    owtsraw_1{1,3}([i:k],1), ...
    owtsraw_1{1,4}([i:k],1), ...
    owtsraw_1{1,5}([i:k],1)];

waves = zeros(length(meresieredmeny_1), 2);
for z=1:length(meresieredmeny_1)
    waves(z,1) = str2num(char(meresieredmeny_1(z,1)));
    waves(z,2) = str2num(char(meresieredmeny_1(z,2)));
    waves(z,3) = str2num(char(meresieredmeny_1(z,3)));
    waves(z,4) = str2num(char(meresieredmeny_1(z,4)));
    waves(z,5) = str2num(char(meresieredmeny_1(z,5)));
end

clear mindeneredmeny_1

end
```