



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

Irinyi Dorián, Veres Dániel

**Részkisülés impulzusok spektrumanalízise és
szigetelőolajok frekvenciafüggő
viselkedésének hatása a terjedésükre**

TDK dolgozat

KONZULENS

Cselkó Richárd
egyetemi tanársegéd
Villamos Energetika Tanszék
Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

BUDAPEST, 2017

Tartalomjegyzék

ÖSSZEFOGLALÓ	3
ABSTRACT.....	4
1 ELMÉLETI ÁTTEKINTÉS	5
1.1 MOTIVÁCIÓ, AZ ÁTVITELI HÁLÓZAT.....	5
1.2 TRANSZFORMÁTOR DIAGNOSZTIKA, RÉSZKISÜLÉSEK	6
1.3 UHF RÉSZKISÜLÉSMÉRÉS MÓDSZERTANA.....	14
2 SPEKTRUMANALÍZIS GTEM CELLA SEGÍTSÉGÉVEL	17
2.1 GTEM CELLA	17
2.2 MÉRÉSI ÖSSZEÁLLÍTÁS	18
2.3 EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE.....	20
2.4 TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK	31
3 SZIGETELŐOLAJOK FREKVENCIAFÜGGŐ VISELKEDÉSE.....	32
3.1 JELTERJEDÉS TRANSZFORMÁTORLAJBAN	32
3.2 HELYMEGHATÁROZÁS UHF RÉSZKISÜLÉSMÉRÉS SEGÍTSÉGÉVEL.....	33
3.3 MÉRÉSI ELRENDEZÉS PERMITTIVITÁS MEGHATÁROZÁSÁRA.....	35
3.4 TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK	36
1 ÁBRAJEGYZÉK.....	37
2 IRODALOMJEGYZÉK.....	38

Összefoglaló

Az átviteli- és elosztóhálózati berendezések közül az alállomásokban található transzformátorok az energiaelosztási lánc legfontosabb és legdrágább elemei. Egy-egy meghibásodásnak komoly ellátásbiztonsági és gazdasági következményei lehetnek, ezért kiemelten fontos, hogy állapotuk online és offline diagnosztikai módszerekkel rendszeresen monitorozva legyen.

Az offline diagnosztika sok alapos vizsgálati lehetőséget foglal magába, azonban az eredmények kiértékelése lassú folyamat. Az online diagnosztika a helyszínen elvégezhető, folyamatos monitorozást valósítja meg, előnyei között szerepel, hogy egy esetleges meghibásodás jeleit rögtön észreveszi, a további meghibásodások előtt azonnal lehet reagálni. Az egyik hazánkban kevésbé elterjedt módszer az UHF tartományban történő részkiülésmérés, melynek segítségével a szigetelés kezdeti hibái detektálhatók és lokalizálhatók.

A szigetelőolajok frekvenciafüggő viselkedése miatt a mérési módszer tökéletesítése céljából fontos a részkiülések spektrumának meghatározása, illetve az olajban történő elektromágneses jelterjedés megismerése. Ezen vizsgálatok tökéletesítésével a hibahely meghatározása is pontosabb lehet.

Kutatásunk célja, hogy rávilágítsunk a transzformátordiagnosztika fontosságára, bemutassuk az UHF módszer során fellépő nehézségeket és ezek megoldási lehetőségeit. A részkiülések spektrumának meghatározására mérési elrendezést tervezünk. Munkánk másik részében mérőcella segítségével meghatározzuk az olaj permittivitásának frekvenciafüggését és a frekvenciatartománybeli jelleggörbéket. Ezen része a kutatásnak a dolgozatnak leadási határidejéig folyamatban van, így eredményeket még nem közlünk, azonban a mérést elméleti síkon már megalapoztuk, a kivitelezésre és az eredmények kiértékelésére az elkövetkező pár hónapon belül sor kerül.

A mért értékek segítségével a későbbiekben a kutatás tovább folytatható a részkiülés pontosabb helymeghatározása irányába.

Abstract

The most expensive and most important equipment of the energy supply chain are transformers. Malfunctions on these equipment could occur big problems in energy safety and also result high costs for system operators. Therefore, it is highly important to monitor the transformers and detect the problems before the malfunctions.

A relatively new online diagnostics method is UHF partial discharge detection. With this method we could detect partial discharges (PD) before it turns into a real short-circuit or strikeover. In UHF (Ultra High Frequency) frequency range we could detect the electromagnetic impulses emitted by partial discharges and with some complex mathematical methods it is possible to determine the source of the discharges. There are some factors which influence the signal propagation in transformer oils. In our work we investigate some of these factors and finally the job could continue to develop a method to localize PD more accurate.

In our work we examined some unique problems regarding to UHF partial discharge investigation methods. Our work started with reviewing high number of references about discharges, methods, equipment and we tried to figure out that how many information are they containing to build up an UHF model. One of my goals is measuring the spectrum of a partial discharge. For this measurement we used the GTEM cell of the Department of Electric Power Engineering. This equipment is suitable to measure high frequency signals. We had to solve a problem about putting the high voltage into the housing without degrade the electromagnetic shielding of the GTEM cell.

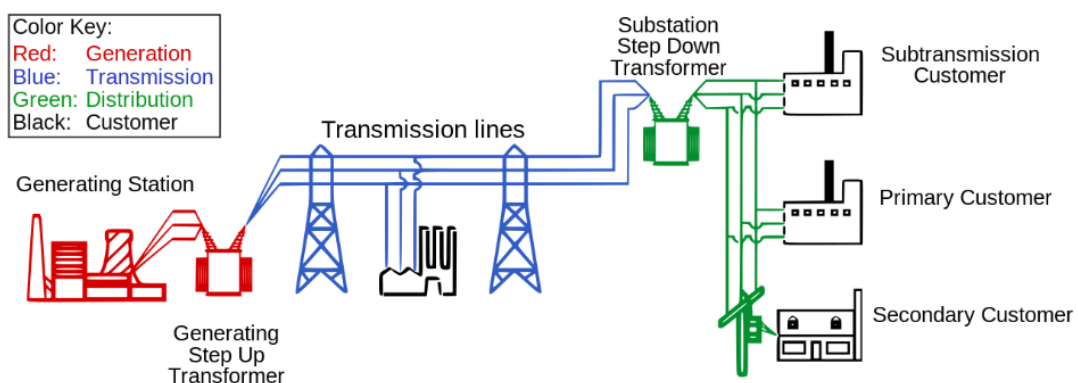
Our other task was to examine the propagation in transformer oil. It is an ongoing part of our study, but we already planned the measurements in a theoretical level and we are going to finish this part and evaluate the results in the following few months.

1 Elméleti áttekintés

Ebben a fejezetben ismertetjük a kutatás motivációját és röviden összefoglaljuk a dolgozat könnyebb megértéséhez szükséges elméleti alapokat.

1.1 Motiváció, az átviteli hálózat

Az átviteli- és elosztóhálózati berendezések közül az alállomásokban található transzformátorok az energiaelosztási lánc legfontosabb és legdrágább elemei. Egy-egy meghibásodásnak komoly ellátásbiztonsági és gazdasági következményei lehetnek, ezért kiemelten fontos, hogy állapotuk online és offline diagnosztikai módszerekkel rendszeresen monitorozva legyen. A kis- és nagyfogyasztóknak, ipari- és lakossági fogyasztóknak mind elvárásuk, hogy az energiaellátásuk a fizetett energiadíj ellenében folyamatos és megbízható legyen. Erre az elosztói engedélyeseket különböző szabályozott mérőszámok is kötelezik, nem teljesítésük esetén komoly pénzbüntetésekkel sújthatják őket. A transzformátorok üzemszerű működése fontos továbbá az átviteli hálózat biztonságos működése szempontjából. Egy-egy elem kiesése komoly túlterhelődéseket, az n-1 elv megszűnését eredményezheti. Fontos ezért, hogy az átviteli- és elosztóhálózati berendezéseket folyamatosan monitorozzák, azonban ezt egy olyan optimális módszerrel kell végezniük, hogy a karbantartási stratégiájuk ne legyen veszteséges. A jó diagnosztika éppen ezért főpillére a gazdasági optimumot célzó eszközgazdálkodásnak.



1. ábra: Az energiaátvitel modellje [1]

Az offline diagnosztika sok alapos vizsgálati lehetőséget foglal magába, azonban az eredmények kiértékelése lassú folyamat. Általában az eredmények kiértékelése nem a

helyszínen zajlik, hanem egy laboratóriumban (például a következő alfejezetben említett olajvizsgálatok). Az online diagnosztika a helyszínen elvégezhető, folyamatos monitorozást valósítja meg, előnyei között szerepel, hogy egy esetleges meghibásodás jeleit rögtön észreveszi, a további meghibásodások előtt azonnal lehet reagálni.

A nem távvezetési zárlat hatására fellépő hibák jelentős többségét részkisülések¹ előzik meg. Sok kiforrott diagnosztikai módszer létezik már, amelyet hazánkban is alkalmaznak. Az UHF² részkisülésmérés egy olyan online transzformátor-diagnosztikai módszer, amely még a mai modern technológiák mellett is rengeteg kérdést tartogat magában. A hazánkban még nem mindenhol alkalmazott diagnosztikai módszer pontos leírása az 1.3 alfejezetben található.

1.2 Transzformátor diagnosztika, részkisülések

A meglévő diagnosztikai módszerek összefoglalását a [2][3][4], valamint az [5][6][7][8] szakirodalmak alapján készítettük.

1.2.1 Transzformátor diagnosztika

Az átviteli- és elosztóhálózati transzformátorok többségét olaj-papír szigetelőanyaggal készítik. A szigetelést alkotó olaj és papír együttesen, sorosan és párhuzamosan rétegezve adja a transzformátorok szigetelését. A tekercselések szigetelésére olajjal átitatott papírt vagy prespánt alkalmaznak, míg a transzformátorházat olajjal töltik fel. A szilárd szigetelésben található olaj és papír szoros kölcsönhatásban vannak egymással: a papír megköti az olaj szigetelési tulajdonságait rontó anyagokat (öregedési termékek, víz egy része, stb.), míg az olaj oldja a papír bomlásakor keletkező vegyületeket. Általánosságban elmondható, hogy mind az öregedés, mind a nedvesedés rontja az olaj-papír szigetelés szigetelési tulajdonságait, végső soron átütés jön létre.

¹ Részkisülés (PD – partial discharge): Olyan induló kisülés, amely nem terjed elektródtól elektródig, azonban a szigetelőanyagot jelentősen károsítja és hosszú távon teljes átütéshez vezethet.

² UHF (Ultra High Frequency): a 300 MHz – 3 GHz közötti frekvenciatartomány.

Ha például a papír víztartalma eléri a 3%-ot, akkor az öregedés hatására körülbelül 10-szer olyan gyorsan csökken felére a papírt alkotó cellulózban a polimerizációs fok³, mint 0,3% víztartalom mellett. Ez hatalmas problémát jelent, mivel ha a transzformátorban a papír mechanikai szilárdsága lecsökken, akkor a bekapcsolási- és zárlati áramlökések hatására elreped, eltörik és elveszti szigetelő és merevítő funkcióját. Az átütések ilyen hibák esetén szinte azonnal bekövetkeznek, de kisebb rongálódás esetén is már kialakulnak a részkisülések.



2. ábra: Olaj-papír szigetelés károsodása menetzárlat után [9]

A transzformátordiagnosztika területén napjainkban már elvárás az online monitorozás. A drága berendezések szükségessé teszik, hogy minél előbb, minél gyorsabban és minél több adatot gyűjtsünk az öregedő berendezésekről. Emellett fontos a jelenlegi állapot ellenőrzése is, ennek minél pontosabb becslése, amelyen egy gazdaságos karbantartási és

³ Polimerizációs fok: adott anyag láncmolekuláinak átlagos hosszát jellemző szám. Papír esetén kezdetben ez 1200-1300, míg 250 esetén már a papír elveszti mechanikai szilárdságát.

fejlesztési stratégia alapszik. A kialakult versenyhelyzet megköveteli, hogy az üzemeltetési és karbantartási költségek mellett az ellenőrzés maximális legyen, ezzel biztosítva az üzembiztos működést és a folyamatos ellátást.

A szigetelési állapotok romlása nyomon követhető a kapcsokon mérhető jellemzők változásának megfigyelésével. Ezt a célt szolgálják a rendszeres állapotellenőrzési mérések.

1.2.1.1 Olajvizsgálatok

A transzformátorokban alkalmazott olajjal telített papír dielektromos alapfolyamatait az olaj és a papír eredeti jellemzőin, valamint az olaj-papír arányon túl a nedvességtartalom, az öregedés és a hőmérséklet együttesen befolyásolja. Az olajjal telített papír villamos vezetését a fajlagos térfogati ellenállással jellemezzük. A nedvességtartalom és a hőmérséklet 1%-os emelkedése is már egy nagyságrenddel csökkenti a fajlagos térfogati ellenállást. Ez azt is jelenti, hogy az öregedési folyamat felgyorsul. Az olaj-papír szigetelés nedvességmegkötő tulajdonsága jellegzetes: a papír hidegen, míg az olaj melegen tud több vizet felvenni, oldatban tartani. Ezáltal minden hőmérsékleten létrejön egy egyensúlyi nedvességtartalom-arány a papír és az olaj között, melynek a papírra vetett hatásai az előző alfejezetben kifejtésre kerültek.

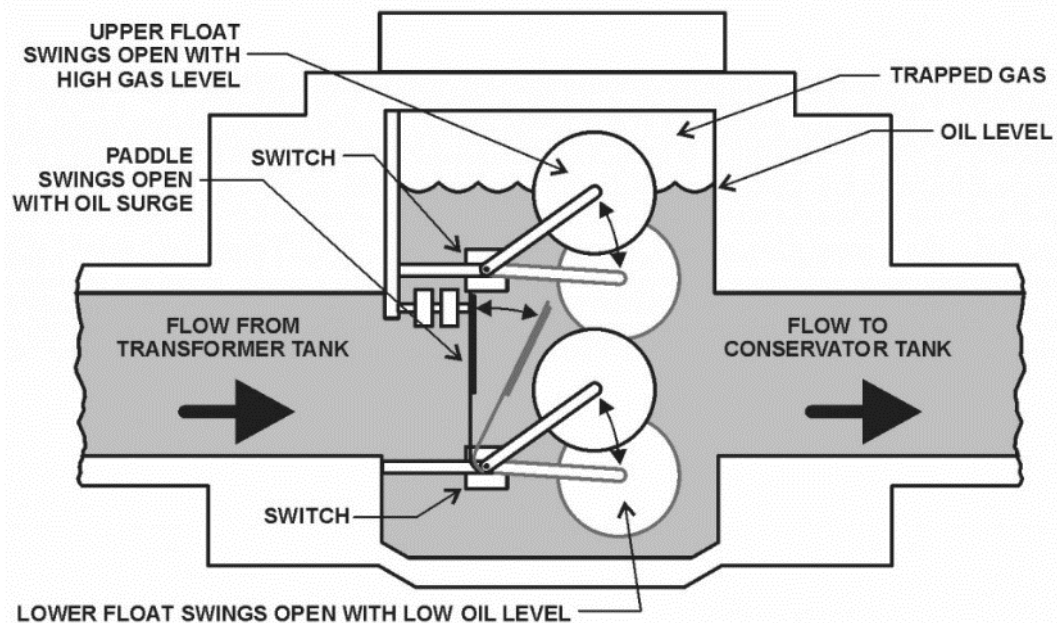
Elnedvesedett szigetelés esetén a papírnak az egyensúly beálltához olyan mennyiségű vizet kell leadnia az olaj felé, hogy azt az olaj már nem tudja oldani, így a víz szabadon kiválik, a villamos szilárdságot jelentősen lerontja. A nedvesség jelenléte elősegíti a PD kialakulását is: a hőmérséklet, a villamos erőtér és a szigetelésben lévő víz együttes hatásaként buborékok keletkeznek az olajban. Az a térerősség, aminél ez a folyamat elindul, erősen térerősség és hőmérsékletfüggő. A buborékokban létrejövő részkisülések könnyedén teljes átütéshez vezethetnek, ez pedig a berendezés üzemzavarát, meghibásodását, de akár a transzformátor kigyulladását is eredményezheti.

