



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

Csányi Gergely Márk

**PVC KÁBELSZIGETELÉSBEN FELLÉPŐ
POLARIZÁCIÓS FOLYAMATOK HŐMÉRSÉKLET
FÜGGÉSÉNEK VIZSGÁLATA**

KONZULENS

Dr. Tamus Zoltán Ádám

BUDAPEST, 2013

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	3
Abstract.....	4
1 Bevezetés	5
2 Vezetés és polarizáció	6
2.1 Vezetés.....	6
2.2 Polarizáció	6
3 Mérési módok.....	8
3.1 Szivárgási áram mérés	8
3.2 Teljes feszültségválasz módszer	11
3.2.1 Továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszer.....	12
3.2.2 Meredekség korrekció.....	14
4 Polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggése	16
4.1 Aktiválási energia kiszámítása.....	16
4.2 Korrekció hatása az aktiválási energia nagyságára.....	17
5 Mérés.....	19
5.1 Ismert eredmények.....	19
5.2 Mérés módja	19
5.3 Mérési eredmények.....	22
6 Eredmények összefoglalása	30
Irodalomjegyzék.....	31

Összefoglaló

A PVC szigetelés szigetelési ellenállásának hőmérsékletfüggése jól ismert tény, többek között az MSZ-13207-es szabvány is foglalkozik ezen szigetelések szigetelési ellenállásának hőmérséklettől való függésével, megadva a különböző hőmérsékletekhez tartozó korrekciós tényezőket. Mivel a szigetelési ellenállásméréssel nem lehet megkülönböztetni a vezetési és polarizációs jelenségeket, mert a mérés során a vezetési és a polarizációs áram összegét mérjük, ezért ez a korrekciós tényező két fajta folyamat együttesét jellemzi. A teljes feszültségválasz módszerével a vezetési és polarizációs folyamatok egymástól elkülöníthetően vizsgálhatóak. Korábbi vizsgálatok kimutatták, hogy e két folyamat hőmérséklettől való függése jelentősen különbözik, és eltérő aktiválási energiával lehet ezeket figyelembe venni. A munkámban a különböző időállandójú polarizációs folyamatok hőmérséklettől való függését vizsgálom, amelyet a továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszerével végzek el.

Abstract

The thermal dependence of the insulation resistance of PVC insulation is well known, among others the MSZ-13207 standard describes this relationship by providing correction factors to be used at different temperatures. It is impossible to distinguish the components of the conductive and polarisation processes by measuring the insulation resistance, as the insulation resistance we measure is determined by the sum of these two components, the correction factors only describe the sum of these two processes. With the voltage response method the conductive and polarisational processes can be studied independently. Earlier studies have shown that the thermal dependence of these two processes vary greatly, and are associated with different activation energies. In this article I will examine the thermal dependence of various static polarisational processes using the improved voltage response method.

1 Bevezetés

A villamosenergia-rendszerek biztonságos működéséhez elengedhetetlen különféle szigetelések használata, legyen az levegő, vagy valamilyen polimer típusú szigetelés. A szigetelések állapota azonban a sokrétű igénybevételekre, roncsoló hatásokra romlik, öregszik. Ez a degradáció a szigetelés jellemző paramétereinek - legyen az villamos, mechanikai avagy kémiai - megváltozásának a mérésével követhető nyomon. Ezen jellemzők különbözőképpen változnak az eltérő szigetelőanyagoknál, így vizsgálatuk érdekes kihívást jelent, valamint gyakorlati szerepe is igen fontos, ugyanis ha sikerül bizonyos jellemzőkre megfelelő határértékeket találni, akkor megállapítható a szigetelés állapota, sőt, ami még fontosabb előre jelezhető, hogy mikor szükséges az adott szigetelés javítása, esetleg cseréje. Ez a szolgáltatók számára igen fontos információt jelent.

Jelen munkámban ismertetem a szigetelések vizsgálatára alkalmazott néhány módszert, köztük a legrégebb óta használt roncsolásmentes diagnosztikai eljárást, a szivárgási áram mérését az ehhez kapcsolódó korrekciós tényezőkkel (MSZ-13207), valamint a teljes feszültségválasz módszerét, illetve ennek egy továbbfejlesztett változatát. Majd ismertetem az általam elvégzett méréseket a szigetelésben fellépő polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggését és ezek eredményeit. Ezek után a vizsgálatok eredményeit és az ezekből következő feltevéseket összegzem.

2 Vezetés és polarizáció

2.1 Vezetés

A szigetelőanyagok nem tökéletes szigetelők, a villamos erőtér hatására igen kicsi, de észlelhető áram folyik át rajtuk. A fémekkel ellentétben szigetelőanyagoknál az Ohm-törvény korlátozott érvényességű, egyes esetekben - pl. gázok esetében - pedig egyáltalában nem is érvényes. Ennek ellenére használjuk az anyagok szigetelési ellenállásának, illetve átvezetésének fogalmát, de annak tudatában, hogy ez nem olyan egyértelmű lineáris kapcsolatot jelent a feszültség és az áram között, mint fémek esetében [1].

A vezetési folyamat erőssége az anyag egységnyi térfogatára vonatkoztatott γ [A/Vcm] fajlagos térfogati vezetőképességgel, vagy ennek reciprokával, a ρ [Ω cm] fajlagos térfogati ellenállással jellemezhető.

2.2 Polarizáció

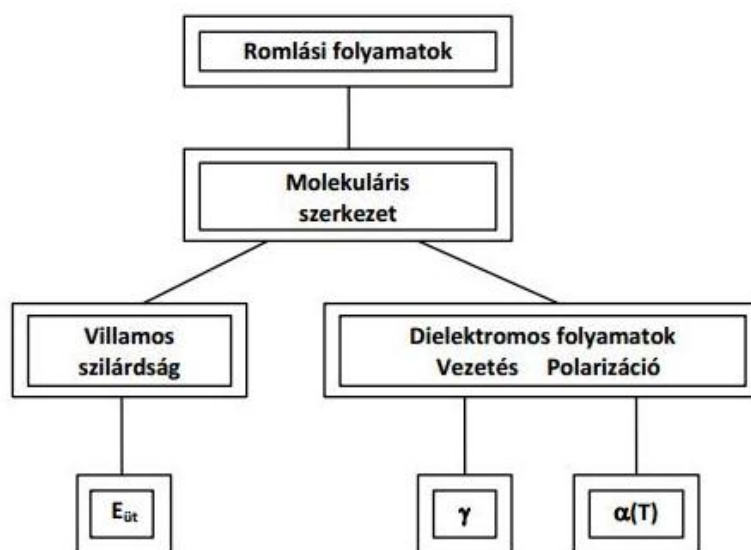
A szigetelőanyagokban a villamos erőtér által keltett másik dielektromos folyamat a polarizáció. Amíg a vezetési folyamatban a töltéshordozók áthaladnak a szigetelőanyag teljes hosszában egyik elektródtól a másikig, addig a polarizációs folyamatban a töltéshordozók az erőtér hatására csak eltolódnak nyugalmi (erőtér nélküli) helyzetükből, és az erőtér megszűnése után oda visszatérnek. A szigetelőanyagokban eleve vannak pozitív és negatív töltéssel rendelkező részecskék, ionok vagy ionizált molekulacsoportok. Ezek a töltéshordozók nyugalmi állapotukban (villamos erőtér nélkül) úgy helyezkednek el, hogy egymás hatását közömbösítik, ekkor a szigetelőanyag kifelé semleges. Erőtér hatására a töltések eltolódnak eredeti helyükről, az eredő pozitív és negatív töltések súlypontja nem esik többé egybe, a szigetelőanyag kifelé makroszkopikus dipólussá válik, polarizálódik. A külső erőtér megszűntével a töltések visszatérnek nyugalmi állapotukba, a polarizáció tehát reverzibilis folyamat [1]. Különbféle polarizációs folyamatok különféle időállandóval jellemezhetőek, kialakulásuk gyorsaságának megfelelően, ezek az állandók jellemzően a $T = 10^{-16} - 10^3$ s időtartományba esnek. Sorban említve a jellemző polarizációs fajtákat, és ezek időállandóit:

- Elektron eltolódási: $T = 10^{-14} - 10^{-16} s$
- Ion eltolódási: $T = 10^{-12} - 10^{-13} s$
- Rugalmas orientációs: $T = 10^{-10} - 10^{-13} s$
- Hőmérsékleti orientációs: $T = 10^{-6} - 10^{-10} s$
- Hőmérsékleti ionpolarizációs: $T = 10^{-2} - 10^{-4} s$
- Határréteg: $T = 10^{-2} - 10^3 s$
- Tértöltés: $T = 10^{-2} - 10^3 s$

Egy olyan folyamat esetén, ahol polarizáció lép fel, egyszerre több időállandóval is zajlik polarizációs folyamat, így az eredő ezeknek az összegeként áll elő.

