

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Fekete Norbert

Nedvesség hatásának vizsgálata PVC szigetelésű kábelekbe

Konzulens:

Dr. Tamus Zoltán Ádám

BME - VET

Budapest, 2011

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Fekete Norbert**, hallgató kijelentem, hogy ezt a 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.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik.

Kelt: Budapest, 2011. 10. 28.

.....
Fekete Norbert

Tartalomjegyzék

2.	Összefoglalás	4
3.	Abstract	5
4.	Bevezetés.....	6
5.	A szigetelések öregedése, romlása.....	7
5.1	Szigetelések öregedése hőigénybevétel hatására.....	7
5.2	Szigetelések öregedése villamos igénybevétel hatására.....	8
6.	Szigetelésvizsgálati módszerek.....	12
6.1	A szigetelésdiagnosztikai vizsgálatok alapelve	12
6.2	Szigetelésvizsgálati módszerek.....	14
6.2.1	Feszültségpróba ipari frekvenciájú váltakozó feszültséggel.....	15
6.2.2	Soros és párhuzamos rezonanciás vizsgáló módszer	15
6.2.3	Feszültségpróba igen kis frekvenciájú (0,1 Hz-es) feszültséggel	16
6.2.4	Feszültségpróba egyenfeszültséggel	16
6.2.5	Feszültségpróba lökő- és kapcsolási hullámú feszültséggel	18
6.2.6	A kapacitás és a dielektromos veszteségi tényező mérése	18
6.2.7	A töltőáram (a szigetelés áramválaszának) vizsgálata	19
6.2.8	A részleges kisülések vizsgálata.....	19
6.2.9	A teljes feszültségválasz mérési módszerének bemutatása.....	20
6.2.9.1	A szigetelőanyagok helyettesítő kapcsolásának bemutatása	20
6.2.9.2	A feszültség (feszültségválasz) mérésén alapuló módszerek	21
6.2.9.2.1	A teljes feszültségválasz (VR) mérésének módszere	24
7.	A teljes feszültségválasz mérés hatása a PVC szigetelésű kábelekre.....	27
8.	Mérés, előkészítés, kísérleti elrendezés.....	29
8.1	Mérőműszerek	29
9.	Mérési eredmények, értékelés.....	33
10.	Összegzés.....	37
	Irodalomjegyzék	38
	Ábrajegyzék.....	39

2. Összefoglalás

A víz behatolása a kábelszigetelésekbe a leggyakoribb oka a kisműködésű, PVC szigetelésű kábelek meghibásodásának. A legújabb kutatási eredmények szerint, a PVC szigetelésű kábelek termikus degradációja a feszültségválasz módszerével vizsgálható.

A feszültségválasz módszere a kisülési és a visszatérő feszültség mérésén alapul. A kisülési görbe egy relatív hosszú (100...1000 sec) feltöltési idő után mérhető a szigetelésen. A visszatérő feszültség pedig, a feltöltött szigetelés néhány másodperces rövidzárása után mérhető.

A munka során, a víz behatolását vizsgáltuk PVC szigetelésű kábelekbe.

A vizsgálathoz kisműködésű PVC szigetelésű kábelekkel készítettünk mintákat. A kábelmintákat vízbe merítve öregítettük, a vizsgálathoz új és üzemben öregedett kábelekkel is vettünk mintákat. A kábelmintákat vízbe merítettük és feszültség alá is helyeztük. Így a nedvesedés hatása könnyen vizsgálható.

A mintákon öregedés előtt és után is elvégeztük a teljes feszültségválasz mérését. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a teljes feszültségválasz mérés igen hatékony eszköze a kisműködésű PVC szigetelésű kábelek állapotvizsgálatának.

3. Abstract

The water ingress into the cable insulation is the most common reason of the damage of low voltage PVC insulated cable networks. The recent research results show that the thermal ageing of PVC insulated cables can be examined by the measurement of Voltage Response.

The Voltage Response method is based on the measurement of the decay and the return voltage. The decay voltage can be measured after the relatively long duration (100...1000 sec) charging period of the insulation. The return voltage can be measured after a few seconds short circuit on the charged insulation.

In this study, the effect of water ingress into PVC insulated cables has been investigated. The water ingress has been examined on laboratory aged low voltage cable samples. All of the cable samples were soaked. The examination has been carried out on new and field-aged cables, as well.

The samples have been examined by voltage response before and after the laboratory ageing. Result of the investigation suggests that the voltage response measurement is a very effective tool for the diagnosis of PVC insulated low voltage cables.

4. Bevezetés

A mai villamosenergia-rendszer rendkívül drága és költséges elemekből épül fel. Gondolhatunk a szabadvezetési- illetve kábelhálózatokra vagy a legnagyobb értéket képviselő transzformátorokra. Ezen eszközök, berendezések esetleges meghibásodása, kiesése igen nagy üzemzavart és ebből adódóan anyagi kárt okozhat. Ezért minden olyan vizsgálati módszer, amelyekkel a villamosenergia-hálózatra felszerelt fontosabb elemek, berendezések és készülékek időszakos diagnosztikáján keresztül az üzemzavarokra vagy meghibásodásokra tudunk következtetni - ezáltal azokat megelőzni - manapság rendkívül előtérbe került. Korábban a hibás kábelszakaszokat olcsó volt kicserélni, mára azonban a nagyvárosi kábelhálózatok rendkívüli mértékben megnőttek, valamint a költséghatékonyság szempontja miatt is fontossá vált a kábelszakaszok diagnosztizálása, mely által a hiba jellegére, helyére, a kábel állapotára is következtetni tudnak a szakemberek.

Választott témában a nedvesség behatolását vizsgáltam PVC szigetelésű, kifestültségű kábelekre. A méréshez a Paksi Atomerőmű ZRT. szolgáltatta a kábeleket. Hat darab mintát készítettem el, a kábelek hossza megegyezően, megközelítőleg egy méter hosszúságú. Ezen mintákat egy vízzel teli kádba merítettem, majd 1000 V-os szinuszos, 50 Hz-es, váltakozó feszültséget kapcsoltam rá 100 órán át.

A mintákat a feszültségválasz (VR) mérésének módszerével vizsgáltam. A szigetelésben lejárlódó kémia folyamatok, így a szigetelés minőségét meghatározó paraméterek, az öregedés és nedvesedés is jól jellemezhetőek a dielektromos folyamatok megváltozásával. A vízbe helyezés előtt mindegyik kábelszakaszt diagnosztizáltam ezen módszerrel, majd a 100 órás igénybevétel után is. A mérőműszer általunk, a tanszéken került kifejlesztésre, melynek felépítését röviden ismertetem dolgozatomban.

5. A szigetelések öregedése, romlása¹

A szigetelések két legfontosabb romlási folyamata az öregedés és a nedvesedés. A szigetelésbe behatoló nedvesség egyrészt reverzibilis módon befolyásolhatja a szigetelőanyag fizikai-villamos jellemzőit, másrészt katalizáló hatásával befolyásolhatja az anyag irreverzibilis öregedési és egyéb romlási folyamatait. A nedvszívó szigetelőanyagok pórusaiba behatoló vízpára a pórusok falán kondenzálódik, így ezek az anyagok a hajszálcsovesség hatása következtében akár 3... 5 tömegszázalék nedvességet is képesek magukba szívni. Kis nedvességtartalmak elsősorban az anyag szigetelési ellenállását befolyásolják igen erőteljesen; a villamos szilárdság csak akkor kezd rohamosan csökkenni, ha nagy nedvességtartalmak esetében az anyagban vízzel telt összefüggő csatornák kezdenek kialakulni. Tartósan jelenlevő nedvesség a villamos jellemzők befolyásolásán túlmenően katalizáló hatásával egyes szigetelőanyagok (pl. telített papír) termikus öregedését is gyorsíthatja.

Öregedésnek nevezzük összefoglaló néven a szigetelőanyagokban fellépő kémiai.fizikai folyamatokat, amelyek a szerves szigetelőanyagok villamos és egyéb fizikai jellemzőinek irreverzibilis romlását idézik elő. A szigetelést üzem közben egyszerre érik villamos, hő- és környezeti, esetleg még mechanikai és egyéb igénybevételek. A szigetelést ezek együttes hatása öregíti, a folyamatos öregedés hatására a szigetelés villamos jellemzői - köztük a villamos szilárdsága is - állandóan romlanak, élettartama csökken. Az élettartamot legnagyobb mértékben a hőigénybevétel és a villamos igénybevétel befolyásolja.

Üzemben levő szigetelések állapotát, tulajdonságaik romlásának mértékét, az öregedés előrehaladását vagy roncsolásos kémiai vizsgálatokkal, vagy a szigetelések roncsolásmentes diagnosztikus vizsgálatával lehet bizonyos korlátok között megállapítani.

5.1 Szigetelések öregedése hőigénybevétel hatására

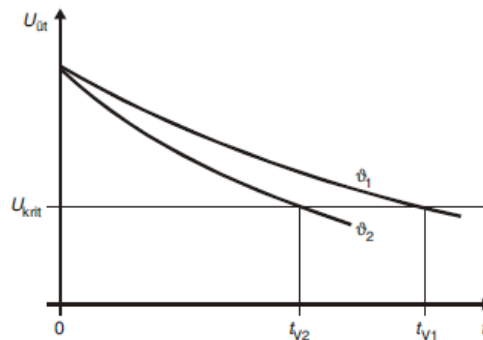
Hőigénybevétel hatására csak a szerves szigetelőanyagok öregednek, a szervesetlen alapú szigetelőanyagok (kerámia, üveg, csillám) a szigetelések üzemi hőmérsékletén gyakorlatilag nem öregszenek.

¹ Luspay Ödön szerkesztette: Nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata – Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete – Budapest,2000

A szigetelések öregedésével, élettartamával kapcsolatos legfontosabb alapfogalmak a következők:

A termikus öregedési görbe megadja, hogy a szigetelés valamely üzemeltetés szempontjából fontos jellemzője hogyan változik az időben egy adott állandó hőigénybevétel hatására. Pl. az 1. ábra – Termikus öregedési görbe, élettartammutatja a szigetelés átütési feszültségének változását két különböző, ϑ_1 és ϑ_2 hőmérsékleten az idő függvényében.

