



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

Veres Dániel

F5FGQW

UHF részkiülésmérés speciális kérdései

TDK dolgozat

KONZULENS

Cselkó Richárd

egyetemi tanársegéd

Villamos Energetika Tanszék

Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

BUDAPEST, 2016

Összefoglaló

TDK dolgozatomban az UHF (Ultra High Frequency) tartományban történő részkiülés (PD – partial discharge) mérés különböző speciális problémáit vizsgálom. A munkám kezdetén a részkiülésekhez, azok méréséhez és az alkalmazott berendezésekhez kapcsolódó szakirodalmakat vizsgáltam abból a szempontból, hogy mennyi információt adnak az UHF tartománybeli mérések modellezéséhez. Egyik célom a részkiülések által elsugárzott jel spektrumának meghatározása. Ehhez a BME Villamos Energetika Tanszékén található GTEM cellát használtam, amely kiválóan alkalmas nagyfrekvenciás jelek spektrumának vizsgálatára. A méréssel kapcsolatban egy különleges megoldandó probléma a részkiülések létrejöttéhez szükséges nagyfeszültség bevezetése a cellába úgy, hogy az ne zavarja meg a nagyfrekvenciás mérést.

Munkám másik részében a részkiülések megjelenését vizsgáltam egy valós mérési elrendezésen. Ezt szigetelőolaj-prespán felületén végzett konvencionális részkiülés mérésekkel párhuzamosan végeztem. Kihasználtam, hogy az UHF tartományban több szenzort is lehet alkalmazni (szemben a konvencionális módszerrel). A szenzorokat a szigetelő mintától (ahol a számunkra fontos részkiülések keletkeznek átütés előtt) azonos távolságra, de térben más-más pozícióban helyeztem el. A jelalakok rögzítésével a hozzávezetések létrejövő koronajelenségek a csatornák jeleinek összehasonlításával kiszűrhetők és lehetővé válik a megtisztított jelek vizsgálata.

Hosszú távú célkitűzésem egy olyan szimulációs modellt felépíteni, ami egy valóságos transzformátor tekercselésében végbemenő kiüléseket helyesen képez le. Fenti munkám ennek a modellnek a felépítése felé tesz lépéseket, hiszen ahhoz meg kell, hogy állapítsuk a keletkező kiülések jellemzőit és a terjedés mikéntjét.

Abstract

In my work I examined some unique problems regarding to UHF (Ultra High Frequency) partial discharge (PD) investigation methods. My work started with reviewing high number of references about discharges, methods, equipment and I 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 I used the GTEM cell of the Department of Electric Power Engineering. This equipment is suitable to measure high frequency signals. I had to solve a problem about putting the high voltage into the housing.

My other task was to examine the PD appear in a real measurement adjustment. I did it in line with PD measurements on an oil surface I utilized that in UHF range we can use more sensors than in conventional measurements. I carried out lots of oil measurement with a special specimen setting. I used four UHF sensors to record the signals and I evaluated the results. Considering just the same shapes from the signals I could filter out the corona effect and other disturbing factors. Applying the relevant information, I can determine the exact position of the partial discharge.

In the near future I would like to compare simulated and real results for the partial discharges. In the reality I will use a simple R-C circuit with a gap to generate partial discharges in an unused transformer. I could simulate it in a finite element method software and it is possible to compare the two results. With this method later I could improve the measurement method. The first steps to do a model about the model are written above.

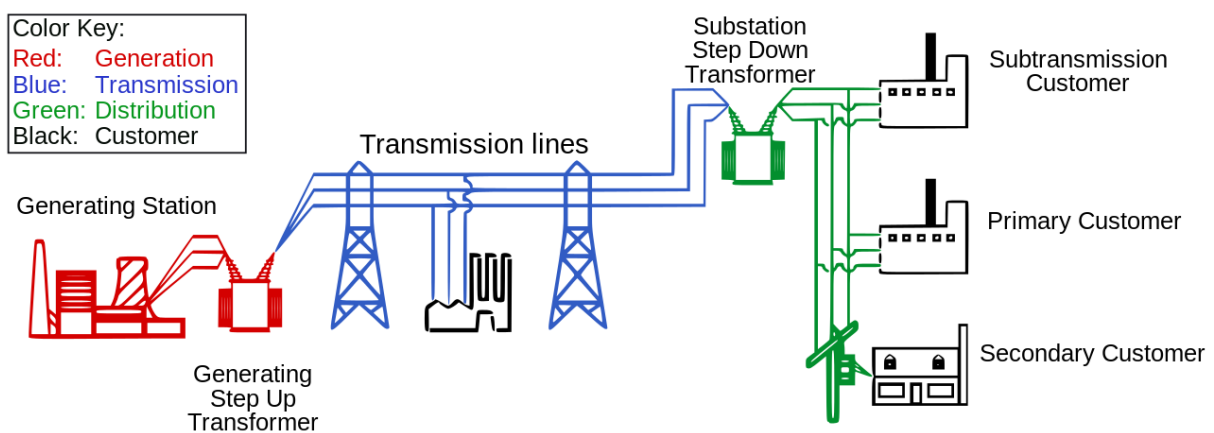
Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| Összefoglaló | 2 |
| Abstract | 3 |
| Tartalomjegyzék | 4 |
| 1 Elméleti áttekintés | 5 |
| 1.1 A téma fontossága [4] [5] | 5 |
| 1.2 Olaj-papír szigetelés sajátossága [6]..... | 6 |
| 1.3 Transzformátordiagnosztikai módszerek [6] | 7 |
| 1.3.1 Olajvizsgálatok..... | 8 |
| 1.3.2 Gázrelében összegyűlt gázok vizsgálata..... | 8 |
| 1.3.3 Olajban oldott gázok vizsgálata (HGA) | 10 |
| 1.3.4 Szigetelési ellenállásmérés..... | 11 |
| 1.3.5 Részleges kisülések típusai és mérése | 11 |
| 1.4 Részkisülések kialakulása folyadékokban [5] [7] [8] [9] | 14 |
| 1.5 Az UHF részkisülésmérés módszertana [10] [11] [12]..... | 15 |
| 1.5.1 Általános ismertető az UHF részkisülésmérésről | 15 |
| 1.5.2 Cikkekben feldolgozott frekvenciatartományok..... | 16 |
| 2 UHF antennák alkalmazása, illetve PD spektrumának meghatározása laboratóriumi környezetben..... | 18 |
| 2.1 UHF antennák alkalmazása részkisülések detektálására [13] | 18 |
| 2.2 GTEM cella alkalmazása részleges kisülés spektrumának meghatározására [14] | 21 |
| 2.2.1 GTEM cella..... | 21 |
| 2.2.2 GTEM cella alkalmazása PD spektrum meghatározására | 22 |
| 3 Rövid- és hosszútávú tervek..... | 26 |
| 4 Ábrajegyzék | 27 |
| 5 Irodalomjegyzék | 28 |

1 Elméleti áttekintés

1.1 A téma fontossága [4] [5]

Az energiatermelési és az energiaátviteli folyamat nagyon komplex, sok összetevője van. Villamos szempontból a legfontosabb, hogy az erőművekben megtermelt villamos energiát el kell juttatni a fogyasztókhoz. Bár egyre nagyobb szerepet kap a decentralizált energiatermelés, még mindig jelentős szerepe van a nagyerőműveknek. Az átviteli lánc legfontosabb elemei a transzformátorok. Az erőművi generátorkapcsokon megjelenő feszültséget többlépcsős feltranszformálás után juttatják az átviteli hálózat nagyfeszültségű távvezetékeire, így csökkentve a hálózati veszteségeket. A folyamat jól végigkövethető az 1. ábra: 1. ábra:ábrán. A piros színnel jelölt energiatermelő rész után nagyfeszültségen szállítják az energiát (kék) az elosztóhálózati alállomásokig, ahonnan kezdve az alállomási nagyfeszültségű/középfeszültségű transzformátorok segítségével az elosztóhálózat feszültségszintjén folytatódik a megtermelt energia elosztása (zöld).



