

# **Részkisülés Mérés Alkalmazása Kisfeszültségű Kábelek Diagnosztikájára**

**Tézisfüzet**



**Cselkó Richárd**

**2019**

**Témavezető: Dr. Kiss István**

## Bevezetés

A közelmúltig kevés figyelem jutott a szekunder kábelrendszerekre, még erőművekben vagy alállomásokon is legfeljebb a végződéseiknél végeztek karbantartást. A kábeleket korrektív karbantartási stratégiával üzemeltették, illetve a teljes kábelezést cserélték átfogó felújítások esetén. A szekunder kábelezés kiterjedtségének növekedésével a teljes csere egyre inkább elfogadhatatlanná válik és bizonyos esetekben nem is megvalósítható. A mai IT alapú automatikákat és szabályozórendszereket figyelembe véve, illetve ezen kritikus rendszerek működésének függését a szekunder kábelezés épségétől, a korrektív karbantartás által okozott kockázat elfogadhatatlanná vált. Élettartam hosszabbítás esetén a kábelezés állapotát fel kell mérni, hogy megalapozottan lehessen a szükséges karbantartási lépéseket megtervezni a biztonságos üzemelés fenntartása érdekében.

Nagyfeszültségű berendezések diagnosztikai vizsgálata és felügyelete már bizonyította hasznosságát az energiaellátás megbízhatóságának növelésében és a karbantartások és cserék optimalizálásban. Számos tényező motiválja, hogy ezeket a módszereket kiterjesszük kisfeszültségű rendszerekre, például vezérlő és mérőkábelekre ipari rendszerekben, erőművekben, vasúti jelzőberendezésekben és repülőgépekben. Ezek közül az egyik legfontosabb az atomerőművek élettartam kiterjesztése esetén a biztonsági rendszerek megbízhatóságának fenntartása, ahol a teljes csere kivitelezhetetlen.

Korábbi kutatások bizonyították, hogy a dielektromos spektrum módszerek és mechanikai mérések képesek kimutatni a kisfeszültségű kábelek szigetelőanyagának általános öregedését

különböző igénybevételek esetén, míg az időtartománybeli reflexiómérés és az impulzussal gerjesztett szikrakisülés („pulse arrested spark discharge”) képesek helyi hibák kimutatására. Ugyanakkor az utóbbiak esetén a szigetelés vastagsága és az érzékelhető sérülés minimális mérete erősen korlátozzák az alkalmazhatóságot. A helyi hibák feltárása másfelől különösen fontos, mert ezek ténylegesen meghibásodáshoz vezethetnek, amikor a kábelek funkciómegtartó képessége különösen fontos lenne - hűtőközeg-vesztéses baleset esetén. Ennek megfelelően a kutatásom célja az volt, hogy bizonyítsam a részkisülés (PD, partial discharge) mérés alkalmazhatóságát kisfeszültségű, ipari kábeltípusokra.

Disszertációmban bebizonyítottam, hogy a PD mérés alkalmazhatósága kiterjeszthető kisfeszültségű kábelekre. Bemutattam, hogy a kisülések megjelennek kisfeszültségű kábelekben. Megalkottam egy mérőrendszert, ami illeszkedik a kisfeszültségű kábelekben keletkező részkisülés jelekhez. Ez az elrendezés hatékonyan képes elnyomni a külső, vezetett zajokat. Vizsgálati módszertant hoztam létre a magyarországi erőművekben leggyakrabban alkalmazott kábeltípusokra. Kimutattam a kisülések által generált jelek azon a jellemzőit, amelyek diagnosztikai paraméterként alkalmazhatók.

## **1. Tézis**

Meghatároztam a rendelkezésre álló kisfeszültségű kábeldiagnosztikai eszköztár hiányosságait és a részkisülés mérés jelentőségét. Ennek alapján a PD mérés feladata azon helyi hibák feltárása, amelyek funkcióvesztéssel járhatnak kritikus események folyamán. Számításokkal, végeselemes szimulációkkal, streamer begyűjtési modellekkel, valamint mérésekkel is megerősítettem, hogy részleges

**kisülések megjelennek a kisfeszültségű kábelek próbafeszültségén sérült és ép kábelek esetén is. [S7] [S8] [S10] [S12]**

