



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

Szirmai Ágnes

Transzformátor szigetelésmodell dielektromos jellemzőinek vizsgálata

KONZULENS

Dr. Tamus Ádám

BUDAPEST, 2015.10.21.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	5
Abstract.....	6
Bevezetés	7
1. A transzformátorok olaj-papír szigetelése	9
1.1. A transzformátor szigetelésének felépítése	9
1.2. A szigetelő olajok.....	10
1.3. A papír.....	12
1.4. Az olaj-papír szigetelésekben lejátszódó dielektromos folyamatok	12
1.4.1. A vezetés.....	12
1.4.2. A polarizációk.....	13
1.4.3. A szigetelések helyettesítő kapcsolása	14
2. A feszültségválasz mérésen alapuló diagnosztikai módszerek..	16
2.1. Visszatérő feszültség mérés (RVM).....	16
2.1.1 Az RVM mérés menete.....	16
2.1.2. Az RVM mérés alkalmazása.....	17
2.2. A feszültségválasz mérés (VR)	18
2.2.1. A VR mérés menete	18
2.2.2. A VR mérés alkalmazása	20
3. A vizsgált transzformátor modell és a bemutatása	21
4. Az RVM és a VR mérés eredményei és kiértékelése.....	24
4.1. A visszatérő feszültségmérés eredményei, kiértékelés.....	24
4.1.1. Az RVM mérés eredményei	24
4.1.2. Az RVM mérés kiértékelése - A centrális időállandók hőmérsékletfüggése	25
4.2. A feszültségválasz mérés eredményei, kiértékelés.....	27
4.2.1. A VR mérés eredményei alapján számítható paraméterek és a számítás módja	27
4.2.2. A VR mérés kiértékelése - A soros RC tagok	29
4.2.3. A VR mérés eredményeinek ellenőrzése valós RC áramkör alapján	32
5. Az RVM és a VR mérés eredményei közötti kapcsolat	36
5.1. Az RC körön végzett RVM és VR mérés eredményei közötti átjárás menete.....	36

5.2. Az RC körön végzett RVM és VR mérés eredményei közötti átjárás eredményei.....	37
Összefoglalás.....	40
Irodalomjegyzék	41

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Szirmai Ágnes**, energetikus mérnök hallgató kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Kelt: Budapest, 2015. 10. 26.

.....
Szirmai Ágnes

Összefoglaló

A nagytranszformátorok diagnosztikai vizsgálataihoz számos dielektromos vizsgálati módszert fejlesztettek ki. Ezeknek a módszereknek egy hátránya, hogy a nagy időállandójú polarizációs folyamatok hordozzák a lényeges információkat a szigetelés állapotáról (nedvességtartalom, termikus öregedés), ezért a mérési idő igen hosszú lehet. A feszültség válasz (VR) mérés eredményeiből a szigetelés helyettesítő kapcsolásának meghatározása volt a célom.

A méréshez egy olaj-papír szigetelés modellt alkalmaztam, amelyen a visszatérő feszültség mérést és a feszültség válasz mérést különböző hőmérsékleteken végeztem el. A dielektromos folyamatokat a 0,1-10000 másodperces időállandójú tartományban vizsgáltuk. A mért visszatérő feszültség meredekségeket közelítettem a helyettesítő áramkör paramétereinek változtatásával.

Az eredmények azt mutatják, hogy az állapot-meghatározás szempontjából elfogadható hibával modellezhető a szigetelés néhány (4...6) Debye (soros RC) taggal, és a hőmérsékletváltozás hatására megfigyelhetők ezek által meghatározott időállandók eltolódása is. A helyettesítő áramkör elemeinek meghatározása után az eredmény összevethető a visszatérő feszültség mérés (RVM) eredményeivel.

Abstract

Several diagnostic methods have been developed on the basis of the measurement of dielectric response functions in frequency or time domain. The general problem with these methods is the long measurement time (some hours), since the slow polarization processes carry the information about the condition of the insulation. In this study, the author introduces how the voltage response technique have been extended by the variation of discharging times and from the results of a relative short measurement the extended Debye circuit of the oil-paper insulation can be calculated.

The experiments were conducted on the laboratory model of an oil-paper transformer insulation at different temperatures. For calculating the parameters of equivalent circuit, the dielectric relaxation processes were modeled in the 0.1 – 10000 s time constant range and the intensities of the processes were varied till the calculated slopes of return voltages became acceptable close to the measured values.

The result shows that the transformer insulation can be modeled by a simple equivalent circuit with few (4..6) Debye elements depending on the temperature of the insulation. By the usage of this equivalent circuit the results of the usual Return Voltage Measurement (RVM) can be easily calculated. By this development the dielectric response of the oil-paper transformer model can be determined lesser time comparing to the RVM method, but the validation of the method by field tests is necessary.

Bevezetés [1],[2]

A villamos hálózatok elemei, akár a láncszemek kapcsolódnak egymáshoz, és egy elem meghibásodása az őt követő elemek kiesését okozhatja. Ezért a rendszerirányítók fokozott odafigyelését igénylik az átviteli hálózatok elemei. A nagy teljesítményű villamos berendezések kiesése óriási károkat okozhat, amely diagnosztizálással, állapotfigyeléssel megelőzhető lehet. A diagnosztika célja a berendezések romlásának nyomon követése, maradék élettartalmának megbecslése. Jó diagnosztikai módszerekkel a hibák hamar észrevehetőek és következtetni lehet az okokra. Lehetőség van javítani vagy megelőzni a további károsodást vagy előre látni egy elem tönkremenetelét, így annak cseréljével a váratlan kiesés megelőzhető.

A nagytranszformátorok (több száz MVA-es) szerepe a hálózatban, hogy lehetővé teszik a nagy teljesítmények alacsony veszteséggel való szállítását a feszültségszint emelésével. Egy-egy ilyen berendezés egyedi tervezést igényel, és méretei valamint anyaga miatt több százmillió forintos beruházást is jelenthet. A nagytranszformátorok kiesésének megelőzése fontos feladat, mivel nagy teljesítményt szolgáltatnak, így meghibásodás esetén nagy károkat okozhat mind a vevőknek, mind a szolgáltatóknak. A transzformátor diagnosztika ezt a célt szolgálja.

Mint a villamos berendezések többségének, a transzformátor üzembiztonságának is a legkritikusabb pontja a szigetelés. A következőkben olaj-papír szigetelésű transzformátorokkal foglalkozok, ahol az olaj szerepe kettős. Egyrészt teljesítenie kell a villamos szigetelési feladatokat, másrészt a hűtési folyamatokban is nagy szerepet kap, ezért sok követelménynek kell megfelelnie. A szigetelés során az olaj a papírral sorosan illetve párhuzamosan van kötve, ezeket üzem közben sokféle igénybevétel éri (villamos, termikus mechanikai, környezeti), emiatt szigetelési képességeik romlanak.

A romlási folyamatok figyelésére, villamos és kémiai vizsgálatokat fejlesztettek ki, de jelenleg nincs olyan eljárás, mely egymagában érzékeny lenne a transzformátor összetett szerkezetében előforduló összes állapotromlásra. Az olaj kémiai vizsgálata a minta lecsapolása után a laborban történik, a transzformátor üzemelését nem megszakítva. Szintén üzemben lévő transzformátoron végezhető vizsgálatok a zajkibocsátás, rezgés mérés vagy a termovíziós vizsgálat. A szigetelés villamos vizsgálataira háromféle dielektromos vizsgálati módszert alkalmaznak: szigetelési ellenállás és abszorpciós tényező meghatározást, dielektromos veszteségi tényező és kapacitás mérést, illetve feszültségválasz mérést. Azonban a villamos vizsgálatokat a transzformátor kapcsain kell elvégezni, így a diagnosztizálás

idejére a transzformátort a hálózatról le kell kapcsolni. A diagnosztizálás idejét ezért amennyire lehet, le kell csökkenteni.

Munkám során a feszültségválasz mérésen alapuló módszereket vizsgáltam, különböző méréseket végeztem egy transzformátor mintán, először azzal a céllal, hogy a dielektromos jellemzők hőmérséklet függését vizsgáljam. Tovább vizsgálódva az eredmények alapján szigetelés modellt alkottam, és olyan módszert kerestem, amely lehetővé teszi a különböző fajta feszültség válasz mérések eredményei közötti átjárást. Azért fontos a különböző módszerek közötti átjárás, hogy a különböző mérések eredményei, amelyekkel ugyanazokat a jellemzőket mérjük, összevethetők legyenek. Különösen akkor, ha az egyik mérési módszer kevésbé időigényes és kiválthatja a másikat. Ebben az esetben a transzformátor, diagnosztizálás miatt, kiesett idejét lerövidíthetjük, de ehhez az kell, hogy egy transzformátor korábban más módon mért adatait összevethessük az új módszer eredményeivel, hiszen az állapotfigyelés csak így lehetséges.

1. A transzformátorok olaj-papír szigetelése [4]

A szigetelés vizsgálati módszereket nem tárgyalhatjuk anélkül, hogy a szigetelésről, néhány alap tulajdonságot és viselkedést ne mondanánk. Ebben a fejezetben először az olaj-papír szigetelésű transzformátorok szigetelésének felépítéséről, majd a szigetelő olajokról és a papirosról, végül pedig a szigetelésekben lezajló folyamatokról írok.

1.1. A transzformátor szigetelésének felépítése

A transzformátor aktív részei a tekercsek illetve a vasmag. A szigetelés feladata ezeknek a különböző potenciálokon lévő fém részeknek az elszigetelése. Egy nagytranszformátor szerkezeti felépítése bonyolult, még a szigetelési rendszere is, így ez a bekezdés nem elég a teljes leírásához, csak a dolgozat szempontjából fontos részletek kiemelésére.

A transzformátorok menetszigetelését papírral oldják meg, esetenként lakkal vagy zománccal, a szigetelési rendszerben ezeknek a szigeteléseknek kell a legkisebb igénybevételt kibírni. A meneteket egymásra gombolyítják több rétegben, ezekben a szomszédos rétegekben már nagyobb feszültségkülönbség lehet, a szomszédos rétegek között helyezkedik el a rétegszigetelés, szintén papírból.

Ha a tekercseket illetve a fém részeit a transzformátornak egyetlen potenciálon lévő elektródnak vesszük, és a köztük lévő szigetelésről beszélünk, azt főszigetelésnek hívjuk. Koncentrikus elrendezés esetén a főszigetelés méreteinek csökkentése céljából a kisebb feszültségű tekercset helyezik a vasmag köré, és erre a nagyfeszültségűt. A járom és a tekercsek végei között van a végszigetelés, melynek igénybevételét a tekercsvégek lépcsőzésével lehet csökkenteni. A főszigetelés olaj, melyet a transzformátor tartályba öntenek és az egész térfogatot kitöltve, a levegőtől elzárva van. Ezt az olaj szigetelést kiegészítik a tekercseken lévő szilárd burkoló szigetelések, a válaszfal, a támasztékok. Azzal, hogy az olaj a teljes térfogatot betölti, érintkezve a tekercsrendszerrel, itatott (impregnált) papírszigetelésről beszélünk, ahol az olaj és a papír tehát a tekercselést érő feszültség igénybevétel szempontjából sorosan és párhuzamosan vannak kapcsolva.

Az olaj szerepe a transzformátorban kettős. Egyrészt villamosan szigetel, másrészt hűtési feladatokat lát el, ezért sokféle paraméternek kell megfelelnie (viszkozitás, hőátadási tényező, stb.). A hatékonyabb hűtésért a tekercsek között olajcsatornákat alakítanak ki, illetve a szekrény falára hűtőbordák, hűtő csöveket alakítanak ki. A szigetelés minőségét a nedvesség súlyosan rontja, ezért mind a tekercsek közötti papírt, mind a szigetelőolajt ki kell szárítani és

hermetikusan elzárni a levegőtől. Ez a szárítás történhet kályhákban, vagy a tekercsek villamos úton való felfűtésével. Az olaj tágulását táguló tartályokkal teszik lehetővé, mely miatt az olaj a levegővel érintkezhet, nedvességet vehet fel, ezért az olajjal kapcsolatba kerülő levegő páratartalmát különböző módszerekkel (például granulátummal) csökkentik.

1.2. A szigetelő olajok

A nagyfeszültségű villamos készülékek legfontosabb folyékony szigetelőanyaga, és a berendezések hűtési folyamataiban is jelentős szerepet játszik a szigetelőolaj. Kőolaj finomítókban a desztilláció egyik frakciójából gyártják, majd kémiai kezelésekkel, tisztítással érik el a megkívánt villamos szilárdságot. A szigetelőolajok különböző összetételűek lehetnek, viszont szabványok írják elő a szállításkor, a betöltéskor, üzembe helyezéskor és üzem közben a villamos szilárdságot. Vannak egyéb szempontok, amik miatt számos szabálynak kell eleget tenni. A friss szigetelőolajok keret szabványát a IEC 60296 nemzetközi szabvány tartalmazza. Az 1.1 táblázat egy, a MOL Nyrt. által gyártott szigetelőolaj termékclapjának [6] egyik táblázatát mutatja, a tipikus jellemzők tipikus értékeivel.