1. ábra: Az energiaátvitel leegyszerűsített modellje [1]

A nagyfeszültségű transzformátorok az átviteli hálózat legdrágább elemei. Ennek oka, hogy a mai elvárásoknak (kis meghibásodási ráta, jó hatásfok, stb.) megfelelő berendezések fejlesztése rengeteg tervezést igényel, valamint felépítéséből és működéséből adódóan a transzformátor nagy mennyiségű fém és szigetelőanyagot (olaj) tartalmaz. Egy ilyen hálózati elem meghibásodása nagy problémát jelent mind az energiaátvitel biztonsága (átrendezésekből adódó túlterhelődés veszélye, n-1 elv megszűnése, stb.) mind a fogyasztók szempontjából. A hibák kiszűrése és a kockázatok elkerülése érdekében szükség van a

transzformátorok folyamatos online és offline diagnosztikájára. A nem távvezetési zárlat hatására fellépő hibák jelentős többségét részkiülések előzik meg. Sok kiforrott diagnosztikai módszer létezik már, amelyet hazánkban is alkalmaznak. Az UHF¹ részkiülésmérés egy olyan online transzformátor-diagnosztikai módszer, amely még a mai modern technológiák mellett is rengeteg kérdést tartogat magában.

1.2 Olaj-papír szigetelés sajátossága [6]

Az nagyfeszültségű transzformátorok szigetelését szilárd és folyékony szigetelőanyagok együttesen, sorosan és párhuzamosan rétegezve alkotják. 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-papírszigetelés szigetelési tulajdonságait, végső soron átütés jön létre.

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 fok², 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 funkcióját. Az átütések ilyen hibák esetén szinte azonnal bekövetkeznek, de kisebb rongálódás esetén is kialakulnak a részkiülések³.

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.

¹ UHF (Ultra High Frequency): a 300 MHz – 3 GHz közötti frekvenciatartomány

² Polimerizációs fok: adott anyag láncmolekuláinak átlagos hosszát jellemző szám. Papír esetén kezdetben ez 1200-1300, míg 250 esetén már a papír elveszti mechanikai szilárdságát.

³ Részkiülés, részleges kiülés, részletörés: partial discharge (PD)



2. ábra: Transzformátor tekercselésének károsodása [2]

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 a korábbiakban 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 erőter 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.

1.3 Transzformátordiagnosztikai módszerek [6]

A transzformátordiagnosztika területén napjainkban már elvárás az on-line monitorozás. A drága berendezések szükségessé teszik, hogy minél előbb, minél gyorsabban és minél több

adatot gyűjtünk az öregedő berendezésekről. Emellett fontos a jelenlegi állapot ellenőrzése is, ennek minél pontosabb becslése, amelyen egy gazdaságos karbantartási és 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.

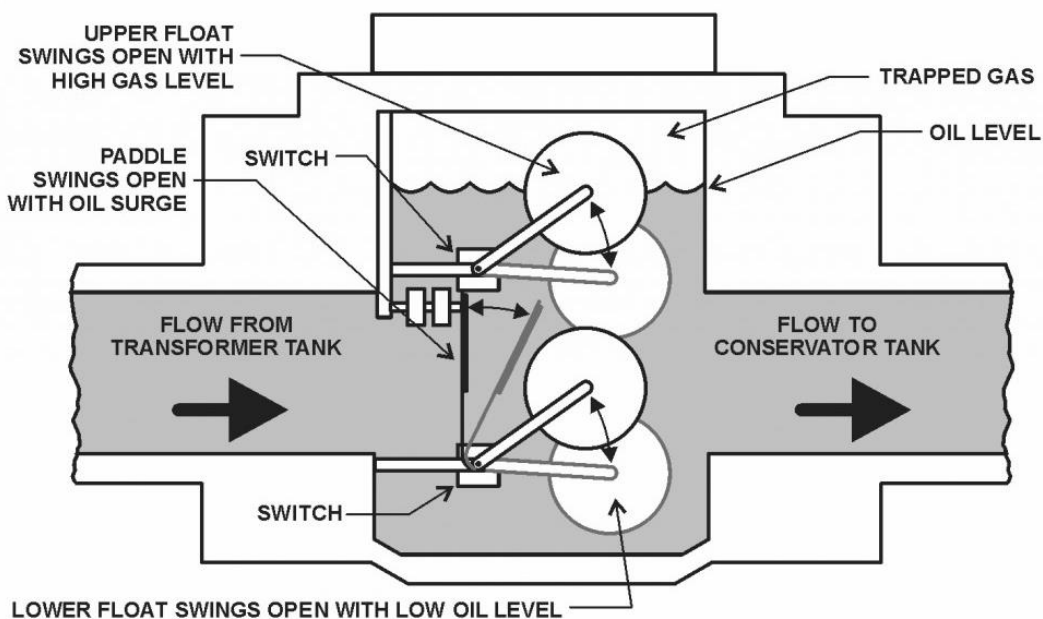
A szigetelési állapotok romlása nyomon követhető a kapcsokon mérhető jellemzők változásának megfigyelésével. Ezt a célt szolgálják a rendszeres állapotellenőrzési mérések.

1.3.1 Olajvizsgálatok

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 olajmintét 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.

1.3.2 Gázrelében összegyűlt gázok vizsgálata

Magyarországon a MAVIR 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 olajsint csökkenése esetén kioldási parancsot ad a transzformátor megszakítóinak.



3. ábra: Buchholz-relé felépítése [3]

A felgyülemllett 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 acetilén (C_2H_2) 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 csöve 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 gázkromatográfiás 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.

1.3.3 Olajban oldott gázok vizsgálata (HGA⁴)

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:

| Hibafajta | Túligénybevétel jellege | Keletkező gázok ⁵ |
|--------------------------------|-------------------------|--|
| 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 |

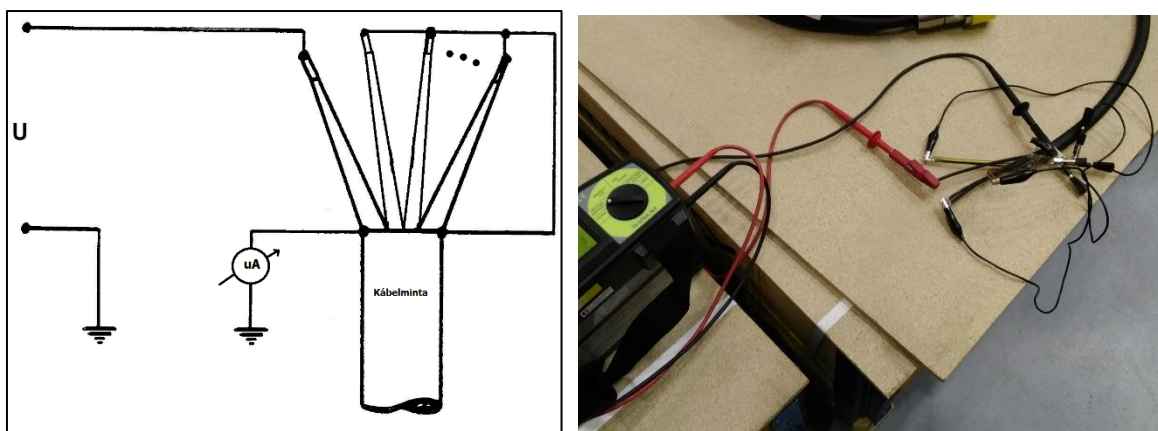
A fellépő folyamatok között létható, hogy átfedések vannak, de a termelt gázok arányai eltérőek, ezért a hiba fajtájának behatárolásakor ez egy fontos szempont.

⁴ HGA: Hibagáz analízis

⁵ CH₄: metán, C₂H₆: etán, C₂H₄: etilén, C₂H₂: acetilén, C₃H₈: propán, C₃H₆: propilén

1.3.4 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 (R_{sz}) a 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 4. ábra: ábrán látható a mérés elvi elrendezése, illetve a BME Nagyfeszültségű Laboratóriumában összeállított mérési elrendezés.



