

2. VILLAMOS SZIGETELÉSTECHNIKA

2.1. Szigetelések üzemi igénybevételei

A szigetelések legfontosabb feladata a villamos gépekben, berendezésekben, elektronikus eszközökben különböző potenciálon levő fémalkatrészek egymástól való megbízható elszigetelése. A különböző potenciálon levő fémelektrodok között a szigetelésben ill. annak felületén villamos erőtér alakul ki. A szigetelés csak akkor tudja szigetelési feladatát betölteni, azaz a villamos igénybevételt tartósan elviselni, ha a villamos szilárdsága megfelelő, azaz ha a villamos erőtérben kialakuló térerősség hatására sem a szigetelésben átütés, sem a szigetelés felületén átívelés nem következik be. A szigeteléseket tehát úgy kell méretezni, hogy az üzemeltetés során fellépő átütési vagy átívelési igénybevételeket biztonsággal kibírja.

A szigeteléseket a villamos igénybevételen túlmenően egyéb igénybevételek is érhetik. A szigetelés feladata lehet még a fémalkatrészek, elektródok mechanikus rögzítése, tartása (pl. távvezeték, gyűjtősín, transzformátor vagy forgógép-tekercs stb.). Az így fellépő mechanikai igénybevételekre a szigetelést szintén méretezni kell.

További igénybevételt jelent a szigetelések számára, hogy a villamos berendezések, készülékek üzemeltetésük következtében melegszenek, tehát szigetelésük méretezésekor ill. a készülék, berendezés üzemi viszonyainak (pl. terhelhetőség) megállapításakor a fellépő hőigénybevételt is figyelembe kell venni. Végezetül a szigetelések túlnyomó része közvetlenül érintkezik a környezetében lévő levegővel, innen egy sor különböző fizikai és kémiai igénybevétel érheti a szigetelést (mint pl. a levegő oxigénjének és nedvességének hatása, gáznemű és poralakú szennyezések, napsugárzás, gombák, rovarok stb.). A szigeteléseket a környezetükből érő ilyen jellegű igénybevételeket összeségükben környezeti igénybevételeknek nevezik.

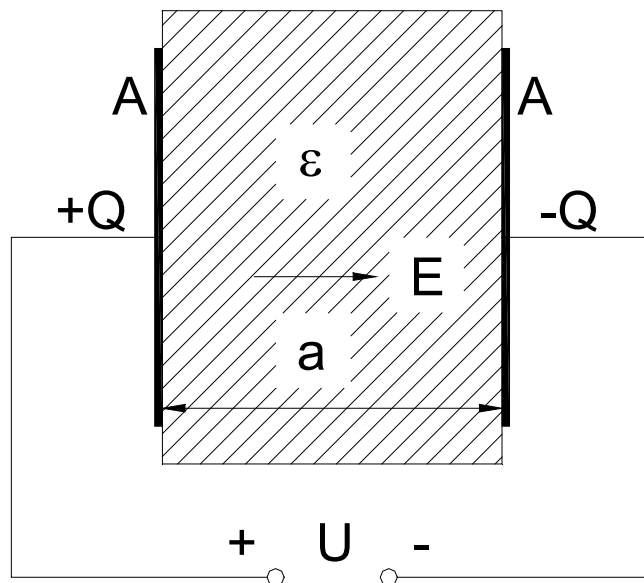
A szigeteléstechnikának a feladata a fentiek alapján egyrészt a szigetelés üzem közben fellépő igénybevételeinek és ezek hatásának a vizsgálata, másrészt az igénybevételek figyelembevételével a szigetelést alkotó szigetelőanyagok kiválasztása és a szigetelés méretezése.

2.2. Villamos erőtér a szigetelésben

A szigetelésekben előforduló villamos erőterek az esetek túlnyomó többségében fémelektrodok között alakulnak ki. Szigetelésben történő töltések kialakulásával ill. tartós megmaradásával normális üzem közben általában nem kell számolni. A szigetelések gyakran több elektróddal, fémszerelvénnyel érintkeznek. Ezek egyik csoportján pozitív, a másikon negatív töltések helyezkednek el úgy, hogy a pozitív töltések összege egyenlő a negatív töltések összegével. Ezek a töltések az elektródok között fellépő potenciálkülönbség, a feszültség hatására kerülnek az elektródokra. A fémelektrodok között levő U potenciálkülönbség hatására a szigetelésben villamos erőtér alakul ki. Ezt az erőteret valójában az elektródokon elhelyezkedő töltések hozzák létre. Az elektródokon elhelyezkedő eredő $+Q$ ill. $-Q$ töltés azonban arányos az U feszültséggel, pl. a 2.1. ábra szerinti két síkelektrodon

$$Q = C \cdot U \quad \text{As (Coulomb)} \quad (2.1.)$$

ahol a C arányossági tényező az elektródok kapacitása, nagyságát az elektród alakja,



