



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék

KÁBELDIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREK FEJLESZTÉSE

Tézisfüzet

Csányi Gergely Márk

Témavezető: Dr. Tamus Zoltán Ádám

Budapest

2021

1. Bevezetés

Szinte minden villamos berendezésben (pl. transzformátor, megszakító, kábel stb.) található villamos szigetelőanyag, amely az adott berendezés biztonságos üzemelését teszi lehetővé. A kutatásom során a villamos berendezések közül kiemelten a kábelekkel foglalkoztam.

A szigeteléseket üzemelésük során sokféle környezeti, öregítő hatás érheti (pl. nedvesség, hő, sugárzás, mechanikai rezgés stb.), amely az adott szigetelésben irreverzibilis változásokat okoz, melyek a szigetelőanyagok élettartamának csökkenéséhez vezetnek. A különböző szigetelésfajták öregedése jellemzően eltér egymástól, sőt, a szigetelőanyag öregedése az öregítést előidéző folyamatoként (pl. hő, feszültség, sugárzás stb.) is változhat. Ezért nem létezik olyan diagnosztikai módszer, amely minden szigetelésfajta vizsgálatához a legjobb megoldást jelentené [1–3].

A szigeteléstechika fejlődésének köszönhetően számos szigetelésdiagnosztikai módszer látott napvilágot, amelyek segítségével következtetni lehet a villamos szigetelések állapotára [4–6]. Ezek közül kiemelkedő fontossággal bír a roncsolásmentes diagnosztikai eljárások fejlesztése és alkalmazása. E módszerek kutatásában tanszékünk évtizedek óta részt vesz, jelentős eredményekkel [5, 7, 8]. Az új szigetelésdiagnosztikai módszerek megjelenését jellemzően két hatás befolyásolja. Az egyik az új típusú szigetelések megjelenése a villamos gyakorlatban (pl. térhálósított polietilén), a másik pedig a villamosenergia-termelés dekarbonizációja miatt, a villamosenergia-hálózat átalakulása, az elosztott energiatermelés térnyerése.

2. Motiváció

2.1. Vegyes olaj-papír és térhálós polietilén szigetelésű kábelek

Az új típusú szigetelések fokozatos üzembe helyezésével, valamint az időben folyamatosan történő javítások következményeképpen nem ritka, hogy egy pl. középvezetési hálózatban három, vagy akár több különböző típusú szigetelés is egyidejűleg üzemben legyen [9]. Ez a gyakorlatban megnehezítheti diagnosztikai vizsgálatokat, különösen ha egy szakaszon belül található ilyen, hiszen a villamos tulajdonságai ezen kábeleknek egymástól jellemzően nagyon eltérő.

A kutatásom során a jelenleg egész Európában széleskörűen előforduló olaj-papír (paper insulated lead covered — PILC) szigetelésű kábel fokozatos lecseréléséből adódóan létrejövő olaj-papír és térhálósított (XLPE) és lineáris

polietilén (PE) szigetelésű vegyes kábelszakaszok diagnosztizálására alkalmas módszer kifejlesztésével foglalkoztam továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszer segítségével. A vegyes kábelszakaszok a középvezetési villamos hálózat gyakori, sokszor nehezen diagnosztizálható elemeit képezik.

2.2. PVC szigetelésű kábelek

PVC szigetelésű kábeleket annak ellenére, hogy villamos paraméterei nem a legkiválóbbak, több helyen is használják a villamos energetikában, pl. atomerőművekben, kisfeszültségű elosztóhálózati-kábeleknél, stb. ezért állapotvizsgálatuk ma is fontos területet jelent. A PVC szigetelésű kábelek jellemző két legfontosabb öregedési folyamata a sósav-lehasadás, valamint a lágyító fogyása [10]. Korábbi kutatások alapján a PVC szigetelésen teljes feszültségválasz méréséből kapott kisülési feszültség kezdeti meredekségének növekedése arányos a szigetelés termikus degradációjával, amellyel a sósav-lehasadás hatása jól követhető [8, 11]. A mesterséges termikus öregítési eljárások során a hőmérsékletet általában állandó értéken tartják, több száz vagy akár több ezer órán keresztül. A valós körülmények között fellépő igénybevétel azonban nem ilyen. A túlterhelés miatti hőterhelés időszakosan jelentkezik, nem állandó hőmérsékleten és nem több száz órán keresztül.