Az élettartam-kritérium valamely tetszőlegesen kiválasztott jellemzőnek az az önkényesen meghatározott legkisebb értéke, amely alatt a szigetelés már nem felel meg szigetelési feladatának, üzembiztonsága már nem megfelelő.



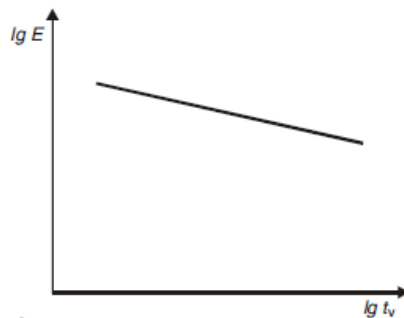
1. ábra – Termikus öregedési görbe, élettartam

Az élettartam az az időtartam, ami alatt a kiválasztott jellemző egy előre megválasztott minimális értékre, az ún. élettartam-kritérium értékre csökken. A 1. ábrában t_{v1} a ϑ_1 , illetve t_{v2} a ϑ_2 hőmérsékletre tartozó élettartam.

5.2 Szigetelések öregedése villamos igénybevétel hatására

Szigetelőanyagok, szigetelések élettartamának a villamos igénybevételtől való függését a $t_v = f(E)$ villamos élettartamgörbe írja le. A villamos élettartam meghatározásakor szükség van egy élettartam-kritérium választására, ez általában az átütési feszültség. Az élettartam meghatározásakor több, párhuzamosan kapcsolt próbatestre az üzemi feszültségnél nagyobb vizsgálófeszültséget kapcsolva mérik, hogy mennyi idő múlva ütnek át. Az adott feszültséghez tartozó élettartamnak azt az időtartamot tekintik, amely alatt a minták 50% -a átüt. A vizsgálatot több feszültségen elvégezve és a kapott élettartamokat ($y = \lg E$, $x = \lg t_v$)

koordinátarendszerben felrajzolva megkapjuk a szigetelés villamos élettartamgörbéjét, ami ebben a koordinátarendszerben jó közelítéssel egyenes.



2. ábra – Élettartam a villamos igénybevételtől függően

A villamos élettartam-görbéből leolvasható, hogy különböző villamos igénybevételek esetén mekkora lesz a szigetelés várható élettartama.

²A korszerű műanyag kábelszigetelések anyaga általában valamilyen nagy molekulájú szerves vegyület (polimer), mely azonos építőelemekből (monomerekből) épül fel.

A polimereket előállításuk, feldolgozásuk és alkalmazásuk során különböző fizikai és kémiai hatások érik, melyek következtében változnak a mechanikai tulajdonságaik, a kémiai összetételük, a molekulatömegük, és fokozatosan elvesztik műszakilag értékes tulajdonságaikat. A műanyagok öregedésén, azok tulajdonságainak időbeli lassú, hátrányos változását értjük, mely elsősorban a fény, a hő, az oxigén, a különböző vegyszerek, a nedvesség és a nagyenergiájú sugárzás hatására következik be.

Magas hőmérsékleten, levegő jelenlétében a polimereknél termikus oxidáció lép fel. Ennek oka a termikus energia, a hőfok emelkedése.

Szabadban alkalmazva a polimereknél fotokémiai oxidáció jelentkezik, melyet az UV sugárzás idéz elő. Kettőskötéseket, aromás és egyéb csoportokat tartalmazó molekulák elnyelik a látható és az UV fényt. A nagyenergiájú UV fény hatására kémiai, általában gyökös reakciók indulnak meg, melyek rendszerint oxidációval járó láncreakcióban a polimer tulajdonságainak jelentős változását okozzák. A hő-oxidáció vagy a fényhatások következtében a termékek felületén finom repedések keletkeznek. Ezek ronthatják a fizikai és mechanikai, valamint a villamos tulajdonságokat.

² Tamus Zoltán Ádám – PhD. értekezés – Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kiefeszültségű kábelekre – Budapest, 2011

Ellentétben a fotodegradációval, a nagyenergiájú sugárzás hatása nem szelektív, energiája gyakorlatilag minden kötés megbontásához elegendő. A sugárzás hatására lánctördelődés, a molekulatömeg csökkenése következik be, de egyes esetekben térhálósodás lehet a domináló reakció.

Nem oxidáló savak, bázisok, sók és azok oldatai praktikusán nem gyakorolnak hatást a polietilénre. Az oxidáló vegyszerek azonban megtámadják a polimert. A kémiai degradáció hatására nagyfokú változások mehetnek végbe a polimerben, de ez gyakran csak magas hőmérsékleten következik be, mivel az ilyen reakciók aktiválási energiája általában nagy.

A mechanokémiai degradáció során a külső mechanikai feszültség gyakran a kémiai kötések elszakadását eredményezi. Ez következik be a polimer törése, de gyakran feldolgozása, vagy alkalmazása alatt is. A kötészakadás általában szabad gyököket eredményez, melyek további reakcióban vesznek részt.

Olyan esetekben, ha a polimerből készített termékeket vegyi anyagok hatásának tesszük ki mechanikai feszültség mellett, akkor felületén repedések keletkezhetnek, ezt a jelenséget hívjuk feszültségkorrózióknak.

A biológiai lebomlás lényegében kémiai degradáció. A mikroorganizmusok számos enzimet termelnek, amelyek reakcióba lépnek bizonyos polimerekkel és a molekulatömeg csökkenését, majd a polimer teljes lebomlását okozzák.

A fenti degradációs hatások szinte sohasem egyedül lépnek fel, általában egyidejűleg több tényező hatása érvényesül. A különböző igénybevételek hatására eltérő kémiai folyamatok játszódhatnak le a polimerben, a domináns reakció és annak következménye is változhat.

Az öregítő hatás egyik legfontosabb jellemzője, hogy a felsorolt tényezők intenzitása, egyidejűsége a használat során csak közelítő pontossággal határozható meg. A polimerek öregedésekor kémiai átalakulások (lánctördelődés, oldalcsoportok változása, kémiai összetétel változás) és fizikai szerkezetváltozások (kristályossági fok, belső feszültségek, alaktorzulások) egyaránt végbemehetnek. Hőterhelés hatására például a polietilén degradálódik, a PVC pedig sósav lehasadásával bomlik.

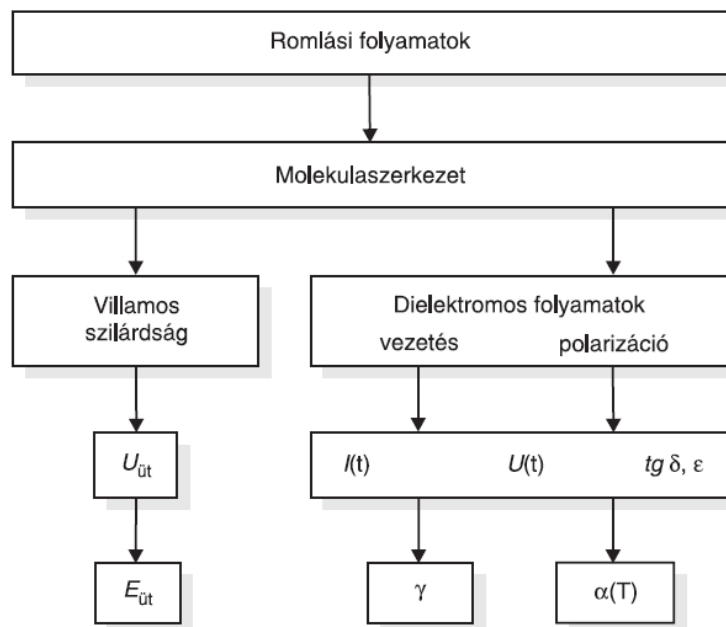
A degradálódás megakadályozása és a tulajdonságok megőrzése érdekében a polimerekhez stabilizátorokat adnak. Ezek a kis mennyiségben használt segédanyagok gátolják a káros kémiai folyamatokat, vagy megváltoztatják irányukat. Az alkalmazott stabilizátor mennyisége függ a megvédeni kívánt polimer kémiai szerkezetétől, a degradációt

előidézõ külsõ behatástól és a degradáció mechanizmusától. Az alkalmazott stabilizátorok, illetve stabilizátor kombinációk hatásmechanizmusa többnyire nem tisztázott, az összetétel és a tulajdonságok kapcsolata nem lineáris, a komponensek gyakran kölcsönhatásba lépnek egymással. Az egyes műanyaggyártó cégek a különböző felhasználási céloknak megfelelően számtalan stabilizátor rendszert fejlesztettek ki, melyek hatására a mai korszerű műanyagok már sokkal stabilabbak, mint néhány évtizeddel korábbi társaik.

6. Szigetelésvizsgálati módszerek³

6.1 A szigetelésdiagnosztikai vizsgálatok alapelve

Üzemeltetés szempontjából a szigetelés legfontosabb jellemzője a villamos szilárdság. Ez azonban nem állandó, hanem a szigetelés romlási folyamatai következtében üzem közben folyamatosan csökken, így ezzel a szigetelés üzembiztonsága is romlik. A szigetelés villamos szilárdsága közvetlenül nem mérhető, mert a méréssel - lévén roncsolásos vizsgálat - tönkretennénk a szigetelést. A roncsolásmentes diagnosztikus szigetelésvizsgálati módszerek adnak lehetőséget arra, hogy a szigetelés állapotának, villamos szilárdságának valószínű változásáról közvetve tájékoztatást adjanak. A diagnosztikai szigetelésvizsgálatok alapelve a következő: a szigetelésben az üzemi igénybevételek hatására fellépő kémiai és fizikai romlási folyamatok befolyásolják, módosítják az anyag molekuláris szerkezetét. A molekulászerkezet módosulása befolyásolja egyrészt a szigetelés villamos szilárdságát, másrészt a szigetelőanyagban fellépő dielektromos alapfolyamatokat, a vezetést és a polarizációt is. Ezek a folyamatok azonban már vizsgálhatók roncsolásmentes módszerekkel, a szigetelés villamos jellemzőinek mérésével.