A jelenleg használatos szigetelőolajok ásványolaj-alapúak, melyek összetétele és öregedési tulajdonságaik jelentősen függenek az ásványolaj származási helyétől és a feldolgozás módjától. Az alkalmazott olajok összetételét, vizsgálati módszereit, tárolási körülményeit, stb. szigorú szabványok írják elő. Az olajvizsgálatok megszervezése az adott berendezés üzemeltetőjének a feladata és érdeke. A vizsgálandó jellemzőket az MSZ IEC 60422-9 szabvány írja elő. Ilyenek például: szín és külső, átütési feszültség, dielektromos veszteségi tényező, víztartalom, üledék, teljes gáztartalom, kinetikai

viszkozitás, lobbanáspont, folyáspont, sűrűség, oxidációs stabilitás. A vizsgálatok kiértékelése után az adott olajmintát négy kategóriába lehet sorolni: használatra alkalmas és a határértékek megfelelnek, kondicionálni kell, regenerálást igényel, minősége kezeléssel sem javítható. A legutóbbi eset fennállása esetén az egész berendezésben található olajmennyiséget ki kell cserélni.

1.2.1.2 Buchholz-relében összegyűlt gázok vizsgálata

Magyarországon a MAVIR⁴ szabályzata alapján minden 1 MVA-nál nagyobb teljesítményű transzformátort el kell látni gázrelével. A gázrelét (Buchholz-relét) alapvetően védelmi célokra használják, ugyanis képes detektálni a transzformátorokban zárlat hatására kialakuló hirtelen olajáramlásokat. Másik védelmi funkciója szerint az olajsztint csökkenése esetén kioldási parancsot ad a transzformátor megszakítóinak.



3. ábra: Buchholz-relé egyszerűsített keresztmetszeti rajza [10]

A felgyülemlett gázokat nem monitorozzák folyamatosan, azonban védelmi működés esetén a hiba jellegének kiderítése miatt érdemes elvégezni az analízist. Az éghető gázok jelenléte a gázrelében a transzformátor belső meghibásodására utal. A papírszigetelés károsodásakor szén-monoxid (CO) keletkezik, ha a zárlati ív főleg olajat bontott, akkor

⁴ MAVIR: Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt.

acetilén (C₂H₂) jön létre bomlástermékként. Helyszínen elvégezhető vizsgálatok során legegyszerűbb módszer az összegyűlt gáz kieresztése és meggyújtása. Nagyobb biztonságot és pontosságot jelent egy vizsgálókészülék, amelyet a gázminta-vevő csapra csatlakoztatnak. A gázrelében összegyűlt gázt egy reagenseket tartalmazó csőrendszerbe vezetik. A folyadékkomponenst tartalmazó készülék egyik csőve az acetilént, a másik a szén-monoxidot jelzi. Egy bonyolultabb módszer a szilárd reagenseket tartalmazó gázvizsgáló, amellyel már a CO, CO₂, H₂ és szénhidrogén gázkomponensek kimutatása is lehetséges. A gázvizsgálatot laboratóriumban is el lehet végezni gázkromatográfias analitikai módszer segítségével. Ennek időigénye azonban jóval nagyobb, ezért gyors döntéskényszernél nem alkalmazható. Az IEC 60599:1999 ajánlása szerint a kiértékeléshez olajmintát is kell venni a főtartályból és a gázreléhez közeli olajtérből is, és ezeket is analizálni kell gáztartalomra.

1.2.1.3 Olajban oldott gázok vizsgálata (HGA⁵)

A hibagáz analízis alkalmazásával még a kezdeti állapotban kimutathatók a villamos berendezések szigeteléseiben fellépő helyi hibaforrások, igénybevételek. A mintavétel módszerét szabvány határozza meg, a levett kis mennyiségű olajat gázkromatográfias vizsgálattal elemzik. A lélegző típusú berendezésekben található olaj érintkezik az atmoszféra gázaival, így közel telítésig oldja a levegő által tartalmazott oxigént, nitrogént és szén-dioxidot. A hermetikus lezárású berendezéseket a szigetelőolaj betöltése előtt kondicionálják, a maradék gáztartalom kisebb, mint 1 térfogatszázalék.

A transzformátorban lévő hibák, a szigetelőanyagok termikus és villamos igénybevételei bontják a szigetelőolajat és az egyéb (például papír) szigetelőanyagokat. A keletkező gázok függenek a hibahelyen felszabaduló energiától és a hőmérséklettől is. Az alábbi táblázat összefoglalja a hibafajták megnevezését, és a fellépésük során keletkező gázokat:

⁵ HGA: Hibagáz-analízis

Hibafajta	Túligenybevétel jellege	Keletkező gázok ⁶
Részkisülés	villamos	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆
Kisenergiájú kisülés, ív	termikus-villamos	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂
Nagyenergiájú kisülés, ív	termikus-villamos	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₈
Melegpont, t < 300 °C	termikus	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈
Melegpont, 300 °C < t < 700 °C	termikus	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆
Melegpont, t > 700 °C	termikus	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆

A fellépő folyamatok között látható, hogy átfedések vannak, de a termelt gázok arányai eltérőek, ezért a hiba fajtájának behatárolásakor ez egy fontos szempont.

1.2.1.4 Szigetelési ellenállásmérés

A szigetelési ellenállásmérés során egyenfeszültséget kapcsolunk a szigetelésre. A folyamat során az átfolyó áram közel exponenciálisan csökken, ennek megfelelően a szigetelés ellenállása nő. A szigetelési ellenállás a szabvány szerint műszerről a mérés 60. másodpercében leolvasott érték. A szigetelési ellenállást a szabványok szerint fázisonként kell megállapítani és adott fázis mérése közben a többi, mérésben részt nem vevő fázist, üzemszerűen földelt fémszerelvényeket földelni kell.

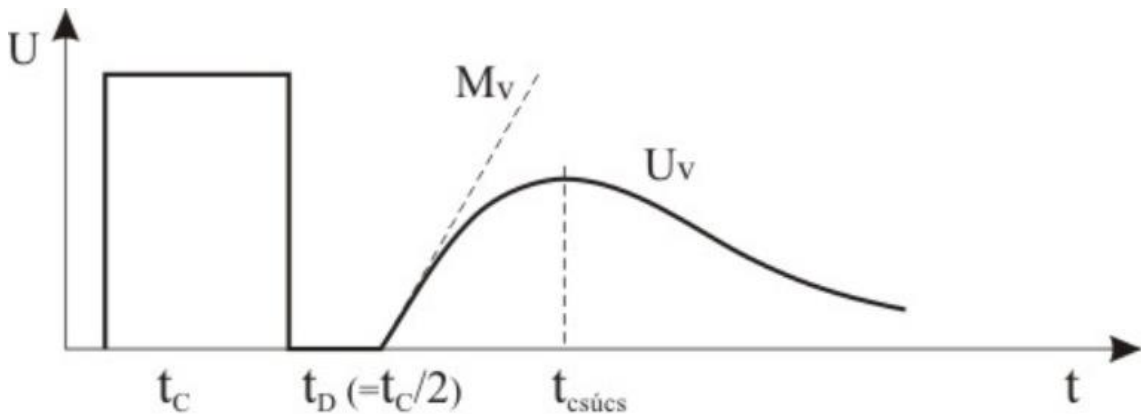
A szigetelési ellenállás hőmérsékletfüggő, így a szabványban előírt értékek is a hőmérséklet függvényében vannak feltüntetve, vagy számértéke egy korrelációs összefüggés alapján referenciahőmérsékletre számolható át. Fontos továbbá megjegyezni, hogy a mérés alatt álló átvezetők felületét mérés előtt meg kell tisztítani a szennyeződésektől. A szigetelési ellenállásmérés az egyik legegyszerűbb diagnosztikai módszer, az eredményekből könnyen lehet következtetni a szigetelés nedvesedésére, öregedésére.

⁶ CH₄: metán, C₂H₆: etán, C₂H₄: etilén, C₂H₂: acetilén, C₃H₈: propán, C₃H₆: propilén

1.2.1.5 A kisülési és visszatérő feszültség mérése (RVM⁷)

Természetesen nem csak a szigetelőanyag konkrét fizikai állapotára, szennyezettségére vonatkozó vizsgálatok lehetségesek, hanem a dielektromos tulajdonságaira vonatkozóak is. Ezek a dielektromos paraméterek (diszperziós tényező, permittivitás, veszteségi tényező, stb.) szintén jól jellemzik a szigetelőanyag állapotát, az öregedés mértékét.

Az egyik ilyen mérési módszer a visszatérő feszültség mérése, amely a szigetelőanyagban fellépő vezetési és polarizációs folyamatokra enged következtetni. Ha a szigetelőanyagra hosszabb időtartamra (amely alatt a nagyobb időállandójú polarizációs folyamatok is ki tudnak alakulni) egyenfeszültséget kapcsolunk, majd ezt leválasztjuk róla, akkor az elektródokon lévő töltések a szigetelési ellenálláson keresztül sülnek ki. A szigetelőanyagon a feszültség időbeli lefolyását mérve megkapjuk a szigetelés kisülési görbéjét. A kisülési görbe kezdeti iránytangense a szigetelés vezetőképességével közvetlenül arányos. Ha a szigetelőanyagot a tápforrásról leválasztva rövid ideig rövidre zárjuk, majd a rövidzárát megszüntetjük, akkor a visszatérő feszültség kezdeti meredeksége a polarizációs folyamatokkal (polarizációs vezetőképességgel) van szoros kapcsolatban. Az alábbi ábrán látható egy tipikus visszatérő feszültség mérési időfüggvény. Az ábrán t_c jelzi a töltési időt, $t_D (=t_c/2)$ azt az időt, amíg a rövidzár fennáll, M_v pedig a visszatérő feszültség kezdeti meredekségét.



4. ábra: Visszatérő feszültség tipikus időfüggvénye [11]

⁷ RVM (Recovery Voltage Measurement): visszatérő feszültség mérés

1.2.2 Részkisülések

Az erősen inhomogén villamos erőterben a szigetelőanyagok villamos szilárdsága lokálisan leromlik, letörik. Ezt a jelenséget nevezzük részletörésnek, más néven részkisülésnek. Részkisülésről akkor beszélünk, ha a szigetelőanyag szigetelőképesége helyileg letörik, a letörés azonban nem ér elektródától elektródáig. A részkisülések folyamatos jelenléte károsítja a szigetelőanyagot, így csökken a szigetelő élettartama és előbb-utóbb a részkisülések teljes átütéshez vezetnek. Részkisülések létrejöhetnek gázokban és folyadékokban erősen inhomogén terek esetén az elektródák környezetében. A nagyfeszültségű technika egyik legismertebb jelensége a koronakisülés kis görbületi sugarú vezetők felületén. Ezt nem csak a nagyfeszültségű berendezések méretezése során kell figyelembe venni, hanem távvezetékek üzeme során mérhető veszteséget, elektromágneses zavarokat és az okozott hangjelenség miatt lakossági panaszokat is okozhat. A koronakisülés nem csak normál atmoszferikus nyomású gázokban, hanem akár tokozott kaapcsolóberendezésekben is létrejöhet. Erős, inhomogén elektromos tér jelenlétében alakul ki, ha a térerősség lokálisan meghaladja a gáz ionizációjához szükséges értéket, de az elektródok közé kapcsolt feszültség nem haladja meg az átütési feszültséget. Oszcilloszkópon vizsgálva a jelenséget, megjelenése a szinusz hullám csúcscsértékénél tapasztalható.