A kisfeszültségű elosztóhálózaton egyre inkább terjedő elosztott energia-termelés új kihívások elé állítja a kábelhálózatot, amelynek eredményeként a nem csak egyirányú teljesítményáramlás miatt egy kábelvonal egyes szakaszai túlterhelődhetnek csökkentve szigetelésének élettartamát. A megváltozó viszonyok következtében előálló nagyobb terhelés miatt a kábelek túlterhelődhetnek, így szigetelési is nagyobb igénybevételnek vannak kitéve, amely miatt az élettartamuk csökken [12, 13], pl. középvezetési PILC kábelek esetén kevesebb, mint felére csökkenhet [14]. Az elosztott termelés hatása a hálózat különböző elemeire ma igen kutatott terület, a kábelek védelmére többféle ötlet látott napvilágot (pl. elektromos autók akkumulátorának bevonása a túlmelegedés elkerülésére stb.) [12, 15]. Az ilyen rövid idejű termikus túlterhelések hatása azonban még a kevésbé kutatott területek közé tartozik.

A munkám másik része során rövid idejű termikus túlterhelésének hatását vizsgáltam PVC szigetelésű elosztóhálózati kábeleken valamint ismert összetételű PVC szigetelésű kábelekkel. A kutatás során olyan villamos paramétereket kerestem, amelyek jól jelzik PVC szigetelés esetén a rövid időtartamú, (pl. túlterhelésből származó) termikus öregítések hatását. Ezen összefüggés ismerete alapját képezheti a villamosenergia-szolgáltatók számára egy pontosabb állapotbecslést lehetővé tevő, és hatékonyabb működést nyújtó infrastrukturális eszközező rendszernek.

3. Tézisek

I. Tézis

Termikusan öregített, különböző hosszúságú olaj-papír és térhálós polietilén részekből álló, vegyes kábelszakaszokon a továbbfejlesztett teljes feszültségválasz mérések eredményéből számított, polarizációs folyamatok időállandók szerinti eloszlását vizsgálva megállapítottam, hogy a polarizációs folyamatok időállandók szerinti eloszlására a térhálós polietilén kábelszakasz hatása elhanyagolható. A polarizációs folyamatok időállandók szerinti eloszlásának meghatározása során a térhálós polietilén szakaszt elegendő annak kapacitásával figyelembe venni. Így a továbbfejlesztett teljes feszültségválasz mérések eredményéből az olaj-papír rész állapota meghatározható, termikus degradációja nyomon követhető.

Kapcsolódó publikációk: (J2), (J5), (C2), (C3), (C5), (C6)

A feszültségválaszon alapuló diagnosztikai módszerek nagyon jól, és több évtizede alkalmazhatók az olaj-papír szigetelésű kábelek általános állapotának vizsgálatára [4, 16, 17]. Vegyes szakaszok esetén az olaj-papír rész állapotának meghatározására eddig kétféle feszültségválaszon alapuló megoldást közöltek [18–20]. Ezeket a módszereket azonban laboratóriumi vizsgálat keretén belül csak kis mintaszámú (1-2 kábel) és kevés különböző részarányú (1-2 különböző részarány) vegyes szakaszon validálták, valamint nem vizsgálták meg a módszerek alkalmazhatóságát több öregítési állapot mellett [18–20]. Korlátozást jelent a [18] módszer esetén, hogy csak akkor alkalmazható, ha az olaj papír szakasz hossza nincs a 20-40%-os hosszarány közt. Mindkét módszer egy-egy számmal jelöli a termikus degradáció előrehaladtát, tehát nem veszik figyelembe a polarizációs spektrum által biztosított nagyobb információ tartalmat [21, 22].

Ciklikus laboratóriumi öregítési vizsgálatot végeztem közepfeszültségű olaj-papír szigetelésű (PILC) kábeleken. Négy különböző mintán, három különböző részarányú XLPE+PILC vegyes szakaszon mérési eredményekkel bizonyítottam, hogy az XLPE szakasz feszültségválasz szempontjából kapacitásként helyettesíthető.

A továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszer eredményeiből meghatároztam egy iterációs módszer segítségével a polarizációs folyamatok intenzitásának időállandó szerinti eloszlását, a polarizációs spektrumot. Megállapítottam, hogy az XLPE szakasz részarányának növelése ellenére a kapott

spektrumok csak a polarizációk intenzitásában változnak, de a spektrum időállandó szerinti eloszlásában nem, vagy az állapotmeghatározás szempontjából elhanyagolható mértékben. Ebből következően, az általam bemutatott spektrumszámítási módszer alkalmas a különböző olaj-papír részarányú egyes szakaszok diagnosztikai vizsgálatára. A spektrumszámítási módszer segítségével a gyakorlati szempontból előforduló olaj-papír részarányok esetén kimutatható az olaj-papír szakasz termikus öregedettsége. Ennek oka, hogy a kis időállandóval rendelkező polarizációs folyamatok intenzitásának növekedése, tehát a polarizációs spektrum kisebb időállandók felé történő eltolódása egy indikátora az olaj-papír típusú szigetelések öregedésének [23], és ezt minden részarány, kábel és öregítési állapot esetén megtalálta az algoritmus.

II. Tézis

Kidolgoztam a villamos szigeteléseken a 20 Hz...500 kHz-es frekvenciatartományban végzett veszteségi-tényező mérés eredményeinek kiértékelésre szolgáló származtatott mennyiségeket tartalmazó új mutatórendszert. Az általam kidolgozott származtatott mennyiségeket tartalmazó új mutatórendszert rövid idejű, termikus igénybevételeket szimuláló laboratóriumi öregítésnek kitett PVC kábel- és szigetelésmintákon alkalmazva megállapítottam, hogy a PVC szigetelések rövid idejű termikus túlterhelése ezen mutatókkal kimutatható, valamint a bekövetkező degradáció roncsolásmentes módon nyomon követhető. Az eredményeket a mintákon elvégzett mechanikai, Shore D keménységméréssel validáltam.

Kapcsolódó publikációk: (J1), (J3), (J4), (C1), (C4)

PVC szigetelésű elosztóhálózati kábelmintákon, valamint ismert összetétellel készített PVC szigetelésű mintákon rövid ideig tartó (3-6 h) ciklikus termikus öregítést végeztem, a kábelmintákon több különböző hőmérsékleten. A mérési eredmények segítségével bebizonyítottam, hogy a rövid idejű termikus öregítések hatással vannak a PVC szigetelésű kábel állapotára. Definiáltam származtatott mennyiségeket, amelyeket korrelációvizsgálat segítségével összehasonlítottam az öregítés időtartamával, és a minták Shore D keménységével. A vizsgálat alapján megállapítottam, hogy a PVC rövid idejű termikus öregítése jól követhető, a szigetelés feszültségválaszaival és egyéb mért mennyiségekkel.

Megmutattam, hogy a hosszú idejű termikus öregítés hatását jól követő Shore D keménységnél lehetséges jobb mennyiségek választása is a rövid idejű termikus öregítés vizsgálatára. A megállapításokat az ismert összetételű PVC szigetelés lapkákon kapott eredmények is alátámasztották. Megállapítottam, hogy a legjobb mennyiségek arányosak a dielektrikumban 20 Hz és 500 kHz közt létrejött disszipált teljesítménnyel, így a rövid idejű termikus öregedés egy megfelelő mutatóval jól követhető.

III. Tézis

Rövid periódusokból álló, ciklikus termikus öregítéssel vizsgálatnak kitett PVC szigetelésminták öregedését továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszerével vizsgálva kimutattam, hogy a PVC lágyítófogyása — ami a PVC szigetelések meghatározó degradációs folyamata — a visszatérő feszültség kezdeti meredekségének értékével nyomon követhető. A termikus öregedés után visszamaradó lágyító mennyisége arányos a visszatérő feszültség kezdeti meredekségével. Az eredményeket mechanikai módszerekkel, Shore D keménységméréssel, valamint dinamikus mechanikai termikus analízissel (DMTA) validáltam.