4. ábra: Szigetelési ellenállásmérés elrendezése a szabványban és gyakorlatban

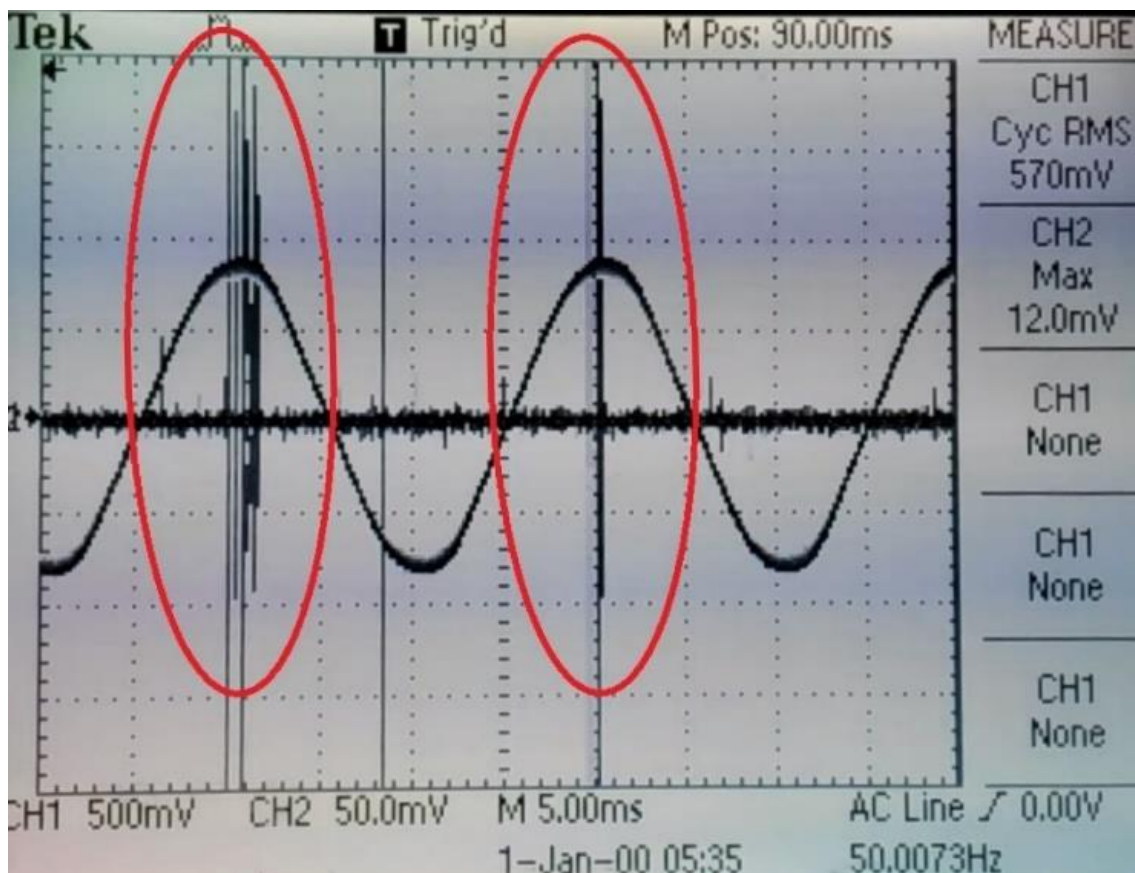
A szigetelési ellenállás hőmérsékletfüggő, így a szabványban előírt értékek⁶ is a hőmérséklet függvényében vannak feltüntetve, vagy számértéke egy korrelációs összefüggés alapján referenciahőmérsékletre számolható át. Fontos továbbá megjegyezni, hogy a mérés alatt álló átvezetők felületét mérés előtt meg kell tisztítani a szennyeződésektől. A szigetelési ellenállásmérés az egyik legegyszerűbb diagnosztikai módszer, az eredményekből könnyen lehet következtetni a szigetelés nedvesedésére, öregedésére.

1.3.5 Részleges kisülések típusai és mérése

Az erősen inhomogén villamos erőterben a szigetelőanyagok villamos szilárdsága lokálisan leromlik, letörik. Ezt a jelenséget nevezzük részletörésnek, más néven részkiülésnek. A kiülések az erőternek csak egy kis részére terjednek ki, ezért nem okoznak teljes átütést/átívelést. A részkiülések folyamatos jelenléte azonban károsítja a szigetelőanyagot, így csökken a szigetelő élettartama és előbb-utóbb a részkiülések teljes átütéshez vezetnek.

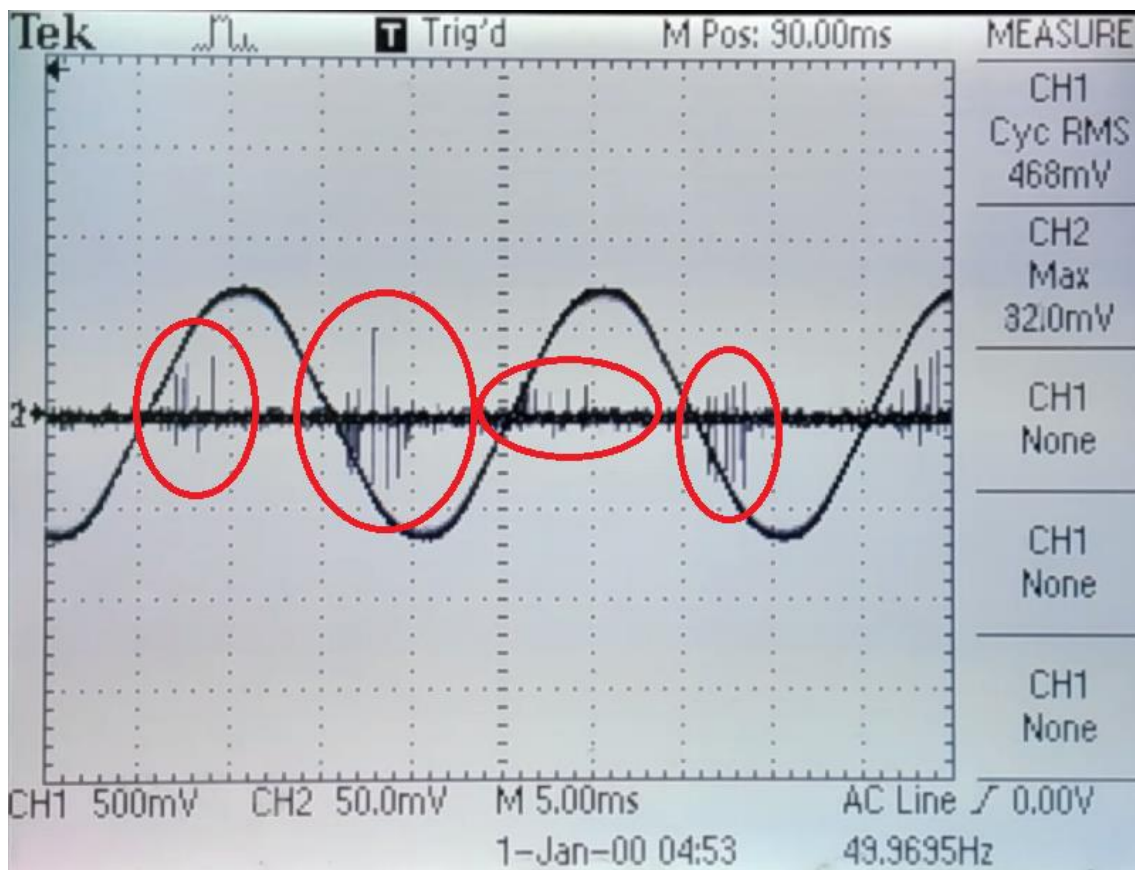
⁶ Középfeszültségű oldalon 200 M Ω , míg nagyfeszültségű oldalon 1 G Ω az előírás

Részkisülések létrejöhetnek gázokban és folyadékokban erősen inhomogén terek esetén az elektródák környezetében. Ezt nevezzük koronakisülésnek, amely az 5. ábra: ábrán látható.