3. ábra – A diagnosztikai vizsgálatok alapelve

³ Luspay Ödön szerkesztette: Nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata – Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete – Budapest, 2000

A roncsolásmentes módszerekkel vizsgálható villamos jellemzők a következők:

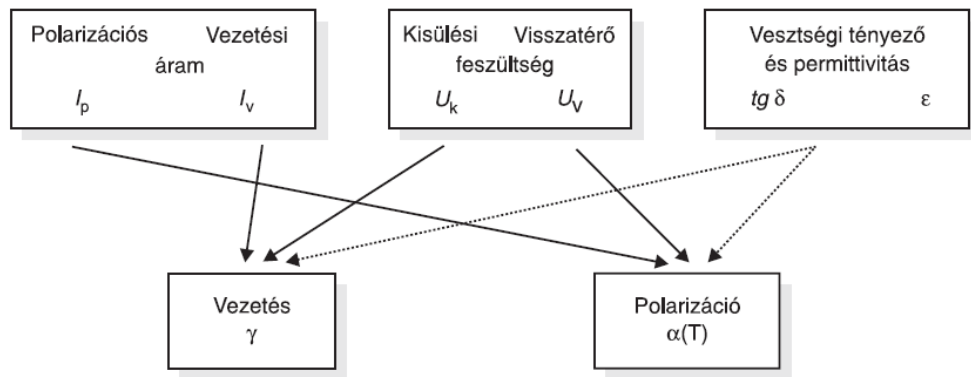
- a $\tan \delta$ dielektromos veszteségi tényező és az ϵ permittivitás,
- a szivárgási áram, illetve ennek polarizációs és vezetési összetevője,
- a szigetelés jellemző feszültséggörbéi, úgymint a kisülési feszültséggörbe és a visszatérő feszültséggörbe.

A tapasztalat szerint a szigetelés romlási folyamatai elsősorban a vezetés folyamatát és a polarizációs spektrum nagyidőállandójú ($T > 1$ s) tartományát befolyásolják. A vezetési folyamat vizsgálatára alkalmazható mérési módszerek:

- a szivárgási áram mérése, a mért áramból az I_v vezetési áramösszetevő meghatározása,
- a kisülési feszültséggörbe mérése, a görbe kezdeti érintőjének meredeksége egyenesen arányos a szigetelés fajlagos vezetőképességével.

A polarizációs spektrum vizsgálható:

- elvileg a veszteségi tényező mérésével, azonban a szigetelések romlási folyamataira érzékeny időállandó-tartomány az igen kis frekvenciákon ($f < 1$ Hz) lenne vizsgálható, megfelelő mérőműszer híján ez a vizsgálati módszer üzemi gyakorlatban még nem terjedt el,
- vizsgálható a spektrum a szivárgási áramból meghatározható I_p polarizációs áramösszetevő mérésével is. Az I_p különböző időpontokban leolvasott értékei más időállandó-tartomány polarizációs folyamatairól adnak felvilágosítást,
- végül vizsgálható a spektrum a visszatérő feszültség mérésével. A visszatérő feszültség a mérésnél alkalmazott feltöltési és rövidrezárási időtartamok által meghatározott polarizációs időállandó-tartományról ad felvilágosítást, a görbe kezdeti érintőjének meredeksége egyenesen arányos az időállandó-tartományba eső polarizációs folyamatok erősségével.



4. ábra – a vezetési és a polarizációs folyamatok vizsgálatának lehetősége

A roncsolásmentes diagnosztikus mérések eredményéből tehát vissza lehet következtetni a dielektromos folyamatok változására, ebből a romlási folyamatok mértékére, előrehaladására, így kellő tapasztalattal közvetve a szigetelés villamos szilárdságának változására is.

6.2 Szigetelésvizsgálati módszerek

Egy rendszer vagy berendezés névleges feszültsége az a feszültségérték, amely a rendszer vagy berendezés jellemzésére, azonosítására, megnevezésére használatos. A berendezések, készülékek szigetelését üzemszerűen 50 Hz-es üzemi feszültség veszi igénybe; ez lehet a vonali-, a fázisfeszültség, vagy ezek adott hányada. Az üzemi feszültség a szabványban előírt legkisebb és legnagyobb üzemi feszültség között változhat.

Az MSZ EN 60071-1:1997 az alakjuk és időtartamuk szerint a feszültségeket és a túlfeszültségeket a következőképpen csoportosítja:

- Folyamatos (ipari frekvenciájú) feszültség: állandónak tekinthető effektív értékű, ipari frekvenciájú feszültség, amely egy szigetelésselrendezést valamely két pontja között tartósan igénybe vesz.
- Időszakos túlfeszültség: viszonylag hosszabb ideig fennálló, ipari frekvenciájú túlfeszültség, ami lehet csillapítatlan, vagy enyhén csillapodó. (Bizonyos esetekben frekvenciája az ipari frekvencia tört része vagy többszöröse lehet.)
- Tranziens túlfeszültség: rövid, néhány ezredmásodperces vagy még rövidebb időtartamú, rendszerint erősen csillapodó túlfeszültség, lehet oszcilláló vagy nem oszcilláló jellegű.

(Tranziens túlfeszültségeket követhet azonnal időszakos túlfeszültség. Ilyen esetekben a kétféle túlfeszültséget különálló jelenségnek kell tekinteni.)

A szigetelések biztonságos méretezéséhez és üzemeltetéséhez szükséges az üzem közben a szigeteléseket érő túlfeszültségeket utánzó feszültségpróbák bevezetése, ill. a szigeteléseket érő túlfeszültségek nagyságának korlátozása. Ez utóbbi a szigetelési feszültség szintek koordinálásával (a szigetelést érő túlfeszültségek egymáshoz képesti arányának rögzítésével) valósítható meg

A feszültségpróba célja annak a megállapítása, illetve bizonyítása, hogy a szigetelés villamos szilárdsága egy előírt legkisebb értéknél nagyobb. A feszültségpróba arról nem ad információt, hogy valójában mekkora a szigetelés átütési feszültsége, azaz villamos szilárdsága.

6.2.1 Feszültségpróba ipari frekvenciájú váltakozó feszültséggel

Az ipari frekvenciájú próbafeszültség általában 50 Hz-es, egyes esetekben a gerjesztőáram csökkentése céljából 100... 200 Hz-es, kis felharmonikus tartalmú, tehát közel szinuszos váltakozó feszültség. A váltakozó feszültséggel végzett feszültségpróbaival kapcsolatos általános előírásokat, a vizsgálóberendezéssel szemben támasztott követelményeket, továbbá a feszültségpróba végrehajtásának módszerét az előbbieken felsorolt szabványok tartalmazzák, míg az egyes készülékek, berendezések, gépek feszültségpróbájának részletes szabályait (a próbafeszültség nagyságát, a feszültségpróba időtartamát és az alkalmazandó kapcsolást, a vizsgálatok kiértékelésének módszerét stb.) a készülékekre, berendezésekre vonatkozó szabványok rögzítik.

6.2.2 Soros és párhuzamos rezonanciás vizsgáló módszer

Nagykapacitású próbatestek (pl. kábelszakaszok, SF₆ gázszigetelésű tokozott kapcsolóberendezések) helyszíni ipari frekvenciájú feszültségpróbája esetén a felmerülő nagy meddőteljesítmény-igény miatt nagyteljesítményű (tehát nagyméretű, nehezen szállítható) próbatranszformátor szükséges és a vizsgálat a hálózatot is erősen megterheli. Ezért újabban ezeket a vizsgálatokat soros vagy párhuzamos rezonanciás kapcsolású vizsgálókörrel végzik.

6.2.3 Feszültségpróba igen kis frekvenciájú (0,1 Hz-es) feszültséggel

Az 50 Hz-es helyszíni feszültségpróba hátrányainak (nagy meddőteljesítmény-igény, nagyméretű vizsgálóberendezés) kiküszöbölésére már a negyvenes években javasolták az igen kis frekvenciás (0,1 Hz-es) feszültségpróba alkalmazását abból a megfontolásból kiindulva, hogy 0,1 Hz-en kisebb a vizsgálat meddőteljesítmény-igénye. A módszer nem terjedt el, mégpedig az igen kis frekvenciájú nagyfeszültség előállításának nehézségei miatt. Az igen kis frekvenciás nagyfeszültséget transzformátorral előállító kapcsolás szóba sem jöhet. Kezdetben a feszültséget olyan potenciométeres kapcsolással állították elő, amelyben a csúszó érintkező excenteres mechanikus hajtás segítségével harmonikus mozgást végzett. A legújabban kifejlesztett módszer esetében a 0,1 Hz-es nagyfeszültséget mikroprocesszoros vezérléssel kis lépésekben ugrásszerűen változtatott egyenfeszültségből állítják elő. Mindezek ellenére a 0,1 Hz-es feszültségpróba két további ok miatt nem terjedt el.

A szigetelésben 0,1 Hz esetén kialakuló erőtéreloszlás erősen különbözik az 50 Hz-es erőtéreloszlástól, inkább az egyenfeszültségű próba esetében fellépő erőtéreloszláshoz áll közel, tehát nem szünteti meg annak hátrányait.

Másik ok, hogy költséges, bonyolult vizsgálóberendezés szükséges a vizsgálatához. Mindezek miatt a 0,1 Hz-es feszültség alkalmazása nagyfeszültségű próba céljára általánosan nem terjedt el, kisebb feszültségű változatát viszont a dielektromos veszteségi tényező mérésekor alkalmazzák.

6.2.4 Feszültségpróba egyenfeszültséggel

Nagykapacitású próbatestek (pl. kábelszakaszok, nagy forgógépek, SF₆ gáztokozású kapcsolóberendezések) helyszíni vizsgálata esetén a váltakozó feszültségű próba nagy meddőteljesítmény-igényének csökkentésére vezették be az egyenfeszültséggel végzett feszültségpróbát. Egyenfeszültség alkalmazásakor meddő teljesítményigény nem lép fel, a feszültségforrásnak csak a vizsgált szigetelés szivárgási áramának megfelelő hatásos teljesítményt kell szolgáltatni. A szükséges feszültségforrás tehát lényegesen kisebb méretű, könnyen szállítható és a próba gyakorlatilag nem terheli meg a táphálózatot.