Kapcsolódó publikációk: (J1), (C1), (E1)

A PVC egy rideg polimer, amelyet lágyító adalékokkal tesznek alkalmasá a kábelszigetelésként történő felhasználásra [10]. Korábbi kutatások bizonyították, hogy mechanikai mérési módszerekkel pl. szakadási nyúlás vagy indenter típusú mérésekkel követhető a termikus öregítés hatása PVC szigetelésen [24–26]. Ezek a módszerek azonban jellemzően együtt járnak a szigetelés roncsolásával, hiszen pl. a szakadási nyúlás méréséhez a kábelszigetelésből történő mintavétel szükséges.

Kidolgoztam egy eljárást, amely segítségével roncsolásmentes módon lehet következtetni a dioktil-ftalát (DOP) lágyító adalékkal lágyított PVC lágyítótartamának csökkenésére és a PVC üvegszerű vagy nagyrugalmas és üvegszerű állapot bekövetkeztére, amely a gyakorlatban a PVC szigetelés mechanikai élettartamának végére figyelmeztet.

Rövid ideig tartó (3-6 h) ciklikus termikus öregítést végeztem többféle lágyítótartamú PVC-ből készített színezékmentes szigetelésmintákon. Mérési eredményekkel bizonyítottam, hogy a továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszer segítségével az öregedés hatása jól követhető a kábelköpenyre

jellemző, vagy annál nagyobb keménységű szigetelések esetén. A köpenyke-ménységű mintákon jól megfigyelhető volt a lágyítótartam csökkenésével egy intenzív polarizációs folyamat időállandójának növekedése, tehát a polarizációs spektrumon való nagyobb időállandó felé való tolódása.

Megállapítottam, hogy a PVC üvegszerű, vagy üvegszerű és nagyrugalmas állapotok közti átmeneti állapotában a PVC lágyítótartamával arányosan változott a továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszerrel mért visszatérő feszültségek mereksége. Shore D keménységméréssel valamint a PVC dinamikus mechanikai termikus analízisével (DMTA) igazoltam a visszatérő feszültségek merekségeinek arányosságát a PVC lágyítótartamával.

Publikációk listája

Tézispontokat érintő közlemények

Lektorált, idegennyelvű folyóiratcikkek

- (J1) G. M. Csányi, S. Bal, Z. Á. Tamus, "Dielectric Measurement Based Deducted Quantities to Track Repetitive, Short-Term Thermal Aging of Polyvinyl Chloride (PVC) Cable Insulation", *MDPI Polymers*, vol. 12, no. 12, p. 2809, 2020. (IF: 3,426, Q1, Scopus, WoS)
- (J2) Z. Á. Tamus, D. Csábi, G. M. Csányi. "Characterization of dielectric materials by the extension of voltage response method." *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 646, no. 1, p. 012043, 2015. (Scopus, WoS)
- (J3) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, P. Kordás, "Effect of enhancing distribution grid resilience on low voltage cable ageing", *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 521 pp 300-307, 2018. (Scopus)
- (J4) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, Á. Varga, "Impact of distributed generation on the thermal ageing of low voltage distribution cables," *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 499 pp 251-258, 2017. (Scopus)

Magyar nyelvű lektorált folyóiratcikkek

- (J5) G. M. Csányi, Z. Á., Tamus. "Elemi polarizációs folyamatok vizsgálata", *Elektrotechnika*, vol. 11-12 pp. 17-19, 2019.

Konferenciaközlemények

- (C1) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Effect of short term thermal aging on PVC films by the extended voltage response measurement method", in *DIAGNOSTIKA '20 - Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE)*, Pilzen, Csehország, 2020.
- (C2) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Modeling of insulations by the results of voltage response measurement", in *ISH 2015 : 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilzen, Csehország, 2015.
- (C3) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Investigation of Dielectric Properties of Mixed PILC and XLPE Cable Insulation by the Extended Voltage Response Method", in: *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, Budapest, Magyarország, 2017.
- (C4) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, T. Iváncsy, "Investigation of Central Frequency and Central Loss Factor Values on Dioctyl-phthalate (DOP) Plasticized PVC

films", in *DIAGNOSTIKA '18 - Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE)*, Pilzen, Csehország, 2018.