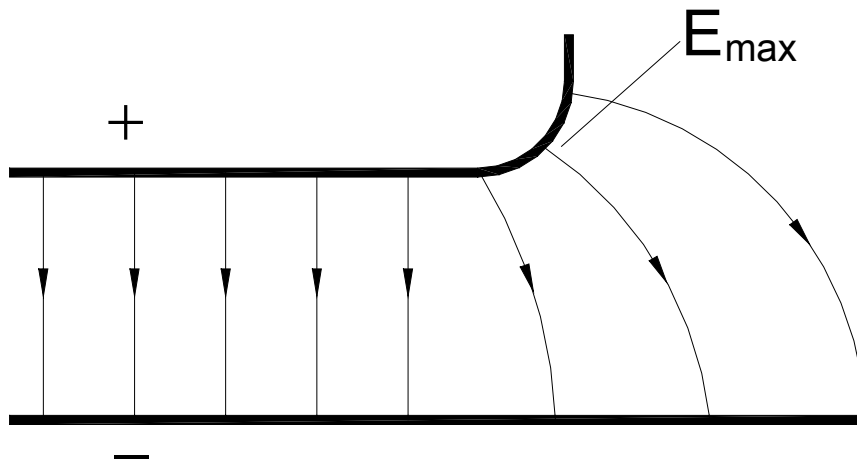
2.1. ábra
Villamos erőtér szigetelőanyagban.

távolsága és a közöttük levő szigetelőanyag határozza meg, síkelektrodok esetében

$$C = \epsilon \epsilon_0 A/a \quad \text{As/V (Farad)} \quad (2.2)$$

A műszaki gyakorlatban általában az elektródok potenciálja, így a közöttük levő potenciálkülönbség, a feszültség ismert, a töltésük viszont ismeretlen, de a fenti arányosság lehetővé teszi, hogy a szigetelésben fellépő erőtér jellemzőit az elektródok potenciáljából, a közöttük levő feszültségből határozzuk meg.

A szigeteléstechika szempontjából az erőtér legfontosabb jellemzője az elektródok között levő feszültség hatására fellépő E térerősség. A gyakorlatban előforduló erőterekben a térerősség általában helyről-helyre változik, azaz az erőtér mindig többé-kevésbé inhomogén. Még az olyan, az első pillanatban homogénnek tűnő elrendezés is, mint két síklemez erőtere, a valóságban erősen inhomogén az elektródok szélein, ahol a sarokhatás következtében jelentős helyi térerősségnövekedés lép fel. Az erőtér annál inhomogénabb, minél nagyobb a legnagyobb és a legkisebb térerősség viszonya, azaz az E_{\max}/E_{\min} arány. Ha ez az arány 10-nél kisebb, akkor enyhén inhomogén, ha nagyobb akkor erősen inhomogén az erőtér.



2.2. ábra
Inhomogén erőtér síkelektrod sarkán

A térerősség néhány egyszerű elektród-alak esetében (sík- és hengeres elektródok kombinációi) közvetlenül is számítható. A gyakorlatban előforduló legtöbb esetben, különösen több elektród erőterének meghatározására azonban gépi számítás alkalmasabb. Gépi módszerekkel háromdimenziós (térbeli) erőterek is számolhatók. A módszerek közös jellemzője, hogy a potenciál ill. térerősség helyfüggvényét nem zárt alakban adják, hanem a meghatározandó erőteret rácshálóval alkalmasan felosztva a potenciált vagy térerősséget a rácspontokban - általában iterációval - határozzák meg. A peremfeltételek megadhatók az elektródokon levő elosztott töltés koncentrált töltésekkel való helyettesítésével, vagy az elektródok alakjának és potenciáljának megadásával. A rácspontok U_1 és U_2 potenciáljának ismeretében a térerősség helyről-helyre az

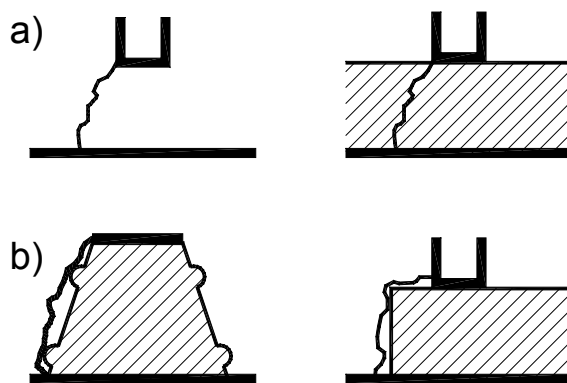
$$E = (U_1 - U_2)/\Delta x \quad (2.3)$$

összefüggés alapján számolható, ahol Δx a rácspontok távolsága.