Tipikus jellemzők

Minőségi jellemzők	Tipikus értékek
Sűrűség 20°C-on [g/cm ³]	0,867
Kinematikai viszkozitás 20 °C-on [mm ² /s]	22
Kinematikai viszkozitás 40 °C-on [mm ² /s]	10,1
Folyáspont [°C]	-45
Lobbanáspont (Pensky-Martens) [°C]	140
Határfelületi feszültség [mN/m]	42
Korrozív kén (ezüstlemezen)	nem korrozív
Korrozív kén (150 °C, 48 h)	nem korrozív
Korrozív kén (150 °C, 72 h)	nem korrozív
Átütési feszültség [kV]	
- kezelés nélkül [kV]	75
Dielektr. veszt. tényező 90°C-on, 40-60 Hz-en	0,0004

A táblázatban szereplő adatok a termékre jellemző tipikus értékek, nem helyettesítik a termék specifikációt.

1.1. ábra Szigetelőolaj tipikus jellemzői és értékei [6]

A lobbanás és gyúléspont nagysága tűzvédelmi szempontból fontos, a dermedéspont és folyáspont pedig üzemviteli szempontból. Mivel az olajnak a szigetelés mellett hűtenie is kell a berendezést, ezért megfelelően viszkozusnak kell lennie, hogy a kialakított résekben

áramolhasson. A szigetelőolajok kéntartalmát redukálják, ugyanis a kén a vezetékek anyagát, a rezet megtámadja.

Az átütési szilárdság és a dielektromos veszteségi tényező a szigetelés minőségére utalnak. Az új szigetelőolajok villamos szilárdsága pár 100 kV/cm, mely a szennyező anyagok, a nedvesség, az oldott gázok mennyiségével arányosan csökken. A villamos vezetés ionos vagy kataforetikus jellegű, nagyobb hőmérséklet esetén a villamos ellenállása az olajnak lecsökken, ezzel a villamos vezetése megnő. A szennyeződések az ionok számát megnövelik, így a vezetőképességet tovább csökkentik. Stabilizátorral, inhibitorral és különböző adalékokkal lassítják a hő okozta bomlását az olajnak. A nedvesség főleg a levegő páratartalmából jut az olajba, ezért az olaj levegővel való érintkezését törekednek a minimálisra csökkenteni, ez azonban a transzformátorok „légzése” (hőre való tágulás majd összehúzódás) miatt nehéz. Tovább rontja a szigetelőképességét az olajnak az egyes kisülések általi kormozódása. Azonban a folyékony szigetelő anyagok bizonyos fokig képesek regenerálni magukat, azzal, hogy a degradációk nem maradnak az átütés helyén, viszont a villamos jellemzők így is romlanak.

A szigetelési tulajdonságok a hőmérséklettől is erősen függenek, a tiszta szigetelőolajok fajlagos ellenállása 10^{14} Ωcm nagyságú, de igen kis hőmérsékletváltozás hatására (pár 10 °C) egy nagyságrendet csökkenhet ez az érték. Az olaj permittivitása $\epsilon=2,1- 2,5$ körüli, amely tiszta olaj esetén nem függ a hőmérséklettől, viszont a nedves és szennyezett olaj permittivitása a hőmérséklet növekedésével erősen növekszik.

Az öregedés az az irreverzibilis folyamat, amikor az anyagok szerkezete megváltozik az üzem közben illetve a tárolás, szállítás közben fellépő igénybevételek során. Ezek az anyagszerkezeti változások megváltoztatják a kémiai, mechanikai és villamos tulajdonságokat, többek között a fent említett fontos tulajdonságokat is, ezért az öregedés folyamatait fontos számba venni. Az olaj 100°C felett, oxigén jelenlétében öregszik. Polimerizációs folyamatok során nagy molekulású anyagok keletkeznek, valamint oxidáció hatására alkoholok, ketonok, észterek, aldehidek és szerves savak képződnek. A nagymolekulájú vegyületek kicsapódnak, lerakódnak és a viszkozitást növeli. Savszámméréssel, mely egy kémiai vizsgálat lehet az öregedés fokára következtetni, és látni fogjuk, hogy villamos vizsgálatokkal is.

Diagnosztizálás során az adalékok pótlása, az olaj tisztítása, regenerálása vagy akár a teljes cseréje is indokolt lehet.

1.3. A papír

A papír cellulózrostok rendezetlen halmaza. A cellulóz nagy molekulájú, növényi eredetű a földön előforduló leggyakoribb szerves vegyület. Képlete a $(C_6H_{10}O_5)_n$, ahol n a polimerizáció foka 1000-10.000 közötti érték, a használt anyagtól és a gyártási módtól függ. A papírt puhafákból (nyár, fenyő) gyártják, a fát szétroncsolják, majd a cellulózrostokat lúgban főzik, hogy a növényi viaszoktól, zsíroktól, ásványi anyagoktól megtisztítsák. Ezután ezt az amorf masszát, tömörítik vagy sajtolják. A cellulózváz összetöredése a villamos és mechanikai tulajdonságokat rontja, ugyanakkor a nedvszívó képességét növeli, ezért ezt minél kevésbé kell ronsolni a gyártás során. A papír vastagsága transzformátorok szigetelésében 0,04-0,08mm.

A gyűrűs szerkezethez különböző csoportok csatlakoznak, így a molekula poláros és kémiaiailag nem stabil, hajlamos a depolarizációra és a bomlásra. A fény, a nedvesség, az oxigén és a magasabb hőmérséklet hatására ezek az öregedési folyamatok felgyorsulnak. Az olajjal impregnálás során a papírszigetelést levegő oxigéntartalmától elzárjuk, illetve a nedvszívó képességét lecsökkentjük, így magasabb hőállóságot érhetünk el és az öregedési folyamatokat lassíthatjuk. Fontos az optimális hűtés beállítása is az olaj áramlásával, mert az a papír élettartalmát megnövelheti.

Az előregedett papír szilárdsága lecsökken, a mechanikai rezgések hatására leszakadhat. A szakadás helyén átívelés lehetséges, illetve a leszakadt, előregedett papír darabok szennyezik az olajt, annak rontják a szigetelő és hűtő képességeit. Előregedett papír szigetelést diagnosztizálva érdemes lehet a transzformátor tekercseinek újratekercselése új papírral.

1.4. Az olaj-papír szigetelésekben lejátszódó dielektromos folyamatok [3],[5]

A szigetelő anyagok nem tökéletesen szigetelnek, bennük a térerősség hatására dielektromos folyamatok mennek végbe: vezetés és polarizációk. Minkét folyamat villamosan töltött részecskék elmozdulásával jár.

1.4.1. A vezetés

A két, különböző potenciálú elektród között lévő szigetelésben áram fog folyni, bizonyos töltött részecskék végleg elhagyják helyüket és az egyik pólus felé fognak haladni, ahol

leadják töltésüket. Ezt a jelenséget hívjuk vezetési áramnak, és megállapíthatjuk, hogy bár a szigetelések villamos ellenállása nagy, mégsem végtelen.

A mozgó részecskék általában ionok, ezért a jelenség ionos vezetésnek is nevezhető. Folyékony szigetelőkben jellemző még az ionvezetés mellett a kataforetikus vezetés is. A poláros szennyező molekulák kolloid részecskéket alkotnak önmagukban vagy a rájuk tapadó vízmolekulákkal. Mivel ezek az ionoknál nagyobb molekulájúak, így lassabban mozognak, de a hőmérséklet növekedésével ionokra szakadhatnak.

Az impregnált, rétegzett anyagokban leginkább a fent említett vezetési folyamatok játszódnak le. Kristályos anyagokban beszélhetünk még a kristályszerkezettől függően egyéb vezetésekről is, de ez a transzformátor szigetelésben nem kap szerepet.

A vezetési folyamat erősségét γ [A/Vm] fajlagos vezetőképességgel jellemezhetjük. A vezetőképesség függ a térerősségtől, illetve a hőmérséklettől jelentősen. Ha a hőmérséklet nő, azzal a részecskék mozgási energiája is, így a vezetés is erőteljesebbé válik, a szigetelési ellenállás lecsökken. A vezetési folyamatok addig végig zajlanak, amíg a szigetelés villamos térben van, így folyamatos veszteséget jelentenek.

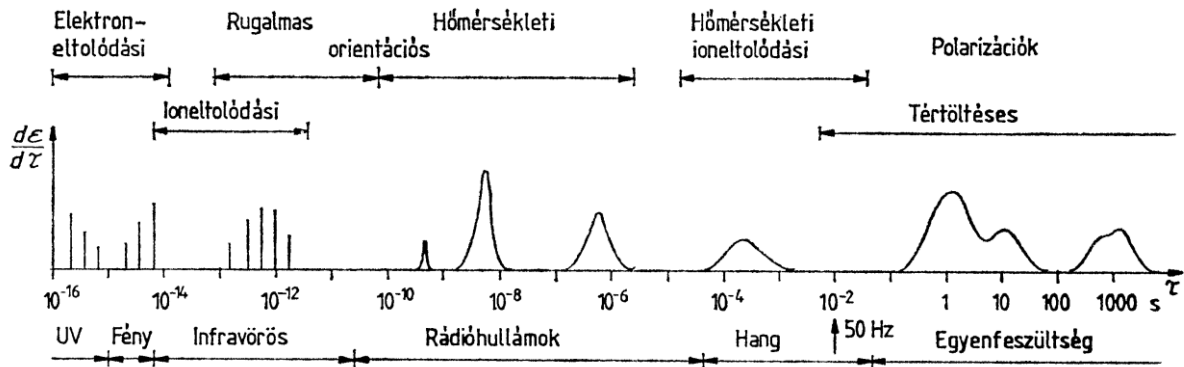
1.4.2. A polarizációk

A szigetelő anyagokban vannak olyan folyamatok is melyek során a töltések bár átrendeződnek, de a helyüket nem hagyják el, csak a térerősség irányába fordulnak, eltolódnak az ellenkező elektróda felé, és így dipólussá válik az anyag, mely korábban a környezet felé semleges volt. Ezt a jelenséget az anyag polarizációjának hívjuk.

A polarizációs folyamatok a szigetelésre kapcsolt feszültség hatására időben exponenciálisan fejlődnek ki, különböző időállandókkal, jellemzően 10^{-14} - 10^4 s közé eső időállandóval. A térerősség csökkenésével ugyanazzal az időállandóval visszaalakulnak. Ha a térerősség nem változik, akkor megmaradnak, és kialakulásuk után további veszteséggel nem járnak, ha változik a térerősség (pl.: 50 Hz-el) akkor ezek is folyamatos veszteséget jelentenek, úgy, mint a vezetés.

Az elektródákra ezzel a folyamattal kötött töltések áramlanak, az anyag polarizálhatóságával arányos mennyiséggel. A polarizáció erőssége jellemezhető az egységnyi felületen levő kötött töltéssűrűséggel, vagy az egységnyi térerősség hatására kifejlődő polarizáció nagyságával. A polarizáció erőssége függ a térerősség nagyságától, az anyagi minőségtől, szennyezettségtől, öregedési állapottól, nedvességtől.

A polarizációs folyamatokból az anyagban egyszerre több különböző erősségű és időállandójú is ki kezd fejlődni a térerősség megjelenésével. Felrajzolható egy szigetelő anyagra a különböző időállandójú polarizációk függvényében azoknak az erőssége, ekkor a polarizációs spektrumot ($\alpha(\tau)$) kapjuk (1.2. ábra). A különböző időállandójú polarizációk más-más polarizációs folyamatok (elektroneltolódási, ioneltolódási, hőmérsékleti orientációs, rugalmas orientációs, tértöltéses polarizáció, határréteg polarizáció.), és a kialakulásukhoz szükséges idő miatt különböző frekvenciájú jelekkel vizsgálhatók.