3 Mérési módok

A villamosenergia-ipar fejlődése során idővel nélkülözhetlenné vált, hogy az üzemben levő szigetelések állapotáról valamilyen módon képet lehessen alkotni. A szigetelés gyakorlatban legfontosabb adata a szigetelés villamos szilárdsága, mely a többféle igénybevétel (hőhatás, nedvesség, túlfeszültség hatása, sugárzás stb.) hatására csökken, ezzel veszélyeztetve a megfelelő üzemi működést. Magát a villamos szilárdság mérését, viszont csak roncsolásos vizsgálattal tudjuk elvégezni, ami a vizsgált szigetelés tönkretételével is jár, tehát az eljárásunk után üzemképtelenné válik. Ezért a gyakorlatban a szükséges állapotfelmérést roncsolásmentes diagnosztikai módszerekkel végzik, melyek alapötlete az **1. ábrán** látható. A roncsoló hatások valamilyen módon megváltoztatják a szigetelő anyagok molekuláris szerkezetét, ezzel befolyásolva a szigetelések fizikai és villamos tulajdonságait [2].



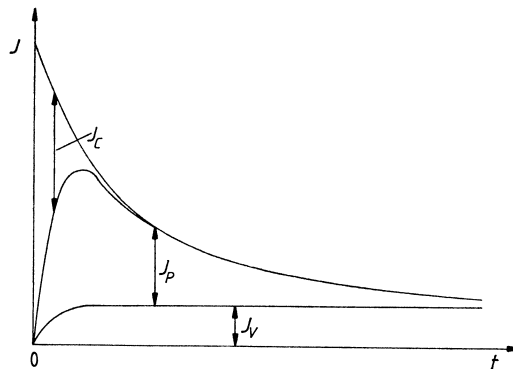
1. ábra: Romlási folyamatok, villamos jellemzők kapcsolata [2]

Ez egyben azt is jelenti, hogy a villamos szilárdság degradációja más, roncsolásmentesen is mérhető paraméterek változásával is együtt jár, például a dielektromos alapfolyamatokkal, a vezetéssel, és a polarizációval is.

3.1 Szivárgási áram mérése

Ez a diagnosztikai módszer, a legrégebb óta használt módszerek közé tartozik köszönhetően az egyszerűségének, nevezik még szigetelési ellenállásmérésnek is. A

mérés során egyenfeszültséget kapcsolunk a vizsgált szigetelésünkre, majd mérjük a rajta átfolyó áram nagyságát. Ez a mért áram azonban három áramkomponens összegeként, név szerint a kapacitív áram (J_c), a polarizációs áram (J_p), valamint vezetési áram (J_v) áll elő. A kapacitív áramkomponens nagyon gyorsan lecseng, így a gyakorlatban a polarizációs és vezetési áram összegét tudjuk mérni a szigetelési ellenállás mérésével, tehát ez a két folyamat ezzel a módszerrel nem, vagy csak nehezen vizsgálható elkülönítve. A kapacitív és a polarizációs komponensek időben lecsengő típusúak, a vezetési áram állandó nagyságúnak tekinthető (lásd **2. ábra**). Így ahhoz, hogy valóban a vezetési komponenst mérjük, sok időnek kell eltelnie, így az időigényesség a mérés egyik hátránya. További problémaként jelentkezik, hogy a mérés stabil feszültségforrást igényel, különösen nagyobb kapacitású vezetékek esetén, tehát a mérés maga zavarra igen érzékeny. Legnagyobb hátránya, hogy a mért áram nem fajlagos érték, tehát különböző hosszúságú, és elrendezésű próbatesteken más adatokat szolgáltat. Ezen probléma kiküszöbölésére hányadosképzéssel dimenzió nélküli mennyiséget alkotnak, mely már alkalmas az összehasonlításra [4].



2. ábra: Szivárgási áram [8]

A vezetési áramkomponens öregítés utáni jelentős változása utalhat kis áramútra a szigetelésben, felületi szennyeződésre, nedvesedésre, de a szigetelési ellenállás nagysága nem feltétlen jelenti a szigetelés jó állapotát, így diagnosztikai célra nem, vagy csak korlátokkal alkalmas.

A szigetelési ellenállás hőmérséklettől függő mennyiség, részben ennek a hatásnak a korrekciójával foglalkozik az MSZ-13207-es számú szabvány, amely 0,6/1 kV-tól 20,8/36 kV-ig terjedő névleges feszültségű erősáramú kábelek és jelzőkábelekkel foglalkozik. A szabvány kitér többek között arra is, hogy a kábelvonal minden egyes erének szigetelési ellenállását miképpen kell megmérni különféle elrendezések esetén:

- erenként árnyékolt (radiális igénybevételű) kábel esetén a vezető és az árnyékolás között;
- egyéb (nem radiális igénybevételű) kábel esetén a vizsgált ér vezetője és a köpenyszerkezet fém szerkezeti elemeivel összekötött többi vezető között;
- árnyékolás nélküli kábeleknél a vizsgált ér vezetője és többi ér egymással összekötött vezetője között.

További fontos információ a szabványból, hogy a szigetelési ellenállás mérésénél alkalmazott mérőfeszültség 1 – 4 kV közötti érték, valamint a mérőműszer teljesítményének pedig alkalmasnak kell lennie a kábel feltöltésére. A mérőműszer leolvasása a mérőfeszültség rákapcsolása után a műszermutató kitérésének állandósult helyzetében, de legkorábban 1 perc múlva kell, hogy történjen.

A 20°C-tól eltérő hőmérséklet esetén korrekciós tényezőt kell alkalmazni. Az n korrekciós tényező értékét PVC-szigetelésekre a **3. ábra** adja meg. A korrekciós tényezőt úgy kell alkalmazni, hogy a mért szigetelési ellenállást meg kell szorozni a táblázatban megadott n tényezővel és ekkor megkapjuk a 20°C-ra vonatkoztatott ellenállásértéket [5].

A PVC szigetelésre jellemző ezen n tényezőket tartalmazó táblázat:

PVC-szigetelésű, 0,6/1 és 3,6/6 kV névleges feszültségű kábelek szigetelési ellenállásának változása a hőmérséklet függvényében (n tényező)

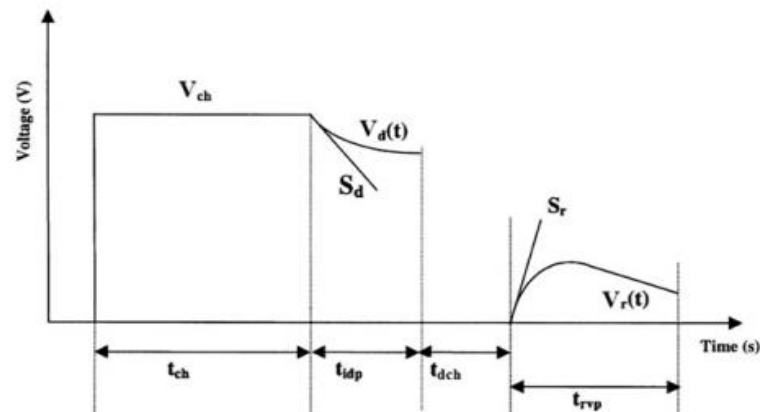
A kábel hőmérséklete, °C	n tényező		A kábel hőmérséklete °C	n tényező	
	0,6/1 kV	3,6/6 kV		0,6/1 kV	3,6/6 kV
5	0,10	0,49	23	1,85	1,34
6	0,12	0,51	24	2,35	1,60
7	0,14	0,53	25	2,90	1,97
8	0,17	0,55	26	3,40	2,35
9	0,20	0,57	27	4,00	3,05
10	0,23	0,60	28	4,90	3,52
11	0,25	0,61	29	5,65	4,33
12	0,29	0,65	30	6,60	5,15
13	0,33	0,67	31	8,40	6,25
14	0,40	0,71	32	9,75	7,46
15	0,46	0,75	33	12,1	9,09
16	0,51	0,79	34	14,7	10,9
17	0,60	0,83	35	17,6	13,0
18	0,72	0,88	36	20,7	14,9
19	0,85	0,94	37	23,5	17,5
20	1,00	1,00	38	27,0	21,3
21	1,25	1,09	39	32,5	25,0
22	1,50	1,20	40	36,5	28,6

3. ábra: PVC szigetelés korrekciós tényezői [5]

Ezen korrekciós tényezők azonban a korábban elmondottak alapján egyszerre jellemzik a polarizációs és vezetési folyamatokat. Ezen folyamatok pontosabb és elkülönített vizsgálatához szükséges újabb mérési módszerek bemutatása a következőkben történik.