5. ábra: Koronakisülés megjelenési formája

Másik megjelenési formája a szilárd vagy folyékony szigetelőanyag zárványaiban, gázbuborékokban kialakuló belső kisülés. Harmadik részkisülés-típus a felületi kúszókisülés, amely két különböző halmazállapotú szigetelőanyag közül az egyik határfelületén képes kialakulni. Esetünkben különösen fontos a belső kisülés. Ha a gázbuborékban fellépő térerősség meghaladja a gáz átütési feszültségét, akkor a gáz ionizálódik, tehát pozitív és negatív töltéshordozók keletkeznek. Ezek a töltések nagyon rövid idő alatt rendeződnek a buborékban, így megváltoztatva a szigetelés egészének kapacitását.



6. ábra: Részkisülések detektálása oszcilloszkóppal

Ennek hatására a szigetelés elektródáin ugrásszerűen megváltozik a szabad töltésmennyiség, amelyet a feszültségforrástól a próbatestre egy I_{rk} meredekhomlokú áramimpulzus visz át. Ezeket az I_{rk} áramimpulzusokat részkisülés-mérőkkel detektálni tudjuk. Egy oszcilloszkóppal regisztrált mérést ábrázol az 6. ábra: ábra: pirossal bekarikázva láthatók az I_{rk} áramimpulzusok.

A részkisülések méréséhez zajszegény villamos környezetre van szükség, amely általában a transzformátorok felszerelt helyén nehezen biztosítható. A hálózati zavarok, a hozzávezetések kialakuló koronakisülés és ezek korreláltsága a fázisfeszültséggel jelentősen megnehezítik az eredmények kiértékelését. Új transzformátorok esetén a részkisülések jelenléte arra utal, hogy tervezési, gyártási vagy üzembehelyezési hibák történtek. Használatban lévő transzformátoroknál a szigetelés öregedésére (villamos szilárdság csökkenése), karbantartási, javítási hibára lehet következtetni. A hiba jellege meghatározható a részkisülés-impulzusok fázishelyzetéből, begyújtási- és kialvási feszültségeikből, időbeli változásaikból.

1.4 Részkisülések kialakulása folyadékokban [5] [7] [8] [9]

Dolgozatom a szigetelőanyagokban létrejövő részkisüléseken, mint valós fizikai jelenségen alapszik, az ebből adódó diagnosztikai módszerek egyik fajtáját vizsgálja. Ebből kifolyólag ebben az alfejezetben egy rövid áttekintést adok a folyadék halmazállapotú szigetelőanyagokban kialakuló átütési folyamatokról.

Szennyezőanyag-tartalom alapján kétféle szigetelő folyadékot különböztethetünk meg: extrém tisztaságú folyadékok és az iparban használt folyadékok. Az extrém tisztaságú folyadékok előállítása nagyon bonyolult, vegyi szempontból nagyon tiszták (0,001 ppm alatti szennyezőanyag-tartalom/nedvesség/stb.) és a gyakorlatban nem használják.

Az ipari alkalmazásokban fellelhető folyadékok összetételét szabványok határozzák meg, így például a sűrűség, viszkozitás, lobbanáspont, hővezető-képesség, áramláskép, stb. jól meghatározott. Kémiaiilag nem tiszták, tartalmaznak adalékanyagokat, szennyeződések, nedvességet, oldott gázokat.

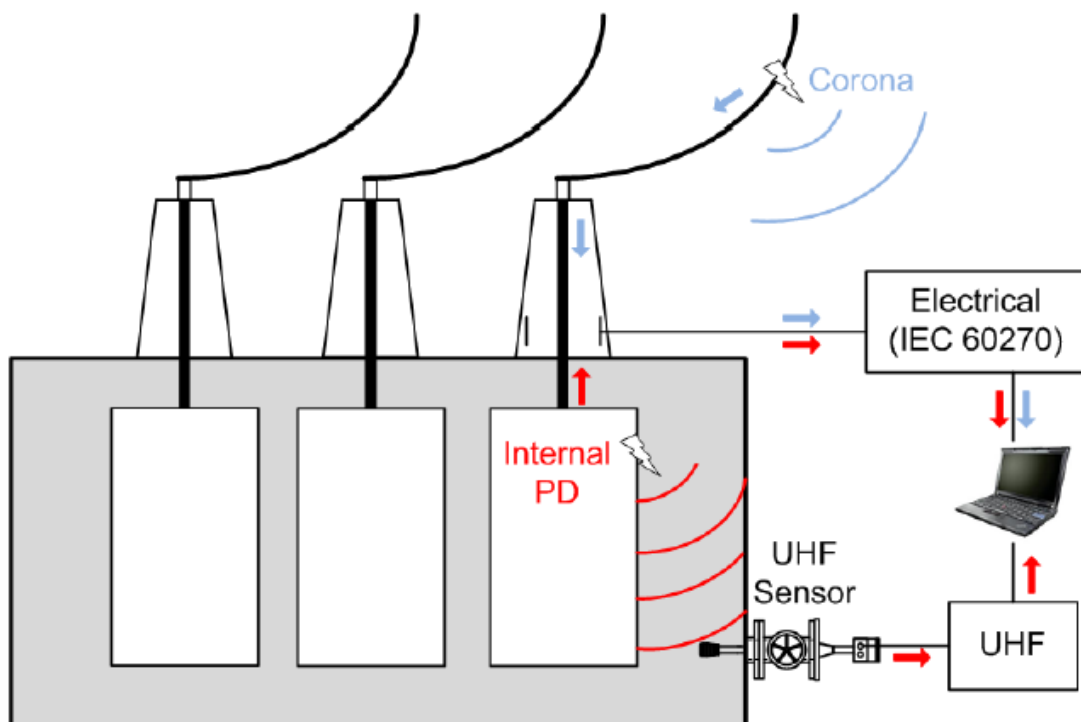
Nem extrém tisztaságú folyadék esetén a fellelhető szennyeződések vezetési folyamatot eredményeznek. A folyadékokban a szennyezőanyagok töltéssel rendelkező részecskék, ezek a molekulák képesek egy pozitív vagy negatív töltésű molekulacsoportot alkotni. Ezek a csoportok viszonylag nagy tömegűek, nettó töltésük pozitív vagy negatív és térerősség hatására képesek elmozdulni. Villamos erőter rákapcsolásakor a pozitív töltéshordozók elkezdenek vándorolni a katód felé. A katód közelében már annyira megnő a térerősség, hogy a belőle elektronok lépnek ki, ezek egy része rekombinálja a molekulacsoportokat, más részük a folyadékba kerül. A rákapcsolt térerősség által vezetési folyamatok alakulnak ki a folyadékban. Ha a katódból a folyadékba kilépő elektronok energiája elegendően nagy, akkor elektronlavina alakulhat ki, hasonlóan a gázok átütéséhez. Ha a teljes átütés nem alakul ki, akkor csak részkisülésekről beszélhetünk. Folyadékokban azt a térerősség értéket, amelynél az elektronlavina átütést eredményez, a folyadék átütési szilárdságának nevezik.

Átütés létrejöhet belső üregkisülések eredményeképpen is. A szigetelő folyadékban mikroszkopikus méretű gázbuborékok vannak jelen az elektródák felületén.