Az egyenfeszültséget a nagyfeszültségű oldalon kell mérni közvetlen módszerrel, ez lehet elektrosztatikus voltmérő vagy rezisztív (ohmos) feszültségosztó. Az előírások általában legfeljebb 5% hullámosságot engednek meg. Nagykapacitású próbatestek vizsgálatakor a próbatest saját kapacitása rendszerint elegendő az előírt hullámosság eléréséhez, kisebb kapacitású próbatárgyak vizsgálatakor külön simító kondenzátorok beiktatása is szükséges lehet. Az egyenfeszültségű próbák időtartama lényegesen hosszabb, mint a váltakozó feszültségű próbáké. Ennek oka az, hogy a kétfajta feszültség eltérő módon veszi igénybe a szigeteléseket. Váltakozó feszültség hatására a szigetelésben a vezetési folyamat mellett polarizációs folyamatok is fellépnek, ezek a szigetelést a polarizációs veszteség következtében melegítik. Egyenfeszültség esetében viszont csak a vezetés okozta veszteség lép föl, ez azonban az előbbinek csak néhány %-a, ez nem melegíti lényegesen a szigetelést. Az igénybevételekben fellépő különbség kiegyenlítésére az egyenfeszültségű próbák időtartamát és a próbafeszültség nagyságát jelentősen megnövelik.

Különböző szigetelőanyagokból rétegezett szigetelésekben a keresztirányú rétegez és törvényei szerint az egyes szigetelőanyagokban kialakuló térerősség váltakozó feszültségű igénybevétel esetén az anyagok permittivitásával fordítva arányos, egyenfeszültség esetében viszont a fajlagos ellenállások aránya határozza meg a térerősségek arányát. Így a szigetelésekben, egyenfeszültségű próba esetén a váltakozó feszültségűtől teljesen eltérő térerősségeloszlás léphet fel.

Hasonló hatások léphetnek föl olyan szigetelésekben, amelyek egyes részein a nagy helyi (főként felületi, tangenciális) igénybevételeket vezetőképes potenciálvezérlő rétegekkel csökkentik veszélytelen mértékűre (pl. átvezető szigetelők, kábelszerelvények). Ezek a potenciálvezérlő rétegek csak 50 Hz frekvencián (gyakorlatilag kb. 35 és 80 Hz között) működnek megfelelően, ennél lényegesen nagyobb illetve kisebb frekvencián, így egyenfeszültségen sem fejtik ki potenciálvezérlő hatásukat, ilyen módon a szigetelés egyes kritikus pontjai a nagy villamos túligénybevétel következtében az egyenfeszültségű próba hatására maradandóan károsodhatnak.

Feltétlenül ügyelni kell arra, hogy az egyenfeszültségű próba után a vizsgált szigetelést teljesen ki kell sütni, azaz annyi ideig kell a szigetelés elektródáit rövidrezárva tartani és leföldelni, amíg az elektródákon a polarizációs folyamatok következtében

fölhalmozódott töltések ki nem egyenlítődnek; ez az időtartam legalább a feszültségpróba időtartamának háromszorosa.

A kábelszakasz kisütésekor a hirtelen feszültségváltozás következtében fellépő nagy térerősségek villamos tree-k keletkezését indíthatják meg, ez is egyik oka annak, hogy az extrudált szigetelésű kábeleken nem végezhető egyenfeszültségű próbák.

6.2.5 Feszültségpróba lökő- és kapcsolási hullámú feszültséggel

A tranziens feszültség hullámokkal végzett feszültségpróbák célja a szigeteléseknek az üzemi tranziens túlfeszültségekkel, azaz az atmoszférikus eredetű vándorhullámokkal, ill. a kapcsolási túlfeszültségekkel szemben tanúsított viselkedésének vizsgálata. Az MSZ EN 60071-1:1997 szerint a vizsgáló feszültség hullámok alakjának szabványos paraméterei lökőfeszültség esetében $T_h / T_f = 1,2/50$ ms, kapcsolási hullám esetében 250/2500 ms.

6.2.6 A kapacitás és a dielektromos veszteségi tényező mérése

Szigetelések, szigetelőanyagok kapacitásának és dielektromos veszteségi tényezőjének (röviden veszteségi tényezőjének) mérésére szolgáló mérési módszereket az MSZ 4857:1983, ill. az IEC 60250:1969 tartalmazza. A módszerek alapelvük szerint a következők lehetnek:

- kiegyenlítő (nullázó) módszerek, ezen belül hídkapcsolást alkalmazó módszerek illetve komparátoros módszerek,
- közvetlenül veszteséget mérő módszerek és
- rezonancia vagy csillapítás mérésén alapuló módszerek.

A rezonancia ill. csillapítás mérésén alapuló módszereket, valamint a veszteséget közvetlenül mérő módszereket általában nagyfrekvenciás méréseknél alkalmazzák, 50 Hz-es vizsgálatokra nem használatosak.

Az erősáramú gyakorlatban 50 Hz-en végzett mérésekre legelterjedtebb a kiegyenlítő módszerek alkalmazása.

6.2.7 A töltőáram (a szigetelés áramválaszának) vizsgálata

A töltőáram (szivárgási áram) illetve a szigetelési ellenállás mérése a legrégebbi és legáltalánosabban használt szigetelésellenőrzési módszer. A szigetelés IT töltőárama egyenfeszültséggel mérhető, a szigetelési ellenállás közelítő értéke a feszültségből és a töltőáram pillanatértékéből az $RSZ = U / ISZ$ [ohm = V/A] összefüggéssel számítható.

A szigetelési ellenállás tulajdonképpen gyűjtőfogalom, többféle szigetelési ellenállás létezik. Ezek:

- A szigetelés ρ fajlagos térfogati ellenállása, definíció szerint a szigetelés ill. szigetelőanyag térfogategységre vonatkoztatott ellenállása, mértékegysége ohm·m, használatosabb az ohm·cm. Fajlagos érték lévén anyagjellemző.
- A szigetelés RF felületi ellenállása, a szigetelés illetve szigetelőanyag felületén elhelyezett, a szabványokban meghatározott alakú és nagyságú mérőelektródák között mért ellenállás, jellemző a szigetelőanyag felületének ellenállására. Mértékegysége az ohm, de meg kell adni, hogy milyen alakú, méretű elektródák között mért érték. Nem anyagjellemző, értéke erősen függ többek között a felület állapotától (szennyezéstől), a környező légtér nedvességtartalmától stb.
- A szabványok a fentiekén kívül még több különleges szigetelési ellenállást is meghatároznak, pl. a szigetelésnek a saját elektródái között mérhető ellenállását, adott méretű kúpos csapok között mérhető (belső) ellenállását stb. Ezek egyike sem anyagjellemző, ezért mindig megadandó, hogy milyen elektródák között mérték.

6.2.8 A részleges kisülések vizsgálata

Azokat a villamos kisüléseket, amelyek nem hidalják át teljesen az elektródaközt, részleges kisüléseknek (röviden: részkisüléseknek) nevezzük.

Részleges kisülés keletkezhet:

- gázokban és folyadékokban az erősen inhomogén erőterek legnagyobb térerősségű részén, ez a koronakisülés,
- szilárd szigetelőanyagok gázzal töltött üregeiben, illetve folyadékokban keletkező gázbuborékokban, ez a belső (vagy üreg-) kisülés,

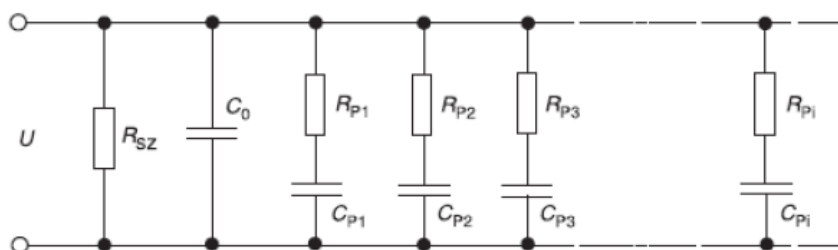
- különböző halmazállapotú szigetelőanyagok határfelületén úgy, hogy a keletkező kisülés csak az egyik elektróddal érintkezik, ez a felületi vagy kúszó kisülés.

A felületi és belső kisülések, egyes esetekben a koronakisülések is, roncsolják a szigetelőanyagokat és ezzel csökkentik a szigetelés élettartamát, rövidebb-hosszabb idő elteltével a szigetelés átütését, átívelését okozzák. Roncsoló hatásuk függ fajtájuktól, intenzitásuktól és fellépésük helyétől, ezért a vizsgálatok célja jelenlétük kimutatásán és intenzitásuk mérésén túlmenően a különböző eredetű részkisülés fajták elkülönítése és lokalizációja is.

6.2.9 A teljes feszültségválasz mérési módszerének bemutatása

6.2.9.1 A szigetelőanyagok helyettesítő kapcsolásának bemutatása

A szigetelőanyagban fellépő dielektromos folyamatok helyettesítő kapcsolása a szigetelőanyagban fellépő dielektromos folyamatokat a helyettesítő kapcsolással lehet jól szemléltetni. A helyettesítő kapcsolásban C_0 képviseli az elektródaelrendezés szigetelőanyag nélküli (geometriai) kapacitását, R_{SZ} a szigetelés szigetelési ellenállását, az egyes R_P - C_P tagok pedig a különböző időállandójú polarizációs folyamatokat. Az R_C tagokban a kapacitások jelképezik az illető folyamat által lekötött töltést, azaz az adott polarizációs folyamat erősségével arányosak, az R_C szorzat viszont a folyamat időállandóját adja.