A szigeteléstechikában a térerősség mértékegységeként V/m helyett célszerűségi okokból a kV/cm vagy kV/mm, esetleg V/mm egységeket alkalmaznak. Az E_{\max} legnagyobb térerősség mindig valamelyik fémlektrod felületén lép fel, értékét az erőtér alakja, azaz az elektródok formája, távolsága, valamint a közöttük levő feszültség határozza meg.

$$E_{\max} = f(U, \text{geometria}) \quad (2.4)$$

Ha az E_{\max} nagyobb, mint a szigetelőanyag villamos szilárdsága, akkor a szigetelés nem tudja többé elszigetelni az elektródokat egymástól, szigetelőképesége megszűnik, az elektródok között villamosan vezető plazma-csatorna, villamos ív alakul ki. Ha az ív a szigetelőanyag belsejében jön létre, akkor átütésnek, ha különböző halmazállapotú szigetelőanyagok határfelületén keletkezik, akkor átívelésnek nevezzük.



2.3.ábra

Szigetelés a) átütése és b) átívelése

Ha az erőtér erősen inhomogén, mint pl. a távolságukhoz képest igen kis átmérőjű sodronyvezetőkől álló távvezeték vagy csúcsos ill. éles elektródok esetében, akkor előfordul, hogy az elektródok közötti feszültség hatására keletkező térerősség csak a elektródok közvetlen közelében lépi túl a szigetelőanyag villamos szilárdságát, az erőtér legnagyobb részében annál lényegesen kisebb marad. Ekkor - főképpen a gáznemű vagy folyékony szigetelőanyagokban - a szigetelés csak az elektródok közvetlen környezetében veszíti el a szigetelőképességét, de a teljes szigetelést áthidaló villamos ív nem tud kialakulni. Ezt a jelenséget a szigetelés részleges átütésének nevezzük. A részleges átütések egyrészt energiavesztéssel járnak, másrészt az elektródok felületén nem folyamatosan fellépő kisülések rádiófrekvenciás zajt okozva az elektronikus készülékek működését zavarhatják.

2.3. Villamos erőtér hatására fellépő folyamatok

A szigetelőanyagban kialakuló villamos erőtér az anyagban többféle villamos folyamatot indíthat meg. Ha a térerősség kisebb, mint a szigetelőanyag villamos szilárdsága, akkor is megindul az anyagban kisebb mértékű töltésmozgás, de ez még nem okozza a szigetelés átütését. Ennek két fajtája van, a vezetés és a polarizáció. Ha a térerősség túllépi a szigetelés villamos szilárdságát, akkor az elmozduló töltéssel bíró részecskék száma rohamosan növekszik (ionlavina alakul ki), az elektródok között létrejön a plazmacsatorna (villamos ív), ezzel a szigetelés alakjától, az elektródok elhelyezkedésétől függően az előbbieket szerint vagy a szigetelőanyag belsejében átütés, vagy a szigetelés felületén átívelés következik be.

2.3.1. A vezetés

A szigetelőanyagok nem tökéletes szigetelők, a villamos erőtér hatására igen kicsiny, 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 ill. átvezetésének fogalmát, de annak tudatában, hogy ez nem olyan egyértelmű lineáris kapcsolatot jelent a feszültség és az áram között, mint fémek esetében.

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.

Gáznemű szigetelőanyagokban a vezetést a gázokban mindig jelen levő töltéshordozók okozzák. Ezek a töltéshordozók a kozmikus sugárzás, a föld radioaktív sugárzása és egyéb ionizáló hatások következtében állandóan termelődnek. Gázokban a töltéshordozók elektronok, valamint pozitív és negatív ionok lehetnek. Túlzott elszaporodásuknak a rekombináció, azaz a pozitív és negatív ionok semleges molekulává visszaalakulása szab határt. Egyensúlyi állapotban a levegőben a töltéshordozók sűrűsége kb. $10^3 \sim 10^4$ ion/cm³, erősen függ a külső ionozó hatások nagyságától. Normál állapotú (1 bar nyomású, 25 °C hőmérsékletű) levegőben 10 V/cm térerősség hatására fellépő áram $10^{-15} \dots 10^{-16}$ A/cm² nagyságrendű, tehát a folyékony és szilárd anyagokhoz képest a levegő igen jól szigetel.