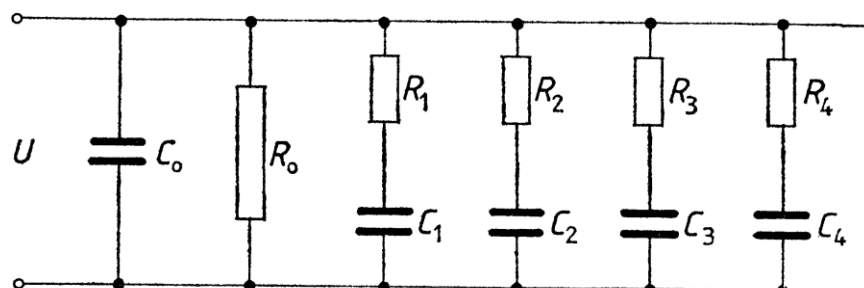


1.2. ábra: Polarizációs spektrum [9]

Ez a spektrum nem csak szigetelőanyagoként más, hanem az egyes szigetelőkben lezajló romlási folyamatokra is vannak jellegzetességek. Különösen a spektrum nagy időállandójú (10^2 - 10^4 s) szakasza jellemzi az öregedési és nedvességi állapotát az anyagnak. Diagnosztikai szempontból tehát ez egy fontos vizsgálandó intervallum, látható, hogy a polarizációs folyamatokat vizsgálva a szigetelő romlási folyamataira lehet következtetni.

1.4.3. A szigetelések helyettesítő kapcsolása

Az előbb megnevezett dielektromos folyamatok alapján a szigetelőanyag helyettesítő áramköre felrajzolható ellenállásokkal és kapacitásokkal (1.3. ábra).



1.3. ábra Szigetelések helyettesítő vázlata

A szigetelő anyag nélküli, az elektródok geometriájából származó geometriai kapacitást a C_0 kondenzátor jelenti, a szigetelési ellenállást, amin a vezetés létrejön, az R_0 képviseli. A sok soros R_x-C_x tag (úgynevezett Debye-tag) pedig a különböző időállandójú ($\tau=RC$) polarizációs folyamatokat jelenti. Mivel a polarizációs spektrum folytonos, így elvileg végtelen sok soros R_x-C_x tag modellezi a dielektromos folyamatokat. A kapacitások a kötött töltéseket szimbolizálják, így a kapacitások nagysága a folyamat erősségével arányos. Ha nem törekszünk a teljes spektrum felvételére, kiemelhetők a centrális időállandók, melyek erősebbek a többinél, ez a továbbiakban fontos lesz, hogy a modell egyszerűsíteni tudjuk kevesebb RC tagra.

2. A feszültségválasz mérésen alapuló diagnosztikai módszerek

Az előzőekben láthattuk, hogy a nagy időállandójú polarizációs folyamatok követése hasznos lehet állapotfigyeléshez. Ezek többek közt a szigetelés feszültségválaszával vizsgálhatók. Feszültségválasz méréskor a szigetelés elektródjai között fellépő feszültségek időbeli változását nézzük. Töltés után két görbe alakul ki, a kisülési és a visszatérő feszültséggörbe. A két elterjedt mérést, a teljes feszültségválasz (V(oltage) R(esponse)) és visszatérő feszültség mérést (R(eturn) V(oltage) M(easurement)) végeztem a kutatás során. Mindkettő feszültségválasz mérésen alapuló módszer, a vizsgálat módja és a mért jellemzők között nagy a hasonlóság. A két módszer eredményeit elemeztem, a VR mérés alapján a szigetelésnek egy egyszerű modelljét alkottam meg, a jellemzők hőmérsékletfüggését vizsgáltam, illetve a két módszer közötti összefüggéseket kerestem. Ebben a fejezetben a két feszültségválasz mérés menetét, alkalmazását ismertetem.

2.1. Visszatérő feszültség mérés (RVM)

2.1.1 Az RVM mérés menete

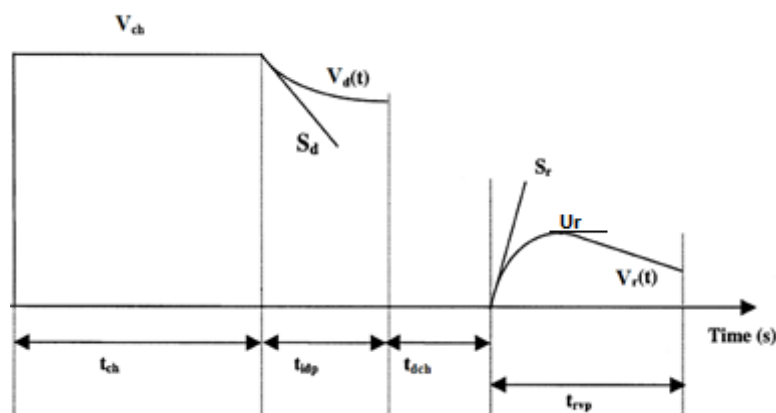
A mérést egy RVM 5461 készülékkel végeztük. Első lépésben a szigetelés feltöltését végzi a műszer. A vizsgálófeszültséggel ($U_c=1$ kV) T_c ideig tölti a szigetelést $0,2s - 10000s$ között 18 féle ideig. Ekkor a szigetelésben fellépő azon vezetési és polarizációs folyamatokat gerjesztjük, melyek a töltési időnél kisebb időállandójúak.

Második lépésben a töltési időnek a feléig $t_{dc}=t_c/2$ rövidre zárjuk a szigetelést, ekkor azok a polarizációk, melyek időállandója a töltési és a kisütési idő közé esik, aktívak maradnak, míg a többi visszaalakul. A töltési és kisütési idők változtatásával különböző időállandójú polarizációkról kapunk eredményt, lépcsőzetesen változtatva ezeket az időket, letapogathatunk egy egész intervallumot és egy spektrális eloszlást kapunk. A 2.1. ábra mutatja, hogy különböző töltési és kisütési időkhöz milyen időállandó rendelhető, szabvány szerint a töltési idő fele ($\tau=t_c/2$).

t_t/t_{rz} (s)	Hozzárendelt idő- állandó T (s)
0,02/0,01	0,01
0,1/0,05	0,05
0,2/0,1	0,1
1/0,5	0,5
2/1	1
10/5	5
20/10	10
100/50	50
200/100	100
1000/500	500

2.1. ábra Töltési és kisütési időpárok és hozzárendelt időállandó [7], [8]

A következő lépésnél, a rövidzár bontásakor az elektródákon kötött töltések jelennek meg a fennmaradó polarizáció miatt, ez, ha a szigetelés modellen nézzük tölti a geometriai kapacitást, illetve kisül a szigetelési ellenálláson (1. ábra). A műszer méri a visszatérő feszültség kezdeti meredekségét (S_r) csúcserőértékét (U_r) és a csúcs eléréséig eltelt időt (T_p). A feszültség alakulása az idő függvényében illetve a mért mennyiségek a 2.2. ábrán láthatók.



2.2. ábra RVM módszernél mért jellemzők

2.1.2. Az RVM mérés alkalmazása

A mérés alapján meghatározható $U_r(t)$ és $S_r(t)$ függvények. A visszatérő feszültség csúcserőértéke bizonyítható, hogy arányos a szigetelőanyagban fellépő polarizáció intenzitásával [4]. A visszatérő feszültség kezdeti meredeksége pedig egy másik dielektromos jellemzővel arányos, az aktivált polarizációs folyamatokhoz tartozó polarizációs vezetőképességgel (β), az alábbi összefüggés szerint:

$$S_r = \beta \cdot \frac{U_c}{\varepsilon_0} \quad (I.)$$

Ahol:

S_r - A visszatérő feszültség meredeksége [V/s]

β - polarizációs vezetőképesség

U_c - Töltési feszültség [V]

ε_0 - az anyag permittivitása

Időállóknak a szabvány a töltési idő felét veszi, azonban a töltési időt azért célravezető alkalmazni, mert a mérések alapján a visszatérő feszültséget leginkább azok a polarizációk befolyásolják, melyek a töltési idő nagyságába esnek. Én a továbbiakban ezt alkalmaztam és visszatérő feszültségek csúcspontjait az így értelmezett időálló függvényében ábrázolva egy görbét kapunk. Ennek a görbének a csúcspontjához tartozó időálló a centrális időálló.

A méréssel kapott spektrum állapotellenőrzésre használható, a centrális időállóknak figyelmével. 1-5 centrális időálló különböztethető meg általában a spektrum alapján. A nedvességtartalom növekedésével a domináns időállóknak csökkennek, 20 °C-on, 0,5%-os nedvességtartalom esetén még 500s feletti, míg 4% esetén már 1s alatti időállóknak mérhetők. A centrális időállóknak mennyisége az öregedés során keletkező bomlástermékekkel együtt nő, illetve csakúgy, mint a nedvesség, az öregedés is a kisebb időállóknak felé tolja a spektrumot. 1,5%-os nedvességtartalom felett már a csak a két folyamat eredőjét mérhetjük, kis víztartalom esetén azonban az öregedési folyamatok külön vizsgálhatóak a méréssel.

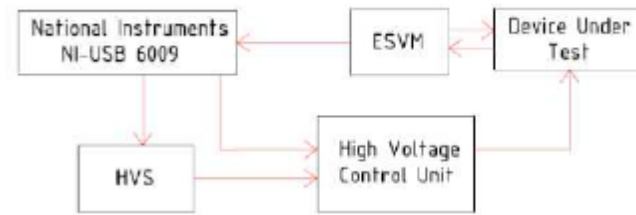
A visszatérő feszültség mérés lényege a szigetelés élettartamára következtetni, amit az öregedés és a nedvességtartalom határoz meg. Azonban a hőmérséklettől való függés kényes pontja ennek a vizsgálatnak, ugyanis a centrális időállóknak a hőmérséklettől is jelentősen függenek. A méréseink egyik célja a hőmérsékletfüggés vizsgálata volt.

2.2. A feszültségválasz mérés (VR)

2.2.1. A VR mérés menete

A méréshez használt tanszéki műszer blokkdiagramja a 2.3. ábrán látható. A mérőkártyával (NI-USB 6009) a számítógépen futó szoftveren keresztül vezéreljük a nagyfeszültségű feszültségforrást (HVS) és a nagyfeszültségű irányítópanelt (HVCU), ami a próbatesthez (DUT) csatlakozik. Az elektrosztatikus voltmérő (ESVM) méri a próbatest feszültségét, és az

adatokat a mérőkártyának küldi. Az elektrosztatikus voltmérő egyenfeszültségen gyakorlatilag fogyasztásmentesen mér [5].

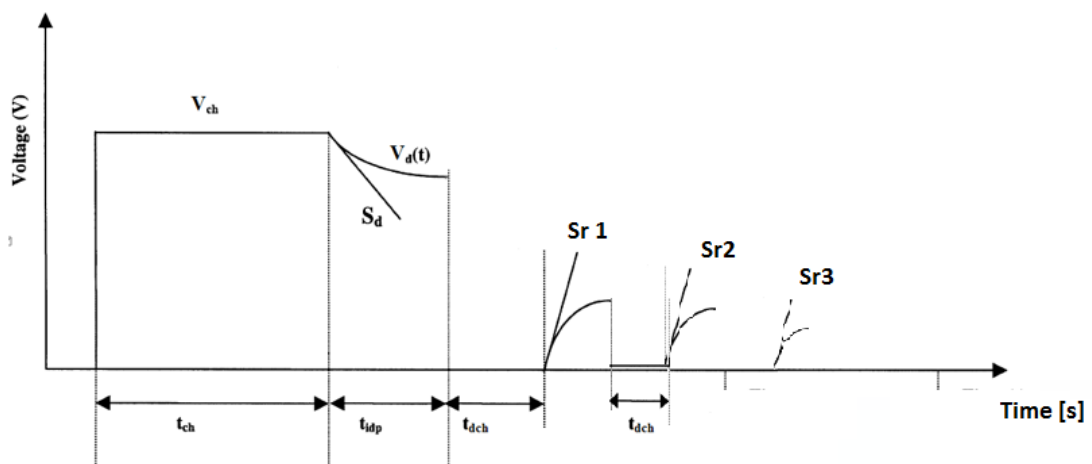


2.3. ábra Feszültségválasz mérő blokk diagramja [5]

A műszer első lépésben $U_c=1000V$ -al $t_c=4000s$ -ig tölti a szigetelést, ezután megméri az kisülési görbe kezdeti meredekségét (S_d). Ezután különböző időtartamokig ($t_{dch}=1\dots2000s$) kisüti, és egy-egy időtartam után megméri a visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredekségét (S_r), majd újra rövidrezárja a mintát, 20 lépésben, legvégül 2000 másodpercig. Egy ilyen mérés után, rövidrezárjuk a szigetelést, hogy minden polarizációs folyamat visszaalakuljon, és a következő mérést így kezdhetjük újra. A mérés eredménye, egy S_d érték illetve a 20 rövidrezárás után visszatérő feszültséggörbék kezdeti meredekségei (S_r).

Az ismertett módszer nem az eredeti VR mérési módszer. Az eredetiben egy töltés majd egy rövidzár után csak egy visszatérő feszültséget mér a műszer, így különböző kisütési idők esetén újra fel kell tölteni az anyagot, ami előtt azonban a töltési idő többszöröséig rövide kell zárni, hogy a polarizációk visszaalakuljanak, ami időigényes. A tanszéken ezt a módszert fejlesztették tovább és így a mérési idő lecsökkent.