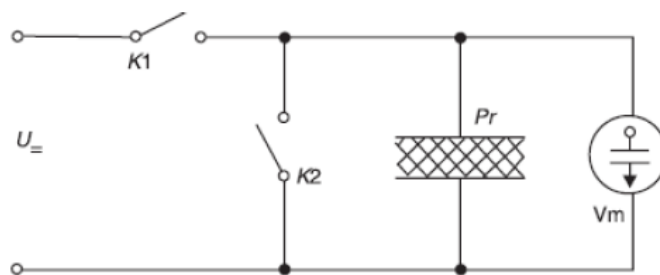
5. ábra – Szigetelőanyagok villamos helyettesítő kapcsolása

Ez a helyettesítő kapcsolás mind egyenfeszültség esetében, mind váltakozó feszültség esetében helyesen képezi le a dielektromos folyamatokat, és tetszőleges idő- és frekvenciahatárok között alkalmazható. Főképpen elektronikai problémák esetében szoktak egyszerűsített helyettesítő kapcsolásokat alkalmazni (soros ill. párhuzamos helyettesítő

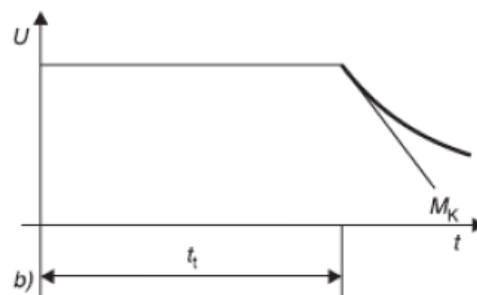
kapcsolások). Ezek azonban csak a külső áramkör szempontjából és csak egyetlen frekvencián helyettesítik a szigetelést, de a fizikai jelenségek leírására nem alkalmasak.

6.2.9.2 A feszültség (feszültségválasz) mérésén alapuló módszerek

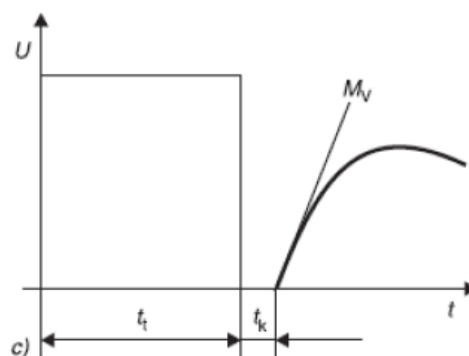
A szigetelésben fellépő vezetési folyamat és a nagydőllandójú polarizációs folyamatok vizsgálhatók a szigetelés feszültségválaszának, azaz a szigetelés elektródjai között fellépő feszültségek időbeli változásának mérésével is. Az elektródákon két feszültséggörbe mérhető, a kisülési feszültséggörbe és a visszatérő feszültség görbéje. A kisülési és a visszatérő feszültségek görbéje az elektródákon a 6. ábra szerinti elvi kapcsolásban mérhető.



6. ábra – A feszültségválasz módszerének elvi kapcsolása



7. ábra – A kisülési görbe

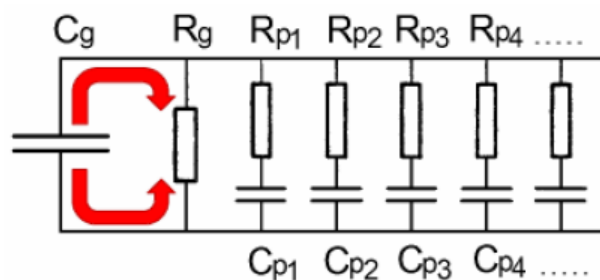


8. ábra – a visszatérő feszültség görbe

(A 6. ábra – A feszültségvázalás módszerének elvi kapcsolása: U= egyenfeszültségű áramforrás; K1 feszültség rákapcsoló; K2 rövidzáró kapcsoló V_m elektrosztatikus (fogyasztásmentes) voltmérő; P_r a vizsgálandó szigetelés.)

Az ábrán a K1 kapcsoló kapcsolja a töltőfeszültséget a P_r próbatestre, a K2 kisüti a próbatestet, a feszültség a V_m fogyasztásmentes voltmérővel mérhető. A kisülési feszültség görbéje a szigetelés elektródáin akkor mérhető, ha a szigetelésre hosszabb (10... 30 perces) időtartamra egyenfeszültséget kapcsolunk, - feltöltjük -, majd a szigetelést a feszültségforrásról lekapcsoljuk. Ekkor az elektródák töltése a szigetelés ellenállásán át egyenlítődik ki, a feszültség a 7. ábra görbéje szerint lassan csökken. Ez az $U_k = f(t)$ kisülési görbe az elektródákon fogyasztásmentes (pl. elektrosztatikus) voltmérővel mérhető.

A folyamat a szigetelésnek az 5. ábra szerinti helyettesítő kapcsolási rajzán a következőképpen szemléltethető:



9. ábra – Kisülési görbe a helyettesítő kapcsoláson

A kisülési feszültség görbe kezdeti meredekségének meghatározása:

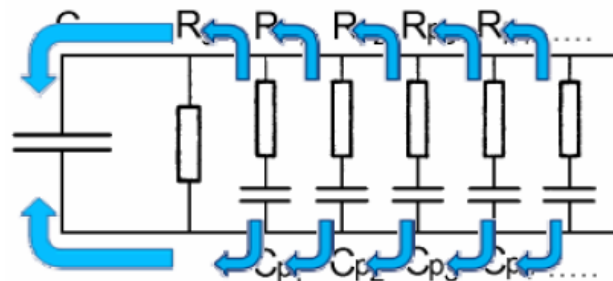
$$S_d = \frac{\gamma V_{ch}}{\epsilon_0}, \quad S_d = \frac{V_{ch}}{\tau_g}, \quad \tau_g = R_p \cdot C_g$$

(A fejlesztett műszerben a meredekség számítását egy szoftver végzi saját módszer alapján, lásd a későbbi részben.)

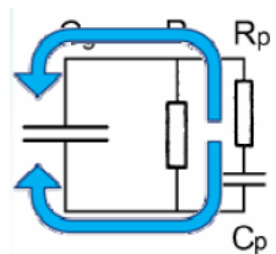
A feszültségforrásról való lekapcsolás után a szigetelés geometriai kapacitását jelképező kondenzátor, valamint a polarizációs folyamatokat jelképező R_p - C_p tagokban levő kapacitások a szigetelés R_{sz} ellenállásán át kisülnek, mégpedig minél kisebb a szigetelési ellenállás, annál gyorsabb a feszültség csökkenése.

A visszatérő feszültség görbéje a szigetelés hosszabb ideig tartó feltöltését követő rövidebb időtartamú kisütése (rövidrezárása) után mérhető (8. ábra). A visszatérő feszültséget a szigetelésben a feltöltés alatt kifejlődött és a rövidzár alatt még vissza nem fejlődött

polarizációs folyamatok visszafejlődése hozza létre, e folyamatok időállandója gyakorlatilag a feltöltési és a rövidzárási idő közé esik. Ez a kapcsolat lehetőséget nyújt arra, hogy a feltöltési és a rövidzárási idők megfelelő megválasztásával tetszőleges időállandójú polarizációs időállandó-tartományba eső polarizációs folyamatokat vizsgáljunk.



10. ábra – Visszatérő feszültség a helyettesítő kapcsoláson 1



11. ábra - Visszatérő feszültség a helyettesítő kapcsoláson 2

A visszatérő feszültség görbe kezdeti meredekségének meghatározása:

$$S_r = \frac{\beta V_{ch}}{\varepsilon_0}, \quad S_r = \frac{V_{ch}}{\tau_r}, \quad \tau_r = R_p \cdot C_g$$

A visszatérő feszültségnek az ábrán látható görbéje úgy jön létre, hogy a feltöltés alatt az elektródákon felhalmozódott szabad és kötött (polarizációs) töltésekből a rövidzárási ideje alatt a szabad töltés kisül, a kötött töltés azonban a polarizációs folyamatok nagy időállandója következtében gyakorlatilag megmarad. A rövidzárási bontása után a polarizációs folyamatok visszafejlődése következtében a polarizáció által lekötött töltések szabaddá válnak. Az így szabaddá vált töltések hozzák létre a visszatérő feszültség kezdeti növekedését. Idővel a növekvő térerősség és a visszafejlődő polarizáció egyensúlyba kerül, ekkor a visszatérő feszültség eléri csúcserősségét, ezután a töltések a kisülési görbéhez hasonlóan a szigetelési ellenálláson át kisülnek.

A helyettesítő vázlat alapján a folyamat a következő: a hosszú feltöltés ideje alatt feltöltődnek a C_0 kondenzátor és a C_p kapacitások. A rövidzárási ideje alatt a C_0 kondenzátort,

így a rövidzár bontása után a feltöltve maradt C_p kapacitásokban tárolt töltések átáramlanak a C_0 kondenzátorba, míg az összes kondenzátor feszültsége ki nem egyenlítődik. Ezután valamennyi kondenzátor töltése a szigetelési ellenálláson át kisül.

A kisülési feszültséggörbe egyik fontos jellemző értéke, a kezdeti érintő meredeksége kizárólag a szigetelés fajlagos vezetőképességétől (azaz a fajlagos szigetelési ellenállástól), a visszatérő feszültség kezdeti meredeksége viszont kizárólag a polarizációs folyamatok erősségétől függ. Ezért alkalmazható a feszültséggörbék mérése a vezetési és a polarizációs folyamatok külön-külön történő vizsgálatára. A visszatérő feszültség másik jellemzőjét, a csúcserősségét mindkét dielektromos folyamat befolyásolja.

A feszültségmérés módszerének két változata használatos, a mindkét, azaz a kisülési és a visszatérő feszültségek görbéjének együttes mérését alkalmazó módszer, az ún. teljes feszültségválasz mérésének módszere a VR (Voltage Response) módszer, és a visszatérő feszültséggörbék sorozatos mérésén, azaz a visszatérő feszültség időállandó-függésének mérésén alapuló módszer, az ún. RVM (Recovery [vagy Return] Voltage Measurement) módszer.