A szilárd vagy folyékony szigetelőanyagokban lévő légrétegeknek lényegesen kisebb a permittivitása, mint a környezetéé, ezért a szilárd anyagban lévő térerősség többszöröse alakul ki benne. Bár a gázok villamos szilárdsága a rétegvastagság csökkentésével jelentősen növekszik, a térerősség gyakran eléri azt a szintet, ami az üregben/zárványban már átütést hoz létre. Mivel a szilárd és folyékony szigetelőanyagoknak rendszerint nagyobb a villamos szilárdsága – és benne a permittivitások különbözősége miatt nem lép fel térerősség-növekedés – a gázréteg átütése nem terjed tovább, hanem részkisülés marad. Bár a belső üregek átütése nem okoz közvetlenül zárlatot, tehát a szigetelés ellátja feladatát, mégis több szempontból káros. Az üregben zajló kisülés folyamatosan roncsolja az üreg falát alkotó szilárd vagy folyékony szigetelőanyagot, és időben abban is részkisülést indít el, amely a treeing jelenség kialakulásához (szilárd szigetelő esetén), majd teljes átütéshez vezethet. Az üregben fennálló részkisülés nagyfrekvenciás feszültségváltozásokat hoz létre, amely az elektronikus készülékeket zavarhatja. Kutatásunk leginkább ennek a részkisülés típusnak a detektálására terjed ki, az UHF részkisülésmérési módszer pontosan a nagyfrekvenciás elektromágneses hullámok

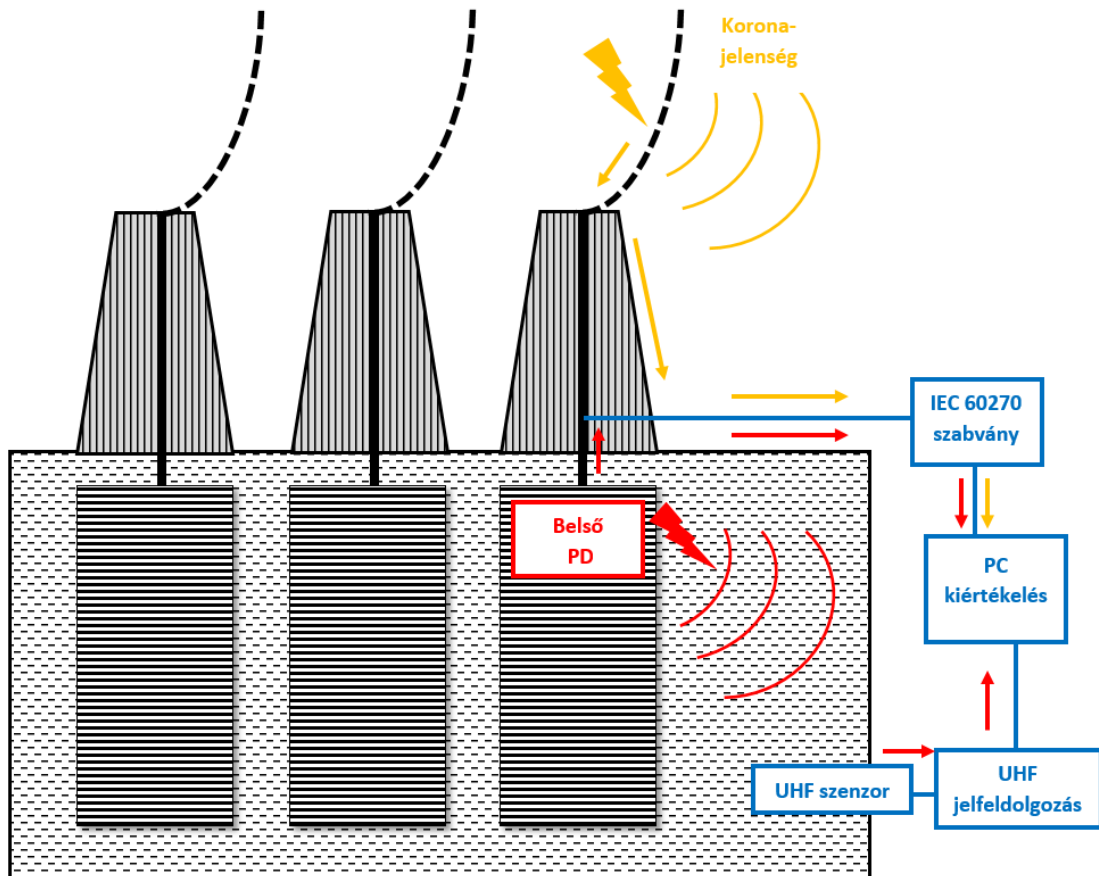
létrejöttét felhasználva detektálja a részkisüléseket. Megjelenése a szinusz hullám nullátmeneteinél tapasztalható.

Tisztán felületi igénybevételt a gáz és szilárd szigetelőanyag határfelületével párhuzamos térerősség hoz létre. Mivel a két szigetelőanyagban kialakuló erőtér független egymástól, elvileg a bennük keletkező átütési jelenségek is függetlenek lennének. Az erőtérben levő határfelületen azonban kisülések indulnak meg (a kisebb villamos szilárdságú anyagban), már lényegesen kisebb felületi térerősség hatására, mint amekkora a szabad gáztérben ezeknek a megindulásához szükséges lenne. A felület mentén tehát a gáz villamos szilárdsága kisebb, mintha a gáz önmagában lenne. A szilárd anyag, bár benne semmiféle kisülési jelenség nincs, csökkenti a gáz villamos szilárdságát. A felületi kúszókisülés olyan elrendezésben jön létre, ahol az egyik elektród a szigetelőanyag egyik oldalán véget ér, a másik pedig az ellentétes oldalon túlnyúlik rajta. A kúszókisülés keletkezésének oka az, hogy a potenciálvonalak a szigetelőanyag egy részén csaknem merőlegesek a felületre, tehát a térerősség közel párhuzamos vele. A felső elektród szélénél azonban ez a térerősség nagy, és van egy kicsi, felületre merőleges összetevője is. A sarkoknál meginduló felületi kisülést a merőleges összetevő a felülethez szorítja, így olyan hatást idéz elő, mintha az elektród megnyúlt volna, de változatlanul élesen végződik. Oszilloszkópon vizsgálva megjelenésére a szinusz hullám nullátmenetei után számíthatunk.

1.3 UHF részkisülmérés módszertana

A részkisülések gyors felfutású impulzusok, melyek elektromágneses hullámokat bocsátanak ki. Ezen elektromágneses hullámoknak jelentős teljesítményű összetevői találhatóak a 300 MHz és a 3 GHz közötti frekvenciatartományban. Erre a sávra hangolt antennákkal, szenzorokkal az elektromágneses hullámok detektálhatók, így a részkisülések monitorozhatók. A transzformátorok földelt fémháza szinte tökéletes árnyékolást biztosít a kívülről érkező elektromágneses zavartatásokkal (alállomási környezetben például nem a szigetelésben keletkező koronakisülés, kapcsolások által keltett elektromágneses zavarok, alállomási kommunikáció UHF sávba eső része, stb.) szemben. Már maga az átvezető szigetelő egy aluláteresztő szűrőként viselkedik, így kiszűrve a külső, nagyfrekvenciás zavarokat. A szenzorokat a transzformátor belsejében elhelyezve (régebbi transzformátoroknál az olajleeresztő csapba, újabb típusoknál külön erre a célra kialakított ablakokba) a külső zavartatások az előbb említett okokból

könnyedén kiszűrhetőek. Fontos tényező az is, hogy a detektált jelek nagyfrekvenciásak, így a közegbeli csillapítás is kisebb, mint kis frekvenciákon. Ezért a mérés szempontjából kritikus jel-zaj viszony a többi részkiülésmérési módszerhez képest jobb.

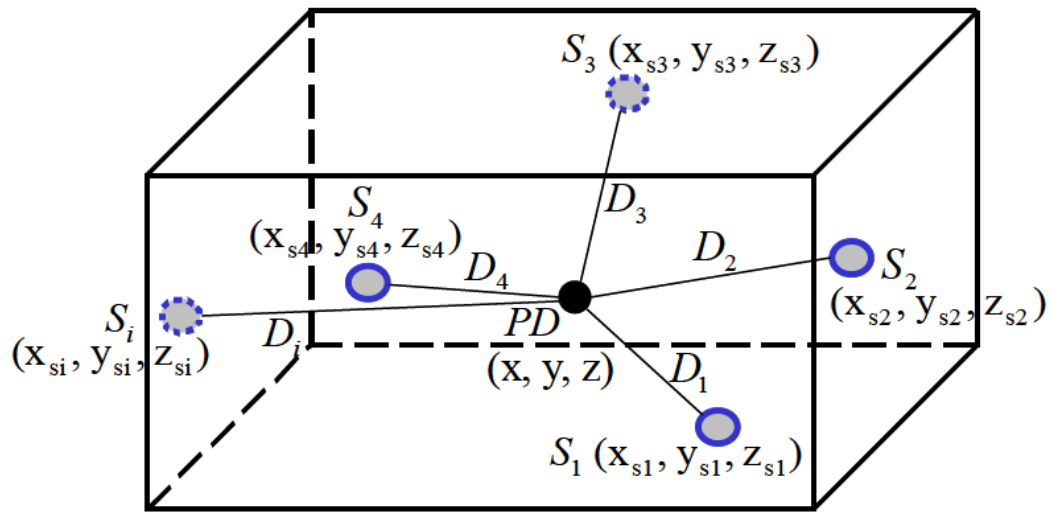


5. ábra: UHF és más részkiülésmérési módszerek összehasonlítása [12]

Ahogy a 3. ábrán is látszik, a pirossal jelzett útvonalon terjednek a transzformátor belsejében keletkező részkiülések és UHF módszerrel a feldolgozó egységig kevés zavartatással jutnak el az elektromágneses hullámok. Ezzel ellentétben például az IEC 60270 szabványban előírt részkiülésmérési módszer külső zavarok által terhelt, így a feldolgozás előtt egy esetenként bonyolult zavorszűrési eljárást is kell alkalmazni.

Az UHF részkiülésmérés módszertanát nem csak a részkiülések detektálására – mint kezdeti hibaforrás detektálásra – használhatjuk, hanem a hibahely meghatározására, azaz a PD lokalizálására is. Több antennával ugyanis az egy forrásból érkező jeleket több helyen tudjuk detektálni és az egymáshoz viszonyított jelterjedési időkből az antennák helyzetének ismeretében meghatározható a részkiülés viszonylagos helye. Hasonlóan a GPS-ek helymeghatározási módszeréhez a háromszögelés elve egyszerű módszernek tűnik, azonban a jelterjedést leíró egyenleteket és a 3 dimenziós helymeghatározást

bonyolult matematikai algoritmusokkal lehet leírni. A helymeghatározás lehetőségeiről és gyakorlati példáiról bővebben a kitekintést nyújtó 4. fejezetben írunk.



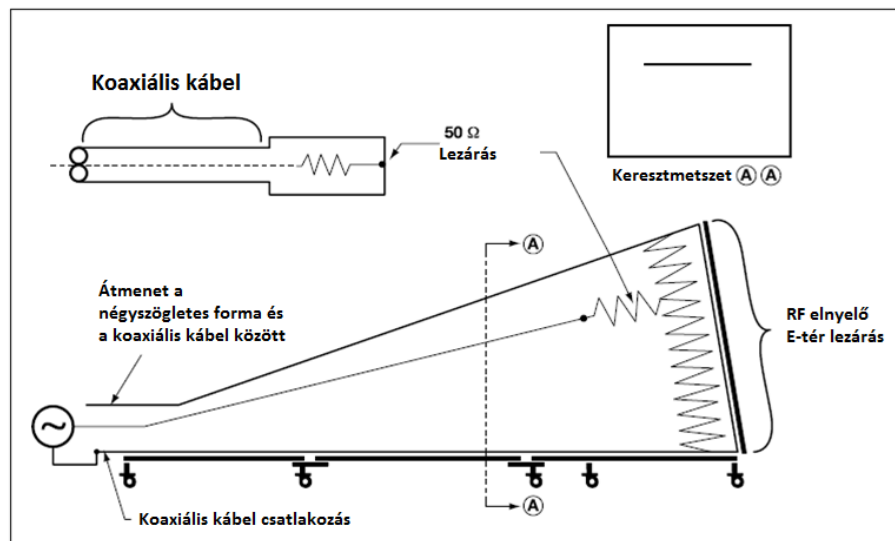
6. ábra: Részkesülések helyének meghatározása a háromszögelés elvével [12]

2 Spektrumanalízis GTEM⁸ cella segítségével

Ebben a fejezetben bemutatjuk a részkiülések spektrumának meghatározásához használt módszert, eszközöket, a mérések menetét és az eredmények kiértékelését.

2.1 GTEM cella

A GTEM cella egy olyan elektromágnesesen árnyékolt mérőberendezés, melynek belsejében homogén elektromágneses teret lehet létrehozni [13]. Segítségével elektronikus eszközök immunitásvizsgálatát és elektromágneses kibocsátását lehet vizsgálni szabványos körülmények között. Ezen mérések szolgáltatják az EMC⁹ mérések alapjait. Kialakítását tekintve a mérőcella egy téglalap alapú, üreges gúla alakú 50 Ω-os transzmissziós vonal. Ez az elrendezés lehetővé teszi, hogy a belsejében csak haladó hullámok alakuljanak ki. Ennél fogva a tápvonal mentén a maximális és minimális feszültség mindenhol állandó. A BME Villamos Energetika Tanszékén található berendezéssel körülbelül 9 kHz és 5 GHz közötti frekvenciatartományban lehet vizsgálatokat végezni.



7. ábra: A GTEM cella keresztmetszeti rajza

⁸ GTEM (Gigahertz Transverse Electromagnetic) cell: Elektromágnesesen árnyékolt mérőcella

⁹ EMC (Electromagnetic Compatibility): Elektromágneses kompatibilitás

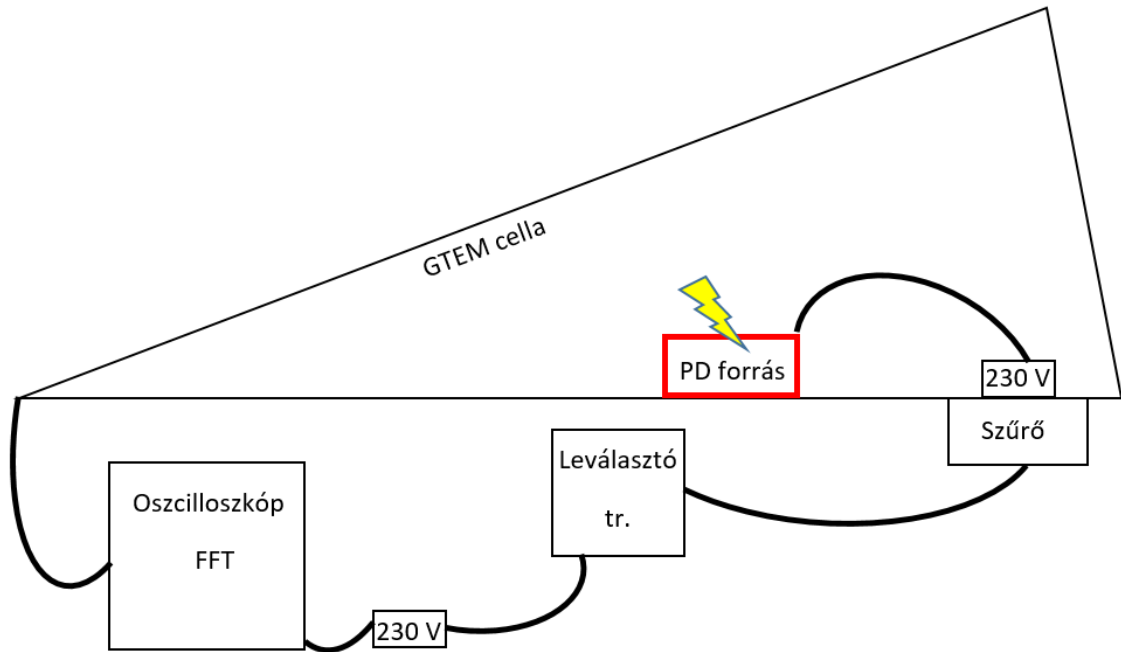
A GTEM cella felépítése a fenti ábrán látható. A gúla alapját jelentő falat belülről elektromágneses sugárzást elnyelő anyaggal burkolják (reflexiók csökkentése), a többi belső felület a hullám terelésére szolgál. A koaxiális kábel jelvezetékét a berendezés belsejében a szeptum képezi le. A gúla csúcspontjában található csatlakozás alkalmas arra, hogy elektromágneses sugárzást juttassunk a cella belsejébe és így vizsgáljuk annak a vizsgált eszközre vetett hatásait. A cellával a koaxiális kábel csatlakozásra kötött spektrumanalizátor segítségével az árnyékolt térben működő berendezés kisugárzott elektromágneses spektrumát is lehet vizsgálni. Ez utóbbi mérési elrendezés segítségével lehetséges a PD spektrumának megmérése.