Folyékony szigetelőanyagok vezetési folyamatában a gázoknál megismert külső ionozó hatások által létrehozott ionok mellett a folyadék molekuláinak ill. a folyadékban mindig jelen levő szennyezőanyagok molekuláinak disszociációja által létrehozott ionok is jelentős szerepet játszanak. A folyadékok könnyen szennyeződnek, szennyeződésük a vezetésüket igen erőteljesen befolyásolja. Pl. a transzformátorolajban levő $1 \cdot 10^{-4}$ súlyrész azaz 0,01 súly% nedvesség az olaj vezetőképességét kb. két nagyságrenddel növeli meg. Szilárd szigetelőanyagokban a vezetés általában szintén ionos jellegű. Elektronvezetés csak néhány kristályos anyagban, - pl. csillámban - és itt is csak nagyobb térerősségeken játszik jelentősebb szerepet. Azok a dielektrikumok, amelyek kis térerősségeken is jelentős elektron vezetést mutatnak, inkább a félvezetők, mint a szigetelőanyagok körébe sorolhatók. Az ionos vezetés erőteljesen függ a hőmérséklettől, mert megkönnyíti az ionok mozgását. A tapasztalat szerint a legtöbb szigetelőanyag esetében a vezetés hőmérsékletfüggését a

$$\gamma = A \cdot e^{-B/T} \quad (2.5)$$

alakú összefüggés írja le, ahol

γ A/Vcm a fajlagos vezetőképesség,
A és B a szigetelőanyagra jellemző állandók,
T K a hőmérséklet.

Várható, hogy az ionos jelleg következtében a szigetelőanyagok vezetőképessége az E térerősségtől is függ. Elméletileg levezethető a

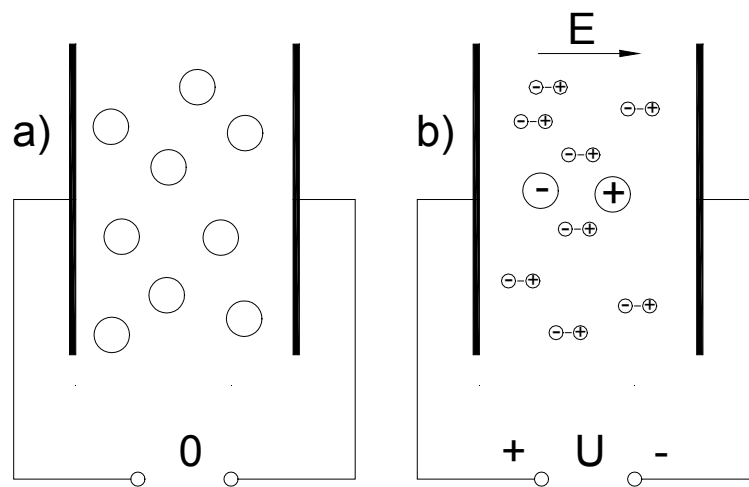
$$\gamma = a \cdot e^{bE} \quad (2.6)$$

összefüggés, ahol a és b ismét anyagjellemzők. A gyakorlati tapasztalat szerint azonban a technikai szigetelőanyagoknál csak az átütési térerősség környezetében mutatkozik észrevehető térerősségfüggés.

Szerves szigetelőanyagok (papíralapú anyagok, műanyagok stb.) vezetőképessége a környezet páratartalmától is erősen függ, ugyanis az anyagok nedvességtartalma a páratartalom változását kisebb-nagyobb késéssel követi. A vezetőképesség megváltozása - különösen a nedvszívásra hajlamosabb porózus anyagok esetében - több nagyságrendet is elérhet.

2.3.2. A polarizáció

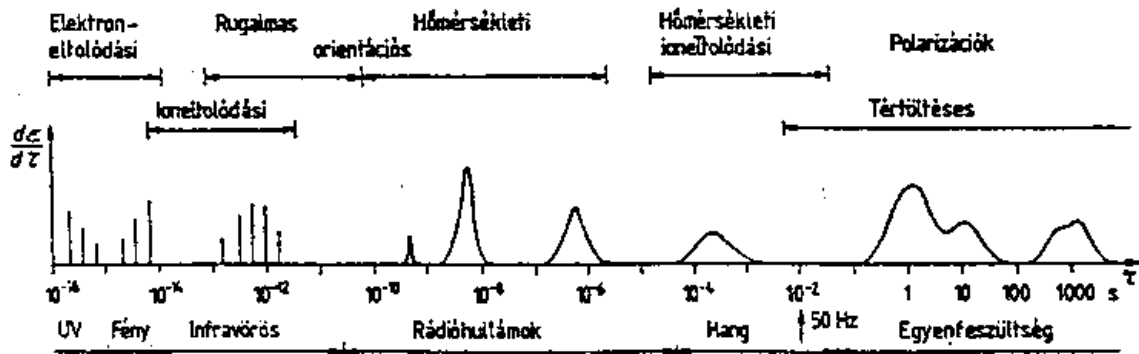
A szigetelőanyagokban a villamos erőtér által keltett másik dielektromos folyamat a polarizáció. Amíg a vezetési folyamatban a töltéshordozók áthaladnak a szigetelőanyag teljes hosszában egyik elektródtól a másikig, addig a polarizációs folyamatban a töltéshordozók az erőtér hatására csak eltolódnak 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 makroszkópikus dipólussá válik, polarizálódik. A külső erőtér megszűntével a töltések visszatérnek nyugalmi állapotukba, a polarizáció tehát reverzibilis folyamat.