1.5 Az UHF részkiülésmérés módszertana [10] [11] [12]

1.5.1 Általános ismertető az UHF részkiülésmérésről

Az UHF részkiülésmérés azon alapszik, hogy a részkiülések gyors felfutású impulzusok, amelyek elektromágneses hullámokat bocsátanak ki a környező szigetelőolaj irányába UHF frekvenciatartományban (300 MHz – 3 GHz). Ezeknek a jeleknek a detektálásával a PD lokalizálható, a módszer online és offline diagnosztikára felhasználható, de még online monitorozásra is alkalmas. A földelt transzformátorház kiváló elektromágneses árnyékolást jelent a külső zavarokkal szemben, ha az UHF szenzorokat a transzformátor belsejében helyezük el. További előnye az UHF tartományban lévő jelterjedésnek, hogy a csillapítása kicsi, így a jel-zaj viszony jó értékű lesz. Ebből adódóan az UHF módszerrel magas érzékenység érhető el és alkalmas a helyszíni vizsgálatokra is.

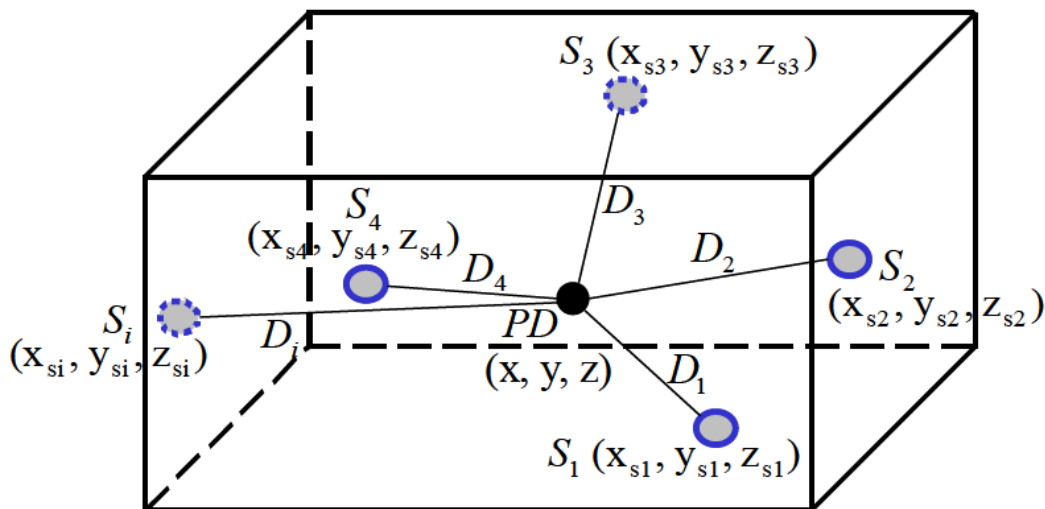


7. ábra: UHF és más méréstípus összehasonlítása [10]

A 7. ábra: ábrán látható, hogy hagyományos mérési módszereknél a vevőegység a pirossal jelölt belső részkiüléseken kívül további zavarokat (az ábra esetében koronajelenséget) is detektál, míg UHF részkiülésmérés esetén a nem kívánatos zavarok automatikusan kiszűrődnek.

Ipari alkalmazások során kétféle UHF szenzort alkalmaznak: leeresztő szelepbe helyezhető szenzort vagy lemez szenzort. Előbbit régi transzformátorokon alkalmazzák, mivel a szelepen keresztül könnyen elhelyezhető. Utóbbit új transzformátorokban már a gyártási folyamat során, a transzformátor falán helyezik el.

A részkisülés lokalizálása sokféleképpen történhet, de talán a legegyszerűbb módszer a jelterjedési idők mérése. Ez alapján a fáziseltolások alapján legalább három antenna jelének felhasználásával a „háromszögelés” módszer alkalmazásával a PD lokalizálható (8. ábra:)



8. ábra: Háromszögelés elvén alapuló PD helymeghatározás

A 8. ábra: ábrán látható térfogatban a három ismeretlen az (x, y, z) koordináták. Ennélfogva egy pontos térbeli PD elhelyezkedéshez legalább három egyenlet felírása szükséges, ezért a használt antennák számának minimum háromnak kell lennie. Előfordulhat, hogy a számítások elvégzéséhez a jel-zaj viszony túl kicsi, ilyenkor a jeleken egy átlagolást végezve a hiba kiküszöbölhető.

1.5.2 Cikkekben feldolgozott frekvenciatartományok

Ismeretes, hogy a jelterjedés a szigetelőanyagokban erősen frekvenciafüggő lehet. Ennek oka, hogy a komplex permittitásnak mind a valós, mind a képzetes része is frekvenciafüggő. A részkisülések spektrumát ezért minél szélesebb frekvenciatartományban érdemes megismerni. Ezáltal a PD összetevőinek nagyobb százalékát vehetjük figyelembe a helymeghatározási számítások során, így a kialakulási helyre irányuló becslés pontossága is

nő. Munkám során egy olyan mérési módszert igyekeztem alkalmazni a spektrum megismeréséhez, amivel a szakirodalmakban található módszerek sávszélességénél nagyobb sávszélesség elérhető. Ezért a szakirodalmak tanulmányozása közben különös figyelmet fordítottam a cikkekben szereplő frekvenciatartományokra. A legtöbb forrásban nem vizsgálták a teljes UHF tartományt, csak egy töredékét (például 500 – 1500 MHz között). Általában a kisebb sávszélességű adatrögzítések oka a sávszéleken már nem megfelelő árnyékolás, vagy a túl nagy csillapítás volt.

Természetesen a mérés sávszélességét valamely berendezés korlátja biztosan befolyásolja. Ez nem csak az antenna, vagy esetemben a GTEM cella sávszélessége lehet, hanem a mérőműszer (spektrumanalizátor) frekvenciaátfogása is.

2 UHF antennák alkalmazása, illetve PD spektrumának meghatározása laboratóriumi környezetben

A BME Nagyszültségű Laboratóriumában lehetőségem nyílt a szakirodalmakból elsajátított módszerek továbbfejlesztésével kipróbálni, hogy az UHF antennákkal történő részszülés detektálás hogyan lehetséges. A továbblépési lehetőségek miatt szükségét éreztem a részszülés terjedési tulajdonságait is jobban megismerni, így egy GTEM⁷ cella segítségével megalapoztam a részszülés spektrumának meghatározását.

2.1 UHF antennák alkalmazása részszülések detektálására [13]

A Nagyszültségű Laboratóriumban korábban elindult kutatás során készült négy darab UHF tartományra hangolt dipólantenna. Munkám során én is ezeket az antennákat használtam fel. A dipólantennák közelítőleg 350 MHz és 835 MHz közötti frekvenciatartomány mérésére alkalmasak. A laboratóriumban egy korábban összeállított, olajminták hagyományos mérésére alkalmas elrendezésen lehetőségem nyílt párhuzamosan elvégezni különböző részszülés méréseket.

Miközben az olajmintában elhelyezett szilárd szigetelőanyagon (prespán) a feszültséget folyamatosan növeltük, egy adott feszültségértéknél begyűjtöttak a részszülések, majd egy nagyobb feszültségen állandó jelleggel jelen voltak. A feszültség további növelése során a szilárd szigetelőminta az olajban átütött. Két oszcilloszkóppal és párhuzamosan a négy UHF antennával figyeltem a részszüléseket. Az egyik oszcilloszkóp a próbatranszformátor feszültségét és egy hagyományos részszülés-mérővel a részszülés feszültségét mérte. Egy másik, négycsatornás oszcilloszkóppal a négy antenna jelét mértem (9. ábra:). Fontos megjegyezni, hogy az antennákat és az oszcilloszkópot összekötő koax-kábelek hossza ugyanakkora volt, ez az azonos jelterjedési idők miatt szükséges.

⁷ GTEM: Gigahertz Transverse Electromagnetic



9. ábra: Jelalakok mérése digitális oszcilloszkópok segítségével

Az antennák közül hármat a szilárd szigetelődarab magasságában (a padlótól számítva 120 cm-re), az olajtartály falától körben, 165 cm-re helyeztem el, míg a negyedik antennát a laboratórium padlójára, a kialakuló részkisülések helyétől szintén 165 cm-re tettem.