2.2 Mérési összeállítás

A mérési összeállításban fontos szerepet játszik maga a részkisülés-forrás, melynek előállítására korábban sikertelen próbálkozásaink voltak. Először egy teljes átütés létrehozásával próbálkoztunk, azonban a nagyon leegyszerűsített lökésgerjesztő (R-L-C tagok és egy szikraköz) nem volt kielégítően megbízható és pontos, így az eredmények a kiértékelés során változatos következtetéseket eredményeztek. Ezen dolgozatunkban már valóságos részkisülések létrehozását tűztük ki célul, melyre mindenképpen szükségünk volt egy több kV-os tápforrásra. Erre a célra egy körülbelül 3 kV-os szinuszos hálózati transzformátort használtunk, melynek a kivezetésein (fázis-föld) többféle elektródelrendezést alkalmaztunk.

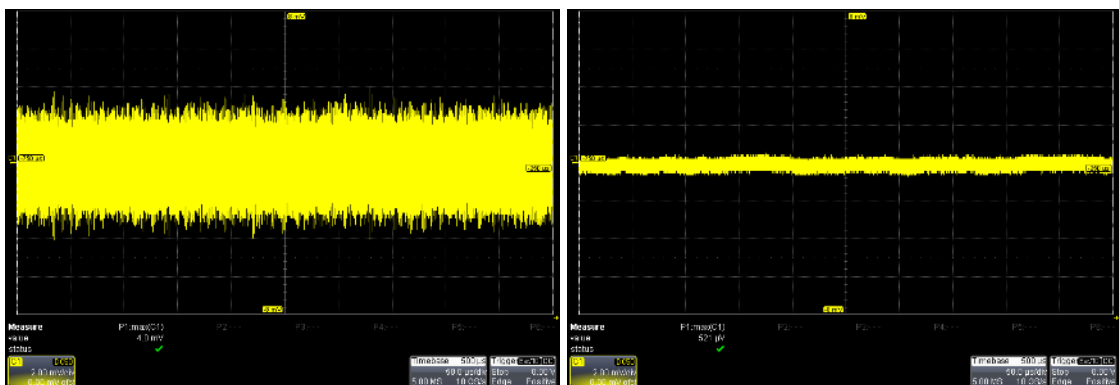
A részkisülés spektrumát egy 1 GHz analóg sáv szélességű, 10 GSa/s mintavételezési sebességű oszcilloszkóp FFT¹⁰ matematikai funkciójával mértük meg. Mérés előtt megvizsgáltuk a GTEM cella árnyékolási tulajdonságait, valamint fontos volt, hogy a transzformátort a GTEM cella csatlakozójába egy leválasztó transzformátoron keresztül kössük elkerülve ezzel az esetleges átütések káros hatásait. A PD forrást tápláló 230V és a leválasztó transzformátor közé egy szűrő került elhelyezésre, amely biztosítja, hogy vezetetten nem kerül be semmilyen külső zavar a cellába.

¹⁰ FFT (Fast Fourier Transform): Matematikai módszer az időtartományból frekvenciatartományba való áttéréshez.



8. ábra: Mérési összeállítás

Jelen mérési összeállítás szerint a GTEM cellát elektromágneses kibocsátás üzemmódban használtuk, tehát a szeptum kivezetésére szolgáló csatlakozót az oszcilloszkópra kötöttük és vizsgáltuk a GTEM cella belsejében a transzformátor, mint PD forrás által generált jeleket. Fontos, hogy a GTEM cella jól árnyékolt legyen a külső zavartatásokkal szemben. Emiatt lemértük a zajfeszültséget a cella nyitott és zárt ajtaja között.



9. ábra: GTEM cella alapzaja az ajtó nyitott és zárt állapotában

Szemmel látható, hogy az ajtó nyitott állapotában az alapzaj körülbelül négyszer nagyobb volt, mint zárt állapotban ($4 \text{ mV} - 521 \text{ µV}$).



10. ábra: Mérési elrendezés

A különböző elektródokat a cellába helyezve minden alkalommal a bekapcsolás előtt megmértük a zajszintet és egy ezen zajszint feletti értéket állítottunk be az oszcilloszkópon triggerelési szintnek. A triggeret „Single” üzemmódba állítva egy impulzus beérkezésekor (amely a triggerelési szintet átlépte) a mintavételezés megállt, lehetőséget adva a kapott jel további elemzésére. A jobb jel-zaj viszonyú spektrum érdekében a mintavételezett jelen átlagolást végeztünk. Az oszcilloszkóp 1 GHz-ig tud pontos adatot szolgáltatni és bár előlött is képes az eredmények kijelzésére, az analóg sáv szélesség csillapítja a jeleket. Ezért a spektrumban megjelenített frekvenciasáv közepe 500 MHz és osztásközönként 100 MHz a felbontása. Így végeredményben a spektrumot 0 és 1 GHz között vizsgáltuk.

2.3 Eredmények kiértékelése

Az eredményeket a későbbi könnyebb feldolgozhatóság miatt nem csak képként, hanem tejes adatsorként is elmentettük. Az oszcilloszkóp az eredményeket dBm¹¹-ben közli, amelyet az alábbi képlet segítségével könnyedén át tudunk számolni pW-ba.

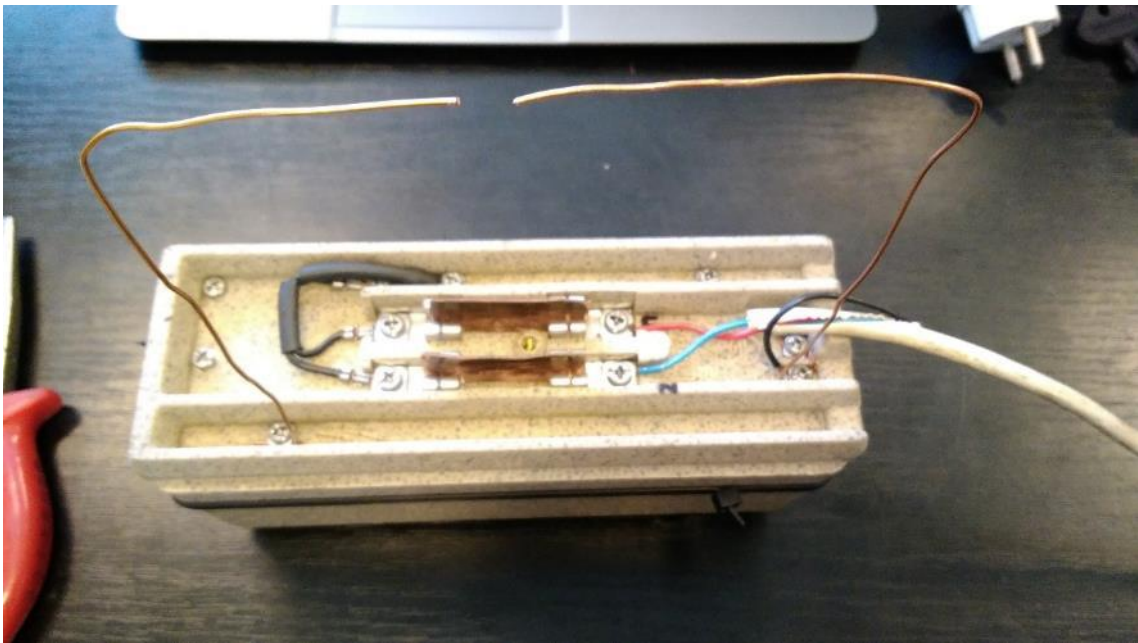
¹¹ dBm: 1 mW jelteljesítményhez decibel skálán viszonyított teljesítményérték

$$P [W] = 1W * 10^{\frac{P[dBm]}{10}} / 1000$$

Fontos kiemelni, hogy az elrendezésekre feszültséget kapcsolva nem keletkezett az elektródok között teljes átütés, hiszen a részkisülések spektrumának meghatározása volt a célunk.

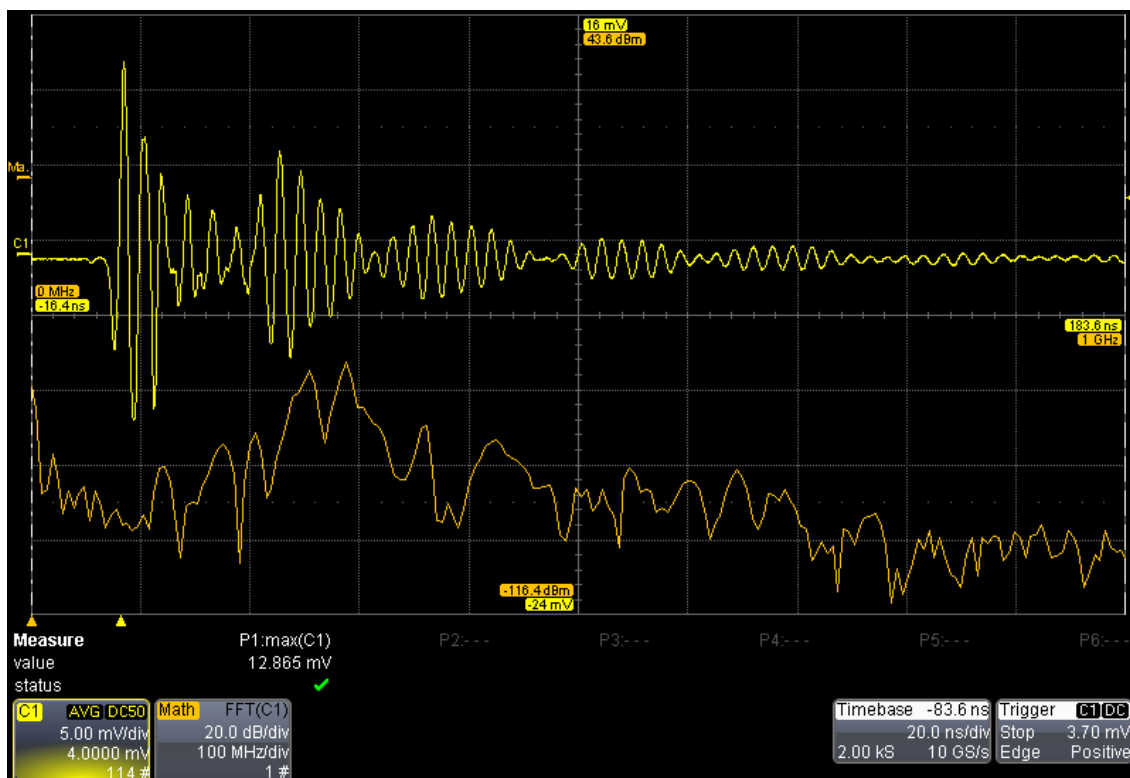
2.3.1 Csúcs – csúcs elrendezés

Először egy tipikus koronajelenséget produkáló elrendezést mértünk meg.



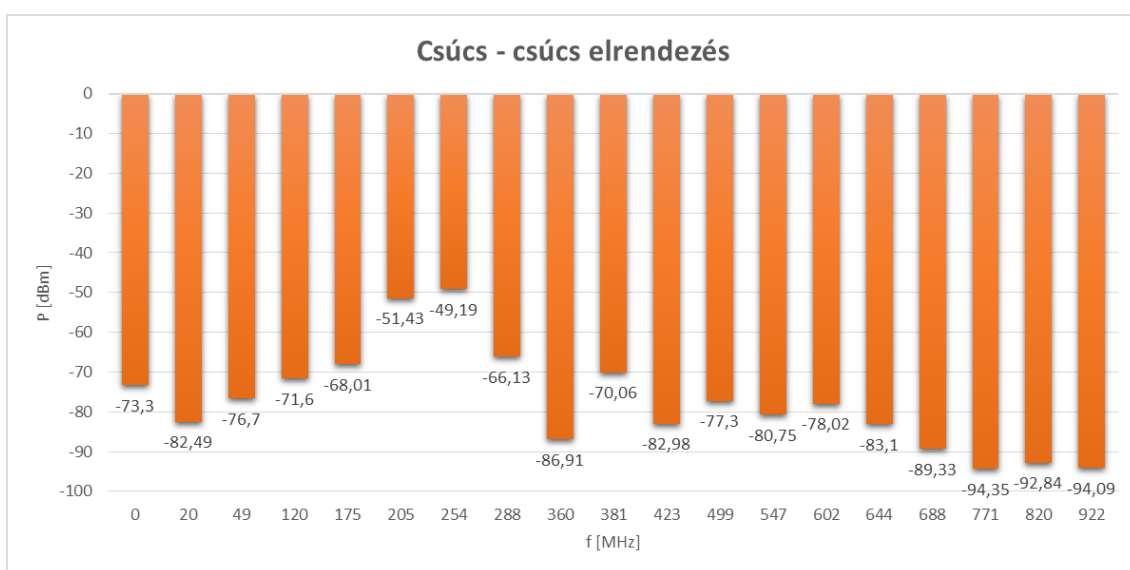
11. ábra: Csúcs – csúcs elrendezés

A fenti ábrán látható a körülbelül 3 kV-os transzformátor, melynek kivezetésére és földpontjára egy-egy rézdrótot erősítettünk. A két rézdrót végeit egymáshoz közelítve egy koronaelektrod-párt alakítottunk ki, ezen végeztük el a GTEM cellás vizsgálatot először.