A feszültség alakulása az idő függvényében illetve a mért mennyiségek a 2.4. ábrán láthatók.



2.4. ábra VR mérésnél mért jellemzők

2.2.2. A VR mérés alkalmazása

A mérésünk célja a továbbfejlesztett módszer vizsgálata, az eredmények hőmérsékletfüggésének vizsgálata, valamint egy egyszerű szigetelésmodell készítése a mérési eredmények alapján.

A VR mérés előnye, hogy a vezetési és a polarizációs folyamatokat külön lehet vizsgálni, ugyanis a kisülési görbe kezdeti meredeksége (S_d) a fajlagos vezetőképességgel arányos:

$$S_d = \gamma \cdot \frac{U_c}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.})$$

Ahol:

S_d - A kisülési görbe kezdeti meredeksége [V/s]

γ - fajlagos vezetőképesség [A/Vm]

U_c - Töltési feszültség [V]

ε_0 - az anyag permittivitása

A visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredeksége pedig, mint említettem a polarizációs vezetőképességgel arányos, még hozzá azokkal a polarizációs folyamatokkal, melyek időállandója a töltési és a kisülési idő közé esik:

$$S_r = \beta \cdot \frac{U_c}{\varepsilon_0} \quad (\text{III.})$$

Ennek a két folyamatnak a külön vett vizsgálata azért előnyös, mert a két legfontosabb romlásfolyamat az öregedés és a nedvesedés ezzel a kettővel van összefüggésben. A nedvesség főleg a vezetési folyamatot, az öregedés főleg a nagy időállandójú polarizációs folyamatokat befolyásolja, így tehát ez a két folyamat is külön vizsgálható.

A szigetelés jellemzői, különösen a vezetés jelentősen függenek a hőmérséklettől, szerencsére a nedvesedés hatása ebben az esetben is nagyságrendekkel nagyobb, mint a hőmérsékleté.

3. A vizsgált transzformátor modell és a bemutatása

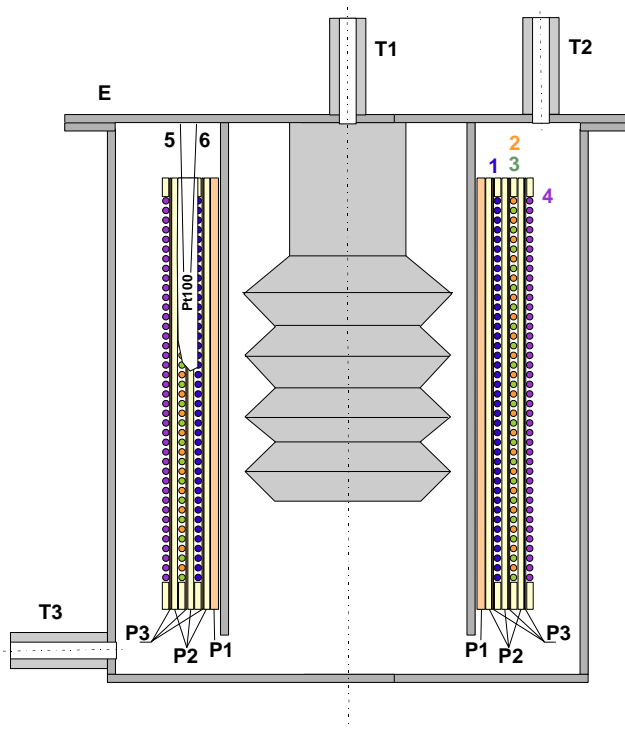
A vizsgált transzformátor modell (3.1-3.2.-3.3. ábrák) 4 koncentrikus tekercselésből áll, rozsdamentes acéltartályban elhelyezve, és egy-egy tekercshez egy-egy kivezetés tartozik. A belső és a külső tekercsek 1.5mm átmérőjű, 146 menetes, egyrétegű vörösréz tekercsek, 2 réteg papírral szigetelve. A két középső tekercs egyenként 73 menetes bifilárisan tekerve, szintén 1.5mm átmérőjű vörösrézből és 2 réteg papírral szigetelve. A párhuzamos tekercsek közül, csak a kettes sorszámút mértük, ugyanis a geometriában számottevő különbség nincsen a hármashoz képest. A tekercsokat perspán távtartó csíkok választják el egymástól, illetve az egész tartály 8.4 liter szigetelő olajjal van feltöltve, melynek a feltöltéskor 12.6 ppm volt a víztartalma.

Az RVM és VR méréseket az 1,2,4-es jelű kivezetéseken végeztük, úgy, hogy a vizsgálófeszültséget a vizsgált tekercselés kivezetésére kötöttük, a többit pedig a tartály testével együtt földeltük. A méréseket különböző hőmérsékleteken végeztük: 25, 40, 55, 70 °C-on. A hőmérséklet beállításához egy légkeveréses kemencét használtunk. A transzformátor minta hőmérsékletének mérésére egy 100 Ohmos Pt 385 hőérzékelő van beépítve. A mérések során ezt ki kellett kapcsolni, hogy a mérési eredményeket ne zavarja a hőérzékelő jele, így csak két mérés között tudtuk a hőmérsékletet leolvasni.

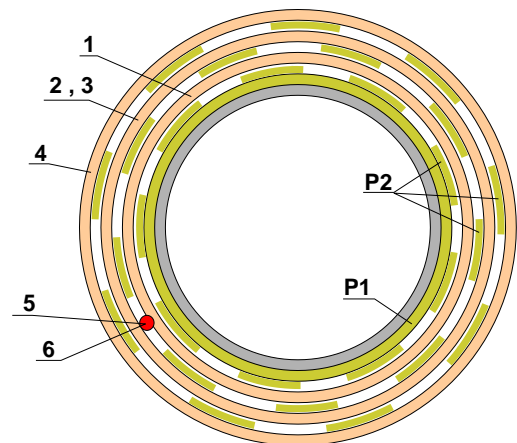
Az alábbi táblázat a geometriai kapacitásokat és veszteségi tényezőket mutatja, 1kV-os, 50 Hz-es váltakozó feszültségen mérve, különböző kivezetéseken:

A modell különböző kivezetései között elvégezve a mérést	C [nF] szárítás előtt	C [nF] szárítás után	$10^4 \text{ tg}\delta$ szárítás előtt	$10^4 \text{ tg}\delta$ szárítás után
1 – többi kivezetés földelve	1.41	1.236	1741	70
2 - többi kivezetés földelve	9.973	9.566	2884	55
3 - többi kivezetés földelve	9.914	9.570	2851	60
4 - többi kivezetés földelve	1.498	1.243	1764	60
2,3 - többi kivezetés földelve	1.947	1.737	1960	63
1,4 - többi kivezetés földelve	2.409	2.324	1940	54

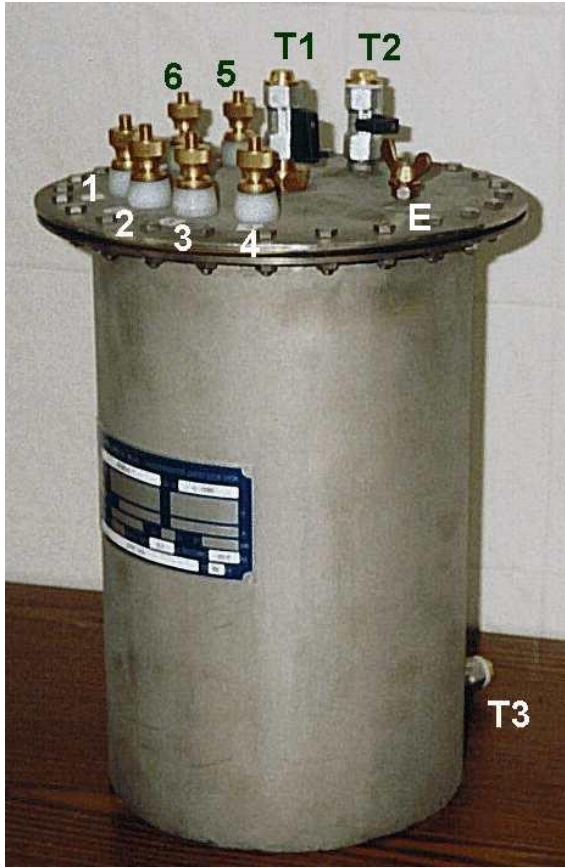
3.1.táblázat Geometriai kapacitások



3.2. ábra: Transzformátor modell oldalnézet



3.3. ábra: Transzformátor modell felülnézet



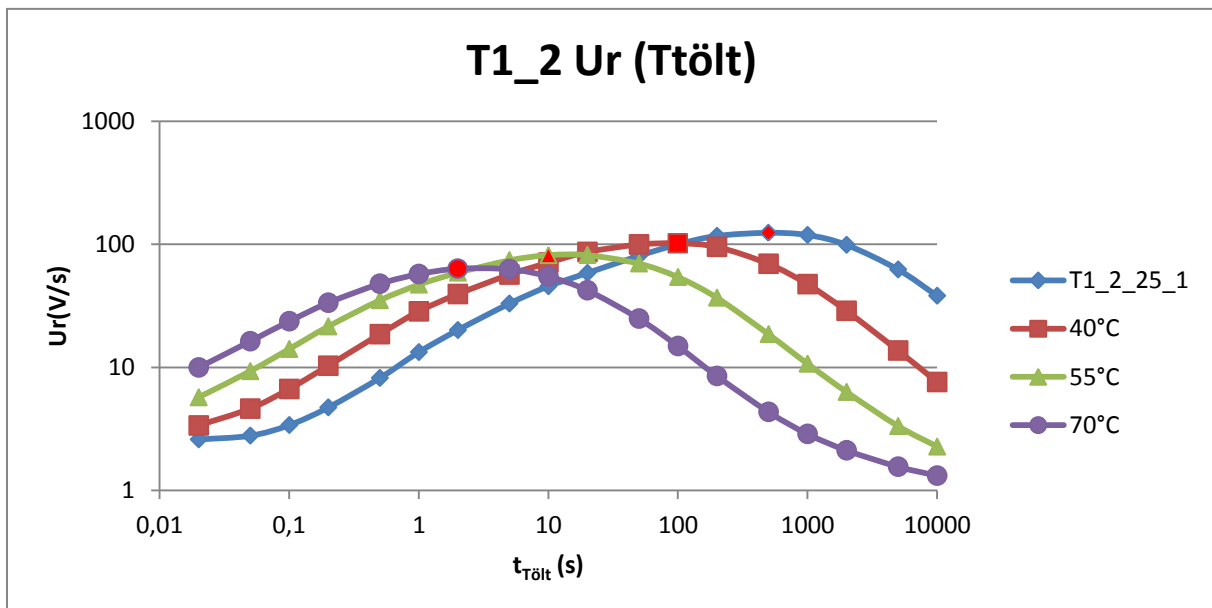
3.1. ábra Transzformátor modell kívülről

4. Az RVM és a VR mérés eredményei és kiértékelése

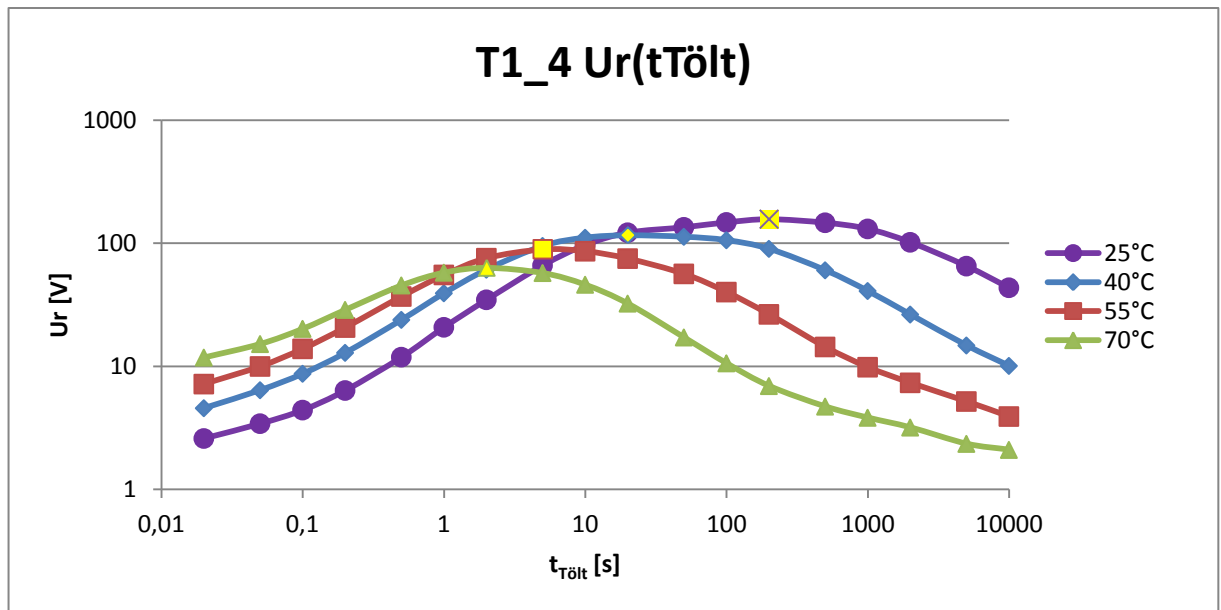
4.1. A visszatérő feszültségmérés eredményei, kiértékelés

4.1.1. Az RVM mérés eredményei

Az előző fejezetben ismertetett modellen elvégeztük a szintén korábban bemutatott méréseket. A visszatérő feszültség eredmények alapján először a polarizáció intenzitásának időállandó szerinti eloszlását vizsgáltuk, majd ennek változását a hőmérséklettel. A különböző geometriák (más-más kivezetések) eredményei közötti nagy hasonlóság volt, így részletesen minden kivezetést nem elemzünk (csak a 2. és 4. kivezetést), a hasonlóságok az eredményekből leszűrt következtetésre is igazak. A 4.1.-4.2. ábra a 2. és 4. kivezetésű tekercselés szigetelésének mérési eredményeit mutatja, log-log skálán, a mérési eredményekre burkológörbét rajzoltam.