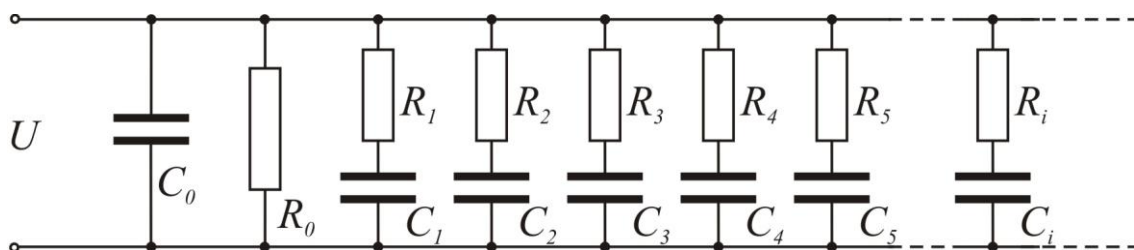
3.2 Teljes feszültségválasz módszer

Vezetési illetve polarizációs folyamatok elkülönítve vizsgálhatóak a teljes feszültségválasz módszerrel. Ezt a visszatérő (S_d) és kisülési (S_r) feszültség meredekségéből lehet könnyen meghatározni. A mérés menete a következő (4. ábra): a vizsgált próbatestet nagy időtartamig (t_{ch}) U_0 egyenfeszültséggel töltjük, majd a feszültségforrást leválasztjuk, és ekkor tudjuk mérni a kisülési feszültség meredekségét.



4. ábra: Kisülési és visszatérő feszültség meredekség [8]

Ezek után a szigetelésünket egy t_{dch} időtartamig rövidre zárjuk. Ennek hatására a gyorsabb polarizációs folyamatok kisülnek, majd megszüntetve a rövidzárát, a feltöltött éren mérhető feszültség a visszatérő feszültség. Ezen jelenségek okát jobban megérthetjük, ha a szigetelőanyag helyettesítő képét vizsgáljuk meg (5. ábra).



5. ábra: Helyettesítő kapcsolás

A kapcsolatban szereplő R_0 mennyiség a szigetelési ellenállás, a C_0 pedig a szigetelés geometriai kapacitását jelenti. A párhuzamosan kötött R-C tagok pedig a

szigetelés polarizációs folyamatait modellezzük, ahol az adott polarizáció időállandója megegyezik az adott R-C tag időállandójával.

A hosszú töltési folyamat során mind a geometriai, mind a feltöltési időnél kisebb időállandójú polarizációs RC tagok kapacitásai feltöltődnek, majd ha a töltőfeszültségről lekapcsolunk, áram csak a szigetelési ellenálláson keresztül folyik a geometriai kapacitás hatására, így a kisülési feszültség meredeksége egyenesen arányos az Ohmos vezetőképességgel. Bizonyított tény, hogy ez a mennyiség a következőképpen számolható:

$$S_d = \sigma \frac{U}{\varepsilon} \quad (1)$$

ahol S_d a kisülési feszültség meredeksége, σ a vezetőképesség, U a méréskor felhasznált feszültség, ε pedig a permittivitás [6].

A kisülési feszültség meredekségének meghatározása után néhány másodpercig rövidre zárjuk a szigetelésünket, majd ezt megszüntetve mérhetjük a visszatérő feszültség meredekségét. A számítások során feltételezzük, hogy a kisütési és feltöltési idő közé eső időállandók teljesen kifejlődött állapotban vannak a kisütés megszüntetésekor (ebbe az időállandó tartományba tartozó polarizációs folyamatokhoz tartozó kapacitások a töltési feszültségre töltött állapotban vannak). Ugyanakkor az ezen időállandó-tartományon kívüli folyamatokat elhanyagoljuk, tehát teljesen visszafejlődött állapotban vannak (az elektromos modellben a hozzá tartozó kapacitások feszültsége 0 V) [7]. Ezeket az elhanyagolásokat figyelembe véve mérhetjük a visszatérő feszültséget, amelynek meredeksége egyenesen arányos a polarizációs vezetőképességgel. Ezt a jelenséget leíró egyenlet:

$$S_r = \beta \frac{U}{\varepsilon} \quad (2)$$

ahol S_r a visszatérő feszültség meredeksége, β a polarizációs vezetőképesség, a többi változó megegyezik az (1) egyenletnél említettekkel [6].

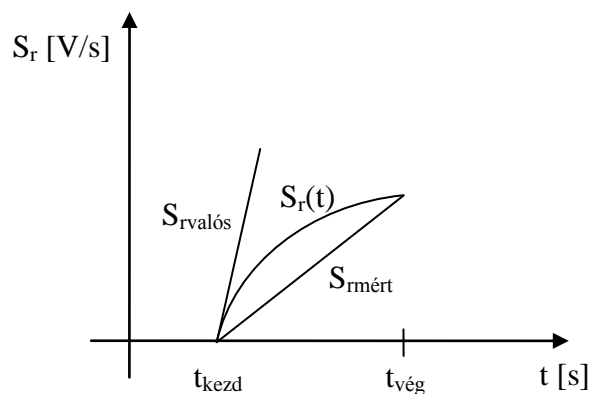
3.2.1 Továbbfejlesztett teljes feszültségválasz módszer

Az előző pontban leírt teljes feszültségválasz módszerrel a mérés elve lényegében megegyezik, az egyetlen lényegi eltérés, hogy itt nem csak egyszer mérjük meg a feltöltött kábel visszatérő feszültségét. A továbbfejlesztett ötlet lényege, hogy

eltérő időtartamokig zárjuk rövidre a korábban feltöltött kábelünket, ilyen módon lehetőségünk nyílik arra, hogy a különböző, leginkább nagy időállandójú polarizációs folyamatokat elkülönítve vizsgálhassuk a kisebb időállandós polarizációktól.

A mérés menete hasonló, mint a teljes feszültségválasz módszere esetén: feltöltjük egy állandó feszültséggel a vizsgált szigetelésű kábelünket, majd lekapcsolva a feszültségforrásról megmérjük a kisülési feszültség meredekségét. Ezek után rövidre zárjuk a szigetelést, hasonlóan, mint korábban, majd a t_1 rövidzárási idő lejárta után megmérjük a visszatérő feszültség nagyságát. Ezt követően még nem fejezzük be a mérést, hanem ismételten rövidre zárjuk a kábel szigetelését egy újabb t_2 időtartamig, majd újra megmérjük az immár t_1+t_2 ideig kisütött kábel visszatérő feszültségének meredekségét. Ezt az eljárást addig érdemes folytatni, míg a nagy időállandós polarizációk hatása már nem észlelhető, tehát a helyettesítő képből a nagy időállandójú RC tagokhoz tartozó kapacitások ki nem sültek. Az általam használt program 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 s rövidzárási idő után méri meg a visszatérő feszültség meredekségét.

A vizsgálat során a kiértékelés eleinte a szelő módszer segítségével történt, amelynek lényege, hogy mérjük az S_r értékét a t_{kezd} időpillanatban, és a $t_{vég}$ időpontban, majd ezen két pont által meghatározott egyenes segítségével közelítjük a valós meredekséget.