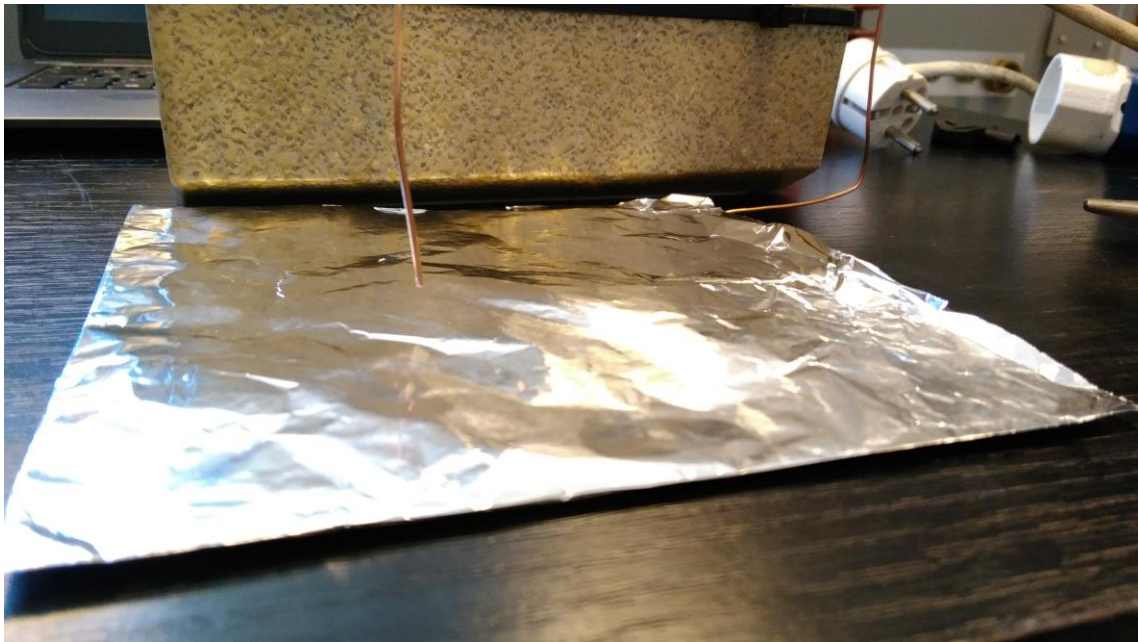
12. ábra: Korona jelalak és spektrum csúcs – csúcs elrendezés során

A spektrumban kimagasló értékeket a kimentett fileből vizsgáltuk meg, ez alapján diagramon ábrázoltuk a 0 – 1 GHz közötti frekvenciaösszetevők teljesítményét. Az eredmények megjelenítése dBm mértékben azért praktikus, mert az értékek egymáshoz viszonyítva egy nagyságrenden belül vannak, míg ha teljesítményben (célszerűen pW) ábrázolnánk, akkor az egyes összetevők között akár 1000-szeres teljesítményeltérés is lehetne.



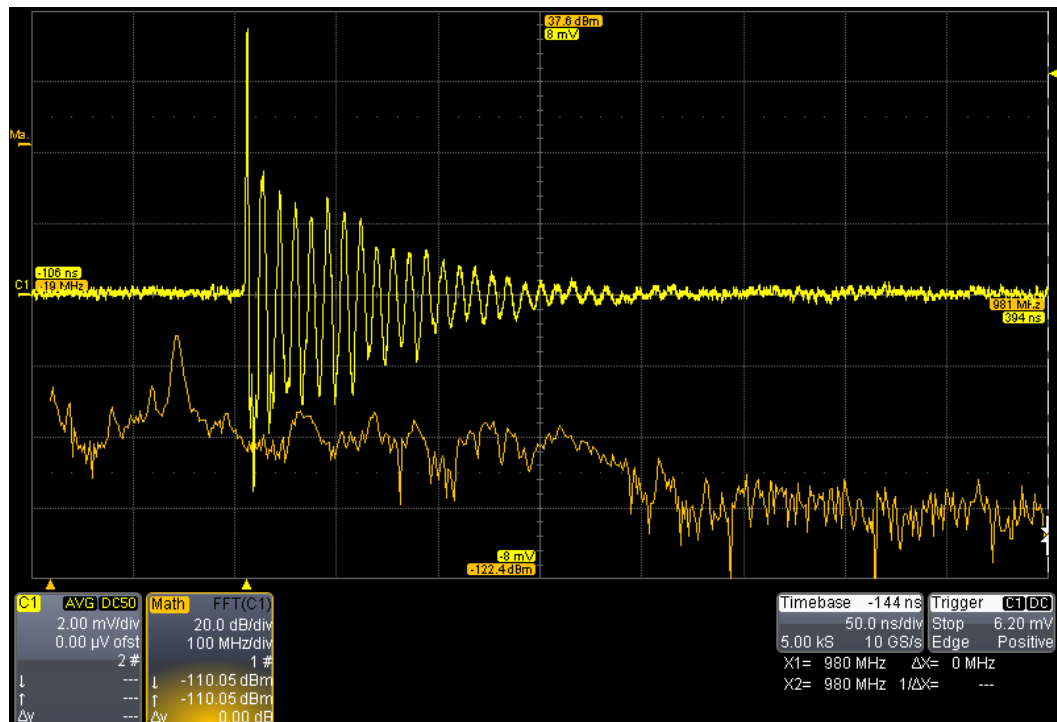
13. ábra: Csúcs – csúcs elrendezés eredményei

2.3.2 Csúcs – sík elrendezés

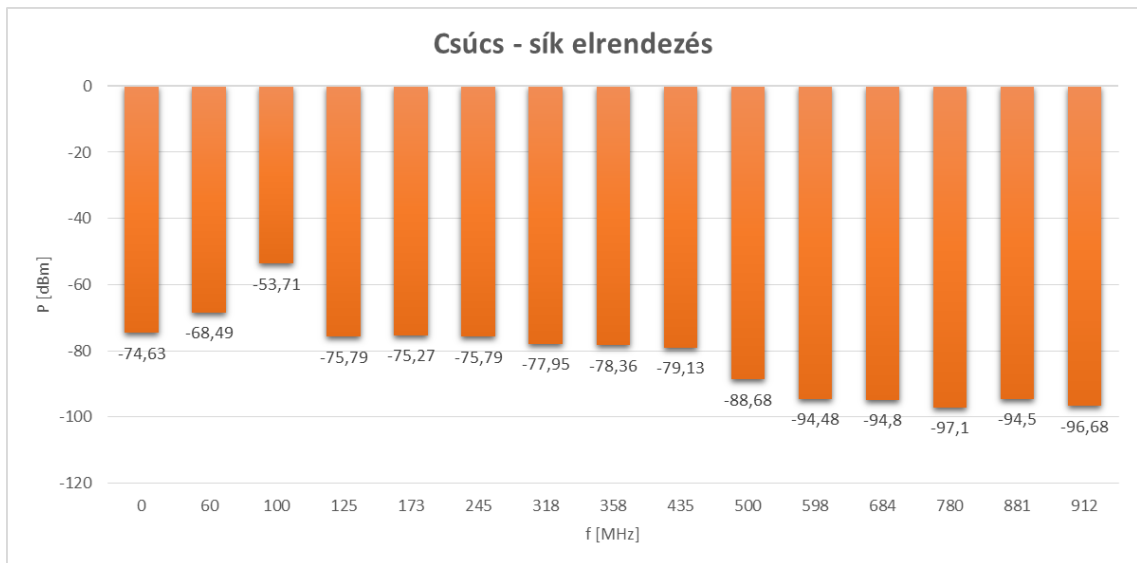


14. ábra: Csúcs – sík elrendezés

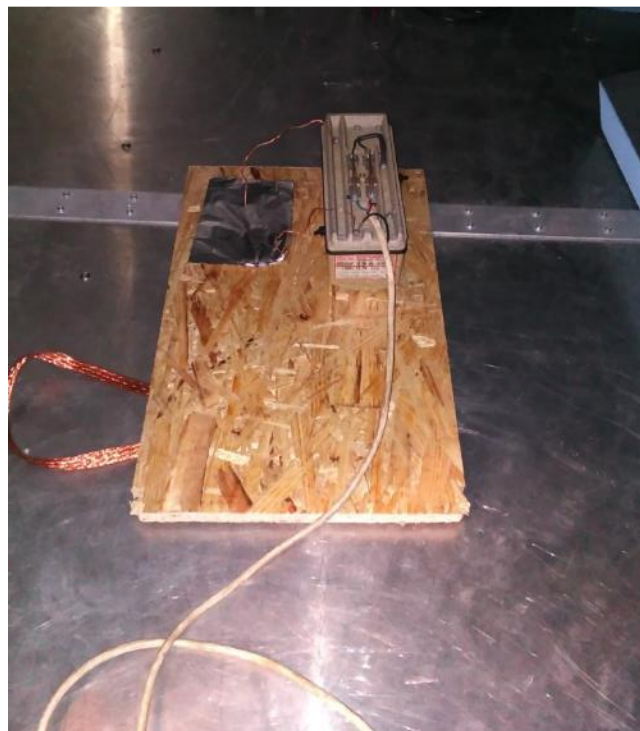
Ebben az esetben egy földelt fémlap (alufólia) alkotta a síkelektrodot. Előzetes feltételezéseink szerint az eredményeknek valamelyest különbözőnek kell lennie az elrendezések közötti különbség miatt. A síkelektrod mérete úgy lett kialakítva, hogy a csúcslektrod szempontjából gyakorlatilag végtelen kiterjedésűnek tekinthető.



15. ábra: Korona jelalak és spektrum csúcs – sík elrendezés során



16. ábra: Csúcs – sík elrendezés eredményei



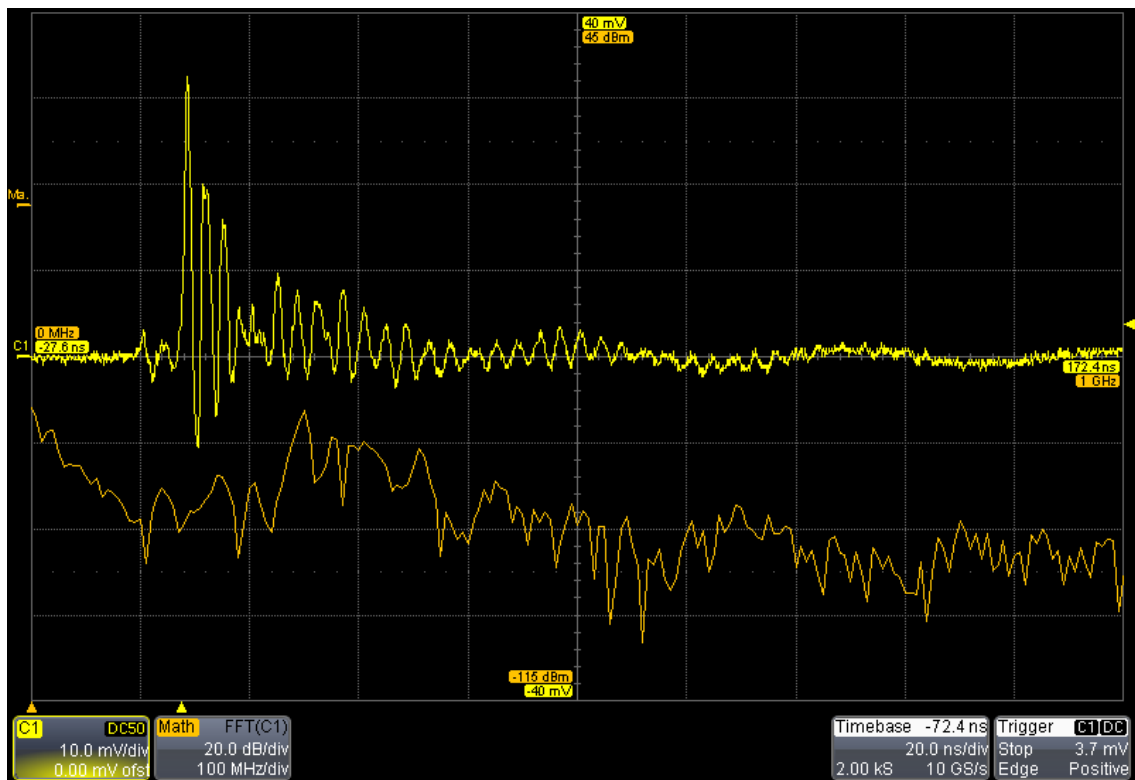
17. ábra: Csúcs – sík elrendezés a GTEM cellában

2.3.3 U-elektrod – sík elrendezés

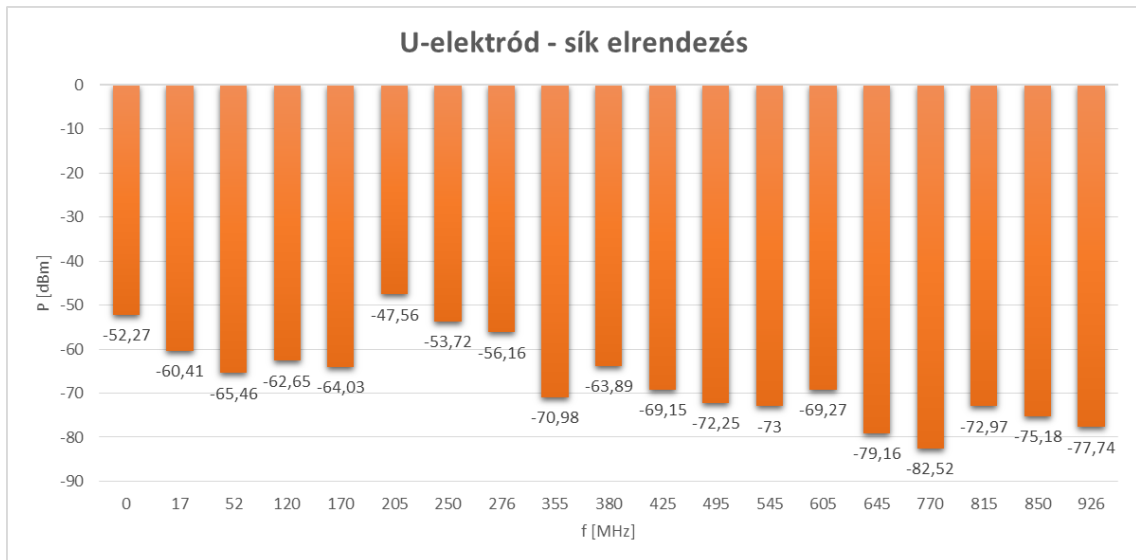
A transzformátor tekercskivezetésére kapcsolt csúcselektrodod U-elektrodra cseréltük és így is megvizsgáltuk a spektrumot.