2.4.ábra

Semleges (a) és polarizálódott (b) szigetelőanyag

A polarizációt létrehozó töltéshordozók töltésétől, sűrűségétől és tömegétől függő az eltolódó töltés nagysága és az elmozdulás időállandója. A szigetelőanyagokban ennek megfelelően egyidőben több polarizációs folyamat is kifejlődhet, ezek erősségükben és időállandójukban különbözhetnek egymástól. A folyamatok időállandója a 10^{-14} s-tól a 10^4 s nagyságrendig terjedhet. A különböző időállandójú elemi folyamatok erőssége nem azonos, így az általuk lekötött töltések nagysága is igen eltérő lehet. Az egy anyagban fellépő polarizációs folyamatok összességét az elemi folyamatok erősségének az időállandó függvényében való változásának megadásával lehet jellemezni. Így alakul ki az egyes szigetelőanyagokra, ill. a bennük fellépő polarizációs folyamatok összességére jellemző polarizációs spektrum.



2.5. ábra

Szigetelőanyagok polarizációs spektruma az egyes polarizációfajták időállandó-tartományának feltüntetésével

Az anyag molekuláris szerkezetének és a polarizációs folyamatoknak a szoros kapcsolata következtében a polarizációs spektrum nemcsak a szigetelőanyagra, hanem annak öregedési állapotára, az öregedési folyamatok előrehaladására is jellemző. A szigetelőanyag öregedését, romlását előidéző kémiai és fizikai folyamatok ugyanis az anyagszerkezet, molekuláris szerkezet, összetétel stb. megváltoztatásával a szigetelőanyagtól ill. a romlás jellegétől függően más-más időállandó-tartományban befolyásolják a fellépő polarizációs folyamatokat, azaz megváltoztatják a polarizáció időállandó szerinti eloszlását. A szigetelések roncsolásmentes diagnosztikai vizsgálatának alapja jórészt a polarizációs spektrum, ill. meghatározott tartományainak vizsgálata.

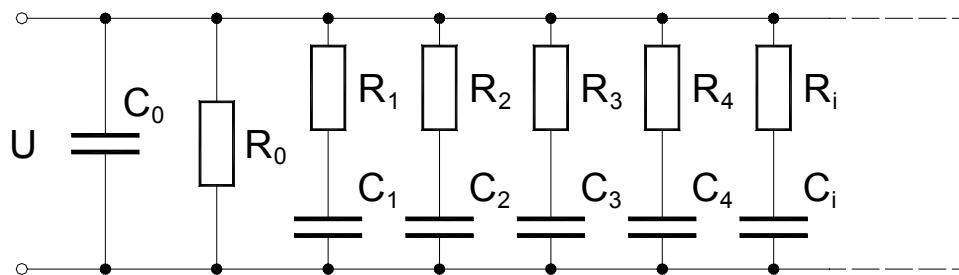
A különböző időállandójú időállandó-tartományok vizsgálatára alkalmazható mérési módszereket a 2.5. ábrán tüntettük fel. A legkisebb időállandójú polarizációs folyamatok infravörös abszorpciós színekép-elemzéssel vizsgálhatók. Ebben az időállandó tartományban jelentkezik a szerves szigetelőanyagok molekuláris szerkezetének öregedés okozta megváltozása, degradálódása, gyökök lehasadása stb. A kb. 10^{-10} s-tól 10^{-1} s-ig terjedő időállandó tartomány rádió-, hang- és ipari frekvenciás permittivitás és veszteségi tényező mérésével vizsgálható. A kb. 10^{-1} s-nál nagyobb időállandók tartományának vizsgálatára egyenfeszültségű vizsgálati módszer, a szigetelésnek az egyenfeszültség-ugrásra adott feszültség- vagy áramválaszának mérése alkalmazható.

A polarizációs folyamatok erősségét a hőmérséklet csak kisebb mértékben befolyásolja, időállandója viszont a hőmérséklet növekedésével erősen csökken, azaz a polarizációs folyamatok hatása a hőmérséklet növekedésével erősen eltolódik a nagyobb frekvenciák irányába.