Mivel egyre több figyelem jut a kisfeszültségű kábelek állapotfelmérésére, számos módszer alkalmazhatóságát vizsgálták meg világszerte. Ezek képesek a kábelek változatos öregedési folyamatainak és sérüléseinek feltárására. Ugyanakkor egy érzékeny és általánosan alkalmazható módszer a helyi sérülések feltárásra még nem áll rendelkezésre. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoportjánál jelentős eredmények születtek a visszatérő feszültség módszerrel mért dielektromos spektroszkópiával és mechanikai (keménység) vizsgálatokkal a kisfeszültségű kábelek szigetelőanyagának öregedésének kimutatásában. Ennek a munkának a közvetlen folytatása a részkisülés mérés alkalmazása helyi hibák kimutatására. Az első és legfontosabb kérdés, hogy a részleges kisülések megjelennek-e kisfeszültségű kábelekben a próbafeszültségükön. Egyszerű, koaxiális elrendezésre és négyzetes üregre a villamos tér és így a kisülések gyújtási feszültsége elemi módszerekkel számítható, míg a többre kábelekben a kialakuló térerősség végeelemes módszerrel számítható. Azonosítottam a kritikus térerősségű részeket számos kábeltípusra és megbecsültem az ebből következő gyújtási feszültséget a streamer kisülés gyújtási kritériuma alapján. A számítási eredményeket mérésekkel is igazoltam. Az eredmények alapján a részkisülések a próbafeszültség alatt megjelennek a sérült kábelekben. Egyúttal azonban azt is találtam, hogy a kisülések ép kábelekben is megjelennek. Ez következményekkel jár a 2. tézisben bemutatott mérési módszerre és a 3. tézisben bemutatott kiértékelési módszerekre is.

## 2. Tézis

Kidolgoztam egy mérési elrendezést kisfeszültségű kábelek részleges kisüléseinek mérésére. Első lépésként megállapítottam, hogy az IEC 60270:2000-es szabvány által definiált konvencionális részkisülés mérő berendezés nem megfelelő erre az alkalmazásra a lassú válaszüdő miatt, mert a túllépett impulzus felbontó képesség a kisülés látszólagos töltésének túlbecslésével és az ismétlődés alulbecslésével jár. Ennek elkerülésére a megalkotott mérési elrendezés két nagyfrekvenciás áramváltót alkalmaz, amelyeknek a felső határfrekvenciája a néhány tíz megahertz nagyságrendbe esik és emiatt megfelelőek a mérésre. Az új elrendezés egy speciális hídkapcsolás, amelynek az egyik ága a mért kábel, míg a másik, mesterséges ága a kábel hullámimpedanciájával megegyező értékű a nagyfrekvenciás áramváltók sávszélességében. Ez az elrendezés hatékonyan csökkenti a külső vezetett zajokat. Hiba! A hivatkozási forrás nem található.[S5] [S11] [S13]

Az IEC 60270:2000 szabvány definiálja a leggyakrabban alkalmazott PD mérési módszereket, melyeket nagyfeszültségű berendezésektől kisfeszültségű eszközökig alkalmaznak. A szabvány által definiált konvencionális mérőberendezés integráló jellegű, mert a célja az egyedi kisülés impulzusok által szállított töltés meghatározása. Ennek megfelelően a sávszélessége limitált: a mérőműszerek felső törésponti frekvenciája néhány száz kilohertz, de semmiképpen sem nagyobb, mint 1 MHz, míg alsó törésponti frekvenciájuk néhány tíz kilohertz is lehet. A műszer válaszüdeje ennek megfelelően lassú, ami hibás kijelzést eredményez, ha gyorsan ismétlődő kisülések vannak jelen, ahogy a kisfeszültségű kábelek esetén. A műszer, kialakításának függvényében, vagy a kisülések gyakoriságát becsüli alul vagy a töltését becsüli túl. Az elvégzett kísérleteim során a gyakorlatban is

megerősítést nyert, hogy a berendezés bizonyos körülmények között nem mutat megbízható értékeket.

A fenti problémát úgy lehet áthidalni, hogy nagyobb sávzélességű mérőberendezést alkalmazunk. Mivel a kisülések által keltett jelek általában igen kis amplitúdójúak (a konvencionális mérőberendezéssel pikocoulomb nagyságrendben mérjük), a PD mérő berendezésekkel kapcsolatban alapelvárás a jó zajelnyomás. Ezt figyelembe véve alkottam meg az új elrendezést, ami két nagyfrekvenciás áramváltót (HFCT, high frequency current transformer) alkalmaz, néhány tíz megahertzes sávzélességgel. Bebizonyítottam ezeknek az eszközöknek az alkalmasságát úgy, hogy összevetettem a mért jeleket egy ultranagy sávzélességű (1 GHz) érzékelővel vett jelekkel.