18. ábra: U-elektrod – sík elrendezés



19. ábra: Korona jelalak és spektrum U-elektrod – sík elrendezés során

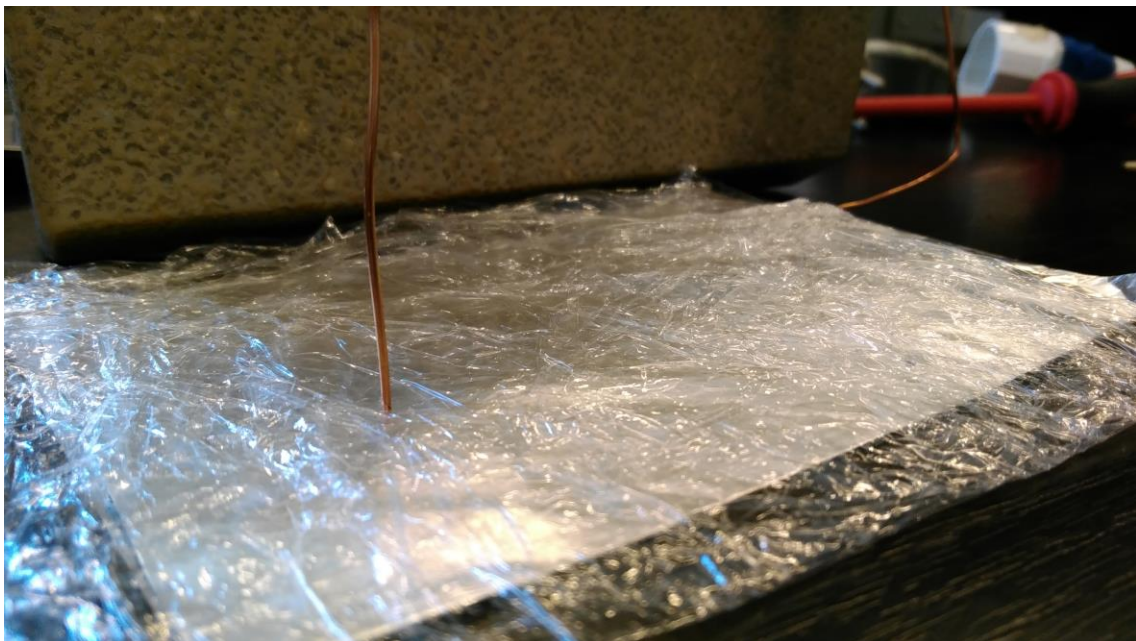


20. ábra: U-elektrod – sík elrendezés eredményei

2.3.4 Csúcs – szigetelt sík elrendezés

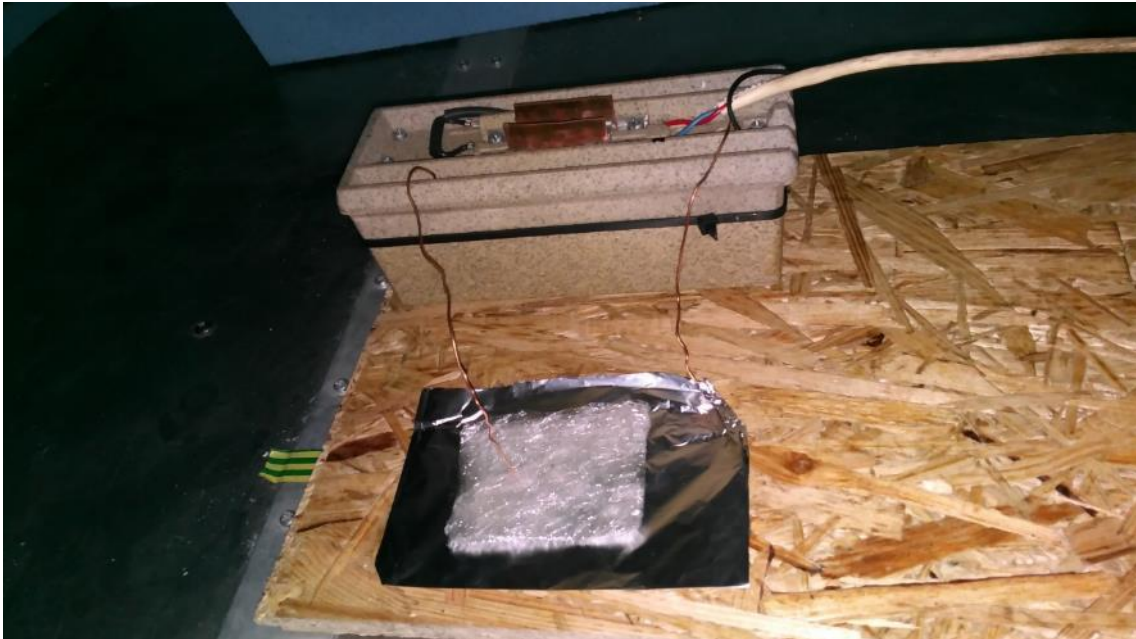
Az eddigi elrendezések a részkisülések közül a koronakisülésre fókuszáltak. Szerettük volna egy belső üregkisülés spektrumát is megvizsgálni. Egy csomagoló fólia (folpack) darabot több rétegbe hajtogatva, így közötté mesterségesen levegővel telt üregeket létrehozva egy zárványos szilárd szigetelődarabot szimuláltunk. Ezt a darabot helyeztük különféle elektrodok közé továbbra is figyelve arra, hogy ne keletkezzen teljes átütés.

Első esetben egy csúcs – sík elrendezésben a földelt fémlemez felé helyeztük a szigetelőt és a csúcselektrodot fentről hozzáértettük.



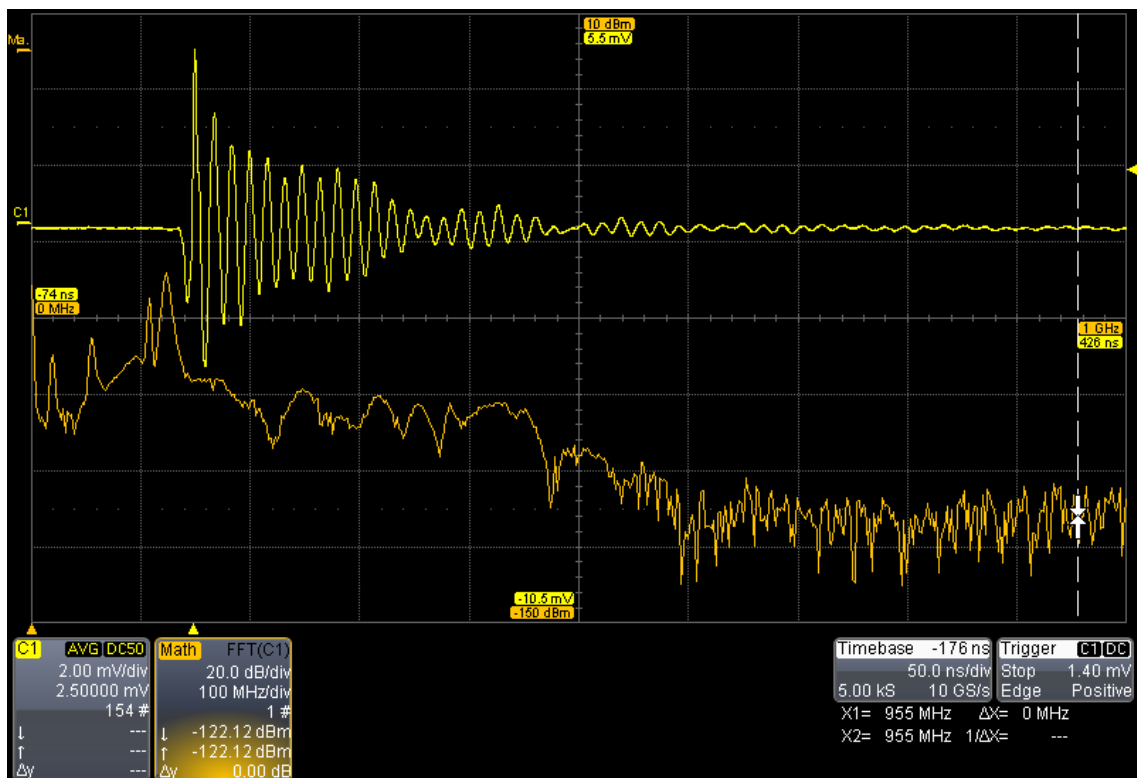
21. ábra: Csúcs – sík elrendezés, az elektrodok közötti szigetelőanyaggal

A két elektród közötti elektromos térben most szilárd és gáz szigetelőanyag is elhelyezkedett.

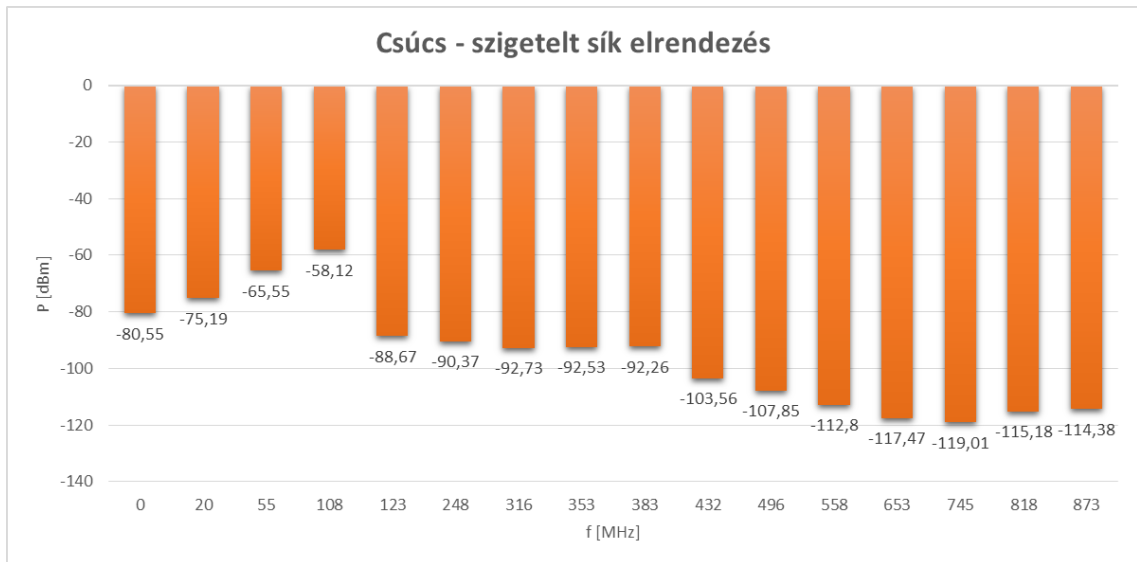


22. ábra: Szigetelőanyaggal ellátott csúcs – sík elrendezés a GTEM cellában

Mivel a levegő permittivitása sokkal kisebb, mint a fóliáé, ezért a levegőbuborékokban kezdtek el kialakulni a részkisülések.



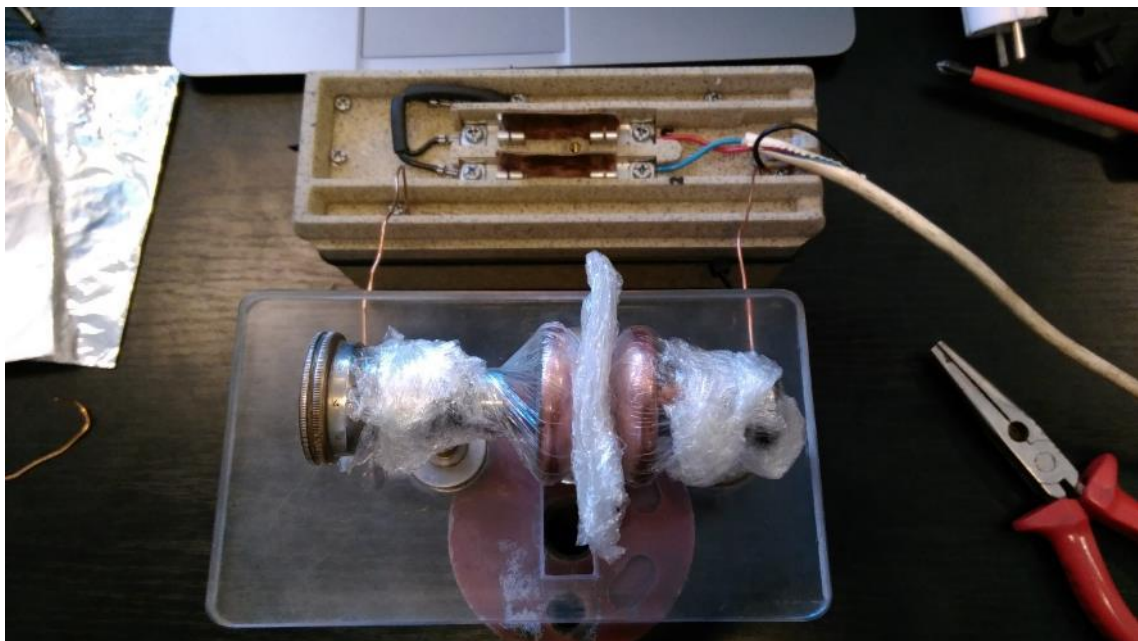
23. ábra: Korona jelalak és spektrum csúcs – szigetelt sík elrendezés esetén



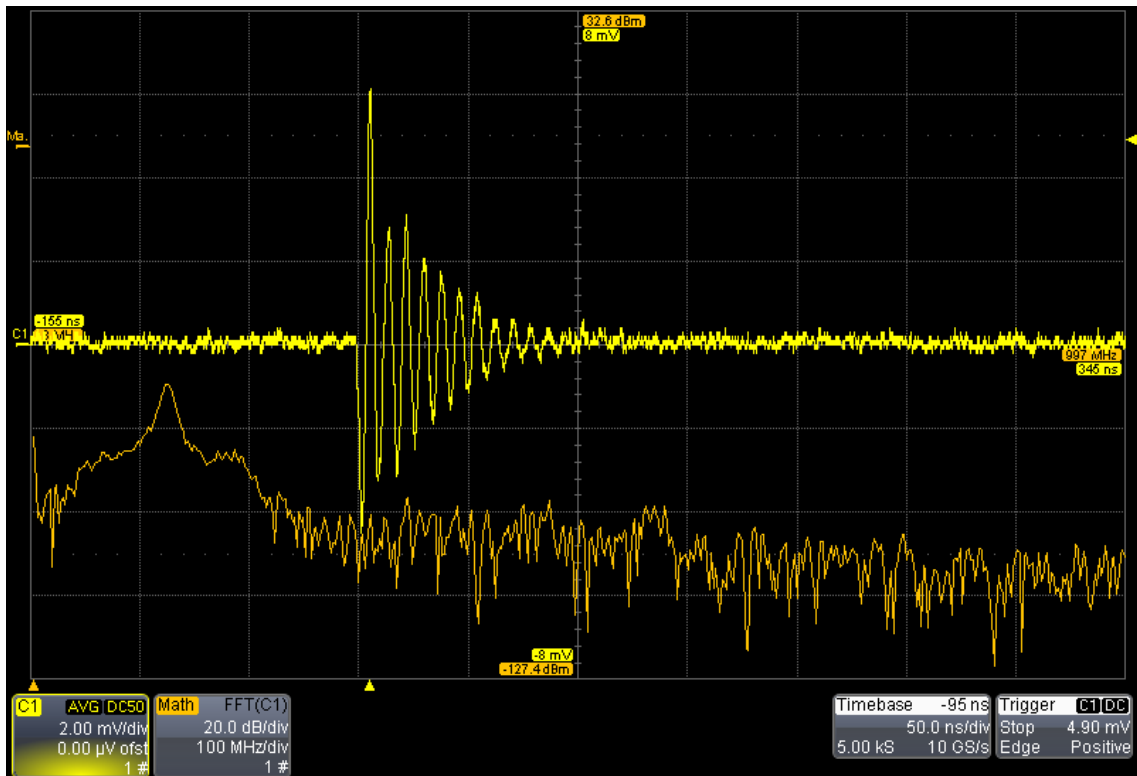
24. ábra: Szigetelővel ellátott csúcs – sík elrendezés eredményei