Egy szigetelőanyagot síkelektrodok közé helyezve és azokra feszültséget kapcsolva a szigetelőanyagban villamos erőter alakul ki. A szigetelésben az erőter hatására fellépő dielektromos folyamatok az erőteret fenntartó külső áramkörben áramokat keltenek, ill. az elektrodokon feszültségeket hoznak létre. Az $I(t)$ áram-, ill. az $U(t)$ feszültséggörbék alakjából, fázisviszonyaiból a vezetési és a polarizációs folyamatok erősségére, eloszlására lehet mennyiségi és minőségi következtetéseket levonni. A szigetelésben lejátszódó folyamatokat a szigetelés helyettesítő kapcsolási rajza alapján lehet szemléltetően tárgyalni.

A szigetelés a benne kialakuló dielektromos folyamatok (vezetés és polarizáció) szempontjából a 2.6. ábrán látható kapcsolással helyettesíthető. Ez a helyettesítő kapcsolat a

külső áramkörben ill. a szigetelés elektródjain ugyanazokat az áram ill. feszültségváltozásokat hozza létre, mint a szigetelésben fellépő dielektromos folyamatok. A C_0 kondenzátor a szigetelés geometriai (polarizációs folyamatok hatása nélkül vett) kapacitását, az R_{SZ} a szigetelési ellenállását (átvezetését) jelképezi. A polarizációs folyamatokat a soros RC tagok helyettesítik, ahol is a C_{Pi} kondenzátor nagysága annak az elemi polarizációs folyamatnak az erősségével arányos, amelynek időállandója a polarizációs spektrum T_i időállandójának környezetében levő ΔT szélességű időállandó tartományba esik. Az R_{Pi} polarizációs ellenállás a T_i időállandóból a $T_i = C_{Pi} \cdot R_{Pi}$ összefüggés segítségével határozható meg, ugyanis az RC körök időállandójának meg kell egyeznie a leképezett folyamat időállandójával. Ez a helyettesítő kapcsolás minden esetben és széles időállandó határok között helyesen képezi le a szigetelésben kialakuló dielektromos folyamatokat. A C_0 kondenzátor feltöltődése jelképezi az erőter felépülését, a benne tárolt töltés a Q_{SZ} szabad, tehát az erőteret létrehozó töltéseket. Az R_{SZ} szigetelési ellenálláson átfolyó áram felel meg a szigetelés időben állandó vezetési áramösszetevőjének, míg az egyes $R_P C_P$ tagok feltöltődése a különböző időállandójú polarizációs folyamatok kialakulását jelképezi. A C_{Pi} kondenzátorokban levő összes töltés így a szigetelés elektródjain elhelyezkedő kötött (polarizációs) töltésnek felel meg.



2.6.ábra

Szigetelőanyag helyettesítő kapcsolása

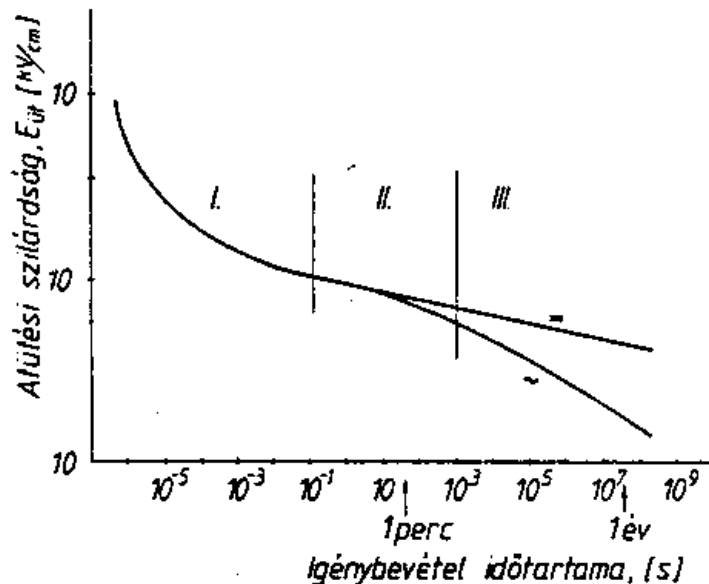
A helyettesítő kapcsolás alapján szemléletesen magyarázhatók a szigetelés elektródjain a villamos erőter ill. annak megváltozása következtében fellépő jelenségek.

2.3.3. Átütés

Már említettük, hogy ha a szigetelésben a villamos szilárdságánál nagyobb térerősség lép fel, a szigetelés átüt. Szigetelő gázok és folyékony szigetelőanyagok átütésekor az ív megszüntetése (a feszültség lekapcsolása) után a szigetelőanyag igen rövid idő ($10^{-4} \dots 10^6$ s) alatt regenerálódik, azaz villamos szilárdsága teljesen vagy majdnem teljesen visszaáll az eredeti értékére. Ezekben az anyagokban erősen inhomogén erőterek esetében felléphet és viszonylag tartósan fennmaradhat a részleges átütés állapota.