A PD mérés során általánosságban a vezetett zavarok a legnagyobb zajforrások. A megalkotott mérési elrendezés képes elnyomni ezeket a zajokat úgy, hogy a beérkező impulzusokat kettéosztja a kábel hullámimpedanciája és egy mesterséges ág között. Ugyanakkor a kábel irányából érkező, PD által generált impulzusok a két érzékelőn különböző amplitúdóval jelennek meg. Az elrendezésben egy differenciális mérőfejet alkalmaztam, így a külső zajokat az elrendezés elnyomja, míg a hasznos PD impulzusokat kiemeli. Az elrendezés legfőbb előnye, hogy a zajt még a digitalizálás előtt, fizikai módszerrel nyomja el, így akár zajszint alatti hasznos jelek is vehetők és a digitalizálás ideális erősítés mellett történhet meg.

### **3. Tézis**

Azonosítottam a kisfeszültségű kábelek részkisülés diagnosztikájának specialitásait, kiemelve az alapvető különbségeket a közép- és nagyfeszültségű kábelekhez képest. A legfontosabb eltérés,

hogy a kisülések megjelennek az ép kábelekben is, így egy általános, látszólagos töltés alapú döntési modell nem alkalmazható, mint a közép- és nagyfeszültségű, polimer szigetelésű kábelekre általánosan elfogadott 5 pC határérték.

Bizonyítottam, hogy részleges kisülés méréssel kimutathatók RG-58, NYCY, YSLCY, SZRMKVM-J és SiHF típusú kábelek szigetelésének változásai. Ezek a változások lefednek mechanikai sértéseket, beleértve azokat, amelyek csak az árnyékolást érik el és termikus igénybevételeket is. Megállapítottam, hogy minden típusra külön szükséges megvizsgálni, hogy milyen paraméterek alkalmasak a változások kimutatására. Az leginkább alkalmasnak mutató paraméterek a PD gyújtási feszültsége, a kisülések fázisszög szerinti eloszlásának statisztikai kiértékelése, valamint a kisülés amplitúdók hisztogramját közelítő Weibull eloszlás paraméterei. Abban az esetben, ha az érszigetelés a vezetőig sérült, a próbafeszültség átívelést okoz a sérült felületen. Azt is megállapítottam, hogy ezek a módszerek egy eredeti állapottal való összehasonlítással alkalmasak diagnosztikára (ún. ujjlenyomat diagnosztika), mivel az ép és sérült kábeleken mért eredmények nagy szórással rendelkeznek és az eredmények gyakran átfedik egymást. [S1] [S2] [S3] [S4] [S6] [S7] [S8] [S9]

A vizsgálatok céljára kiválasztottam számos kábeltípust koaxiálistól többberűig, valamint sodrott és szalag árnyékolásúakat is. Az érszigetelés anyagai PVC, PE és EPR voltak, legnagyobb hangsúllyal a PVC-n, mivel a keleti blokk atomerőműveiben ezt használták széleskörűen.

A közép- és nagyfeszültségű kábelek tervezési villamos terének nagynak kell lennie ahhoz, hogy költséghatékony és kivitelezhető konstrukció álljon elő. Az üzemben fellépő villamos tér képes a részkisülések begyűjtására, így ezeket a kábeleket PD mentesre kell gyártani. Ennek megfelelően a gyárban illetve később üzemben elvégzett PD méréseket amplitúdó alapon ki lehet értékelni. Ezzel

szemben kisfeszültségű kábelek szigetelésének tervezésekor a fő szempont a mechanikai követelmények teljesítése, így üzemi feszültségen nem várható a kisülések begyűjtása és kisülés miatti öregedés. Ugyanakkor a próbafeszültségen kialakulnak a kisülések ép kisfeszültségű kábelekben is, és a kisülések amplitúdója nem feltétlenül nagyobb sérült kábelek esetén.

Mivel a kisülések nagysága szerinti döntés nem alkalmazható minden esetben, a PD mérés diagnosztikai alkalmazásához a mért jelek összetettebb értékelésére van szükség. A váltakozófeszültséggel vizsgált minták esetén a kisülések megjelenése függ a vizsgálófeszültség fázisszögétől. A kisülések fázisszög szerinti eloszlásának mintázata kiértékelhető statisztikai módszerekkel úgy, hogy a félperiódusonként mért jeleket eloszlásnak tekintve kiszámoljuk azok statisztikai jellemzőit. További módszer a kisülések nagyság szerinti eloszlásának vizsgálata, amikor hosszabb idejű mérési adatokból a kisülés amplitúdók hisztogramját képezzük, és azt közelítjük Weibull eloszlással. Ekkor a közelítő eloszlás skála és alakparamétere szolgál diagnosztikai paraméterként.