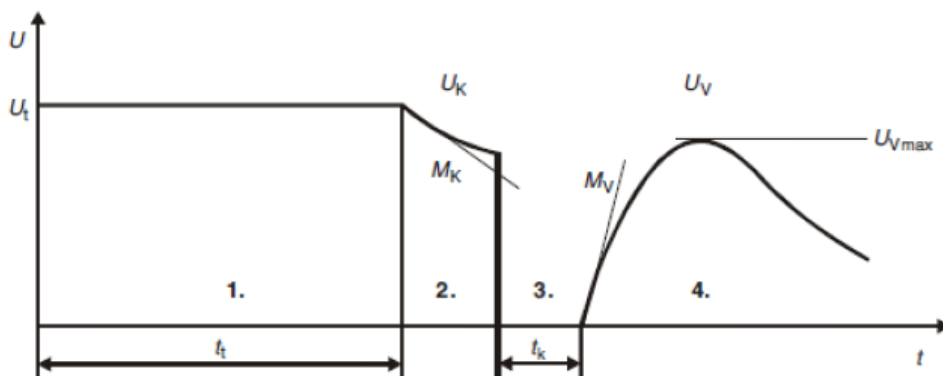
6.2.9.2.1 A teljes feszültségválasz (VR) mérésének módszere

Mint már említettük, ennél a módszernél a kisülési és a visszatérő feszültségek görbéit mérjük, és a feszültséggörbék kezdeti érintőjének meredekségéből következtethetünk a vezetési, ill. polarizációs folyamatokra, ill. ezekből a szigetelés állapotára. Bizonyítható, hogy egyenfeszültséggel való hosszú ideig tartó feltöltés után mért kisülési görbe kezdeti érintőjének meredeksége egyenesen arányos a szigetelés fajlagos vezetőképességével, továbbá, hogy adott t_t feltöltési és t_k kisütési idő után mért visszatérő feszültséggörbe kezdeti meredeksége arányos a t_t és t_k idők közéeső időállandójú polarizációs folyamatok erősségével. Véges t_t időtartamú feltöltés és t_k időtartamú kisütés után ugyanis gyakorlatilag a $t_t < T < t_k$ időállandójú folyamatok lesznek számottevően gerjesztett állapotban, tehát a visszatérő feszültséget ezek a folyamatok hozzák létre. A kisülési és a visszatérő feszültségek külön-külön feltöltés után való mérésének hátránya, hogy az egyenfeszültséggel gerjesztett szigetelés hosszabb ideig emlékszik a gerjesztésre, azaz az előző mérés befolyásolja a következőt. A befolyás elkerülésére a két mérés között a szigetelést, az elektródákat

rövidrezárva teljesen ki kell sütni, ez meglehetősen hosszadalmas folyamat. Még a feltöltési idő tízszeresének megfelelő idejű rövidrezárás után is marad mérhető polarizáció a szigetelésben. A mérési folyamat rövidítése érdekében szigetelések vizsgálatára alkalmazott módszernél a két feszültséggörbét egy menetben mérjük a következő lépésekben (12. ábra):

1. A szigetelés feltöltése. A szigetelésben fellépő vezetési és polarizációs folyamatokat egyenfeszültséggel gerjesztjük. A gerjesztőfeszültség nagysága 1 és 3 kV között van, ezen a feszültség szinten általában már kialakulnak a dielektromos folyamatok, de az elektródákon még nem kell kisülések fellépésével számolni. A feltöltés időtartamát a szigetelésben a vizsgálni kívánt polarizációs időállandó-tartomány felső határának megfelelően választjuk meg. A mérés időbeli elhúzódsának elkerülésére általában legfeljebb $t_t = 1000$ s-os, vagy ennél rövidebb feltöltési időt alkalmazunk, az ennél nagyobb időállandójú polarizációs tartomány a tapasztalat szerint nem szolgál lényeges többletinformációval a szigetelés minőségéről.

2. Az UK kisülési görbe MK kezdeti meredekségének mérése. A meredekség biztonságos méréshez elegendő a görbe menetének a feszültség néhány %-os csökkenéséig való mérése, ez a csökkenés még nem befolyásolja észrevehetően a visszatérő feszültség értékét.



12. ábra – A feszültségválasz mérésének diagnosztikus módszere

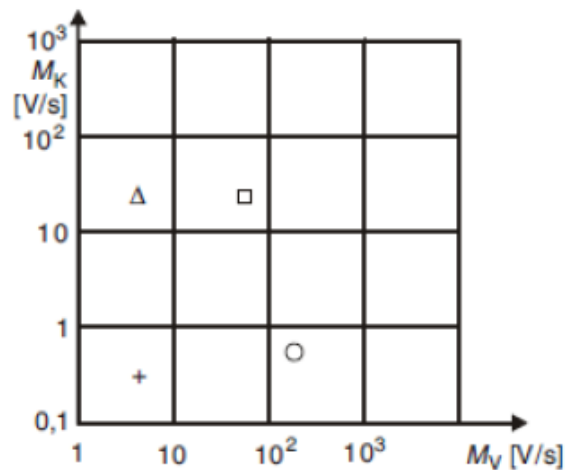
3. A szigetelés kisütése. A rövidrezárás időtartamát a vizsgálni kívánt polarizációs időállandó-tartomány alsó határa határozza meg.

4. Az UV visszatérő feszültség MV meredekségének mérése. A kisülési görbéhez hasonlóan itt is elegendő a feszültséggörbének csak a kezdeti szakaszát mérni, ami a meredekség biztonságos meghatározásához már elegendő.

A mérési eredmények kiértékelése. Az eredmények kiértékelésére, ill. több szigetelésen (pl. a három fázisszigetelésen mért eredmények összehasonlítására) célszerű a 11. ábra szerinti diagram alkalmazása.

A diagramban a visszatérő feszültség M_V meredekségének függvényében a kisülési görbe M_K meredeksége van felrajzolva. Egy-egy szigetelésen végzett mérés eredményét egyetlen pont ábrázolja. A pont fölfelé való eltolódása ($+ \rightarrow \Delta$) a szigetelés ellenállásának csökkenését, jobbra való eltolódása ($+ \rightarrow o$) a polarizációs folyamatok erősödését jelzi, a mindkét irányban való eltolódás ($+ \rightarrow \square$) mindkét folyamat erőteljes változását mutatja.

A feszültséggörbék mérésének módszerével a szigetelésben fellépő vezetési folyamatok és a polarizációs folyamatok külön-külön vizsgálhatók. Ez egyes esetekben (pl. telített papírszigetelés esetében) lehetővé teszi a szigetelés romlási folyamatainak megkülönböztetését, külön-külön vizsgálatát. A feszültségválasz mérésének módszere alkalmas nagyfeszültségű szigetelések állapotának vizsgálatára és telített papírszigetelésű kábelek vizsgálatára.



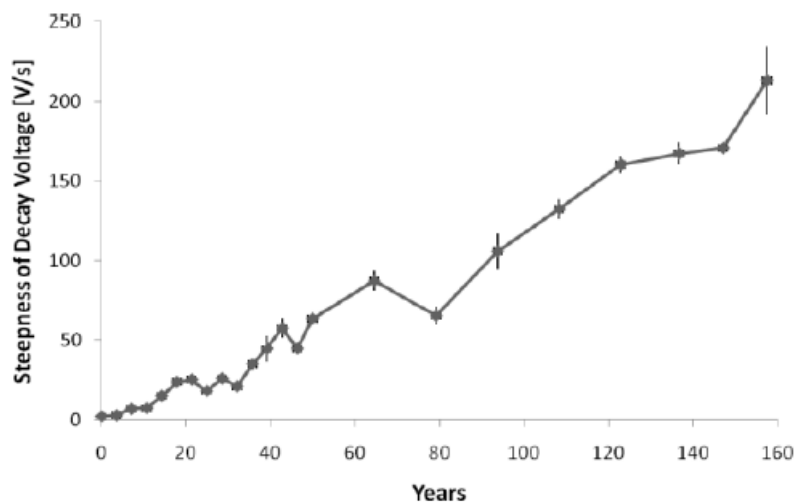
13. ábra – Az eredmények kiértékelésére alkalmas koordináta-rendszer

7. A teljes feszültségválasz mérés hatása a PVC szigetelésű kábelekre

Laboratóriumi mérésekkel kimutatható, hogy a kisülési feszültség kezdeti meredeksége növekszik, de enként más intenzitással. Bizonyos ereknél jól megfigyelhető az egyenletes növekedés, de az öregítés során többször visszaesés tapasztalható a kisülési feszültség kezdeti meredekségében⁴ (14. ábra). Ennek oka, hogy az erek szigetelőanyagának színezésére használt különféle adalékanyagok különbözőképpen hatnak a vezetőképességre⁵.

A visszatérő feszültség kezdeti meredeksége az öregítés során minden ér esetében egy ideig emelkedett, majd visszaesett (15. ábra). Itt is tapasztalható kismértékű növekedés valamelyik érben illetve más erekben együttfutnak a görbék.

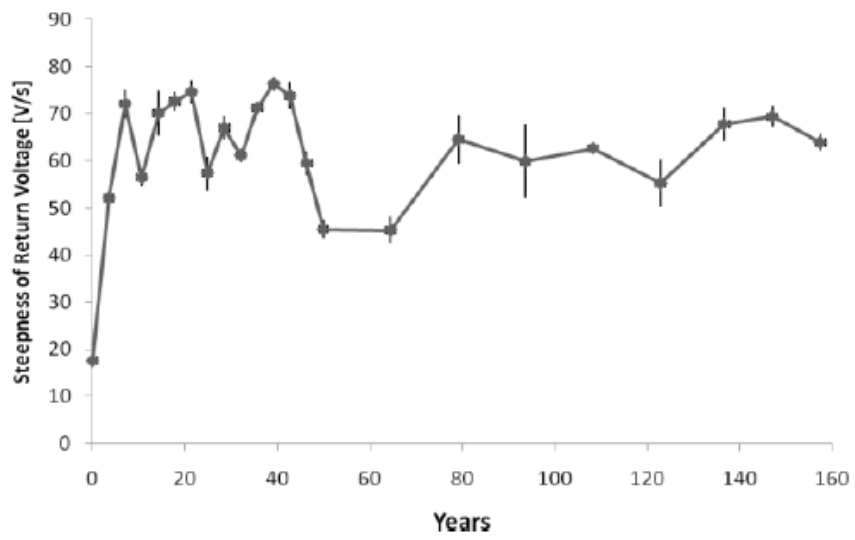
Ezek alapján megállapítható, hogy a termikus öregítés hatása a PVC-ben fellépő nagy idő-állandójú polarizációs folyamatokra nem egyértelmű, tehát a kisülési feszültség kezdeti meredekségéből következtethetünk a termikus öregedési folyamatra. Továbbá a visszatérő feszültség kezdeti meredeksége, kültéri, helyszíni méréseknél szintén változást mutat. Ennek oka lehet a nedvesedés hatása a kábelekre.