4.1 ábra: 2 kivezetés mérési eredményei, különböző hőmérsékleteken, pirossal jelölt a centrális időállandó



4.2. ábra: 4 kivezetés mérési eredményei, különböző hőmérsékleteken, sárgával jelölt a centrális időállandó

4.1.2. Az RVM mérés kiértékelése - A centrális időállandók hőmérsékletfüggése

Az előző bekezdésben említett észrevétel, hogy a különböző kivezetések eredményei hasonlóan viselkednek, fontos, mert látható, hogy ezek az összefüggések, melyek az időállandókról szólnak általánosak, tehát a visszatérő feszültség időállandó szerinti eloszlása anyagjellemzőként viselkedik, a térfogattól, geometriától kis mértékben függ, viszont az anyag állapota (pl.: hőmérséklet, nedvesség), melyet most változtatunk, jelentősen befolyásolja.

A kivezetések eredményeit megnézve (4.1.-4.2. ábra) a visszatérő feszültség csúcsértékei a kis ideig tartó töltések esetén a töltési idő növekedésével nőnek. Ennek a növekedésnek a meredekségével kapcsolatos, hogy időnként megfigyelhetők a csúcsérték előtt is már kiugró időállandók, ez arra utal, hogy több domináns időállandójú polarizáció is van a szigetelésben. A visszatérő feszültség csúcsértékek egyre kevésbé nőnek, majd eléri a csúcsértéket (centrális időállandó) és lecsökkennek. A visszatérő feszültség csúcsértéke az adott időállandójú polarizáció erősségével arányos, tehát a polarizációs folyamatok erősségei hasonló módon növekednek az időállandókkal, majd a centrális időállandó után csökkennek. Ezzel a módszerrel tehát megtalálható a centrális időállandó.

Jól látható módon, a magasabb hőmérsékleten mért centrális időállandók eltolódtak a spektrum elejére, a kisebb időállandók felé, tehát a hőmérséklet emelkedésének hasonló hatása van a spektrumra, mint a korábban említett öregedésnek, illetve mint a nedvesedésnek. Ez azt jelenti, hogy a mérést az üzemből kivett transzformátoron nem mindegy, hogy mikor végzik, a hűlés milyen szakaszában. A mérést különböző hőmérsékleten elvégezve ugyanarra a szigetelésrendszerre más eredményt kapunk és pont az a lényeges információkat homályosíthatja így el a mérés. Ugyanakkor, míg a nedvesség pár %-os változása a centrális időállandónak négy-öt nagyságrendnyi eltolódását okozza, addig a mérések alapján a hőmérséklet kezdeti, szobahőmérsékletéről (25°C) 15°C-al való növelése után jelentős, akár egy nagyságrendi csökkenés történik, viszont a két nagyságrendhez legalább a 45°C-os hőmérsékletemelést volt szükséges. Így tehát néhány fokos hőmérsékletingadozás nem okoz nagy hibát a mérésben, viszont célszerű egy transzformátor mérését egységesen, kihűlt állapotban mérni, ekkor ugyanis a spektrum eltolódását leginkább az öregedés és a nedvesség befolyásolja.

A 4.1-4.2. ábrák alapján az is megfigyelhető, hogy nem csak a centrális időállandó, de annak maximuma is eltolódik, csökken a hőmérséklettel. Most már csak a centrális időállandókat vizsgálva erről az eltolódásról lesz szó.

A 4.3. ábrán a centrális időállandók természetes alapú logaritmusai láthatók a hőmérséklet függvényében, minden kivezetés esetén. A görbék az előzőek szerint a hőmérséklet növekedésével monoton csökkennek, és az első kivezetést leszámítva egyenessel jól közelíthetőek, tehát a centrális időállandó a hőmérséklettől exponenciálisan függ, ahogy azt az exponenciális trendvonalak mutatják. Az alábbi tapasztalati képlet tehát alkalmazható. [4]:

$$\tau_1 = \tau_2 \cdot e^{\frac{-(T_1 - T_2)}{a}} \quad (\text{IV.})$$

Ahol:

τ : a centrális időállandó

T: a hőmérséklet

a: nagyszámú mérés során megállapítható az értéke:

új, száraz szigetelés esetén	20°C
új, közepesen nedves szigetelés esetén	15°C
régi, nem túl nedves szigetelés esetén	10°C
öreg, nedves szigetelés esetén	8°C

Ez az összefüggés az Arrhenius egyenlethez hasonló, mely egy reakciósebességi állandó hőmérséklet függését fejezi ki:

$$k = k_0 \cdot e^{\frac{E_a}{k_B T}} \quad (V.)$$

Ahol:

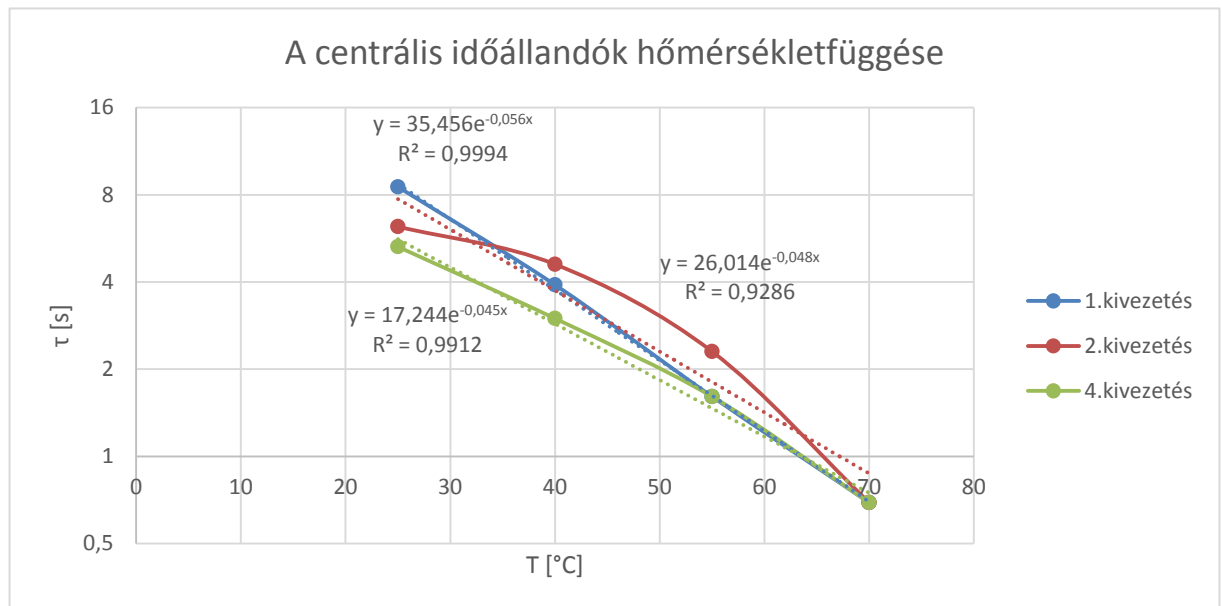
k: reakciósebesség időállandója

E_a : aktiválási energia

k_B : Boltzmann állandó $k_B = 1,380\ 6488(13) \cdot 10^{-23}$ J/K

T: hőmérséklet [K]

A képlet és a saját mérési eredmények alapján a értéke 5 és 17 között változott, több mérési eredménnyel, illetve sűrűbb töltési idők beállításával pontosabb közelítés lenne lehetséges, a mostani méréssel a centrális időállandó leolvasása nem pontos.



4.3. ábra: A centrális időállandók hőmérsékletfüggése

4.2. A feszültségválasz mérés eredményei, kiértékelés [10],[11],[12], [15]

4.2.1. A VR mérés eredményei alapján számítható paraméterek és a számítás módja

A mérési eredmények, a 20 rövidzárási idő után mért S_r értékek. Ezek ismeretében célunk az volt, hogy azokat iterációs módszerrel a lehető legjobban megközelítsük, különböző

időállandójú polarizációkból származó S_r értékek összegeken. A kiindulást a szigetelőanyagok helyettesítő áramköre jelentette (3.3. ábra).

Az áramkör alapján a rövidzár miatt C_o kisül, míg egy C_x tag feszültsége (U_{Ci}) a töltés majd a rövidzárás után:

$$U_{Ci} = U_c \cdot (1 - e^{-\frac{t_c}{\tau_i}}) \cdot e^{-\frac{t_{dch}}{\tau_i}} \quad (\text{VI.})$$

Ahol:

t_c : töltési idő [s]

t_{dc} : kisütési idő [s]

τ_i : időállandója az i -edik tagnak $\tau_i[\text{s}] = R_i[\text{G}\Omega] \cdot C_i[\text{nF}]$

U_c : töltőfeszültség (1000 V)

A modell alapján a visszatérő feszültségre, mely az egyes C_x tagokból szökik vissza, a C_o geometriai kapacitás rövidzár, a C_x kondenzátorok ezen kezdenek kisülni, R_x -en keresztül. A kezdeti feszültséggörbe meredeksége egy-egy tagra meghatározható:

$$S_{ri} = \frac{U_{Ci}}{R_i \cdot C_o} \quad (\text{VII.})$$

Ahol:

R_i : az i -edik tag ellenállása [$\text{G}\Omega$]

C_o : geometriai kapacitás értéke az első táblázatból [nF]

A tagok eredő kezdeti meredekségét az egyes meredekségek összegeként számoltam:

$$S_r = \sum_1^n S_{ri} \quad (\text{VIII.})$$

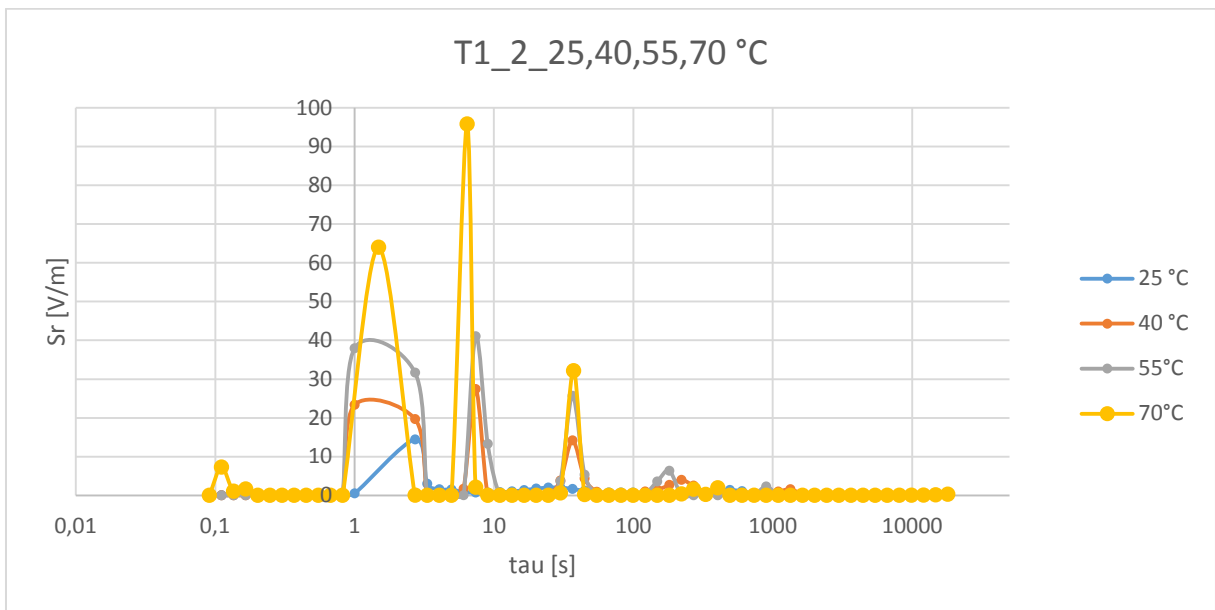
A számolás egy iterációs folyamat, melynek során a párhuzamos RC tagok értékeit kerestük, hogy az általuk kapott feszültségválasz, a töltési és kisütési idők ismeretében megegyezzen a mérttel. Tehát az egyes tagokból származó S_r -ek összegei adott töltési és kisütési idő esetén megegyezzen a mért S_r -el. Ehhez az egyik peremfeltétel a szorzatukkal kapott időállandó megadása és fixálása volt, így R és C csak úgy tudott változni, hogy szorzatuk állandó volt. 58 időállandót vettünk fel 0,1 és 1800s között és változtatható paraméternek R_x és C_x volt.