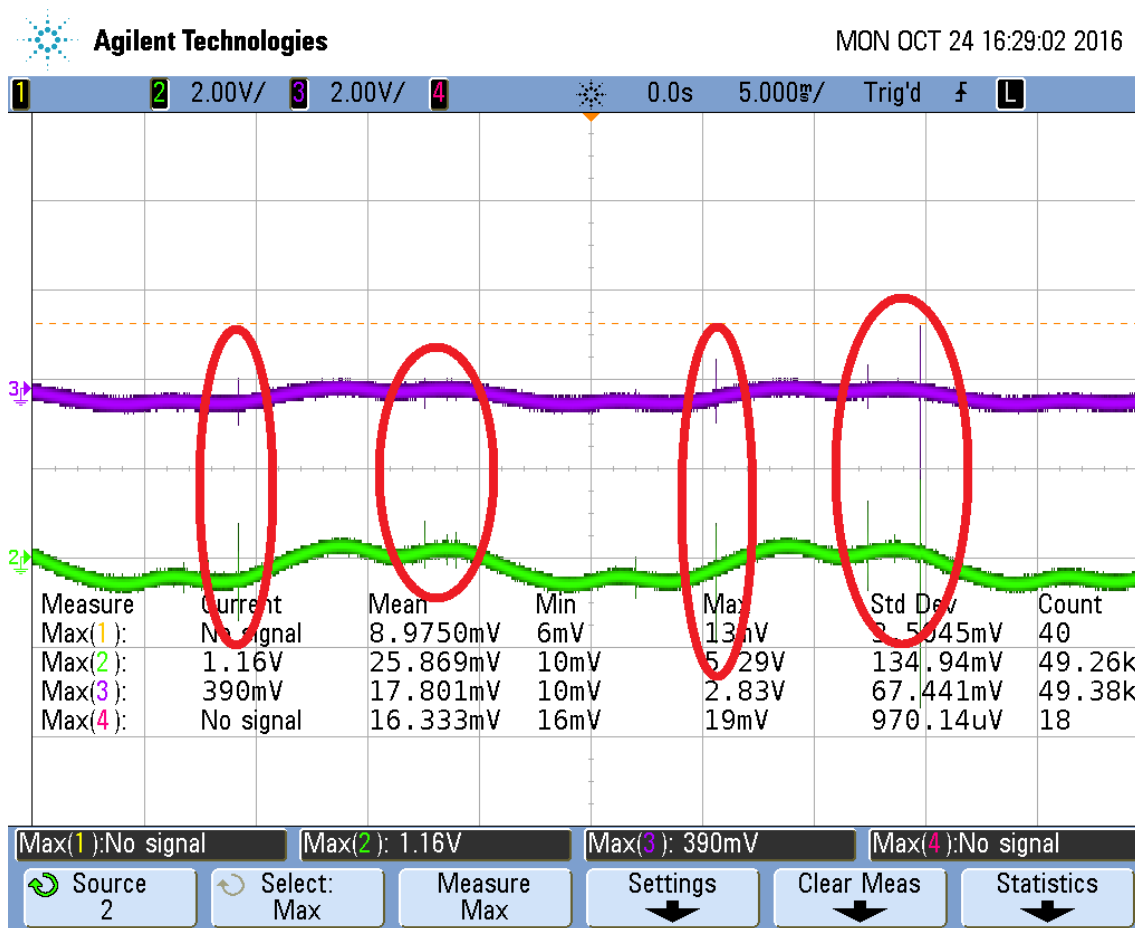
A négy antennát és elhelyezését a következő ábra szemlélteti:



10. ábra: Az antennák elhelyezkedése a mérőtérben

Az első antennát a próbatranszformátor oldalán helyeztem el, a másodikat a kezelőpult mérőtér felé eső oldalán, a harmadikat a mérőtérbe vezető rácsos ajtón, a negyediket pedig a a transzformátor feszültségét mérő koax-kábel kábelcsatornáján. Mindegyik antenna közel azonos távolságra helyezkedett el az olajtartályban kialakuló részkiüléstől. Az ilyen fajta elhelyezésnek fontos szerepe van későbbi kutatásaim szempontjából, mivel így lehet viszonylag egyszerűen, programozhatóan meghatározni a részkiülés helyét az antennák által vett feszültségértékekből (fázisok és amplitúdók).

Például csak a 2-es és 3-as antennák jelét figyelembe véve a 11. ábra: ábrán megfigyelve több következtetést is le lehet vonni.



11. ábra: 2-es és 3-as antennák vett jelei PD jelenléte esetén

Jól látszik, hogy mindkét jelben megjelennek a részkiülések a pirossal bekeretezett részekben. Az is megfigyelhető, hogy fázisban nincsenek eltolódva egymáshoz képest, tehát a részkiülés a két csatornán egyszerre érkezett az oszcilloszkóp BNC csatlakozójához. Ez azt bizonyítja, hogy az antennák tényleg azonos távolságra helyezkedtek el a részkiüléstől,

illetve a koax-kábelek hossza is azonos volt. Ez az információ felhasználható arra, hogy a későbbiekben egy olyan elrendezésnél, amikor az antennák nem azonos távolságra vannak a részkiüléstől (okozza ezt akár a nem szimmetrikus elhelyezés, akár a részkiülés helyének eltolódása), a fáziseltolódásokból négy antenna jelének feldolgozásával kiszámítható lesz az antennáknak a részkiüléshez viszonyított pozíciója. Természetesen az antennák minden részkiülést, így a hozzávezetéseken létrejövő koronajelenségeket is detektálják, ezért a részletes kiértékelés és a feldolgozás előtt ezeket a zavaró tényezőket ki kell szűrni a jelalakokból. Mivel több jelalak is rendelkezésre áll, ezért a koronajelenség a jelek összehasonlításával kiszűrhető. További segítséget nyújt ebben az a tény, hogy a korona típusú részkiülések a szinuszjel csúcserkének közelében lépnek fel, ahogyan korábban az 5. ábra: ábrán is látható volt. Valós mérési körülmények között problémát (zavarforrást) jelenthetnek még az alállomások sugárzott zavarjelei, de még az UHF tartományban lebonyolított mobilkommunikáció is.

A közeljövőben szeretnék több mérést is elvégezni és a jelek rögzítése után a szűrést szoftveresen elvégezni. Ezután a módszert a 3. fejezetben ismertetett módon az UHF antennákkal történő részkiülméréshez kapcsolódó távlati terveim során tudom majd alkalmazni.

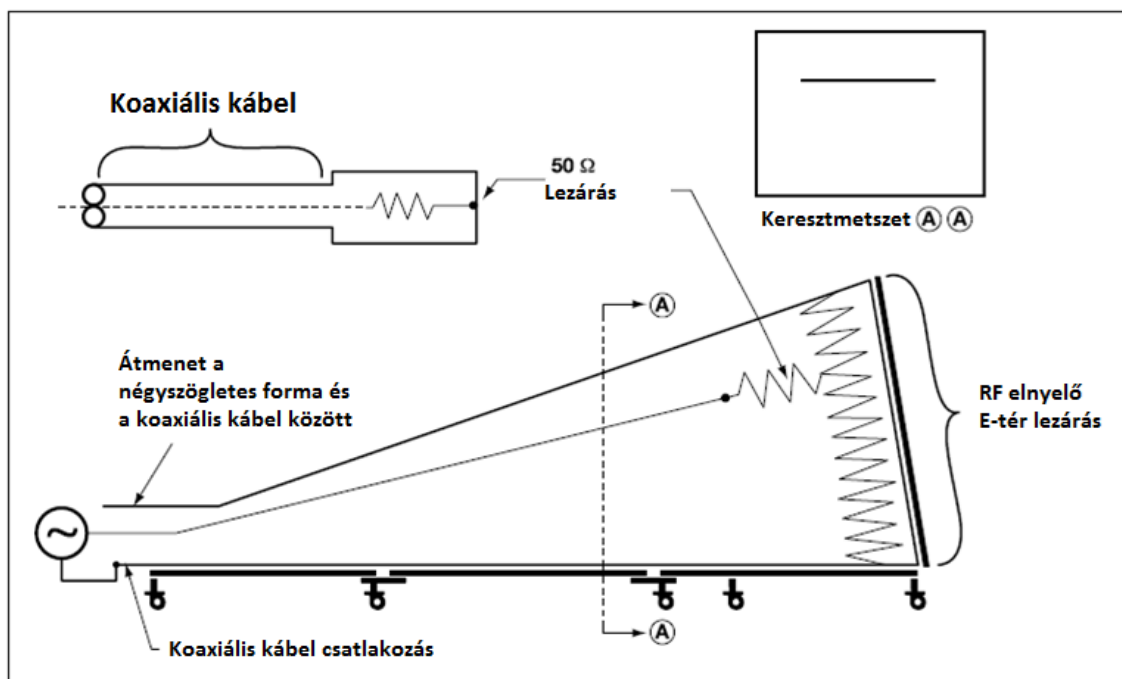
2.2 GTEM cella alkalmazása részleges kiülés spektrumának meghatározására [14]