A kísérleteket a következőképpen terveztem: méréseket végeztem ép és öregített kábeleken. Ezt követően a mért jeleket kiértékeltem a fenti módszerekkel, majd összehasonlítottam az ép és igénybe vett kábeleken kapott értékeket. Elsőként egyesével hasonlítottam össze az azonos kábelmintáról származó értékeket, majd összevettem az azonos típusokra és igénybevételekre kumulált eredményeket az ép kábelekről származó kumulált eredményekkel. Ezzel a módszerrel megállapítottam, hogy mely jellemzők alkalmasak kimutatni a mintákon bekövetkezett változásokat és azt is, hogy ezek közül melyek alkalmasak általános döntési szabályként való alkalmazásra. Az eredmények



azt mutatják, hogy lehetséges minden esetben szignifikáns változást mutató paramétert találni egy-az-egyhez való összehasonlítás esetén, minden igénybevétel típusra. Ugyanakkor kimutattam, hogy a kumulált eredmények nagy szórással rendelkeznek és az ép illetve sérült mintákon mért eredmények eloszlása átfedésben van egymással. Ennek megfelelően azt a következtetést vontam le, hogy kisfeszültségű kábelekre a részkisülés mérés ún. ujjlenyomat diagnosztikaiként alkalmazható, tehát ha korábbi mérési adattal való összehasonlítás lehetséges.

## Válogatott hivatkozások

- [1] B. KRUIZINGA: LOW VOLTAGE UNDERGROUND POWER CABLE SYSTEMS : DEGRADATION MECHANISMS AND THE PATH TO DIAGNOSTICS, DOCTORAL DISSERTATION, TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN, 2017
- [2] E. GULSKI, W. KOLTUNOWICZ ET.AL., "GUIDELINES FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION USING CONVENTIONAL (IEC 60270) AND UNCONVENTIONAL METHODS", CIGRÉ WORKING GROUP D1.37, TECHNICAL BROCHURE NR. 662, 2016
- [3] L. VERARDI, D. FABIANI, G. C. MONTANARI, "CORRELATION OF ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN ACCELERATED AGING OF LV NUCLEAR POWER PLANT CABLES", 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION, DOI: 10.1109/ICHVE.2014.7035376
- [4] B.D. SHUMAKER, C.J. CAMPBELL, C.D. SEXTON, G.W. MORTON, J.B. MCCONKEY, AND H.M. HASHEMIAN, "CABLE CONDITION MONITORING FOR NUCLEAR POWER PLANTS", FUTURE OF INSTRUMENTATION INTERNATIONAL WORKSHOP (FIIW), 2012, DOI: 10.1109/FIIW.2012.6378325
- [5] G. J. TOMAN, A. MANTEY, "CABLE SYSTEM AGING MANAGEMENT FOR NUCLEAR POWER PLANTS", 2012 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM

ON ELECTRICAL INSULATION, DOI:  
10.1109/ELINSL.2012.6251480

- [6] Z. A. TAMUS, "PRACTICAL CONSIDERATION OF MECHANICAL MEASUREMENTS IN CABLE DIAGNOSTICS", 2011 ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, DOI:10.1109/EIC.2011.5996178
- [7] Z. A. TAMUS, I. BERTA, "APPLICATION OF VOLTAGE RESPONSE MEASUREMENT ON LOW VOLTAGE CABLES", 2009 ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, DOI:10.1109/EIC.2009.5166387
- [8] X. SHEN, Y. ZHANG, Q. SHI, L. WEI, "DISCHARGE IN LOW VOLTAGE EPR DC CABLE UNDER SPECIAL SITUATIONS", 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS, JULY 19-23, 2009, HARBIN, CHINA
- [9] Z. A. TAMUS AND I. BERTA, "APPLICATION OF VOLTAGE RESPONSE MEASUREMENT ON LOW VOLTAGE CABLES," 2009 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, MONTREAL, QC, 2009, PP. 444-447.
- [10] Z. A. TAMUS, "PRACTICAL CONSIDERATION OF MECHANICAL MEASUREMENTS IN CABLE DIAGNOSTICS", IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE 2011, PP. 359-363.
- [11] JOSEPH KUREK ET.AL., "AIRCRAFT WIRING DEGRADATION STUDY", FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, REPORT NO. DOT/FAA/AR-08/2, JANUARY 2008
- [12] R. KEVIN HOWARD ET AL., "FINAL REPORT ON DEVELOPMENT OF PULSE ARRESTED SPARK DISCHARGE (PASD) FOR AGING AIRCRAFT WIRING APPLICATION", SANDIA NATIONAL LABORATORIES, REPORT NR. SAND2005-2638, SEPTEMBER 2006
- [13] Y.-J. SHIN ET AL., "APPLICATION OF TIME-FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY FOR DETECTION AND LOCALIZATION OF A FAULT ON A COAXIAL CABLE", IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, DOI:10.1109/TIM.2005.858115