Ennek a meredekségnek kellett az optimalizálás során a lehető legkevésbé eltérnie a mérttől. Illetve mivel egy hőmérsékleten és egy kivezetésen, 20 rövidzárási idő volt, tehát 20 mérés volt, így 20 S_r tagot kellett közelíteni, ugyanazoknak a paramétereknek a változtatásával, és a cél ennek a 20 értéknek a mérttől való eltérés négyzet összegének a

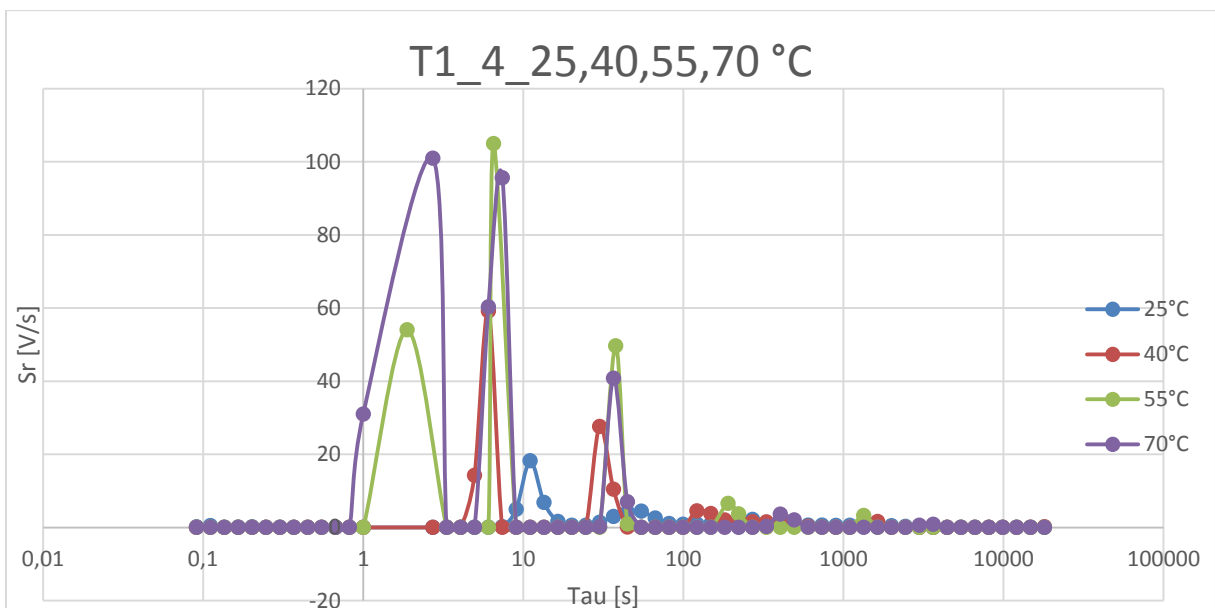
minimalizálása volt. A fent bemutatott iterációs feladat Excel Solver használatával viszonylag kis hibával megoldható, de más optimalizáló program alkalmazása célravezetőbb lehet.

4.2.2. A VR mérés kiértékelése - A soros RC tagok

Az alábbi ábrák az előzőekben bemutatott a közelítési módszerek az eredményeit mutatja a 2. és a 4. kivezetésekre, a különböző hőmérsékleteken az első rövidzárási idő utáni S_r -t az időállandók függvényében.



4.4. ábra Eredmények a 2. kivezetésre



4.5. ábra: Eredmények a 4. kivezetésre

Ennek a közelítésnek a pontossága a 2. kivezetésen: 25°C-on 0,87 az eltérés négyzetösszeg, 40°C-on 0,56, 55°C-on 3,2, 70°C-on 10,2. Míg a 4. kivezetésen 25°C-on 0,84, 40°C-on 3,71, 55°C-on 9,23, 70°C-on 76,6. Ezek nagyon alacsony hibák 20 tag esetén, ahol egy-egy mért Sr érték 200-as értéket is felvehet. Az alábbi táblázat egy példát mutat a 2. kivezetés esetén 55 °C-on a mért és a közelített eredmények láthatók.

Mért Sr	Számolt	Eltérés
171,42	171,51	0,08
130,46	130,20	0,25
93,89	93,94	0,05
75,83	76,63	0,80
65,80	65,60	0,20
58,88	57,68	1,20
44,14	44,90	0,76
36,97	37,21	0,23
28,50	28,29	0,21
19,80	19,43	0,37
13,29	13,68	0,39
10,37	10,39	0,02
7,07	7,03	0,05
5,51	5,36	0,15
3,57	3,60	0,03
1,97	2,06	0,09
1,39	1,33	0,06
0,98	0,99	0,00
0,58	0,63	0,06
0,45	0,44	0,01
	Eltérésösszeg	
		5,02

4.1. táblázat: Mérési eredmények 55°C-on, a 2. kivezetésen

A 4.4.-4.5. diagramokon az egyes időállandókhöz az első rövidzárási idő után visszatérő feszültség meredekségét vettem, mint amplitúdó érték. Ha a további rövidzárási időkhöz tartozó Sr-t vesszük, hasonló spektrumot kapunk, csak kisebb értékekkel, mert a visszatérő feszültség meredeksége is kisebb a későbbi rövidzárásokkor. Másik lehetőség a C_x/C_0 hányadost venni, mint az adott időállandójú folyamathoz tartozó erősség, de a C_x érték függ az előre meghatározott időállandó nagyságától is, a kis időállandókhöz, kisebb kapacitások tartoznak, így nem számít ott kiugrónak egy-egy magasabb kapacitásérték.

Fontos észrevétel, hogy bizonyos időállandóknál erős csúcsok keletkeztek. Ezek valószínűleg egy- egy erős polarizációs folyamat, mely polarizációs időállandója a csúcshoz

hasonló. Vannak olyan csúcsok, melyeket két egymás melletti pont alkot, ott valószínűleg csak egy polarizációs folyamat lehet, de a közelítésünk nem elég pontos, hogy azt az időállandót megtalálja, így a két közel eső időállandót emeli ki a módszerünk. A két egymás mellé eső csúcs időállandóját kézzel változtatva, megtalálható a polarizációs csúcs, de ez a módszer erre magától nem képes. Lehet olyan módszer mellyel ezek a hibák kiküszöbölhetők.[7]

A csúcsok a hőmérséklettel alig vándoroltak az időállandó skáláján, viszont a maximumok értékei nőttek a hőmérséklettel, főleg a kis időállandók változnak nagy mértékben a hőmérséklettel. A hőmérséklet emelkedésével a legtöbb polarizációs folyamat erősödik. A modell alapján kétféle következtetés lehetséges, annak alapján, hogy az időállandó azonos maradt, de az erősség nőtt. Egyik feltételezés az lehet, hogy a polarizációt szimbolizáló kapacitások értékei nőttek meg, ezzel együtt a velük soros ellenállások csökkentek. Ez alapján a modell alapján azt feltételezzük, hogy a hőmérséklet hatására több töltés halmozódott fel a pólusoknál.

Másik lehetőségnél a soros kapacitás és ellenállás értékek a különböző hőmérsékleteken azonosak. A szigetelési ellenállást (R_0) eddig a visszatérő feszültség szempontjából szakadásnak vettük, és azt feltételeztük, hogy az kisülés a C_0 -on keresztül történik. A hőmérséklet növekedésével viszont a szigetelők ellenállása csökken, a részecskéknek nagyobb a kinetikus energiájuk megnő a szigetelő anyagon átfolyó áram. Így az is előfordulhat, hogy a visszatérő feszültségnél a villamos vezetés a szigetelő anyagon keresztül már nagyobb hőmérsékleten nem elhanyagolható, és ez okozza a nagyobb intenzitást a polarizációs folyamatoknál.

Mivel minden eredményen 3-4 darab maximumot lehet felfedezni, arra következtettem, hogy négy RC tag is elég lehet a szigetelés modellezéséhez, mely tagok időállandója a csúcsok közelébe esnek. A következő lépésben ezért már csak négy RC tagot kerestem és az időállandó értékét nem fixáltam, hanem változni engedtem. Az alábbi táblázat mutatja a 2. kivezetésre, különböző hőmérsékletekre az eredményeket, az ellenállások $G\Omega$ -ban, a kapacitások nF-ban, az időállandók s-ban.

25°C										
eltérés összeg	R2	C2	R4	C4	R1	C1	R3	C3	Szumma C	
0,564625	3,29	0,61	6,34	1,92	11,37	8,04	19,18	49,29	59,87	
	tau2		tau4		tau1		tau3			
u1	2,00		12,18		91,47		945,35			
40°C										
eltérés összeg	R4	C4	R2	C2	R1	C1	R3	C3	Szumma C	
1,463664	1,35	0,94	2,29	3,03	3,89	13,22	10,14	49,11	66,31	
	tau4		tau2		tau1		tau3			
u1	1,28		6,94		51,49		498,20			
55°C										
eltérés összeg	R1	C1	R3	C3	R2	C2	R4	C4	Szumma C	
7,606021	1,00	1,13	1,22	4,06	2,18	14,76	9,56	31,56	51,52	
	tau1		tau3		tau2		tau4			
u1	1,13		4,96		32,19		301,63			
eltérés összeg	R3	C3	R4	C4	R2	C2	R1	C1	Szumma C	
21,65288	1,00	0,75	1,00	2,06	1,00	8,56	4,25	17,54	28,91	
	tau3		tau4		tau2		tau1			
u1	0,75		2,06		8,56		74,47			

3.2. táblázat: 4RC tag esetén eredmények a 2. kivezetésre

Az időállandók értéke hasonló, mint az előző módszerrel, illetve egyes esetekben az egyik el is hagyható a négyből (a nagyon kis értékek, melyek közel esnek egymáshoz). A hiba pedig, bár a 20 tag helyett csak 4-el közelítettünk, nem nőtt jelentősen, tehát az eredményeim alapján az mondható, hogy valóban az 3.3. ábra szerinti helyettesítő kapcsolásnál elég lehet akár 4 RC tag is olaj-papír szigetelés modellezéséhez.

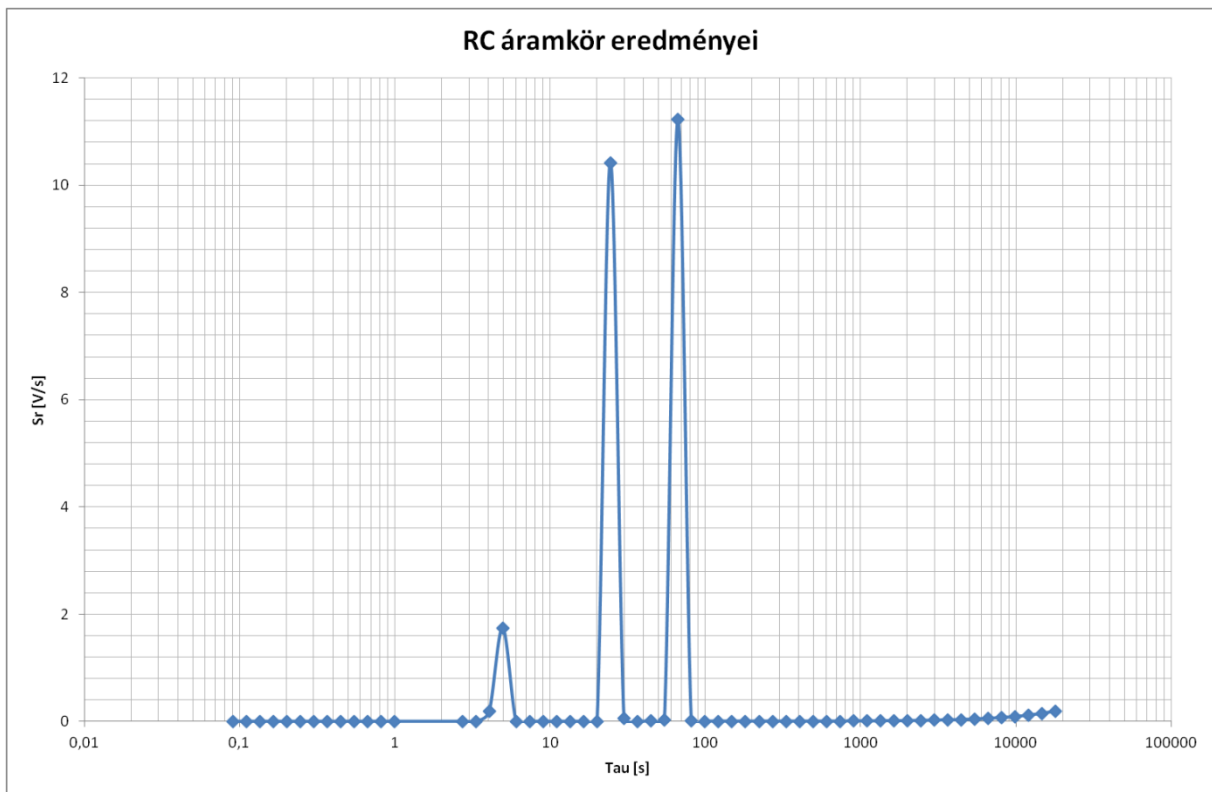
A csúcspontok x tengelyen való eltolódását a hőmérsékletváltozás hatására nehéz ezzel a módszerrel meghatározni, mivel a csúcsok helye nem egyértelmű, és a közelítés hibákat is tartalmaz. Továbbá vannak olyan csúcsok, melyek eltűnnek. A 4 RC tagos módszerrel pedig még nehezebb felismerni, hogy melyek az összetartozó időállandók. A pontosabb optimalizáló módszert ezért is lenne célravezető alkalmazni.