2.2.1 GTEM cella

A GTEM cella egy olyan árnyékolt berendezés, amelynek a belsejében kialakításánál fogva homogén teret lehet létrehozni. Segítségével elektronikus berendezések immunitásvizsgálatát, és elektromágneses kibocsátását lehet vizsgálni. Szabványos EMC⁸ vizsgálatok elvégzésére is alkalmas. Elektromágneses viselkedését tekintve a cella 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

⁸ EMC: Electromagnetic Compatibility – elektromágneses kompatibilitás

Tanszékén található berendezéssel körülbelül 9 kHz és 5GHz közötti frekvenciatartományban lehet vizsgálatokat végezni.



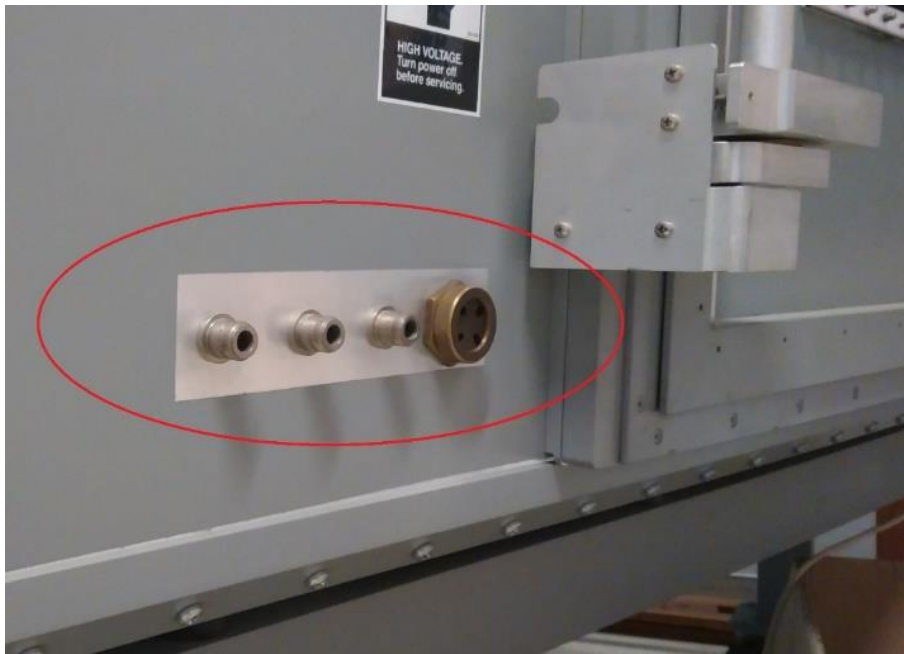
12. ábra: GTEM cella felépítése

A GTEM cella felépítése a 12. ábra: 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.

2.2.2 GTEM cella alkalmazása PD spektrum meghatározására

Az 2.2.1 alfejezetből látható, hogy a GTEM cella alkalmas a belsejében elhelyezett elektronikus eszközök által kibocsátott elektromágneses sugárzások spektrumának mérésére egy a koaxiális kimenetére kötött spektrumanalizátor segítségével. Problémaként merült fel, hogy a GTEM cellában hogyan lehet az árnyékolás hatásfokának csökkentése nélkül részkiülést előállítani. A GTEM cellának az oldalán található egy jelvezeték bemeneteket

tartalmazó panel (13. ábra:8. ábra:). Ezek kialakítása olyan, hogy a cella árnyékolása folyamatos marad.

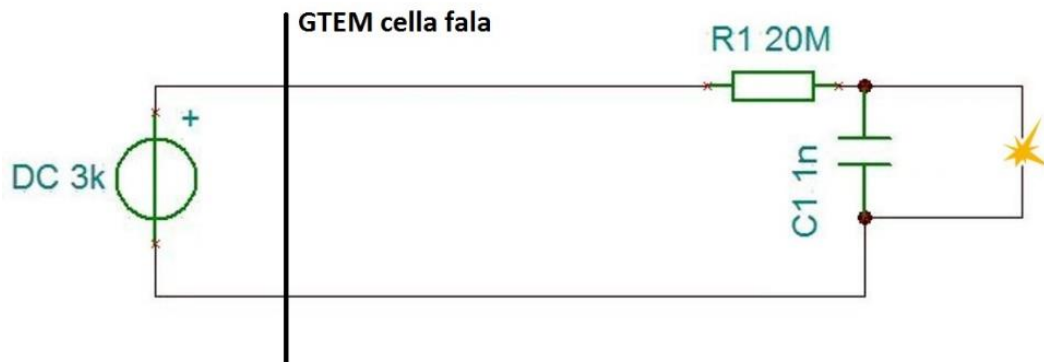


13. ábra: Jelvezeték bemenetek a cella oldalán

Az erre a célra kialakított bemeneten négy kis átmérőjű vezeték a cella belsejébe vezethető. Ehhez egy olyan eszközt kellett kitalálni, amely maximum négy vezeték felhasználásával külső tápellátásból részkisüléseket állít elő. Fontos szempont volt az is, hogy a kisüléskor az elektromágneses hullámok ne sugározzanak az áramkör vezetékvezetésén.

A kisülés előállításához egy egyenfeszültségű (DC) tápellátást, egy ellenállást, egy kondenzátort és egy szikraközt használtam fel (14. ábra:). A tervezés során több fontos szempont is volt. Az első, hogy a DC tápellátás elég nagy feszültséget biztosítson ahhoz, hogy a részkisülést reprezentáló átütés a szikraközön létrejöhessen, azonban ne legyen túl nagy sem a feszültség, mert az az áramköri elemek, környező berendezések károsodásához vezethet. Ezért a DC tápellátás feszültségét néhány kV-os értéken kellett maximalizálni. További szempont a korábban említett vissz irányú jelterjedés megakadályozása is. Erre szolgál az ellenállás, amely nagy értéke (néhányszor 10 M Ω) révén ezt a hatást kiküszöböli. Az ellenállás mellé úgy kell kiválasztani a kondenzátort, hogy a kisülések ne kövessék túl gyakran egymást. Az ellenállás és a kapacitás szorzata adta időállandónak ideális esetben néhány másodpercnek kell lennie. A körben folyó maximális áram a kisülés pillanatában

indul meg, ennek értéke az ellenállás nagy értéke miatt kV-os nagyságrendű táplálás esetén néhányszor $10 \mu\text{A}$.