2.3.5 Fémgömbök, köztük szigetelő elhelyezve

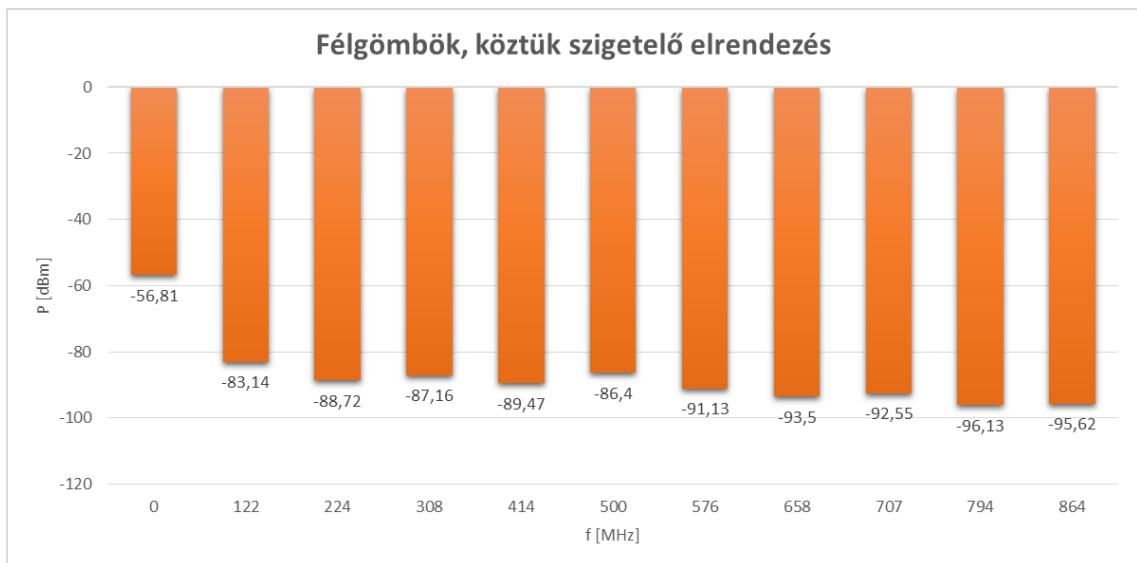
Ezen mérési elrendezés során két félgömb-elektrod (mérés szempontjából tekinthető gömbelektrodnak) közé helyeztük az előző elrendezés során megismert fóliadarabot (új mintát). a két elektród közül az egyik fix, a másik mikrométer pontossággal állítható, így a szigetelőanyagot a két elektród közé szoríthattuk. A két félgömböt ugyancsak beburkoltuk ugyanazon anyagból készült fóliával, hogy az esetleges más terjedési útvonalak számát lecsökkentsük.



25. ábra: Fémgömbök közötti szigetelőanyag mérési elrendezése



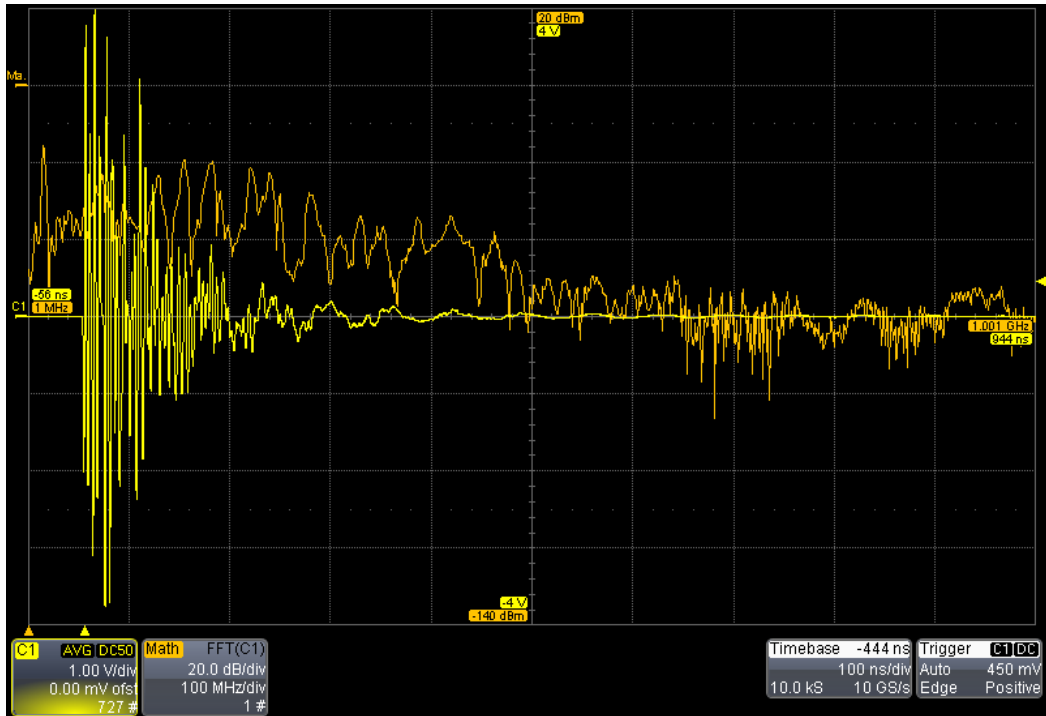
26. ábra: Korona jelalak és spektrum fémgömbök között elhelyezett szigetelő elrendezés esetén



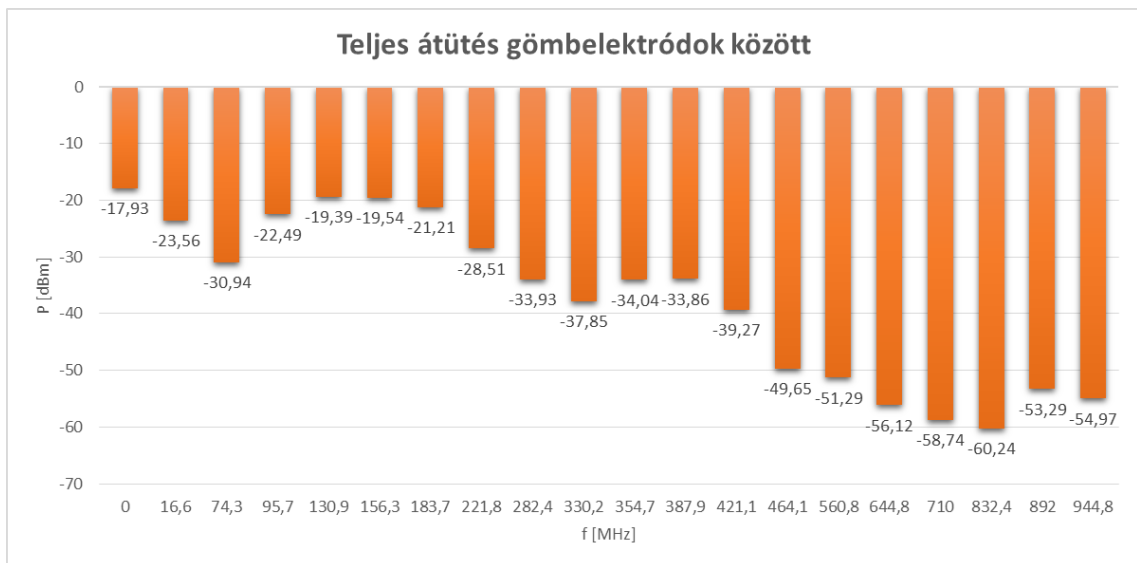
27. ábra: Gömbelektródok közötti szigetelőanyag elrendezés eredményei

2.3.6 Teljes átütés gömbelektródok között

Végül összehasonlítási alapként egy teljes átütést is megvizsgáltunk a GTEM cella segítségével. Az eredmények alább láthatók:



28. ábra: Teljes átütés jelelek és spektrum



29. ábra: Teljes átütés eredményei

2.3.7 Eredmények összehasonlítása

Minden elrendezés esetén általánosan elmondható, hogy a jelszintek a megszokotthoz képest nagyon kicsinek bizonyulnak, az alábbi táblázat bemutat néhány dBm és nW közötti átváltást viszonyítási alapul:

P (dBm)	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
P (nW)	1000	100	10	1	0,1	0,01	0,001	0,0001

Látható, hogy a korábbi oszlopdigramokon ábrázolt értékek a nW – pW nagyságrendbe esnek, de ez nem meglepő, hiszen nem egy galvanikusan csatlakoztatott jel teljesítményét mértük, hanem egy eleve kis teljesítményű részkisülést vizsgáltunk és a környező levegőbe kisugárzott elektromágneses hullámok összetevőinek teljesítményét mértük.

Megfigyelhető továbbá, hogy a teljes kisülés minden frekvencián nagyobb teljesítményű elektromágneses hullámokat gerjeszt. Az első három esetben (csúcs – csúcs, csúcs – sík, U-elektrod – sík) a legnagyobb teljesítményű összetevő más-más frekvenciákon helyezkedett el, azonban értéke -45 – 50 dBm között változott. Általánosan elmondható, hogy körülbelül 500 MHz felett a jelszint minden esetben nagyon kicsi, az összetevők teljesítménytartalma itt már elhanyagolható és a frekvencia tovább növekedésével sem lesz már nagyobb teljesítményű összetevő. Ez alatt a határfrekvencia alatt azonban az összetevők teljesítmény-eloszlása változó.

Abban a két esetben, amikor belső üregkisülést szimuláltunk, az összetevők teljesítményszintje általánosan 10-20 dBm-mel kisebb volt, így a határfrekvencia is lejjebb tolódott körülbelül 300 MHz-re.

2.4 Tovább lépési lehetőségek

Az eredményekből jól látható, hogy a határfrekvencia alatt a teljesítmény-eloszlás nem egyértelmű és általános a különböző elektródelrendezésekre. Ebben valószínűleg közrejátszik a mérőműszerek pontatlansága is. A jövőben egy olyan elektródelrendezést szeretnénk megvizsgálni, amely hasonlít a transzformátorokban található potenciálon lévő részekre, esetleg egy konkrét tekercselés darabot is elhelyezhetünk feszültségre kapcsolva a GTEM cella belsejébe. Valószínűsíthető, hogy a valóságban nem csak a részkisülés által gerjesztett elektromágneses hullámok detektálhatók, hanem a tekercsekben folyó áramimpulzusok által keltett tér is.

Eszközoldalon továbbfejlesztési lehetőséget jelenthet pontosabb mérőműszerek alkalmazása, ebben az irányban is vannak terveink.

3 Szigetelőolajok frekvenciafüggő viselkedése

Ebben a fejezetben ismertetjük a részkisülések terjedésének fizikáját, a terjedést befolyásoló tényezőket, a permittivitás meghatározásához szükséges elméleti alapokat, valamint a tervezett mérési összeállítást. A dolgozat ezen fejezete a leadási határidőig még nem teljes, az elkövetkező pár hónap során készülünk el a valós mérésekkel és az eredmények kiértékelésével. A dolgozat ezen fejezetében továbbá betekintést adunk a kutatás jövőbeni kifizetésébe, bemutatjuk, hogy milyen kapcsolódó jövőbeni kutatások lehetségesek. Alapvetően méréseink a részkisülések helyének pontosabb meghatározására irányultak, ennek elősegítésére végeztük a dolgozat előző fejezeteiben leírt munkánkat.

3.1 Jelterjedés transzformátorolajban

A levegőbeni jelterjedést leíró egyenletek homogén közegben viszonylag egyszerűnek mondhatók, azonban esetünkben az alapösszefüggések több paraméter szempontjából is bonyolultabbá válnak. A terjedést legegyszerűbben a távíróegyenletekből kiindulva lehet leírni [14]:

$$U(x) = U_0^+ e^{i(\omega t + kx)} + U_0^- e^{i(\omega t - kx)}$$
$$I(x) = \frac{U_0^+}{Z_0} e^{i(\omega t + kx)} - \frac{U_0^-}{Z_0} e^{i(\omega t - kx)}$$

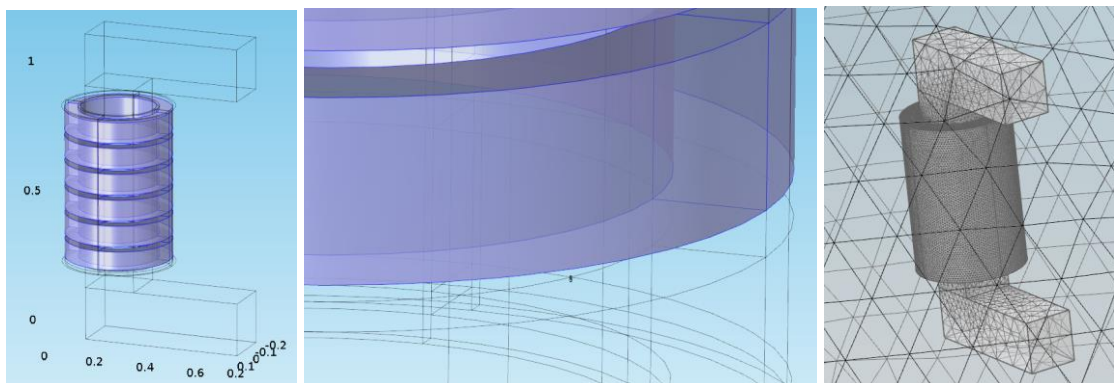
A távíróegyenletekből, illetve a közegek hullámimpedanciájából (Z_0) lehet származtatni a reflexiós tényezőt, amelynek meghatározása a valós mérések előtt szintén fontos feladatunk [15].

A levegőben, illetve a transzformátorolajban történő jelterjedés közötti fő különbséget a permittivitás adja. Az olaj relatív permittivitása ugyanis nem egyenlő 1-gyel, így az egyenletekben is megjelenik mint jelterjedési sebességet és jelszinteket befolyásoló tényező (például a jelterjedési sebessége fordítottan arányos a relatív permittivitás gyökével). További bonyodalmakat okoz az is, hogy az olaj permittivitásának valós és képzetes része is frekvenciafüggő, így a részkisülések egyes összetevői más-más terjedési tulajdonságokkal (különböző terjedési idő, jelszint) bírnak. Dolgozatunk ezen részének célja pontosan az, hogy különböző típusú transzformátorolajoknak meghatározzuk a

komplex permittivitását, elősegítve ezzel a folyékony szigetelőanyagokban történő jelterjedés pontosabb leírását.

A transzformátorban történő jelterjedés szimulálására egy végelem szimulációt végeztünk. Az egyszerűsített modellben található egy fázistekercs (a primer- és szekunder tekercsek osztott tekercselése), a transzformátor vasmagja, a tekercsek közötti térrészt kitöltő szigetelőanyag, illetve egy mesterséges részkisülés-forrás. A modell a szoftverben megépítésre került, segítségével a jövőben a végelem módszer felhasználásával számítógépen szeretnénk szimulálni a részkisülés hatására kialakuló elektromágneses teret a tekercselés környezetében, és szeretnénk megvizsgálni, hogy mely pontokon találhatóak a legnagyobb térerősségű részek.