14. ábra - Kisülési feszültség meredekségének változása az egyenértékes üzemi évek függvényében

⁴ Zoltán Ádám Tamus and †Endre Németh: Condition Assessment of PVC Insulated Low Voltage Cables by Voltage Response Method - Conference Proceedings of CMD2010

⁵ Tamus Zoltán Ádám – PhD. értekezés – Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kiefeszültségű kábelekre – Budapest, 2011



15. ábra - Visszatérő feszültség meredekségének változása az egyenértékes üzemi évek függvényében

8. Mérés, előkészítés, kísérleti elrendezés

8.1 Mérőműszerek

A bevezetőben már említettem, hogy a *feszültségválasz-mérő* műszer a tanszék saját fejlesztése. Röviden ismertetem a műszer működését:

A korábbiakban leírtaknak megfelelően, a kisülési és a visszatérő feszültséggörbéit mérjük és a feszültséggörbék kezdeti érintőjének meredekségéből következtethetünk a vezetési illetve polarizációs folyamatokra, melyek végül a szigetelés állapotát jellemzik.

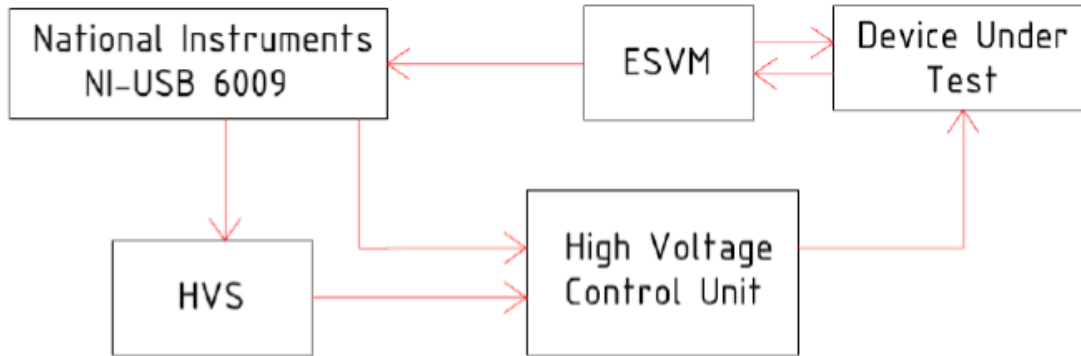
Felépítés:

Ha a feszültségválasz mérésének diagnosztikus módszerét tekintjük, akkor látható, hogy négy darab szakaszt különböztetünk meg, melynek megfelelően a vezérlésnél a két kapcsoló állása a következő lehet a négy szakasznak megfelelően:

- A szigetelés feltöltése szakasznál a K I. kapcsoló zárt, a K II. kapcsoló nyitott állásban van. Ekkor a szigetelésre hosszabb ideig feszültséget kapcsolunk, és "feltöltjük" a szigetelést
- A kisülési görbe kezdeti meredekségének mérése alatt az I. kapcsoló és a II. kapcsoló is nyitott állapotban van. A szigetelést a feszültségforrásról lekapcsoljuk, az elektródok töltése a szigetelés ellenállásán át egyenlítődik ki, a görbe lassan csökken és a kezdeti meredeksége mérhető az elektrosztatikus voltmérővel
- A szigetelés kisütése szakasznál a próbatestet rövid időre kisütjük, rövidrezárjuk. A K I. kapcsoló nyitott a K II. kapcsoló zárt állapotba kerül.
- A visszatérő feszültség görbéje kezdeti meredekségének mérése szakasz alatt a K I. kapcsoló zárt a K II. kapcsoló nyitott állapotba kerül. A rövidzárt megszüntetjük és mérjük a görbe kezdeti meredekségét.

A kapcsolásokra kettő darab reed-relét használunk. Előnye az igen gyors működés, önideje kisebb, mint 1 ms. A reed relé kisméretű, védőgázzal töltött zárt üvegcső, amelyben két, egymáshoz közel lévő, de egymással nem érintkező ferromágneses elektróda található. Az elektródák nemesfém bevonatúak, mágneses térrel vezéreljük.

A műszer blokk-diagramja az alábbi ábrán látható:



16. ábra – A műszer blokkdiagramja

Az NI – USB 6009-es típusú mérő és adatgyűjtő kártyával, saját szoftverből vezéreljük a nagyfeszültségű feszültségforrást (HVS) és a nagyfeszültségű irányító panelt (High Voltage Control Unit rövid. HVCU). A HVCU-ról csatlakozunk a próbatesthez (DUT – Device Under Test), melyhez az elektrosztatikus voltmérő (ESVM) csatlakozik. Az ESVM a mért feszültségértékeket az NI – USB 6009-es kártyának küldi. Az adatokat a kártya segítségével a szoftver feldolgozza és kiszámítja a kisülési és a visszatérő feszültséggörbék kezdeti érintőinek meredekségét.

Az *elektrosztatikus voltmérő* (ESVM) az elektrosztatikus erőhatásokat, villamos töltések közötti vonzó és taszító erőket használja fel. Közel ideális kondenzátornak tekinthető, az átvezetés ellenállása gigaohm nagyságrendű. Egyenáramon gyakorlatilag fogyasztásmentesen mér. Váltakozóáramon a műszer kapacitív töltőáramot vesz fel, 50 Hz-en ez néhány mikroamper nagyságú. A műszer 1 MHz frekvenciáig használható, nagyobb frekvenciákon az áramfelvétel nő ($I=U/XC=U\omega C$).

A nagyfeszültségű feszültségforrás kiválasztásakor az ajánlott töltő egyenfeszültség értékét vettük alapul, melynek értéke 1000V. Ez a feszültség szint a rossz minőségi szigetelésre is veszélytelen, viszont már elég nagy ahhoz, hogy a szigetelésben a vezetési és polarizációs folyamatok végbemenjenek, megfelelő mértékben kifejlődjenek.

Az elektrosztatikus voltmérő (ESVM) az NI kártya egyik digitális bemenetére kapcsolódik. Mérjük a próbatest feszültégét és a beérkező adatok alapján határozzuk meg a két görbe kezdeti meredekségét. A számításokat a szoftver végzi el. A kisülési görbénél, amikor a feszültséget lekapcsoljuk, akkor az első négy mintavett adatokból képzünk egy átlagot (az első kettő-három adatot elhagyjuk a mérési bizonytalanság miatt), majd kis idő múlva ismét mintavételezünk négy adatot és ezeket is átlagolva a kapott két érték összekötő egyenese adja meg a meredekséget. A visszatérő feszültséggörbe érintőjének meghatározása is ugyanilyen módon történik.

- **A vizsgált kábelek:**

- 1. kábel és a 6. kábel megegyező minták. Típusa: SZAMKAtVM 3X16/16 mm²
- 2. kábel és a 3. kábel megegyező minták. Típusa: SZAMKAtVM 3X16/16 mm² osztott nullavezetővel
- 4. kábel és az 5. kábel megegyező minták. Típusa: SZAMKAtVM 3X16/16 mm² osztott nullavezetővel

A vízbe merített kábelekre 50 Hz-es szinuszos feszültséget kapcsoltunk feszültség generátorral. Minden egyes kábelmintának csak a kék erét vizsgáltuk és helyeztük feszültség alá és mérést is csak a kék erekre végeztük a vízbe merítést illetően.

A nem vizsgált ereket fémesen összekötöttem a földdel és ezt csatlakoztattam a mérőműszer föld pontjára, míg a vizsgált eret a nagyfeszültségű kimenetére. Majd a próbadarabokra 1000 V-os feszültséget kapcsoltunk, 1000 másodperces időre. A kisütési idő kettő másodperc volt.



17. ábra – A mérési elrendezés 1



18. ábra – A mérési elrendezés 2

9. Mérési eredmények, értékelés

Az alábbi táblázatok a száraz, vízbemerítés előtti állapotot mutatják. Az S_d a kisülési, az S_r a visszatérő feszültségörbék kezdeti érintőinek meredekségét jelölik.

		1. mérés			
1. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	S_d [V/s]	S_r [V/s]
1	Kék	20	44	0,933333	48,996
2	Barna	21	41	1,080667	50,26567
3	Fekete 1 (kék-barna-1. fekete- 2. fekete) sorrendben	21	40	1,555	45,39033
4	Fekete 2 (kék-barna-1. fekete- 2. fekete) sorrendben	21	32	1,697	37,75467

2. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	S_d [V/s]	S_r [V/s]
1	Kék	20	44	17,18067	39,45133
2	Fehér	20	41	14,24533	44,751
3	Piros	21	41	16,035	43,26933

3. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	S_d [V/s]	S_r [V/s]
1	Kék	19	44	15,48367	36,90633
2	Fehér	21	40	13,57467	33,30067
3	Piros	20	41	14,211	41,57233

4. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	S_d [V/s]	S_r [V/s]
1	Kék	20	43	1,244333	19,30167
2	Piros	21	40	5,684333	16,756
3	Fehér	20	42	4,03	21,42233

5. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	20	43	2,955667	22,05933
2	Piros	20	41	3,521	21,84667
3	Fehér	21	39	2,898667	17,39233

6. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	20	42	3,973667	47,72333
2	Barna	20	41	0,876667	42,63333
3	Fekete 1 (kék-barna-1. fekete- 2. fekete) sorrendben	20	35	1,697	42,42067
4	Fekete 1 (kék-barna-1. fekete- 2. fekete) sorrendben	21	33	3,634333	43,69367

A nedves mérési állapot mérési eredményei: a mérést úgy végeztem el, hogy a feszültség lekapcsolása után, a kábelek a mérés ideje alatt is vízbe merítve maradtak.