6. ábra: Szelő módszer bemutatása

A valóságban azonban a jelek zajjal terheltek, így a kezdeti és végpontnál egy-egy rövid időtartamra való átlagolás után határozzuk meg a mért S_r értékeket. A **6. ábráról** is látszik, hogy az így meghatározott meredekség igen eltérhet a valós meredekségétől.

A másik, egy pontosabb meghatározási lehetőség, hogy nagy frekvenciával folyamatosan mintavételezzük a jelet, majd egy alul áteresztő szűrővel csökkentjük a zajok hatását, és erre a kapott jelre egy regressziós görbét illesztünk. Ezzel a módszerrel a mérési hiba jelentősen csökkenthető.

3.2.2 Meredekség-korrekción

A feszültségválasz mérésénél alapvető követelmény, hogy a mérőrendszer ne befolyásolja a mért paramétereket. Nyilvánvaló, hogy a mérőrendszer kapacitása és szigetelési ellenállása hatással van a kisülési és visszatérő feszültség kezdeti meredekségére. Általánosságban elmondható, hogy a mérőrendszer szigetelési ellenállásának legalább két nagyságrenddel meg kell haladnia a vizsgálandó próbatest szigetelési ellenállását, továbbá a mérőrendszer kapacitása legyen elhanyagolható a vizsgált próbatest kapacitásához képest [9]. Ez utóbbi korrekció ipari környezetben elhagyható, hiszen itt a mért kábelszakaszok hossza adott esetben kilométerekig terjedhet, így a mérőrendszer kapacitása elenyésző nagyságú lesz a próbatestéhez képest. Ha azonban rövidebb kábelszakaszokat vizsgálunk, ez a feltevés már nem állja meg a helyét, így a következő módon tudjuk korrigálni mért meredekségeinket [9]:

$$S_e = S_m \cdot \frac{C_m + C_p}{C_p} \quad (3)$$

ahol S_e a korrigált, S_m a mért meredekség, C_m a mérőrendszer, C_p pedig a próbatest kapacitása.

A mérőrendszerünknek (mérőkábel és a műszer együttese) nem csak a kapacitása nem hanyagolható el, hanem a feszültségválasz paraméterei sem, ezért szükséges a fenti korrekciós képletet tovább általánosítani. Bizonyított, hogy általánosan a következő alakban írható le az összefüggés [7]:

$$S_{er} = S_{e1} \cdot S_{e2} \left(\frac{\frac{C_g}{C_{gm} + C_g} + \frac{C_{gm}}{C_{gm} + C_g}}{\frac{S_{e2}}{C_{gm} + C_g} \cdot \frac{S_{e1}}{C_{gm} + C_g}} \right) \quad (4)$$

ahol S_{er} a mérőrendszer és a próbatest feszültségválaszának együttes mért meredeksége, S_{e1} és S_{e2} a mérőrendszer és a próbatest feszültségválaszának valódi meredekségei, C_g a próbatest, C_{gm} a mérőrendszer kapacitása.

Az általános képlet jelöléseit módosítottam, hogy a képlet kifejezőbb formát öltjön. Ekkor az S_{e2} -t megválasztva a mérőrendszer feszültségválaszának a meredekségének (S_{em}), és az S_{e1} -et pedig a vizsgált vezetékének (S_e), és kifejezve S_e értékét kapjuk a következő összefüggést:

$$S_e = S_{er} \cdot \frac{C_g + C_{gm}}{C_g} - S_{em} \cdot \frac{C_{gm}}{C_g} \quad (5)$$

$$S_e = S_{er} \cdot K_1 - S_{em} \cdot K_2$$

ahol K_1 és K_2 konstansok, és K_1 megegyezik a (3)-as egyenletben kapott korrekciós összefüggéssel.

4 Polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggése

4.1 Aktiválási energia kiszámítása

A polimerek vezetőképességének hőmérsékletfüggése a jól ismert Arrhenius-formulát követi, amely a következő alakban írható fel:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_{ac}}{RT}} \quad (6)$$

ahol $\sigma(T)$ a vezetőképesség abszolút hőmérsékleten, σ_0 a vezetőképesség 0 K-re extrapolálva, E_{ac} a vezetési folyamat aktiválási energiája, R pedig az egyetemes gázállandó.

Hasonló összefüggés írható fel a polarizációs vezetőképesség hőfokfüggésére is:

$$\beta(T) = \beta_0 \cdot e^{-\frac{E_{ap}}{RT}} \quad (7)$$

ahol $\beta(T)$ a polarizációs vezetőképesség abszolút hőmérsékleten, β_0 a polarizációs vezetőképesség 0 K-re extrapolált értéke. E_{ap} pedig a polarizáció aktiválási energiája [8].

Mivel a kisülési feszültség meredeksége egyenesen arányos a szigetelés Ohmos vezetőképességével (lásd (1)-es egyenlet), így a vezetőképesség is jellemezhető az Arrhenius-formulával, és ugyanígy a visszatérő feszültség meredekségére is igaz (2), hogy egyenesen arányos a polarizációs vezetőképességgel, tehát a hőmérsékletfüggése ugyancsak jellemezhető az Arrhenius-formulával.

A vezetési folyamatokra jellemző aktiválási energiát ezek után könnyen meghatározhatjuk, ha a kisülési, és visszatérő feszültségek meredekségeinek a természetes alapú logaritmusát vesszük, és ezeket ábrázoljuk az abszolút hőmérséklet reciprokanak függvényében, ugyanis az $\ln(S_d) \left(\frac{1}{T} \right)$ síkon kapott görbe az Arrhenius-formulák miatt egy egyenes lesz, és ennek meredeksége egyenesen arányos az aktiválási energiával. Pontosán meghatározva: $meredekség = -\frac{E_a}{R}$. Ily módon grafikusán már

könnyen meghatározhatjuk, hogy az egyes szigetelésekhez milyen meredekségek, azaz aktiválási energiák tartoznak [8].

4.2 Korrekció hatása az aktiválási energia nagyságára

A 4.1 pontban említettek miatt az aktiválási energia könnyen meghatározható, ha a mért feszültségválaszok meredekségének természetes alapú logaritmusát ábrázoljuk az abszolút hőmérséklet reciprokának függvényében, tehát az $\ln(S_e) - \left(\frac{1}{T}\right)$ síkon.

Az első korrekciós lehetőség ((3)-as számú egyenlet) esetén a korrekciót egy konstanssal való szorzás jelenti, amely kifejtve:

$$\ln(S_e) = \ln\left(K \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}\right) = c - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (8)$$

Jól látszik, hogy a kapott kifejezés deriváltja $\frac{1}{T}$ szerint éppen ugyanannyi, mint a korrekciómentes esetben, így az első korrekció nincs hatással a kapott meredekségre, és így az aktiválási energia nagyságára sem.

Vegyes kábelszakaszok esetén a korrigált feszültségválasz természetes alapú logaritmus az (5)-ös számú egyenletből a következőképpen fejezhető ki:

$$\ln(S_e) = \ln(S_{er} \cdot K_1 - S_{em} \cdot K_2) \quad (9)$$

Itt fontos észrevennünk, hogy a mérőkábel hőmérsékletfüggése csak akkor szól bele bonyolultabban a kifejezésbe, ha szintén függ a hőmérséklettől, mint az S_{er} értéke. Ha a mérések során a mérőkábel hőmérsékletfüggése elhanyagolható, akkor az S_{em} értéke konstansnak tekinthető. Ekkor a meredekség a következő, egyszerűbb alakra hozható:

$$\frac{d}{dx} \left(\ln(e^{-k \cdot x} \cdot K_3 - K_4) \right) = \frac{-K_3 \cdot k \cdot e^{-k \cdot x}}{K_3 \cdot e^{-k \cdot x} - K_4} \quad (10)$$

Jól látható, hogy a $K_4=0$ választásával visszakapjuk a meredekségre a $-k$ értéket, amely megegyezik az előző korrekciónál kapott értékkel, tehát pontosan $-\frac{E_a}{R}$ adódik.