4.2.3. A VR mérés eredményeinek ellenőrzése valós RC áramkör alapján

A fenti módszer elméletének valós RC áramkörök kiértékelésekor is működnie kell. Ha ezt belátjuk, és tudjuk ellenőrizni, akkor az mondható, hogy ha valóban lehet a szigeteléseket a 3.3. ábra alapján modellezni, akkor a VR mérés eredményeiből helyesek a fenti következtetések.

Ehhez az ellenőrzéshez ismert nagyságú, két párhuzamos RC tagból, illetve egy ezekkel párhuzamos kapacitásból és ellenállásból álló áramkört raktam össze, és elvégeztem rajta a VR mérést.

Az eredményekre lefutattam az iterációs számításokat és megkerestem a polarizációs csúcsokat, és a kapacitás illetve ellenállás értékeket és összevettem a valós értékekkel. A 4.7. ábra az eredményeket mutatja, az eltérés négyzetösszeg ekkor 1,41.



4.7. ábra: Az RC áramkörre végzett számítások eredményei

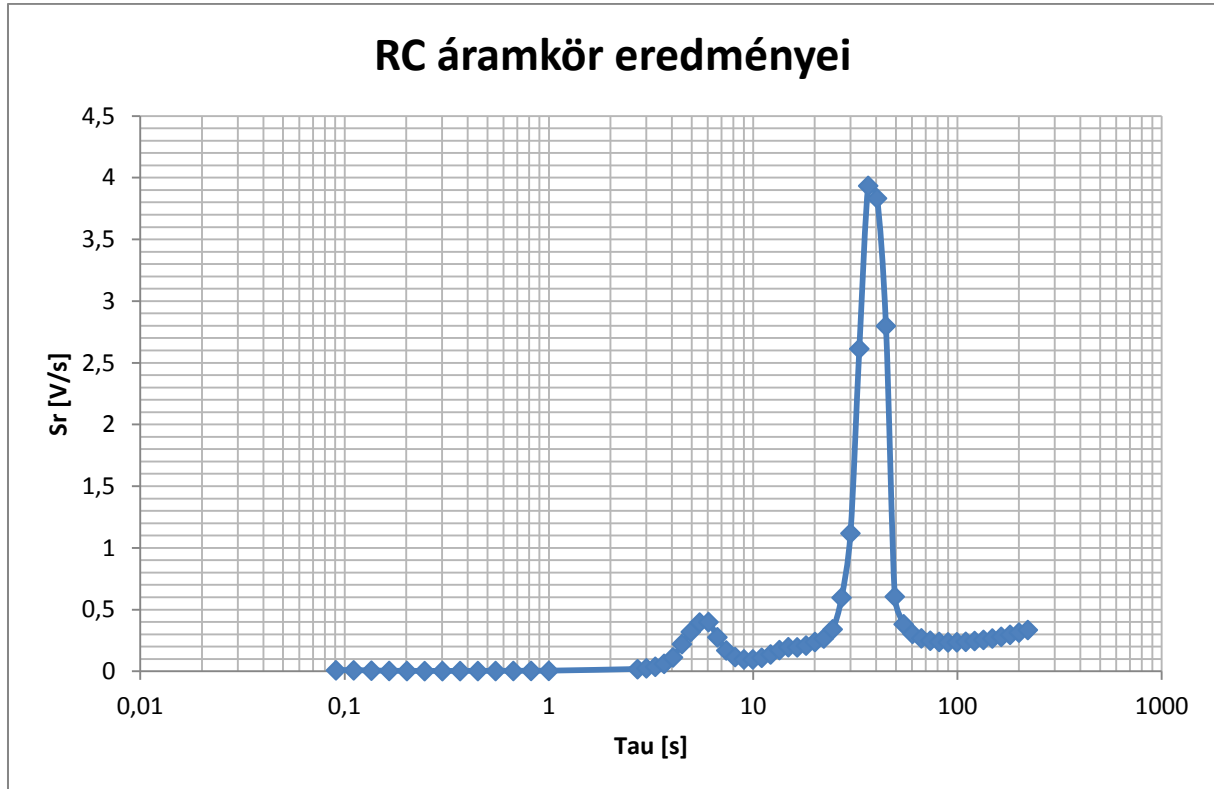
Az alábbi (4.3.) táblázat mutatja a keresett (valós) és a keresés eredményeit.

Keresett τ	Számított τ	Keresett R	Számított R	Keresett C	Számított C
[s]	[s]	[G Ω]	[G Ω]	[nF]	[nF]
5,3044	4,953	1,78	2,83	2,98	1,7447
	24,5325		2,35		10,42
42,3792		2,16		19,62	
	66,686		5,93		11,23

4.3. Táblázat A keresési és valós eredmények összehasonlítása

Látható mind a diagramból, mind a táblázatból, hogy eggyel több csúcsot (tagot) talált a módszerünk, mint kellett volna. A kisebb időállandójú tagot, kis eltéréssel megtalálta ez a módszer. A nagyobb időállandójú tagot viszont az előzőekben már említett hibával találta

meg, úgy hogy a valós időállandó helyett két közel eső tagot talált, pedig valójában azok között van az eredmény. Ahhoz, hogy ezt kiküszöböljem, a következő lépésem az volt, hogy a fix időállandókat sűrűbben vetem fel, és újra lefutattam a solvert. Ennek eredménye a 4.8. ábrán látható.



4.8. ábra Sűrűbb időállandókkal vizsgálva

Az eltérés négyzetösszeg ekkor 0,764-re csökkent, tehát látható, hogy egyre precízebb a közelítés, és már csak két csúcs van. Ebben az esetben a csúcsok a megfelelő időállandókhöz esnek: 5,47 (míg a valós: 5,3) és 36,59 (míg a valós 42,38). Mivel az időállandók csak diszkrét értékeket vehetnek fel, azok nem lesznek teljesen egyezők a valós időállandóval, de az időállandók sűrítésével ezek egyre pontosabbak, ebben az esetben ezeknél közelebbi értéket nem tud felvenni az időállandó. Ha ezekkel tisztában vagyunk, akkor elfogadhatjuk és alkalmazhatjuk ezt a módszert, amin látható, hogy eddig komolyabb beavatkozás nélkül működik.

A 4.8. ábrán viszont még az is látható, hogy a csúcsok melletti időállandók intenzitása is megnő, inentől a további közelítést kézzel kell elősegíteni. Ezt könnyíti, hogy a csúcs helye már jó, csupán a többi tag intenzitását kell lecsökkenteni. Az így kapott eredmény esetén az eltérés négyzetösszeg lecsökkent 0,19-re. Ez az utolsó lépés a polarizációs csúcsok

időállandójának megtalálása szempontjából már nem fontos. A következtetés az, hogy kellő odafigyeléssel használva a módszer valóban alkalmas az RC tagok megtalálására.

5. Az RVM és a VR mérés eredményei közötti kapcsolat

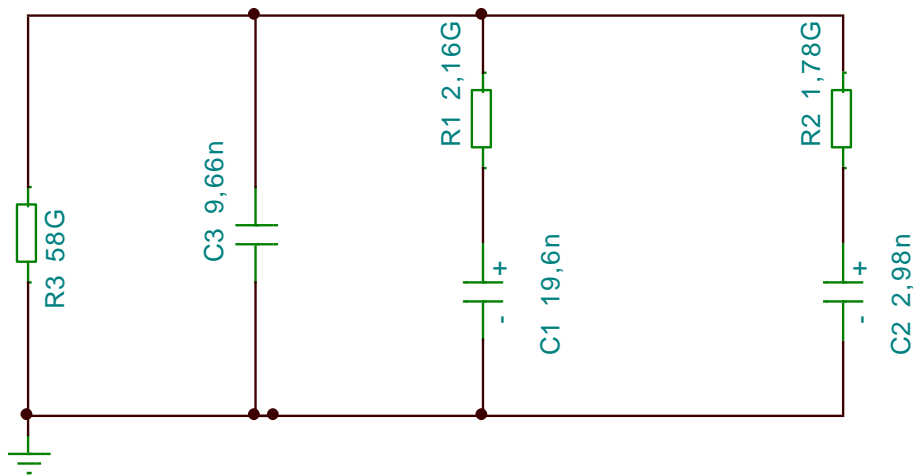
A kapcsolat megteremtése a két mérés eredményei között azért fontos, mert az a VR műszer melyet alkalmaztam a mérések során, egy továbbfejlesztett változat, melynek mérési ideje jóval rövidebb a hagyományos VR mérésénél, illetve az RVM mérésénél. Ennek oka, hogy egy töltési idő után több rövidzárás után mérjük a visszatérő feszültség jellemzőit és nem kell minden töltés után hosszan rövidre zárni a szigetelést és várni, hogy minden polarizáció visszaalakuljon, és kezdhessük a következő mérést más töltési idővel. Láthattuk, hogy a VR módszer is alkalmas önmagában állapotfigyelésre, de a hálózaton üzemelő transzformátorok diagnosztikai eredményei azonban leginkább RVM méréssel vannak végezve, az évek során egy transzformátor állapotváltozását azok összehasonlításával végzik. Így tehát a jóval rövidebb ideig tartó VR mérés eredményei a már régóta üzemben levő transzformátorokon, csak akkor alkalmazhatóak, ha az eredményi alapján az RVM mérés eredményeivel össze lehet vetni. A következő feladatként tehát erre kellett módszert találni. Az ellenőrizhetőség kedvéért az átjárást az összeállított és fent bemutatott RC tagon végeztem el. Ugyanezeket a méréseket egy párhuzamos RC taggal is elvégeztem, és hasonlóan jól működött a módszer, de az eredményeket itt csak a bonyolultabb rendszeren mutatom be.

5.1. Az RC körön végzett RVM és VR mérés eredményei közötti átjárás menete

Az RC tagok kiszámolása után a szigetelés modell-hálózat többi eleme is megkapható más mérési módszerrel. A geometriai kapacitás az 50 Hz-en mért geometriai kapacitás méréssel, melybe azonban a gyors polarizációs folyamatok is beleértendők. A szivárgási ellenállás egyenáramú méréssel kapható meg, ezen az elemen azonban elhanyagolható mennyiségű áram folyik, így a mérése nem szükséges, és a modellbe sem szükséges ennél a feladatnál bevenni. Mivel a hálózatelemek ismertek voltak, így én belevettem a modellbe a szigetelési ellenállást is. Ezek alapján a szigetelés modellezhető egy RC tagokra alkalmazható, egyszerű villamos áramkörök szimulációjára kifejlesztett software-el, én a Tina Pro v6.008 softwaret használtam.