		1.mérés			
1. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	22	28	1,2725	49,951

2. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	22	28	31,816	38,497

3. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	22	28	41,3605	29,2705

4. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	22	28	1,739	22,9075

5. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	22	28	1,7815	20,044

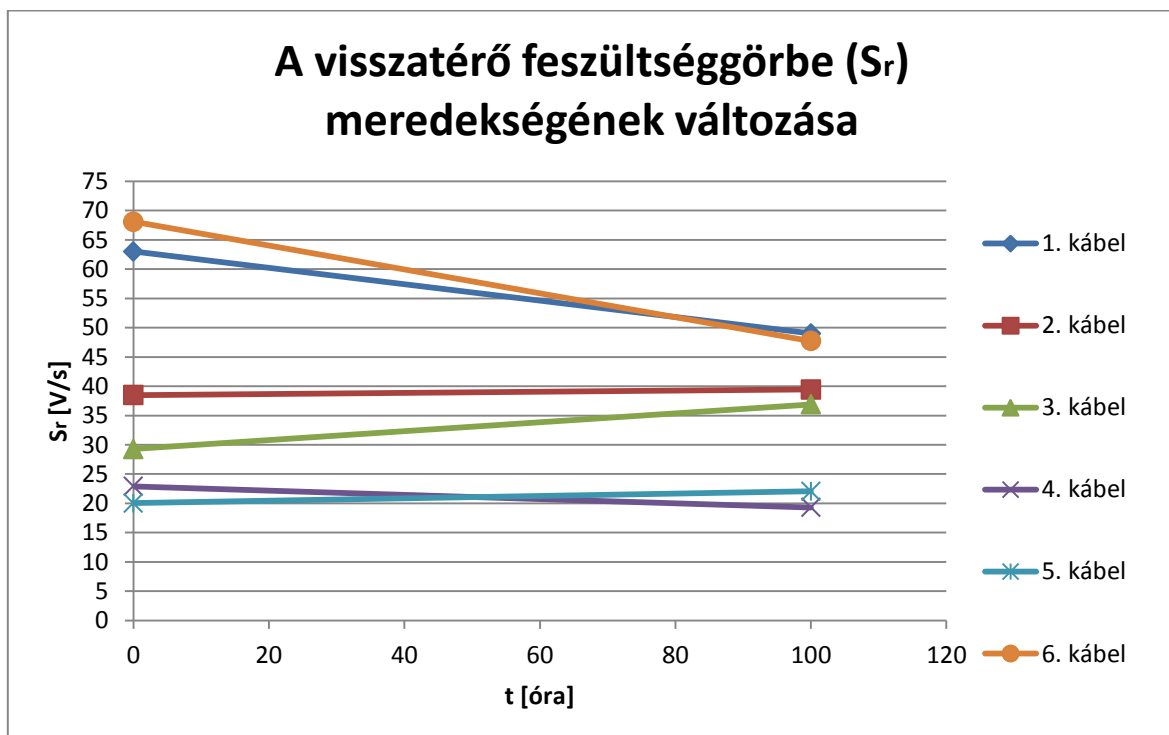
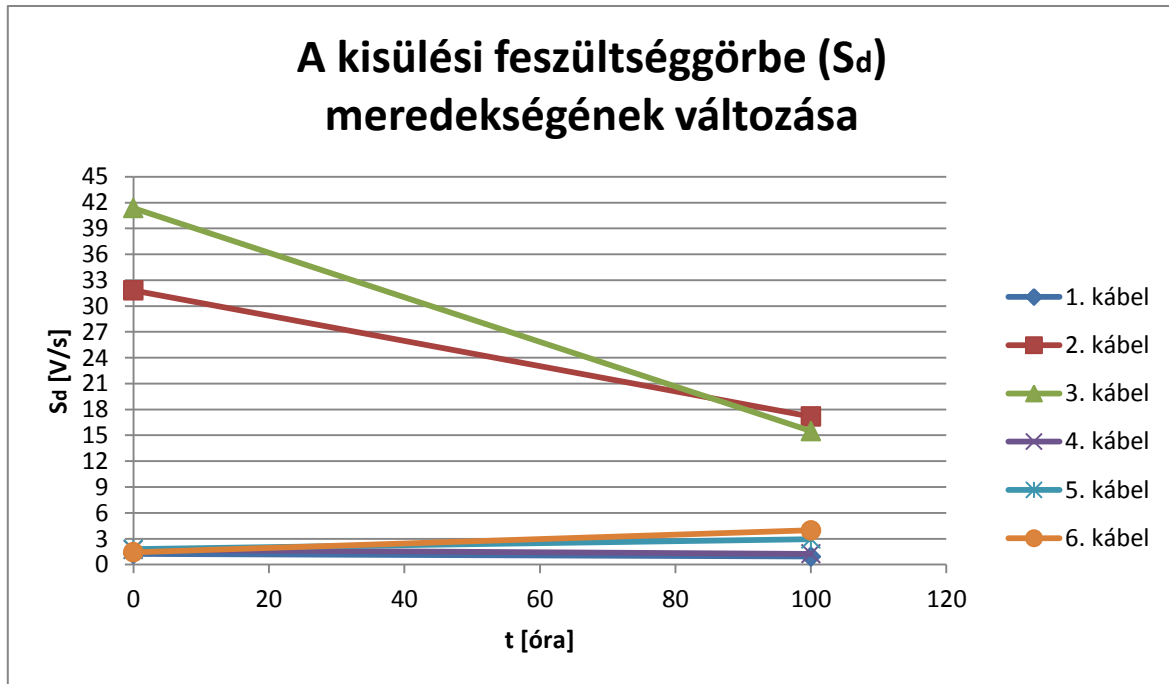
6. kábel	Ér jelölése	Hőmérséklet [C°]	Relatív páratartalom [%]	Sd [V/s]	Sr [V/s]
1	Kék	23	26	1,442	68,086

Az eredményekből kitűnik, hogy a vízbemerítés hatására valóban változtak a kisülési és visszatérő feszültségörbék meredekség értékei.

Az eltérést százalékosan meghatározva, a vízbemerítés utáni mért értékek a normál értékekhez képest a következőképpen változtak:

Az eltérés százalékos értéke		
	Sd [%]	Sr [%]
1. kábel	-24%	-22%
2. kábel	-46%	2,48%
3. kábel	-62,56%	26,09%
4. kábel	-28,45%	-15,74%
5. kábel	65,91%	1,01%
6. kábel	175,57%	-29,91%

Mindezeket diagramon ábrázolva:



Ezek alapján állítható, hogy a feszültségválasz módszer alkalmasnak tűnik a nedvesedés vizsgálatára kábelekben. További munkámban folytatom az öregítést és vizsgálom, hogy a nedvesség hatására bekövetkező változásokat kémiai-anyagszerkezeti vizsgálatokkal is alátámaszom.

10.Összegzés

A kisfeszültségű kábelek meghibásodásának fő oka a nedvesedés. Ennek igazolására laboratóriumi vizsgálati elrendezést alakítottam ki, amely ezen igénybevételt modellezi: a vízzel teli kádba helyezett kábelekre 1000 V-os 50Hz-es váltakozó feszültséget kapcsoltam (minden egyes kábel kék érére) és 100 órás időtartam után leválasztottam a próbatesteket a tápforrásról.

A vízbe merítés előtt minden egyes vezető éren elvégeztem a teljes feszültségválasz mérésének módszerét, majd az öregítés után ismét elvégeztem a teljes feszültségválasz mérésének módszerét a kábelszakaszok kék ereire, amelyekre a tápfeszültséget is kapcsoltam.

A mérési eredmények alapján bizonyítható, hogy nedvesség hatására a PVC szigetelésű kábelek tulajdonságai romlanak, továbbá mind a kisülési, mind a visszatérő feszültséggörbék meredekségei változtak.

A romlási folyamatok kimutatására alkalmasnak mutatkozik a teljes feszültségválasz mérésének módszere.

További vizsgálatokat igényel annak az eldöntése, hogy a kisülési illetve a visszatérő feszültséggörbék meredekségei milyen mértékben változnak. A vizsgálatokat tovább folytatom, hosszabb időtartamra vetem alá a kábelmintákat mesterséges öregítésnek. A további vizsgálatokhoz kémiai és anyagszerkezeti méréseket is végzek, hogy a feszültség alá helyezett PVC kábelekre behatoló víz a szigetelésekben milyen hibásodásokat, elváltozásokat eredményez.

Irodalomjegyzék

1. Z Á Tamus, N Fekete, T Schachinger, R Egyed, "Condition based maintenance of LV cable network of public lighting", Proc. Jicable 2011-8th International Conference on Power Insulated Cables. Versailles, 2011.jun..20-2011.jun.23. Paper D.3.7.
2. Z Á Tamus, E Németh, "Condition Assessment of PVC Insulated Low Voltage Cables by Voltage Response Method", Proc. of the 2010 Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2010. Tokyo, Japán, 2010.sept.06-2010.sept.11. Tokyo, Japan, pp. 721-724.
3. E. Németh, "Some newest results of diagnostics testing of impregnated paper insulated cable", Proceedings 10th Int. Symp. HV Eng., ISH'97, Montreal, Canada Vol. 4., pp. 191-194
4. Luspay Ödön szerkesztette: Nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata – Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete – Budapest,2000
5. Tamus Zoltán Ádám – PhD. értekezés – Komplex szigetelésdiagnosztika alkalmazása kiefeszültségű kábelekre – Budapest,2011
6. Fekete Norbert – Diplomaterv 1, BME – VIK, Budapest,2011

Ábrajegyzék

1. ábra – Termikus öregedési görbe, élettartam.....	8
2. ábra – Élettartam a villamos igénybevételtől függően	9
3. ábra – A diagnosztikai vizsgálatok alapelve.....	12
4. ábra – a vezetési és a polarizációs folyamatok vizsgálatának lehetősége	14
5. ábra – Szigetelőanyagok villamos helyettesítő kapcsolása	20
6. ábra – A feszültségválasz módszerének elvi kapcsolása	21
7. ábra – A kisülési görbe.....	21
8. ábra – A visszatérő feszültség görbélye	21
9. ábra – Kisülési görbe a helyettesítő kapcsoláson.....	22
10. ábra – Visszatérő feszültség a helyettesítő kapcsoláson 1.....	23
11. ábra - Visszatérő feszültség a helyettesítő kapcsoláson 2	23
12. ábra – A feszültségválasz mérésének diagnosztikus módszere	25
13. ábra – Az eredmények kiértékelésére alkalmas koordináta-rendszer	26
14. ábra - Kisülési feszültség meredekségének változása az egyenértékes üzemi évek függvényében	27
15. ábra - Visszatérő feszültség meredekségének változása az egyenértékes üzemi évek függvényében.....	28
16. ábra – A műszer blokkdiagrammja	30