Szintén következik a kapott egyenletből, hogy a mérőkábel hatása nem elhanyagolható mértékben módosítja a mért feszültségválasz meredekségének értékét. Ez jól látható az előbbi kifejezés esetén, hiszen ha a K_4 konstans pozitív, akkor a derivált nevezőjének értéke csökken, ezáltal a meredekség abszolút értékben nagyobbak adódik, mint a korábbi korrekció esetében.

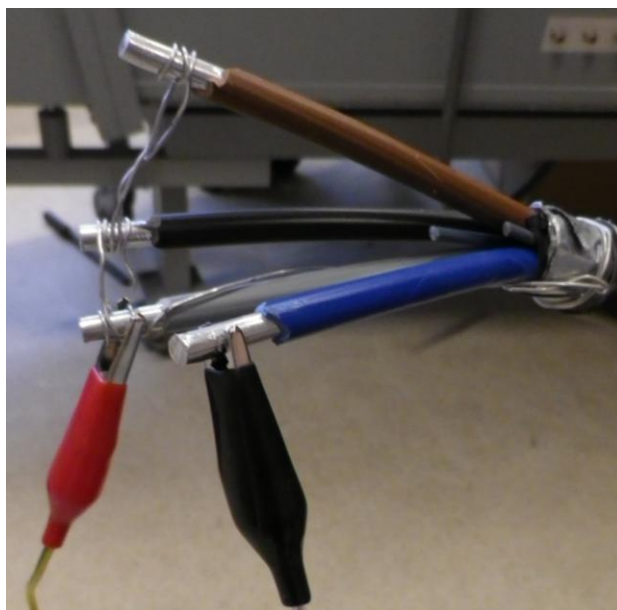
5 Mérés

5.1 Ismert eredmények

Egy korábbi kutatás már kimutatta, hogy a vezetési és polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggései jelentős mértékben eltérő tendenciát mutatnak. A vizsgálatot öregített PVC kábeleken a teljes feszültségválasz módszerével végezték, 1000 s-os töltési és 2 s-os kisütési idő után mérték a visszatérő feszültség meredekségét. A mérési értékekből meghatározható vezetési és polarizációs aktiválási energiák a következő intervallumba estek: E_{ac} : 105,4-133,8 kJ/mol és E_{ap} : 32,1-51,8 kJ/mol. Ezek az eredmények alátámasztják azt, hogy a vezetési és polarizációs folyamatokat alapvetően különböző fizikai folyamatok hozzák létre. Ebből következik az is, hogy a PVC-ben lezajló polarizációs folyamatok nem jelentik az elektronok vándorlását, mint a DC vezetőképesség esetében, hiszen ha azonos típusú töltésvándorlásra alapulna a két folyamat, akkor hasonló aktiválási energiákat is szolgáltatott volna a mérés [8].

5.2 Mérés módja

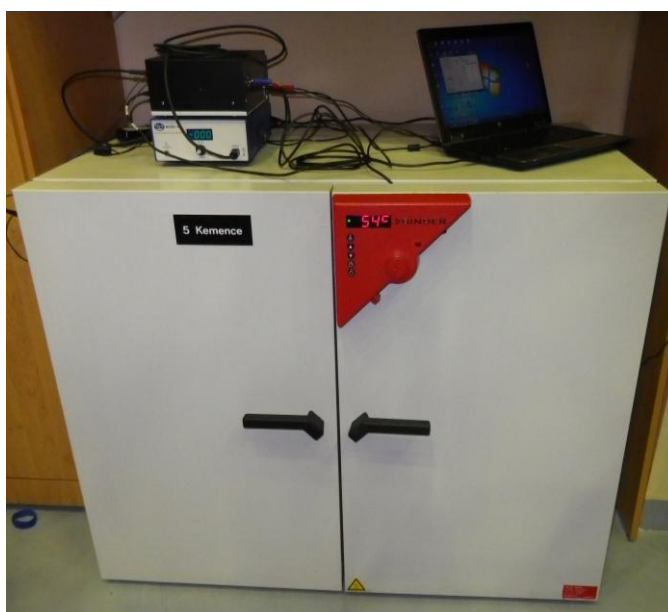
A mérések elvégzéséhez használt kábelek négy (kék, szürke, fekete, barna), egyenként PVC szigetelt érből állnak, ezek együttesen egy acélköpennyel vannak körbevéve, ezt egy külső PVC szigetelésréteg öleli körül. A mérések egységesen a kék erekben történtek (7. ábra). A mért érre csatlakoztattam az 1000 V-os töltőfeszültséget, az összes többi eret, és az acélköpenyt pedig egy dróttal hoztam azonos potenciálra, majd földeltem. A mérések befejeztével a kék ereket is rövidre zártam a dróttal, hogy minden, esetlegesen még ki nem sült polarizáció hatását megszüntessem. A töltési időt egységesen 1000 s-nak választottuk, a rövidzárási idők pedig megegyeznek a 3.2.1 pontban leírtakkal.



7. ábra: Kék ér mérése

Ahhoz, hogy a szigetelésünk polarizációs folyamatainak hőmérsékletfüggését vizsgálhassuk, négy különböző hőmérsékleten végeztem el a méréseket. Ezek az értékek: -14°C , 27°C , 40°C , 55°C voltak, azonban a hőmérséklet-beállítási lehetőségek pontatlanságai miatt ezek az értékek $\pm 1^{\circ}\text{C}$ eltéréssel értendők.

A minták előkészítése során a felületi, kúszó áramok minimalizálása érdekében a mért erek szigeteléseit alkohollal le lettek tisztítva, ezzel megszüntetve a rájuk rakódott port és zsírt, vagy egyéb szennyeződések. A minták temperálását egy kemence (**8. ábra**), illetve egy hűtőláda (**9. ábra**) segítségével láttuk el.



8. ábra: Mérés kemence segítségével

A méréseket először a legmagasabb, tehát az 55°C-os hőmérsékleten kezdtük el, és ezen a hőmérsékleten két és fél napig szárítottuk a kábelt. Erre azért volt szükség, mert korábban a mért kábelek relatíve nagy páratartalmú helységben voltak elhelyezve, így a szigetelésben meglevő nedvességnek volt ideje bejutni a kábelbe. A magasabb hőmérséklet, és a levegő folyamatos keringetésének hatására a próbatest nedvességtartalma jelentősen lecsökkent, a kábelt körülvevő levegő páratartalmát mérő készülékünk nem volt képes kimutatni. Az 55°C-os mérést követően a hőmérsékletet 40°C-ra állítva egy nap elteltével végeztük a következő vizsgálatot, majd ezt követően csak 4 óra elteltével vizsgáltuk a 27°C-os esetet. Ezeken a hőmérsékleteken a páratartalom 12% és 22-27% volt. Feltételeztük, hogy ilyen relatíve rövid idő alatt a kábel nedvességtartalma még mindig nem nő meg jelentősen, ezért igyekeztük a mérést minél gyorsabban elvégezni, de ügyeltünk arra, hogy a kábelnek mindig elég ideje legyen a megfelelő hőmérsékletre való beállásra.

A kiszáritási eljárásunkat igazolták a laboratóriumi vizsgálataink eredményei is, hiszen a még ki nem szárított kábeleken 25°C-on mért értékek nagyobbak, mint a 27°C-on, már kiszáritott kábel esetében kapottak, valamint azonos hőmérsékleten is nagyobb értékek adódtak a kiszáritatlan kábelek esetén (lásd **F/1. táblázat**). Tehát a környezet, és ezzel együtt a kábel nedvességtartalma jelentősen befolyásolja a mért értékeket.

A fagypon alatti méréshez a vizsgált kábeleinket egy napra hideg hűtőládába helyeztük, és ezek után mértük a szigetelések feszültségválaszait. Alacsony hőmérsékleten a PVC-ben szerkezeti változások (üvegesedés) mennek végbe, így a mért eredményeket is úgy vártuk, hogy eltérőek lehetnek a korábbiakban tapasztaltaktól, és ezen a tartományon már nem lesz érvényes az Arrhenius-összefüggés.