- (C5) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, T. Iváncsy, "Investigation of dielectric properties of cable insulation by the extended voltage response method", in *Proc. of DIAGNOSTIKA '16 - Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE)*, Pilzen, Csehország, 2016.
- (C6) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Elemi polarizációs folyamatok vizsgálata továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszer segítségével", in *IX. Mechwart András Ifjúsági Találkozó*, Debrecen, Magyarország, 2019.

Egyéb

- (E1) G. M. Csányi, "Polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggésének vizsgálata", MSc Diplomamunka, 2015

Tézispontokhoz közvetlenül nem kapcsolódó közlemények

Lektorált, idegen nyelvű folyóiratcikkek

- (J6) Jaroslav Hornak, Pavel Trnka, Petr Kadlec, Ondrej Michal, Václav Mentlík, Pavol Šutta, G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Magnesium Oxide Nanoparticles: Dielectric Properties, Surface Functionalization and Improvement of Epoxy-Based Composites Insulating Properties", *MDPI NANOMATERIALS* vol. 8, no. 6, 2018. (IF: 4,032, Q1, Scopus, WoS)

Konferenciaközlemények

- (C7) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Investigation of Polarization Processes on Thin PVC Film Insulations by the Comparison of Frequency Domain Spectroscopy and Extended Voltage Response Measurements", in: *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, Budapest, Magyarország, 2017.
- (C8) R. Egyed, Z. Á. Tamus, G. M. Csányi, T. Iváncsy, "Testing of high voltage cable lines by damped ac technique – a case study", in *Proc. of DIAGNOSTIKA '16 - Conference on Diagnostics in Electrical Engineering CDEE 2016*, Pilzen, Csehország, 2016.
- (C9) Z. Á. Tamus, G. M. Csányi, Á. Szirmai, A. Nagy, "Insulation Diagnostics of High Voltage Equipment by Dielectric Measurements – Hungarian Research and Experience", in *International Scientific Symposium "Electrical power engineering 2016"*, Várna, Bulgária, 2016.

- (C10) Z. Á. Tamus, G. M. Csányi, "Laboratory investigation of a service aged HV cable termination", in *Jicable'15 - 9th International Conference on Power Insulated Cables*, Párizs, Franciaország, 2015.
- (C11) Z. Á. Tamus, G. M. Csányi, G. Tomon, "Investigation of temperature dependence of DC diagnostic tests on LV PVC insulated cables", in *Jicable'15 - 9th International Conference on Power Insulated Cables*, Párizs, Franciaország, 2015.
- (C12) G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Temperature dependence of conductive and polarization processes of PVC cable", in *Electrical Insulation Conference (EIC)*, New York, USA, 2014.
- (C13) D. Kapitány, G. M. Csányi, Z. Á. Tamus, "Investigation of in-service degradation of a low voltage PVC cable", in *Electrical Insulation Conference (EIC)*, New York, USA, 2014.
- (C14) P. Kordás, Z. Á. Tamus, G. M. Csányi, "Elosztott energiatermelés által okozott termikus túlterhelések vizsgálata a kiefeszültségű elosztókábelekre", in *VIII. Mechwart András Ifjúsági Találkozó*, Visegrád, Magyarország, 2018.