A 2.4 fejezetben leírt további GTEM cellában történő vizsgálatokat egy miénkhez hasonló végelem szimuláció a valós mérések előtt jól megalapozza.



30. ábra: A végelem szimulációhoz megépített egyszerűsített modell

3.2 Helymeghatározás UHF részkisülmérés segítségével

A legtöbb helyen manapság a részkisülés mérést mint diagnosztikai módszert csak detektálásra használják. Ebben a formájában a módszer a mai technológiákkal már kellő pontossággal és megbízhatósággal alkalmazható. Alállomási környezetben ha például egy transzformátorban, mérőváltóban, megszakítóban, stb. jelentős részkisülés jelenséget tapasztalnak, akkor az eszközt tovább üzemeltetni nem üzembiztos. Transzformátorok esetén kiemelten fontos komolyan venni az efféle veszélyeket, hiszen mint a bevezetőben is említettük, nagyon drága berendezésekről van szó. A részkisülmérés detektálása után a szigetelés valamilyen módon javításra szorul és egy több méteres dimenziókkal rendelkező transzformátor esetén nem biztos, hogy első ránézésre megállapítható, hogy hol volt a részkisülés forrása. Éppen ezért fontos, hogy ne csak a detektálás, hanem a

lokalizálás is megoldott legyen alállomási berendezések során. Egy működő lokalizáló algoritmus segítségével a transzformátorokban például gyorsan megtalálható a hibahely, gyorsabban javítható (például, ha csak egy féltekercset kell kicserélni), és végül gyorsabban újra üzembe helyezhető. Kutatásunk célja pontosan az, hogy a részkiülések frekvenciafüggő természetét, terjedését meghatározva alapot biztosítsunk egy jól működő, pontos lokalizáló algoritmus kifejlesztéséhez.

3.2.1 Problémafelvetés

Az UHF részkiülés méréssel történő helymeghatározás több nehézséget is támaszt elénk. Korábban említettük, hogy transzformátorok esetében a terjedés szigetelő olajban történik, melynek a komplex permittivitása frekvenciafüggő, így a részkiülések által kibocsátott elektromágneses hullámok egyes összetevői más-más paraméterek szerint terjednek. Ha igazán pontos (centiméteres pontosságú) helymeghatározást szeretnénk végezni, akkor a frekvenciafüggéssel számolni kell az algoritmusban. Egy frekvenciafüggést figyelmen kívül hagyó, egyszerűbb algoritmus egy-két nagyságrenddel pontatlanabb lokalizálást tesz lehetővé (gyakorlatilag maximum a hibás fázis meghatározására alkalmas). További problémát jelenthet, hogy alállomási környezetben rengeteg zavartatás jellemző, így jól működő zavarcsökkentési eljárásokra is szükség van a tényleges megvalósítás során.

3.2.2 Helymeghatározási módszerek

Nemzetközi szakirodalmakban sokféle módszer megjelenik részkiülések lokalizálására. A háromszögelés elve a GPS-ekhez hasonló helymeghatározást jelent. A több antenna segítségével vett jelet zavarcsökkentés után megvizsgáljuk a köztük lévő időkülönbségek szempontjából. Fontos, hogy az antennák egymáshoz viszonyított helyzete jól ismert legyen, illetve buktató lehet, ha az antennáktól a feldolgozó egységig a jelterjedési idők különböznek, ezért először validációs mérésekre van szükség [16]. Ezen módszeren alapuló algoritmusokban a részkiülés helyének meghatározására különböző iteratív (Standard Least Squares [17], Hyperbolic Least Squares [18], Maximum Likelihood becslés [19]) és nem iteratív módszerek (Pattern recognition [20], Bancroft algoritmus [21]) lehetségesek.

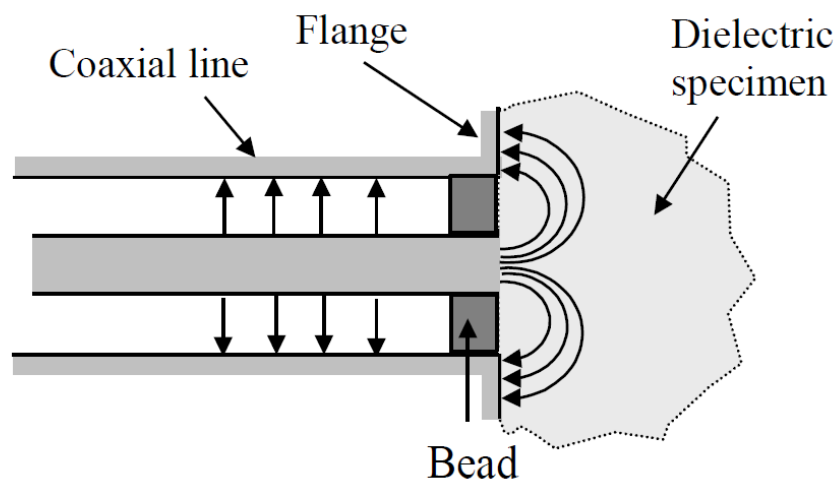
A pontosságot sok tényező befolyásolhatja, például az eszközök mintavételezési képessége, jó helymeghatározó algoritmus választása [17], különböző külső zajszintek

[18], antennák karakterisztikája és elhelyezkedése, antennák száma [22], antennák egymáshoz viszonyított helyzetének mérési hibája.

3.3 Mérési elrendezés permittivitás meghatározására

A nemzetközi szakirodalomban sok esettanulmány fellelhető komplex permittivitás mérésére. A legtöbb példában az időtartománybeli spektroszkópia segítségével vizsgálták a szigetelőmintákat [25][26][27]. Egyes forrásokban nagyon széles sávban (100 kHz – 25 MHz) kiviteleztek a mérést, más esetekben pedig inkább kisebb frekvenciákon (50 mHz – 100 kHz). Kutatásunkban egy koaxiális elrendezésű mérőcellák alkalmazásával szeretnénk meghatározni a szigetelőminta dielektromos tulajdonságait [28].

A koaxiális elrendezésű mérőcellákat komplex permittivitás meghatározására használják rádiófrekvenciás módszereknél. A mérőcellákba helyezve a dielektrikumot és reflektométerre kötve az elrendezést egy adó-vevő egység különböző frekvenciájú hullámok visszaverődését vizsgálja. Az adott és vett jel adataiból a permittivitás komplex síkon számítható. Fontos, hogy a mérőrendszer referencia szigetelőanyaggal kalibrálva legyen és a mérőcellák gyártása is nagyon nagy pontosságot igényel. A bizonytalanságok becslésére a Monte Carlo módszer használható.



31. ábra: Koaxiális elrendezésű mérőcella [28]

A tervezett elrendezés a fenti ábrán látható: a végén nyitott koaxiális vonal (Coaxial line) végén karima található (Flange), amely jobb terjedési tulajdonságokat eredményez. Az ábrán nyilakkal jelölték a becsült erővonalakat. A szigetelőminta (Dielectric specimen)

bejutását a koaxiális vonalba egy szigetelő dugó (Bead) akadályozza meg. A dugó méretre vágásával pontosan beállítható a lezáró impedancia, illetve a vonal kapacitása is. A szenzor érzékenysége a méretétől függ, így több méretben is érdemes a vizsgálatokat elvégezni. Minél nagyobb frekvencián szeretnénk pontos méréseket végezni, a szenzorméret annál kisebb [28].

3.4 Továbblépési lehetőségek

A szigetelőanyagok frekvenciafüggő viselkedésével kapcsolatos kutatásunkat mindenképpen szeretnénk a jövőben befejezni és különböző típusú ásványi- és természetes alapú transzformátorolajokra meghatározni a permittivitás valós és képzetes részének frekvenciafüggését. Szeretnénk speciális mérőcellákat szimulálni és gyártani és ezekben elvégezni a fent említett méréseket. A 2 és 3 fejezetekben leírtaknak megfelelően kutatásaink jó kiindulási alapnak számíthatnak egy pontosabb részkisülés helymeghatározási módszer kifejlesztésében.

1 Ábrajegyzék

1. ábra: Az energiaátvitel modellje [1]	5
2. ábra: Olaj-papír szigetelés károsodása menetzárlat után [9]	7
3. ábra: Buchholz-relé egyszerűsített keresztmetszeti rajza [10]	9
4. ábra: Visszatérő feszültség tipikus időfüggvénye [11]	12
5. ábra: UHF és más részkiülésmérési módszerek összehasonlítása [12]	15
6. ábra: Részkiülések helyének meghatározása a háromszögelés elvével [12].....	16
7. ábra: A GTEM cella keresztmetszeti rajza	17
8. ábra: Mérési összeállítás	19
9. ábra: GTEM cella alapzaja az ajtó nyitott és zárt állapotában	19
10. ábra: Mérési elrendezés.....	20
11. ábra: Csúcs – csúcs elrendezés	21
12. ábra: Korona jelalak és spektrum csúcs – csúcs elrendezés során	22
13. ábra: Csúcs – csúcs elrendezés eredményei	22
14. ábra: Csúcs – sík elrendezés.....	23
15. ábra: Korona jelalak és spektrum csúcs – sík elrendezés során.....	23
16. ábra: Csúcs – sík elrendezés eredményei	24
17. ábra: Csúcs – sík elrendezés a GTEM cellában	24
18. ábra: U-elektrod – sík elrendezés	25
19. ábra: Korona jelalak és spektrum U-elektrod – sík elrendezés során.....	25
20. ábra: U-elektrod – sík elrendezés eredményei	26
21. ábra: Csúcs – sík elrendezés, az elektrodok közötti szigetelőanyaggal.....	26
22. ábra: Szigetelőanyaggal ellátott csúcs – sík elrendezés a GTEM cellában.....	27
23. ábra: Korona jelalak és spektrum csúcs – szigetelt sík elrendezés esetén	27
24. ábra: Szigetelővel ellátott csúcs – sík elrendezés eredményei	28
25. ábra: Fémgömbök közötti szigetelőanyag mérési elrendezése	28
26. ábra: Korona jelalak és spektrum fémgömbök között elhelyezett szigetelő elrendezés esetén	29
27. ábra: Gömbelektrodok közötti szigetelőanyag elrendezés eredményei	29
28. ábra: Teljes átütés jelelak és spektrum.....	30
29. ábra: Teljes átütés eredményei.....	30
30. ábra: A végeelem szimulációhoz megépített egyszerűsített modell.....	33
31. ábra: Koaxiális elrendezésű mérőcella [28]	35

2 Irodalomjegyzék

- [1] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/41/Electricity_grid_simple-North_America.svg/1280px-Electricity_grid_simple-North_America.svg.png, 2017.10.22.
- [2] *Veres D., Cselkó R.*: UHF részkiülésmérés speciális kérdései, TDK 2016.
- [3] *Csépes G.*: Villamos főberendezések üzembiztonságának egyszerű és gazdaságos növelése a szigetelések állapotellenőrzésével, a diagnosztika sajátosságai és legújabb eredményei, Balatonfüred, 2011.
- [4] *Luspay Ö.*: Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata, Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete, Budapest, 2000.
- [5] BME Villamos szigetelések és kisülések tárgy ([VIVEMA14](#)) előadásai
- [6] *Németh E., Horváth T.*: Nagyfeszültségű szigeteléstechnika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
- [7] *Császár M., Cservenyák T., Ónodi T., Orosz J., Rácz I., Ráski G.*: Villamos szigeteléstechnika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.
- [8] *Dr. Horváth T., László T., Dr. Máthé B., Németh E.*: Villamos szigetelések vizsgálata, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979
- [9] <http://oilregeneration.globecore.com/wp-content/uploads/sites/10/2016/05/u2-1.jpg>, 2017.10.22.
- [10] <http://globecore.com/wp-content/uploads/2015/08/Figure-33-%E2%80%93-Buchholz-Relay-Section-1024x626.jpg>, 2017.10.22.
- [11] http://www.insulationdiagnostics.com/index.php?page=item&item_id=116&lang=HU, 2017.10.22.
- [12] Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods, Working Group D1.37, 2016
- [13] BME Épületvillamosság laboratórium tárgy ([VIVEMB02](#)) Fényforrások EMC vizsgálata GTEM cellával című mérési útmutatója
- [14] http://fizipedia.bme.hu/images/a/a2/RF_labor_ver3.pdf, 2017.10.22.
- [15] *Tóth Z., Cselkó R.*: Transzformátor diagnosztika UHF részkiülések segítségével, 2015.
- [16] *B. G. Stewart ; A. Nesbitt ; L. Hall*: Triangulation and 3D location estimation of RFI and Partial Discharge sources within a 400kV substation, IEEE EIC, 2009.

- [17] *O. El Mountassir ; B. G. Stewart ; S. G. McMeekin ; A. Ahmadinia*: Effect of sampling rate on the location accuracy of measurements from radiated RF partial discharges signals, *EEEIC*, 2012.
- [18] *O. El Mountassir ; B. G. Stewart ; S. G. McMeekin ; A. Ahmadinia*: Evaluation of an iterative method used for partial discharge RF location techniques, *EEEIC*, 2011.
- [19] *Y.T. Chan ; K.C. Ho*: A simple and efficient estimator for hyperbolic location, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994.
- [20] *Y. Lu ; X. Tan ; X. Hu*: PD detection and localisation by acoustic measurements in an oil-filled transformer, *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 2000.
- [21] *O. El Mountassir ; B. G. Stewart ; A. J. Reid ; S. G. McMeekin*: Quantification of the performance of iterative and non-iterative computational methods of locating partial discharges using RF measurement techniques, *Electric Power Systems Research*, February 2017.
- [22] *S. Zheng ; C. Li ; Z. Tang ; W. Chang ; R. Lu ; W. He ; Y. Jiang*: The study on the arrangement of UWB RF sensor-array for the PD location in transformers, *ICHVE*, 2010.
- [23] *S. Tenbohlen, D. Denissov, S. M. Hoek, S. M. Markalous*: Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008.
- [24] *S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl*: Sensitivity of UHF PD Measurements in Power Transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008.
- [25] *R. Nozaki, Tapan K. Bose*: Broadband Complex Permittivity Measurements by Time-Domain Spectroscopy, *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, 1990.
- [26] *J. Ulrich, M. Svoboda, R. Polansky, J. Phiera*: Dielectric analysis of vegetable and mineral oils, *IEEE ICDL*, 2014.
- [27] *Y. Zhou, M. Hao, G. Chen, P. Jarman, G. Wilson*: A New Approach to Understanding the Frequency Response of Mineral Oil, *IEEE ICDL*, 2014.
- [28] *A. P. Gregory, R. N. Clarke*: Dielectric metrology with coaxial sensors, *Measurement Science and Technology*, March 2007.