9. ábra: Mérés a hűtőládában

5.3 Mérési eredmények

Első lépésként meg kellett határoznom a korrekcióhoz szükséges értékek nagyságát, ehhez pedig meg kellett mérni a mérendő kábelek és a mérőkábel kapacitását, illetve a mérőkábel kisülési és visszatérő feszültségének meredekségeit. A használt mérőkábel PE szigetelésű, tehát a szigetelési ellenállására teljesül, hogy körülbelül két nagyságrenddel nagyobb, mint a mért kábelé, így ennek hatását elhanyagoltam. A mérés során kapott, majd utána számított értékek:

MÉRT ÉRTÉKEK		KORREKCIÓ			
Kábel	C [pF]	S_dK_1	S_dK_2	S_rK_1	S_rK_2
V1	894	1,447427	0,596107	1,447427	1,119646
V2	939	1,425985	0,56754	1,425985	1,065989
V3	891	1,448934	0,598114	1,448934	1,123416
Mérőkábel	400				
Mérőkábel	Meredekség [V/s]				
S_{dm}	1,3323				
S_{r1}	2,50240909				

10. ábra: Mért és korrigált értékek táblázata

A táblázatban szereplő K_1 és K_2 konstansok a (5)-ös számú egyenletben szereplő konstansokkal egyeznek meg. A többi visszatérő feszültségre a mérés 0 értéket szolgáltatott, így a korrekciókat csak az (3)-as számú egyenlet alapján végeztem el, ám ezek a lineáris illesztés során kapott meredekséget a 4.2 pontban bizonyítottak miatt nem befolyásolják.

A -14°C -on mért vizsgálat során több olyan – mérési hibából eredeztethető - értéket is kaptam, ahol a feszültségválasz negatívnak adódott, ezeket az értékeket egységesen nullának vettem, ilyen módon ezen értékek természetes alapú logaritmusai nem léteznek, ezért a diagramokon ezeket az értékeket nem ábrázoltam. A kisülési illetve visszatérő feszültségek nulla értéke azt is jelenti, hogy nem lép fel ezekben az esetekben polarizációs vagy vezetési jelenség sem, így aktiválási energiáról sincs értelme beszélni. A **11. ábrán** feltüntetett értékekkel korrigálva a következő eredményeket kaptam, ahol S_d a kisülési feszültség, S_{ri} pedig az i másodpercig tartó rövidzárás után mért visszatérő feszültség meredeksége:

T [°C]	-14	27	40	55
Sd[V/s]	1,265207	3,721768	13,40107	53,16953
Sr1[V/s]	19,84133	46,91972	82,7303	115,2202
Sr2[V/s]	15,66096	34,84105	50,87673	75,18858
Sr5[V/s]	7,32238	19,39471	29,05234	38,1483
Sr10[V/s]	6,314717	13,03406	19,16886	23,94122
Sr20[V/s]	0,757747	7,416869	11,82579	14,48513
Sr50[V/s]	0,53488	3,251452	5,963865	7,397726
Sr100[V/s]	0,423005	2,150992	3,99361	3,992181
Sr200[V/s]	0,083708	1,327709	2,39708	1,834238
Sr500[V/s]	0,151111	0,729189	1,004309	0,541284
Sr1000[V/s]	0,000636	0,358373	0,336352	0,253995

11. ábra: V1-es kábel korrigált feszültségválasza

T [°C]	-14	27	40	55
Sd[V/s]	0	1,583776	15,74976	64,87835
Sr1[V/s]	27,83348	47,97189	78,67428	111,0339
Sr2[V/s]	13,17183	33,4384	52,53729	76,64405
Sr5[V/s]	7,366821	16,5984	31,96341	41,34267
Sr10[V/s]	5,742162	12,45952	18,62992	27,96771
Sr20[V/s]	1,758849	7,098977	13,21722	16,47475
Sr50[V/s]	0,585127	3,76218	6,484017	7,82498
Sr100[V/s]	0,480285	2,442046	4,196118	3,711787
Sr200[V/s]	0,257716	1,462802	2,525863	1,770645
Sr500[V/s]	0,02892	0,79011	0,824484	0,564476
Sr1000[V/s]	0,052444	0,396119	0,183658	0,296331

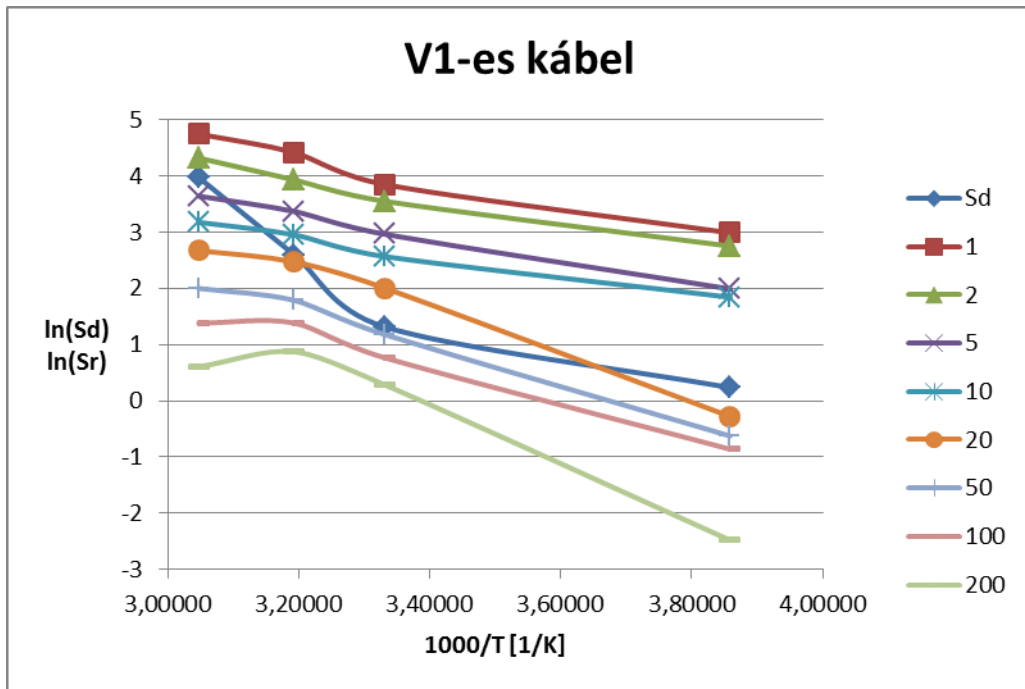
12. ábra: V2-es kábel korrigált feszültségválasza

T [°C]	-14	27	40	55
Sd[V/s]	0	3,305082	12,90877	51,76835
Sr1[V/s]	27,24491	52,95549	84,40678	115,2026
Sr2[V/s]	14,8129	36,9094	57,22895	73,53122
Sr5[V/s]	7,431477	22,45424	32,9584	42,22381
Sr10[V/s]	0	12,71556	21,05275	24,52589
Sr20[V/s]	1,779922	7,558346	11,59538	17,30844
Sr50[V/s]	0,294134	4,028415	6,98819	8,780735
Sr100[V/s]	0,368971	2,458171	4,354246	4,253611
Sr200[V/s]	0,139175	1,547779	2,613358	1,959852
Sr500[V/s]	0,051854	0,825422	0,938093	0,599341
Sr1000[V/s]	0	0,341103	0,425683	0,226737

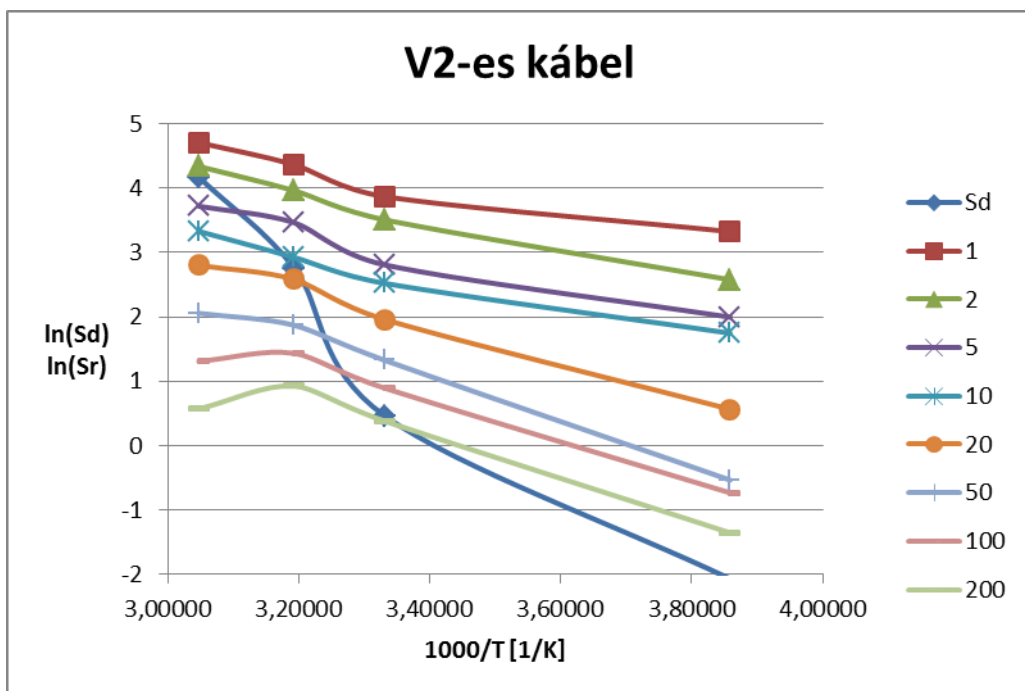
13. ábra: V3-as kábel korrigált feszültségválasza