Szilárd szigetelőanyagokban az átütés az igénybevétel nagyságától függően hosszabb-rövidebb idő alatt fejlődhet ki, a kifejlődött átütés azonban minden esetben maradandóan károsítja a szigetelést. A szilárd szigetelőanyagok villamos szilárdságának időbeli változását széles időhatárok között felrajzolva a 2.7. ábrán látható diagramot kapjuk. A görbe három szakaszra osztható. Az I. szakasz a villamos átütés tartománya. A II. szakaszban a hő-villamos átütés fejlődik ki. Ebben a tartományban a villamos igénybevétel mellett a szigetelés melegedése (a dielektromos veszteség) is szerepet játszik az átütésben, így a szigetelés térfogata, hűlési viszonyai is befolyásolják a villamos szilárdságát. Váltakozófeszültség

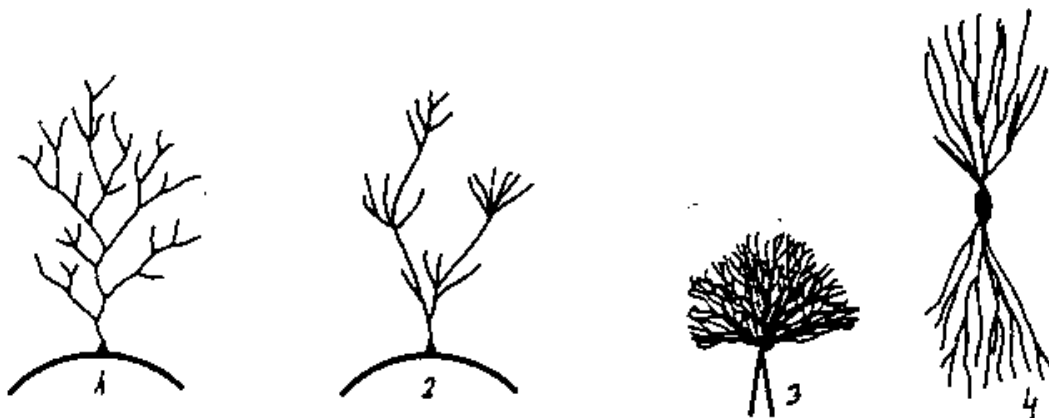
esetében az átütési szilárdság kisebb, mert nagyobb a dielektromos veszteség. Végül a III. szakasz az üzemi igénybevételek tartománya. Ebben a szakaszban a villamos szilárdság csökkenését a tartós üzemi (villamos és nem villamos) igénybevételek hatására fellépő lassú romlási folyamatok okozzák, mint pl. a szigetelések anyagában végbemenő lassú kémiai-fizikai változások, azaz a szigetelőanyag öregedése, vagy az átütési csatornaképződés, a treeing folyamata stb.



2.7.. ábra
Szilárd szigetelőanyagok villamos szilárdságának változása az igénybevétel időtartamának függvényében

Néhány mm ... tíz mm vastagságú, homogén szerkezetű anyagban (főleg műanyag szigetelésekben), már az üzemi igénybevételek tartományában is meghatározott körülmények között megindulhat az átütési csatornák képződése. Ezek lassan, hónapok, évek alatt

kifejlődve végül is a szigetelés átütését okozzák viszonylag kis villamos igénybevételek esetében. Ezek az átütési csatornák rendszerint az egyik elektródon levő térerősséggyűjtő helyről (parányi csúcshól, élből), vagy a szigetelőanyagban levő szennyező zárványból indulnak ki, kifejlődésük közben többszörösen elágazódnak. Így alakul ki jellegzetes, fára emlékeztető alakjuk, erről nyerték a nemzetközi szakirodalomban elterjedten használt angol nevüket: tree (=fa), a csatornaképződés folyamata pedig a treeing elnevezést.



2.8..ábra
Átütési csatorna (tree) típusok:
1-2-3 elektródból, 4 zárványból induló csatornák

Az üzeminél jóval nagyobb igénybevételeken a szigetelések lényegesen rövidebb idő (10^{-6} s ... perc nagyságrend) után átütnek. A legtöbb szigetelőanyag átütési szilárdsága ebben a tartományban erősen függ az igénybevétel időtartamától, mennél rövidebb az igénybevétel,

annál nagyobb az anyag átütési szilárdsága. Ebben a tartományban szilárd anyagoknál az átütés két típusa különböztethető meg: a villamos átütés és a hő-villamos átütés.