14. ábra: A részkisülést előállító áramkör

Az áramkört a BME Nagyfeszültségű Laboratóriumában összeállítottam és többféle ellenállás – kapacitás kombinációval méréseket végeztem. Tápegységként egy Haefely lökésgerjesztő egyenfeszültségű kimenetét használtam. A szikraközt az egyszerűség kedvéért a kondenzátor lábából hajlítottam meg. A feszültséget egy 1:1000 osztásarányú feszültségosztó és digitális multiméter segítségével végeztem el. A mérési eredmények megfelelőnek bizonyultak $20 \text{ M}\Omega$ -os ellenállás és 1 nF -os kondenzátor választása mellett. A kisüléseket különböző szikraköz-távolságok esetén is sikerült létrehozni. A 15. ábra: ábrán bal oldalon látható szikraköz-távolság esetén a tápláló egyenfeszültség értéke $3,87 \text{ kV}$ volt, míg a jobb oldali kép esetén, kisebb szikraköz-nél $2,78 \text{ kV}$.



15. ábra: Kisülések a kondenzátor kivezetései között

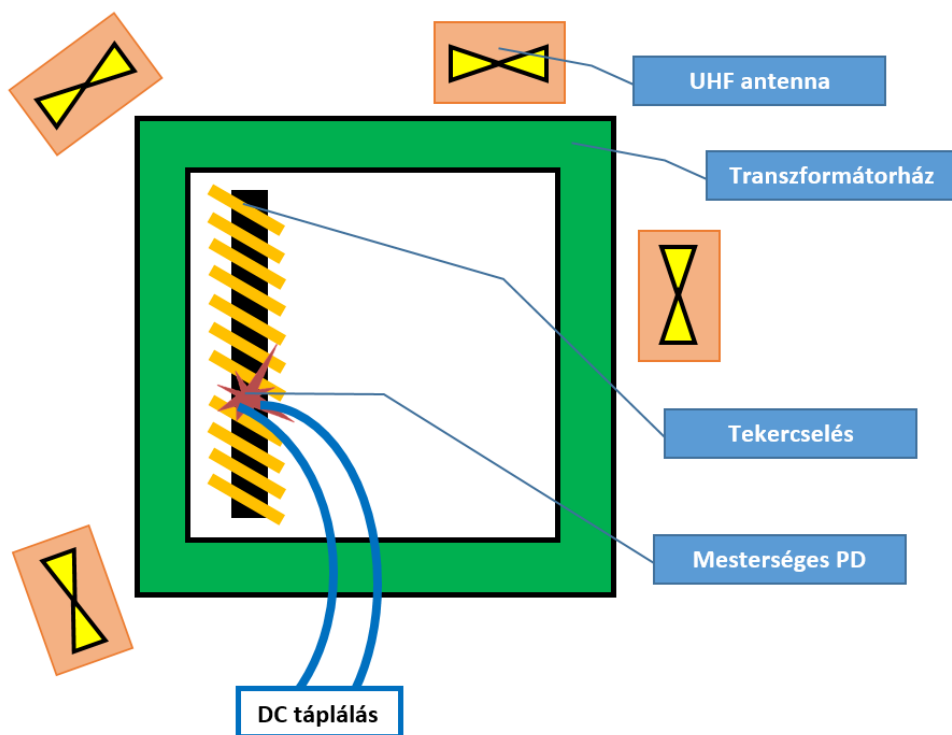
A mérési eredményekből levontam a következtetést, hogy a kisülések szimulálására alkalmas áramkör összeállítása lehetséges és a GTEM cella belsejében elhelyezhető, a részkiülés spektruma ezáltal megmérhető. A cella koaxiális kivezetésén elhelyezett szélessávú spektrumanalizátor és a GTEM cella sávszélessége is alkalmas a részkiülések spektrumának mélyebb tanulmányozására. Az 1.5 fejezetben említett cikkekkel szemben ezzel a módszerrel szélesebb sávban tudom megismerni a részkiülések viselkedését. Ez elengedhetetlen az olajban történő jelterjedés modellezéséhez és a további céljaim teljes értékű megvalósításához.

3 Rövid– és hosszútávú tervek

Hosszú távú célkitűzésem egy olyan szimulációs modellt felépíteni, ami egy valóságos transzformátor tekercselésében végbemenő kisüléseket helyesen képez le. Ennek kiindulási alapja a dolgozatomban ismertetett kutatások folytatása. További munkám során egy valóságos transzformátort szeretnék megvizsgálni és UHF részkisülés vizsgálattal a részkisülés helyét detektálni. A kikapcsolt állapotban lévő transzformátor tekercselései között mesterségesen állítok elő részkisülést a 2.2 fejezetben ismertetett módszer segítségével. Ezt a részkisülést a transzformátor körül elhelyezett antennákkal a 2.1 fejezet alapján szeretném detektálni és a helyét meghatározni.

A módszer – mivel a mesterséges részkisülés helye pontosan ismert lesz – az antennarendszer kalibrálására is fel lehet használni és a későbbiekben üzemben lévő transzformátorokon alkalmazni. Valóságos mérési elrendezéseknél az antennákat a transzformátorház belsejében kell elhelyezni az olajcsapon, vagy külön erre a célra kialakított ablakokon keresztül.

A tervezett mérési összeállítást mutatja a 16. ábra::



16. ábra: Valós transzformátoron elvégzendő mérés összeállítása

4 Ábrajegyzék

| | | |
|-----------|--|----|
| 1. ábra: | Az energiaátvitel leegyszerűsített modellje [1] | 5 |
| 2. ábra: | Transzformátor tekercselésének károsodása [2]..... | 7 |
| 3. ábra: | Buchholz-relé felépítése [3] | 9 |
| 4. ábra: | Szigetelési ellenállásmérés elrendezése a szabványban és gyakorlatban..... | 11 |
| 5. ábra: | Koronakisülés megjelenési formája | 12 |
| 6. ábra: | Részkisülések detektálása oszcilloszkóppal | 13 |
| 7. ábra: | UHF és más méréstípus összehasonlítása [10] | 15 |
| 8. ábra: | Háromszögelés elvén alapuló PD helymeghatározás | 16 |
| 9. ábra: | Jelalakok mérése digitális oszcilloszkópok segítségével | 19 |
| 10. ábra: | Az antennák elhelyezkedése a mérőtérben..... | 19 |
| 11. ábra: | 2-es és 3-as antennák vett jelei PD jelenléte esetén | 20 |
| 12. ábra: | GTEM cella felépítése | 22 |
| 13. ábra: | Jelvezeték bemenetek a cella oldalán | 23 |
| 14. ábra: | A részkisülést előállító áramkör | 24 |
| 15. ábra: | Kisülések a kondenzátor kivezetései között | 24 |
| 16. ábra: | Valós transzformátoron elvégzendő mérés összeállítása..... | 26 |

5 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
- [2] <http://oilregeneration.globecore.com/wp-content/uploads/sites/10/2016/05/u2-1.jpg>
- [3] <http://globecore.com/wp-content/uploads/2015/08/Figure-33-%E2%80%93-Buchholz-Relay-Section-1024x626.jpg>
- [4] Csépes G.: Villamos főberendezések üzembiztonságának egyszerű és gazdaságos növelése a szigetelések állapotellenőrzésével, a diagnosztika sajátosságai és legújabb eredményei, Balatonfüred, 2011.
- [5] BME Villamos szigetelések és kisülések tárgya ([VIVEMA14](#)) előadásai
- [6] Luspay Ö.: Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata, Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete, Budapest, 2000.
- [7] Németh E., Horváth T.: Nagyfeszültségű szigeteléstechika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
- [8] Császár M., Cserenyák T., Ónodi T., Orosz J., Rácz I., Ráski G.: Villamos szigeteléstechika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.
- [9] Dr. Horváth T., László T., Dr. Máthé B., Németh E.: Villamos szigetelések vizsgálata, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979
- [10] Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods, Working Group D1.37, 2016
- [11] S. Tenbohlen, D. Denissov, S. M. Hoek, S. M. Markalous: Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range
- [12] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl: Sensitivity of UHF PD Measurements in Power Transformers
- [13] Tóth Zoltán: Transzformátor diagnosztika UHF részkisülések segítségével, 2015.
- [14] BME Épületvillamosság laboratórium tárgya ([VIVEMB02](#)) Fényforrások EMC vizsgálata GTEM cellával című mérési útmutatója