Figyelemre méltó, hogy a polarizációs vezetőképességre jellemző értékek elég magasak, még alacsony hőmérsékleten is; ez a jelenség is azt látszik igazolni, hogy a PVC polarizációs folyamatai nem a vezetéshez hasonló töltésvándorláshoz kapcsolhatók. A kapott adatokból leolvasható még, hogy a kisülési feszültség meredeksége a hőmérséklet növekedésével mindhárom esetben jelentősen növekedett, illetve 100 s-nál rövidebb ideig rövidre zárt esetekben a visszatérő feszültségekre is ugyanez igaz. 100 s-nál vagy ennél hosszabb rövidzárási időket követően azonban általánosan igaz az, hogy a 40°C-os hőmérsékleten mért visszatérő feszültség meredekségei nagyobbak, mint az 55°C-on mért esetben. Ez, mivel mindhárom mérés ezt az azonos eredményt szolgáltatta, kis valószínűséggel jelenti azt, hogy mérési hiba lenne a jelenség oka. Mivel a vizsgálatokat az 55°C-os hőmérséklettel kezdtük, és ezek után a következő vizsgálatot csak 24 óra múlva kezdtük el, és a 40°C-on mért próbatest mérésekor már 12%-os páratartalom volt a kemencében, így feltehetőleg a különbséget a nedvesség behatolása okozhatta. A 27°C-os esetben még nagyobb volt a páratartalom nagysága (24-27%), ám jelentősen rövidebb ideig volt ilyen körülmények között a kábelünk, így a nedvességtartalma is kisebb mértékben változhatott a 40°C-on mért értékhez képest. De mivel csak a 100 s-nál nagyobb időállandójú folyamatoknál figyelhető meg ez a jelenség, így lehetséges, hogy ezen nagy időállandós folyamatok jellemzik jobban a szigetelés nedvességtartamát. Következtetésként levonható, hogy a nedvesség beszivárgása a szigetelésbe feltehetően rövidebb idő alatt történik, és nagyobb a hatása a mért értékekre, mint ahogy azt korábban feltételeztük, és a nagyobb időállandós polarizációk jelezhetik a nedvesség jelenlétét.

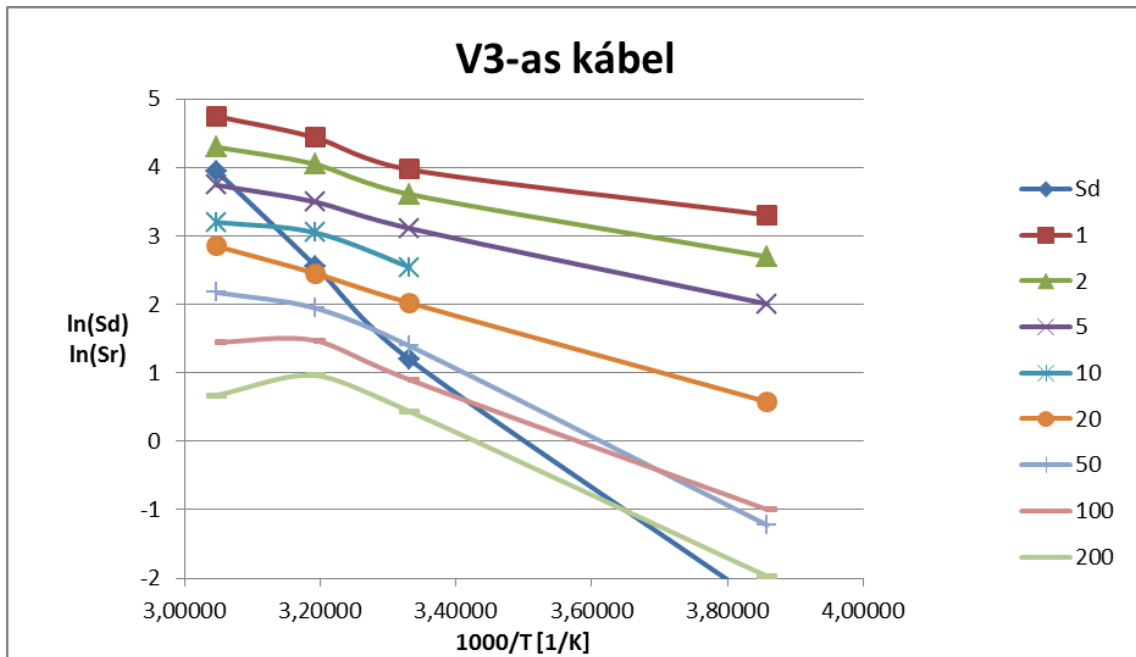
Ábrázolva a fenti eredmények logaritmusát az abszolút hőmérséklet reciprokának függvényében, a következő diagramokat kapjuk (14-16. ábrák):



14. ábra: V1-es kábel feszültségválaszai különböző hőmérsékleten



15. ábra: V2-es kábel feszültségválaszai különböző hőmérsékleten



16. ábra: V3-as kábel feszültségválaszai különböző hőmérsékleten

A kapott diagramokról leolvasható, hogy mindhárom mért kábel esetében a kisülési feszültség meredeksége, ami arányos az aktiválási energia nagyságával, a hőmérséklet csökkenésére sokkal érzékenyebb, mint a visszatérő feszültségek meredekségei. Ez megegyezik az 5.1. pontban ismertetett eredménnyel, melynek magyarázata az, hogy a vezetési folyamatoknál töltéshordozók mozgásáról beszélhetünk, így ezen töltéshordozóknak rosszul vezető anyagokban való mozgásához jelentős energia szükséges, ezért nagy a vezetési folyamatok aktiválási energiája is. Polarizációs folyamatoknál azonban, mivel a szigetelés dipólus összetevői nem áramlanak, hanem a külső tér hatására rendeződnek, és ez a rendeződés, elfordulás jelentősen könnyebben megy végbe, mint a töltéshordozók mozgása, így a polarizációs vezetőképesség aktiválási energiája kisebb, mint az előbbi esetben. Polimerekre jellemző az úgynevezett szegmenspolarizáció, amikor a hosszú láncmolekula egyes szakaszai, szegmensei, elfordulnak. Elképzelhető, hogy itt is ilyen folyamat lép fel.

Megállapítható még, hogy az alacsony hőmérsékleten mért esetekben sincs jelentős törés a visszatérő feszültségek meredekségeinek görbéinél, tehát a polarizációs folyamatok a hőmérséklet csökkenésére itt is kisebb mértékben változnak.