Hivatkozások

- [1] T. Orosz, „Evolution and modern approaches of the power transformer cost optimization methods,” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 63, no. 1, pp. 37–50, 2019.
- [2] E. Mustafa, R. S. Afia, and Z. Á. Tamus, „Condition monitoring uncertainties and thermal-radiation multistress accelerated aging tests for nuclear power plant cables: A review,” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 64, no. 1, pp. 20–32, 2020.
- [3] T. Orosz, A. Rassõlkin, A. Kallaste, P. Arsénio, D. Pánek, J. Kaska, and P. Karban, „Robust design optimization and emerging technologies for electrical machines: Challenges and open problems,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, p. 6653, 2020.
- [4] G. Csépes, „A visszatérõ feszültség mérés módszerének szigeteléses technikai alkalmazásai,” in *11. Villamosság 34.*, pp. 33–74, Sept 1986.
- [5] E. Nemeth, „Some newest results of diagnostic testing of impregnated paper insulated cables,” Dec 1997.
- [6] R. Patsch and O. Kouzmine, „P-factor, a meaningful parameter for the evaluation of return voltage measurements,” in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 906–909, IEEE, 2002.
- [7] G. Csepes, I. Hamos, R. Brooks, and V. Karius, „Practical foundations of the rvm (recovery voltage method for oil/paper insulation diagnosis),” in *1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.98CH36257)*, vol. 1, pp. 345–355 vol. 1, Oct 1998.
- [8] Z. Tamus and E. Németh, „Measurement of dielectric, mechanical and chemical properties of the insulation in cable diagnostic,” in *15th International Conference on High Voltage Engineering, ISH*, pp. 26–31, 2007.
- [9] A. Csank, „A kábeldiagnosztika fontossága dso oldalról.” https://www.insulationdiagnostics.com/userfiles/20171018_Csank_Kabeldiagnosztika_fontossaga_DS0_oldalrol.pdf, Elérve: 2021.03.09, Oct 2017.
- [10] B. Chaudhary, C. Liotta, J. Cogen, and M. Gilbert, „Plasticized pvc,” in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016.
- [11] Z. Á. Tamus and E. Németh, „Condition assessment of pvc insulated low voltage cables by voltage response method,” in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD*, pp. 721–724, 2010.

- [12] N. Höning, E. D. Jong, G. Bloemhof, and H. L. Poutre, „Thermal behaviour of low voltage cables in smart grid — related environments,” in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, pp. 1–6, Oct 2014.
- [13] P. Trichakis, P. C. Taylor, P. F. Lyons, and R. Hair, „Predicting the technical impacts of high levels of small-scale embedded generators on low-voltage networks,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, pp. 249–262, December 2008.
- [14] M. Zapf, T. Blenk, A.-C. Müller, H. Pengg, I. Mladenovic, and C. Weindl, „Lifetime assessment of pilc cables with regard to thermal aging based on a medium voltage distribution network benchmark and representative load scenarios in the course of the expansion of distributed energy resources,” *Energies*, vol. 14, no. 2, 2021.
- [15] P. Kadurek, J. F. G. Cobben, and W. L. Kling, „Overloading protection of future low voltage distribution networks,” in *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1–6, June 2011.
- [16] E. Nemeth, „Zerstörungsfreie prüfung von isolationen mit der methode der entlade-und rückspannungen,” *IWK*, vol. 66, pp. 87–91, 1966.
- [17] E. Nemeth, „Proposed fundamental characteristics describing dielectric processes in dielectrics,” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 305–322, 1971.
- [18] Z. Á. Tamus and I. Berta, „Condition assessment of mixed oil-paper and xlpe insulated cable lines by voltage response method,” in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 1–4, June 2010.
- [19] R. Patsch and D. Kamenka, „Diagnostic interpretation of return voltage measurements of cable lengths consisting of paper-oil and xlpe cables,” June 2011.
- [20] R. Patsch, „Dielectric diagnostics of power transformers and cables-return voltage measurements, theory and practical results,” in *VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium*, pp. 1–6, VDE, 2018.
- [21] A. Bogнар, G. Csepes, L. Kalocsai, and I. Kispal, „Diagnostic test method of solid/liquid electrical insulations using polarisation spectrum in the range of long time-constants,” in *7th Int’l. Sympos. High Voltage Eng.*, no. 25.11, pp. 1–3, 1991.
- [22] Ö. Luspay, „Közép-és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata,” *Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete, Budapest*, pp. 225–231, 2000.
- [23] T. K. Saha and P. Purkait, „Investigating the impacts of ageing and moisture on dielectric response of oil/paper insulation systems,” 2003.

-
- [24] E. Smoley, „Isothermal rupture characteristics of a plasticized poly (vinyl chloride) in the glass–rubber transition zone,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 20, no. 1, pp. 217–242, 1976.
- [25] M. Ekelund, H. Edin, and U. W. Gedde, „Long-term performance of poly (vinyl chloride) cables. part 1: Mechanical and electrical performances,” *Polymer degradation and stability*, vol. 92, no. 4, pp. 617–629, 2007.
- [26] M. Ito and K. Nagai, „Analysis of degradation mechanism of plasticized pvc under artificial aging conditions,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 92, no. 2, pp. 260–270, 2007.