Az RVM mérés paraméterei alapján (töltési feszültség, töltési idő, rövidzárási idő) számolhatóak a VR mérésből megkapott egyes elemek feszültségének értékei a VI. egyenlet alapján, majd ezek, az áramkör megrajzolása után, bevihetők a programba, mint a

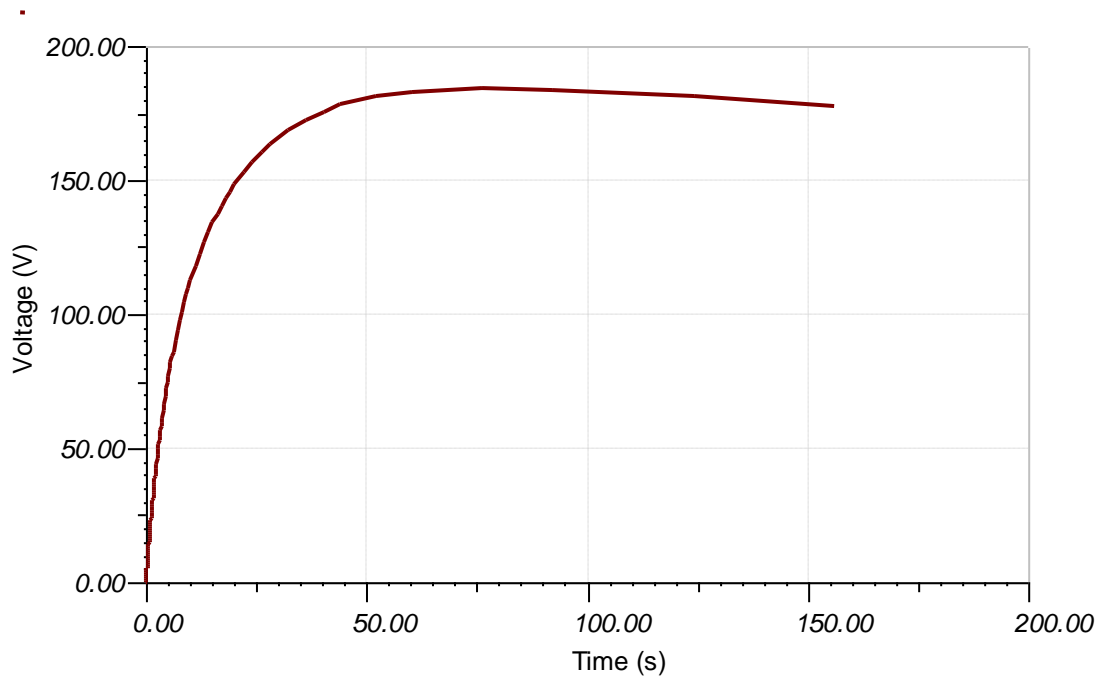
kondenzátorok feszültségei, és modellezhető a visszatérő feszültség görbéje és összevethető a valós RVM mérések eredményeivel. A hálózat felépítése az 5.1. ábrán látható.



4.1. ábra: A hálózat felépítése

5.2. Az RC körön végzett RVM és VR mérés eredményei közötti átjárás eredményei

A szimulációt tetszőleges idejű töltésre és rövidzárásra meg lehet csinálni, és akár csak az RVM mérés, eredménynek kiadja a visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredekségét és a feszültség csúcserőértékét, ezeket vettem össze. A mérés egyedüli hátránya, hogy minden egyes új töltési idő esetén a kondenzátorok feszültségét ki kell számolni, az áramkört át kell paraméterezni, a görbéket újra kell rajzoltatni és róluk az értékeket leolvasni. Ez azonban könnyen automatizálható folyamat. A visszatérő feszültség görbét a szimuláció alapján a 20 s-os töltési idő után a az 5.2. ábra mutatja.



5.2. ábra: 20 s-os töltési idő után a visszatérő feszültséggörbe a szimulációval

Erről a görbéről lehetőség van a maximum érték, illetve a görbe kezdeti meredekségének leolvasására. Az RVM mérés eredményeivel ez a két érték vehető össze. Az alábbi táblázat mutatja az összes töltési időre az RVM eredményeit, illetve a szimuláció görbéjéről leolvasható értékeket, a VR mérés által kapott eredmények alapján számolt visszatérő feszültség meredekséget és az eltéréseket az RVM módszerhez viszonyítva.

RVM mérés eredményei				Szimuláció eredményei				VR alapján	
$T_{\text{tölt}}$	U_r	S_r	T_p	U_r	U_r eltérés	S_r	S_r eltérés	S_r	S_r eltérés
s	V	V/s	s	V		V/s		V/S	
0,02	0,886	0,925	11	0,768	-13%	0,2263	-76%	0,241061	-74%
0,05	2,02	1,29	12	1,91	-5%	0,563	-56%	0,599533	-54%
0,1	3,86	1,8	12,1	3,79	-2%	1,143	-37%	1,188755	-34%
0,2	7,45	2,76	12,2	7,47	0%	2,29	-17%	2,336885	-15%
0,5	17,6	5,75	12,7	17,84	1%	5,38	-6%	5,549496	-3%
1	32,6	9,75	13	33,11	2%	10,03	3%	10,19812	5%
2	57,3	15,7	14,4	57,39	0%	16,74	7%	17,28695	10%
5	105	25,2	19,1	98,82	-6%	26,2	4%	27,18579	8%
10	147	29,3	46,2	137,11	-7%	25,76	-12%	28,17157	-4%
20	193	26,7	73	184,05	-5%	22,01	-18%	22,86461	-14%
50	220	19,8	81,7	221,46	1%	18,8	-5%	18,92545	-4%
100	161	13,4	84,4	160,01	-1%	13,16	-2%	13,34263	0%
200	57,3	4,63	87,5	53,86	-6%	4,46	-4%	4,48637	-3%
500	4,33	0,174	489	1,58	-64%	0,111	-36%	0,131405	-24%

5.1. táblázat: A különböző mérési és számolási eredmények összehasonlítása az RC körre

Az eltérések az RVM mérési eredményhez vannak viszonyítva százalékosan

Az 5.1. táblázatból látható, hogy az eredmények között a maximális eltérés a visszatérő feszültség meredekségben volt 76% és 74%, ugyanazon a 0,2 s-os töltési időn mért ponton, azon kívül még a 0,05 s-os töltésnél, illetve a mérési ponton: 500 s-os töltésnél. A kis időállandós mérésnél, az eltérés oka az, hogy a kicsi időtartományban az RVM műszer nem tud elég precízen mérni, illetve ezen a kis feszültségértéken nagyok a zavarások, tehát a szimuláció és a VR módszer eredménye a helyes. Ez abból is látszódik, hogy ezek közel esnek egymáshoz. A nagy időállandónál hasonló a helyzet, ekkora időállandójú folyamatok már nem játszanak szerepet ebben az áramkörben, így ismét a zavarások és a mérési pontatlanságok miatt a szimuláció és a VR módszer eredményei a helyesek. A többi pontban kicsi eltérések vannak. A feszültségmaximumok értékei között a már említett három helyen volt eltérés, a többi ponton azonban nagyon precízen visszaadta az RVM mérés eredményei.

Megállapítható, hogy a VR mérés eredményeiből az S_r értékek, és a szimulációból az U_r és S_r értékek is pontosan vissza tudják adni az RVM mérés eredményeit, anélkül, hogy a mérést el kellene végezni az áramkörön. Mivel a 4. fejezetben bemutattam, hogy a VR mérésből kapott eredmények és iterációs lépések hasonlóan működnek mind az áramkörre, mind a transzformátormintára, így belátható, hogy a transzformátorra is ugyanez a bemutatott műveletsor elvégezhető.

Összefoglalás

A nagytranszformátorok diagnosztizálása egy fontos feladat, de a Magyarországon, illetve sok más területen elterjedt eljárás, a visszatérő feszültség mérése (RVM), a hosszú töltési- és rövidzárási idők miatt nagyon időigényes folyamat. Ezt a mérést pedig a hálózattól kivett berendezésen kell elvégezni, tehát egy rövidebb módszer alkalmazása előnyösebb lenne.

A Budapesti Műszaki Egyetem Villamos Energetika Tanszékén kifejlesztett mérőműszer a feszültségválasz mérés (VR) továbbfejlesztett változata, mely rövidebb mérési idővel dolgozik amiatt, hogy egy mérést egy töltéssel valósít meg, és a rövidzárási időket egymás után végzi. Ennek a mérésnek az alkalmazása a rövidebb kiesési idő miatt célszerű lenne, mivel hasonló módon használható diagnosztizálásra, mint az RVM mérés.

Megvizsgáltam mindkét módszer diagnosztizálásra való alkalmazásának hőmérséklet függését, amely során kiderült, hogy az eljárások a hőmérsékletváltozásra érzékenyek. Ezért célszerű a transzformátorokon kihűlt állapotban elvégezni a mérést. Másik megoldás, ha a transzformátor hőmérsékletének mérése megoldható, hogy a mérést minden alkalommal egy fix hőmérsékleten végezzük, ugyanis a hőmérsékletváltozás hatása hasonló módon mutatkozik a mérés eredményein, mint a szigetelés öregedésének vagy nedvesedésének hatásai.

Azok a transzformátorok, melyek évek óta a hálózatban működnek, azoknak a diagnosztizálását évekig az RVM méréssel csinálták. Ezeknek az eredményeknek évről évre összehasonlíthatónak kell lenniük, hiszen a szigetelési rendszerben végbemenő folyamatok (nedvesség, öregedés) így követhetők számon, ezért nem könnyen helyettesíthető az RVM mérés más módszerrel. Tehát egy olyan módszerre lenne szükség mely az átjárást lehetővé teszi a két különböző mérés eredményei között.

A dolgozatban egy ilyen módszert dolgoztam ki, és egy transzformátor mintán, illetve a szigetelés helyettesítő képe alapján összerakott áramkörön a gyakorlatban alkalmaztam, és az eredményeket elemeztem. Az eredmények igazolják, hogy a VR mérés eredményeiből iterációs módszerrel a domináns polarizációs folyamatok meghatározhatóak. A polarizációk időállandói alapján a szigetelések helyettesítő áramkörének elemei meghatározhatóak, és a soros RC tagok végtelen sok helyett csak 4-5 tagúra egyszerűsödnek. A helyettesítő kép elemeit megkapva, egy alkalmas szoftver alkalmazásával, a visszatérő feszültséggörbe szimulálható, mintha az RVM mérést valóban elvégeznénk a mintán. Az eredmények nagyon kis eltérést mutattak, tehát az elmélet a gyakorlatban is működött.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Karsai, Dr. Kerényi, Dr. Kiss - Nagytranszformátorok
Műszaki Könyvkiadó
Budapest, 1973
- [2] Dr. Karsai, Dr. Kerényi, Dr. Kiss - Large Power Transformers
Akadémiai Kiadó
Budapest, 1987
- [3] Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata
Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete
Budapest, 2000
- [4] Dr. Németh Endre, Dr. Horváth Tibor - Nagyfeszültségű szigeteléstechika
Tankönyvkiadó, Második kiadás
Budapest, 1982
- [5] Herr Antal - Olaj - papír szigetelés rendszer dielektromos vizsgálata - Szakdolgozat
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék
Budapest, 2014
- [6] A MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt. honlapján közzétett terméktájékoztató
2015.10.26. elérhető link:
http://mol.hu/images/content/LUB_repo/TDS_MOL%20TO%2040A%20Extra_HU.pdf
- [7] Csépes Gusztáv - A visszatérő feszültség mérésének diagnosztikai alkalmazása I.
Villamosság szaklap, 34. évfolyam, 2. szám
Budapest, 1986
- [8] Csépes Gusztáv - A visszatérő feszültség mérésének diagnosztikai alkalmazása II.
Villamosság szaklap, 34. évfolyam, 3. szám
Budapest, 1986
- [9] Ábra a Műszeroldal - Villamos szigeteléstechika pdf-ből
2015.10.26. elérhető link:
<http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/villamosszigetelestechnika.pdf>
- [10] Zoltán Ádám Tamus, István Berta - Condition Assessment of Mixed Oil-paper and XLPE
Insultated Cable Lines by Voltage Response Method
Budapest University of Technology and Economics
Department of Electric Power Engineering
Budapest, Hungary

- [11]Gergely Márk Csányi, Zoltán Ádám Tamus - Modeling of insulations by the results of voltage response measurement
Budapest University of Technology and Economics
Department of Electric Power Engineering
The 19th International Symposium on High Voltage Engineering
Pilsen, Czech Republic, 2015
- [12] Kapila Bandara, Chandima Ekanayake, Tapan Kumar Saha - Modelling the Dielectric Response Measurements of Transformer oil
School of Information Technology and Electrical Engineering,
The University of Queensland
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
Brisbane, Australia, 2015
- [13]Tamus Zoltán Ádám - Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kisfeszültségű kábelekre
Ph.D. értekezés
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék
Budapest, 2010
- [14]S.V.Kulkarni, S.A.Khaporde - Transformers Engineering - Design and Practice
Elektronikus könyv
Indian Institute of Technology, Bombay
Mumbai, India, 2004
- [15]Csábi József Dávid -Villamos szigetelések dielektromos folyamatainak modellezése
Diplomaterv 1.-BME VET
2015