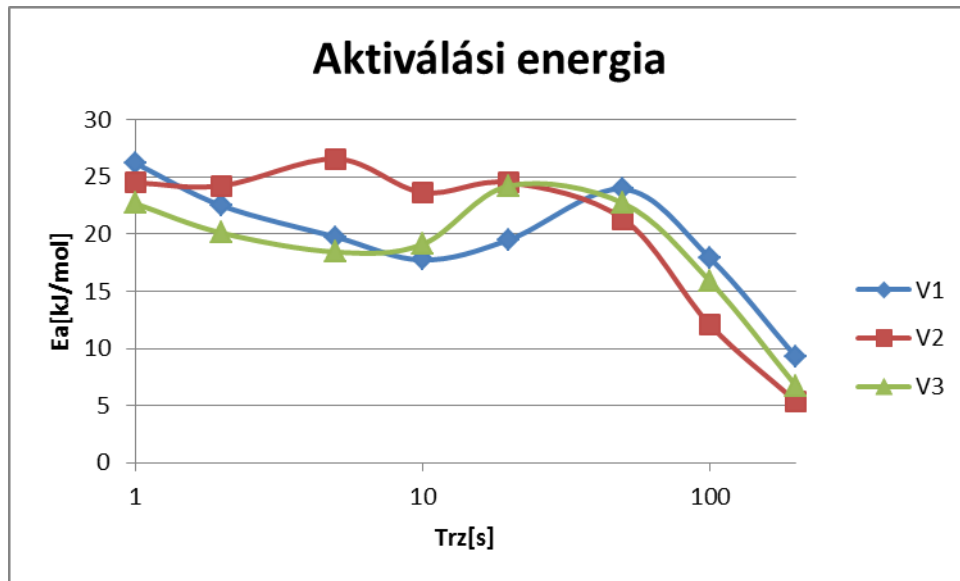
A lineáris illesztést követően a következő aktiválási energiák adódtak a 0°C-nál nagyobb hőmérsékletek felhasználásával:

Ea[kJ/mol]	V1	V2	V3
Sd	77,78	108,32	80,45
1	26,21	24,50	22,68
2	22,49	24,23	20,10
5	19,74	26,58	18,43
10	17,74	23,64	19,11
20	19,50	24,51	24,22
50	23,93	21,32	22,70
100	17,92	12,07	15,88
200	9,22	5,35	6,69

17. ábra: Aktiválási energiák

A táblázatból kimaradtak a 200 s-nál hosszabb ideig rövidre zárást követő mért értékek, mivel ezekből számolva minden esetben negatív aktiválási energiát kaptam eredményül, ezt feltehetően a nedvesség behatolása okozza. Ezek a mért eredmények nem tekinthetők valósnak.

A visszatérő feszültségekből számított aktiválási energiák 26,58 kJ/mol és 17,74 kJ/mol közt változnak, ám egyik kábel esetében sincs szó arról, hogy ezek az értékek a rövidzárási idő növekedésével egyenletesen csökkenő, vagy növekedő tendenciát mutatnának, ám 100 s után egyenletesen csökkenő értékeket tapasztaltam.



18. ábra: Aktiválási energiák a rövidzárási idők függvényében

A kapott diagramok esetén megállapítható, hogy a visszatérő feszültségekre kapott görbék pozitív hőmérsékleten nagyjából azonos aktiválási energiákkal vehetők figyelembe, tehát párhuzamosak egymással, ez igaz körülbelül a 100 s-os rövidzárási időig. Ez arra utal, hogy az 1-100 s időállandó tartományban hasonló az egyes polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggése, tehát valószínűsíthető, hogy itt egyfajta polarizációs folyamat jelentkezik a PVC-ben. A 100 s-nál nagyobb rövidzárási idők esetén a csökkenés szintén nem valószínű, hogy mérési hiba eredménye, hiszen mindhárom esetben hasonló tendencia figyelhető meg. Azonban ezen 100 s-nál nagyobb időállandójú folyamatok pontosabb vizsgálatához hosszabb töltési idő lenne szükséges.

6 Eredmények összefoglalása

A mérések során kapott eredmények igazolták egy korábbi, szintén a vezetési és polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggését vizsgáló kutatás eredményeit, ám a saját méréseim során eredményként kapott aktiválási energiák kisebbeknek adódtak. Ennek oka az eltérő állapotú és összetételű kábelekben keresendő, hiszen a korábbi kutatáskor öregített, míg a jelenlegi dolgozatban öregítetlen szigeteléseket vizsgáltunk. Ezen vizsgálat tehát újfent igazolta, hogy a vezetési és polarizációs folyamatok fizikai tulajdonságaikat tekintve alapvetően eltérnek.

A mérés következményeként megállapítható még, hogy az 1-100 s időállandó tartományban hasonló az egyes polarizációs folyamatok hőmérsékletfüggése, tehát valószínűsíthető, hogy itt egyfajta polarizációs folyamat jelentkezik a PVC-ben. A 100 s-nál nagyobb időállandójú polarizációs folyamatoknál tapasztalt jelenségek további vizsgálatot igényelnek. Az esetleges mérési hibák csökkentése céljából hosszabb töltési időt (5000-10000 s) szükséges használni, ezáltal a nagyobb időállandójú folyamatok is jobban kifejlődnek, mérések könnyebbé válik.

Bár a vizsgálat célja nem volt a szigetelésekbe behatoló nedvesség hatásának vizsgálata, de az eredmények azt mutatják, hogy a levegő páratartalmából a kábelszigetelésbe behatoló nedvesség igen jelentős mértékben tudja befolyásolni a próbatest feszültségválaszait. Az elvégzett mérések azt mutatják, hogy a szigetelés nedvességtartama rövid idő alatt képes megnőni, és a szigetelésbe behatoló nedvesség a 100 s-nál nagyobb időállandós folyamatokra jelentős hatást gyakorol. Ezen eredmények igazolása további - esetleg kémiai -, vizsgálatokat igényelne.

Mivel az üzemben lévő kábelek a diagnosztikai vizsgálatok során hasonló környezeti (változó hőmérséklet és páratartalom) hatásoknak vannak kitéve, ezért a gyakorlati mérések megkönnyítése céljából a vizsgálatok folytatását kiemelten fontosnak tartom.

Irodalomjegyzék

- [1] Tímár Peregrin László szerk.: Villamos energetika, 19. fejezet, MEE-BME 1993.
- [2] Németh E.: Fundamentals of insulation diagnostics, 37th International Scientific Colloquium TU Ilmenau, Sept 1992, Proc. Ser. 2.2.4.
- [3] Tamus Z. Á.: Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kiefeszültségű kábelekre, Ph.D. értekezés, 7. oldal
- [4] Tamus Z. Á.: Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kiefeszültségű kábelekre, Ph.D. értekezés, MI.4, 116. oldal
- [5] MSZ-13207: 7.3.1-7.3.2; 7.3.3.1; 3. táblázat
- [6] Németh, Measuring voltage response: a non-destructive diagnostic test method of HV insulation, IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology 146 (5) (Sept. 1999) 249-252.
- [7] Tamus Z. Á.: Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kiefeszültségű kábelekre, Ph.D. értekezés, 56-59. oldal
- [8] Z.Á. Tamus, N. Szedenik, Investigation of temperature dependence of dielectric processes in thermally aged PVC insulation, Journal of Electrostatics (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.003>
- [9] Németh E.: A műszaki gyakorlatban szigetelések vizsgálatára alkalmazható villamos jellemzők kapcsolata az alapvető dielektromos folyamatokkal, Kandidátusi értekezés, 1974

Függelék

F/1. táblázat

T[°C]	25	27	40	40	55	55
Állapot:	nedves	szárított	nedves	szárított	nedves	szárított
Sd[V/s]	3,255859	2,983137	17,09469	9,670381	61,4092	37,14566
Sr1[V/s]	37,123056	33,18948	63,61904	57,93033	95,32759	80,37696
Sr2[V/s]	27,129562	24,071018	46,30466	35,14976	62,0766	51,94636
Sr5[V/s]	16,610771	13,399438	25,35966	20,07171	35,0411	26,35594
Sr10[V/s]	9,748339	9,004984	17,99243	13,2434	21,63981	16,54053
Sr20[V/s]	5,565742	5,124173	11,24407	8,170216	13,86236	10,0075
Sr50[V/s]	3,407651	2,246366	5,990815	4,120321	6,259239	5,110948
Sr100[V/s]	2,133467	1,486079	3,470498	2,759109	2,868225	2,758122
Sr200[V/s]	1,437098	0,917289	1,79918	1,656097	1,229358	1,26724
Sr500[V/s]	0,729118	0,503783	0,591384	0,693858	0,623751	0,373963
Sr1000[V/s]	0,370341	0,247593	0,124855	0,232379	0,303482	0,175481