Villamos átütés (2.7. ábra diagramjában az I. tartomány) esetében az anyagban fellépő nagy térerősség az állandó töltéssel rendelkező töltéshordozókat (elektronokat ill. ionokat) kiszakítja a helyükről, és az anyagban a gázokhoz hasonlóan töltéshordozó-lavina szerű folyamat indul meg. Villamos átütésre egyrészt a kristályos szerkezetű szigetelőanyagok (pl. csillám) hajlamosak, másrészt az amorf szigetelőanyagok is hajlanak a villamos átütés felé, ha az igen rövid ideig tartó igénybevétel vagy egyéb ok miatt az anyag melegebbé (a dielektromos veszteség hatása) nem játszik szerepet az átütésben. Így inkább villamos átütés fordul elő az igen rövid ideig tartó túlfeszültségek vagy egyenfeszültség esetében. A villamos átütés igen rövid idő (10^{-4} ... 10^6 s) alatt kialakul, megindulásához viszonylag nagy feszültség (térerősség) szükséges.

Hő-villamos átütésre az amorf, inhomogén szerkezetű szigetelőanyagok hajlamosak, tehát a szigetelések többsége. Az átütési folyamat kialakulási ideje lényegesen hosszabb, s-től akár több órás nagyságrendig is terjedhet, függ a szigetelés melegebbé ill. hűlési körülményeitől. Hő-villamos átütés esetében (2.7. diagram II. tartománya) a szigetelőanyag melegebbé jelentős szerepet játszik az átütés kifejlődésében. Az anyagban keletkező veszteség nagysága ugyanis függ az szigetelőanyag hőmérsékletétől, mennél melegebb a szigetelés, annál nagyobb veszteség keletkezik benne.

Végül a 2.7. diagram szerinti III. tartományban az üzemi igénybevételek okozta romlási folyamatok következtében csökken a szigetelést alkotó szigetelőanyagok villamos szilárdsága. Ezzel természetesen a szigetelés villamos szilárdsága, azaz üzembiztonsága is csökken. Ezek a romlási folyamatok főképpen a tartós villamos- és hőigénybevétel hatására lépnek fel, általában a szigetelés anyagának lassú, de irreverzibilis változását okozzák, amelyek magukkal hozzák a szigetelés villamos és egyéb fizikai jellemzőinek romlását is. Ezt a lassú folyamatot a szigetelés öregedésének nevezik. Ilyen öregedési folyamat lehet pl. az oxidáció, a műanyagokat alkotó polimer óriásmolekulák széttöredezése, a depolimerizáció stb. vagy az előbbieken ismertetett átütési csatornaképződés (treeing).

2.3.4. Átívelés

A szigetelőképeség megszűnésének másik esete az átívelés. Átívelés esetében az elektródokat összekötő villamos ív a szilárd szigetelőanyag felületén, a környező gázban vagy folyadékban keletkezik. Az átívelés, mint határfelületen fellépő jelenség, sokkal inkább függ a környezetből eredő behatásoktól, mint a szigetelőanyag belsejében kialakuló átütés. Szilárd szigetelőanyagok levegővel vagy egyéb gázzal vagy folyékony anyaggal érintkező felülete sohasem lehet tökéletesen tiszta. Ha a szilárd szemcsés, poralakú szennyeződés lerakódását figyelmen kívül hagyjuk, akkor is mindig jelen van a felületen egy, a levegő alkotóelemeinek, a gázalakú szennyezéseknek, a levegőben levő párának stb. adszorbeálásával kialakult határréteg. Ez a réteg nem állandó, hanem a környezeti hatások függvényében (mint pl. a hőmérséklet, a szennyező anyagok koncentrációja, páratartalom stb.) állandóan változik. A felületi réteg a szigetelőanyag felületi jellemzőinek (felületi ellenállásának, átívelő feszültségének) nagyságát olyan mértékben befolyásolja, hogy a mért jellemzők nem annyira anyagjellemzőknek, mint inkább a határréteg pillanatnyi állapotára jellemző mennyiségeknek tekinthetők. Így a szigetelőanyag felületi jellemzőit (felületi ellenállás, átívelőfeszültség, kúszóáram-szilárdság stb.) csak szabványos elektród-elrendezéssel és csak az előírt

hőmérsékletű és páratartalmú zárt térben, tehát csak szabványosított körülmények között szabad mérni. Ezek az értékek - szemben pl. a veszteségi tényezővel, fajlagos szigetelési ellenállással stb. - még ebben az esetben sem tekinthetők anyagjellemzőknek.

A felület további makroszkopikus szennyeződése (por, ujjlenyomat stb.) tovább rontja a szigetelés felületi tulajdonságait, még bizonytalanabbá teszi a felületi jellemzők értékét. Ezért a szigeteléseket felületi igénybevételre nem is lehet egzakt módon méretezni, a gyakorlatban tapasztalati alapon az átütési igénybevételeknél nagyságrendekkel kisebb felületi igénybevételeket engednek meg.