- [14] IEEE 383-2003, IEEE STANDARD FOR QUALIFYING CLASS 1E ELECTRIC CABLES AND FIELD SPLICES FOR NUCLEAR POWER GENERATING STATIONS
- [15] J. STEIN ET AL., "IMPROVED CONVENTIONAL TESTING OF POWER PLANT CABLES", ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, RESEARCH PROJECT 2895-03, FINAL REPORT, SEPTEMBER 1995
- [16] J. P. STEINER, F. D. MARTZLOFF: PARTIAL DISCHARGES IN LOW-VOLTAGE CABLES, IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, TORONTO, CANADA, JUNE 3-6 1990

## **A tézisekhez kapcsolódó publikációk**

- [S1] Z. A. TAMUS, R. CSELKÓ, I. BERTA, "PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT IN LOW VOLTAGE CABLE DIAGNOSTICS", CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 26-29 OCT. 2008, QUÉBEC CITY, CANADA
- [S2] CSELKÓ, R., "RÉSZLEGES KISÜLÉSEK VIZSGÁLATA KISFESZÜLTSGŰ KÁBELEKBEN" ELEKTROTECHNIKA 101: 11 PP. 5-7. (2008)
- [S3] Z. Á. TAMUS, R. CSELKÓ, I. BERTA: "APPLICATION OF PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT ON LABORATORY AGED LOW VOLTAGE CABLES", ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, MAY 31 – JUNE 3 2009, MONTREAL, CANADA
- [S4] R. CSELKÓ, I. BERTA, "PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT EVALUATION WITH COMBINED STATISTICAL AND FUZZY TOOLS", 2ND INTERNATIONAL YOUTH CONFERENCE ON ENERGETICS, JUNE 4-6, 2009, BUDAPEST, HUNGARY
- [S5] Z. Á. TAMUS, R. CSELKÓ, I. BERTA, "PRACTICAL ISSUES OF PARTIAL DISCHARGE TESTING OF LOW-VOLTAGE CABLES", JUNE 5-8, 2011, ANNAPOLIS, MD, USA
- [S6] R. CSELKO, I. BERTA, "OCCURRENCE OF PARTIAL DISCHARGES IN LOW VOLTAGE CABLES DUE TO ARTIFICIAL MECHANICAL INJURIES", 2011 3RD

INTERNATIONAL YOUTH CONFERENCE ON ENERGETICS, 7-9 JULY  
2011, LEIRIA, PORTUGAL

- [S7] R. CSELKÓ AND Á. Z. TAMUS, "OCCURRENCE OF PARTIAL DISCHARGES IN LOW-VOLTAGE CABLES AT THE FAILURE SPOT," 2012 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, SAN JUAN, PR, 2012, PP. 5-9.
- [S8] R. CSELKO, I. BERTA, "CHALLENGES OF PARTIAL DISCHARGE DIAGNOSTICS OF LOW-VOLTAGE CABLES", JOURNAL OF ELECTROSTATICS, VOLUME 71, ISSUE 3, JUNE 2013, PAGES 558-563
- [S9] CSELKÓ, R., GARCÍA, M. M., BERTA, I.: PARTIAL DISCHARGE CHARACTERISTICS OF NYC LOW-VOLTAGE CABLES. IN: 2013 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, OTTAWA, ON, 2013, PP. 138-141.
- [S10] R. CSELKÓ AND I. BERTA, "COMPARISON OF FAILURE DETECTION CAPABILITY OF AVAILABLE LOW-VOLTAGE CABLE DIAGNOSTIC METHODS," 2016 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC), MONTREAL, QC, 2016, PP. 346-349.
- [S11] R. CSELKÓ AND I. KISS, "SUPPRESSION OF CONDUCTED DISTURBANCES DURING THE PARTIAL DISCHARGE MONITORING OF INDUSTRIAL CABLE SYSTEMS", IFIP ADVANCES IN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY 521 PP. 308-316. , 9 P. (2018)
- [S12] R. CSELKÓ AND I. KISS, "ESTIMATION OF THE PARTIAL DISCHARGE INCEPTION VOLTAGE OF LOW VOLTAGE CABLES", IN: 2019 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (IN PRESS)
- [S13] R. CSELKÓ, "REPETITION RATE OF PARTIAL DISCHARGES IN LOW VOLTAGE CABLES", PERIODICA POLYTECHNICA ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE 2019 (IN PRESS)