



## Mérési útmutató

### Nagyfeszültségű kisülések és átütési szilárdság vizsgálata

Az Elektrotechnika tárgy laboratóriumi gyakorlatok 1. sz. méréséhez

#### 1. A mérés célja

Védőtávolságok alkalmazásának szükségessége és azok meghatározása nagyfeszültségű rendszerekben. Átütés vizsgálata atmoszférikus levegőben, a villamos szilárdság meghatározása. Az átütési és az átívelési feszültség összehasonlítása különböző elrendezések esetén nagy váltakozó feszültség illetve nagyfeszültségű impulzus alkalmazásával.

#### 2. Rövid elméleti áttekintés

A nagyfeszültségű technika egyik legfontosabb szigetelőanyaga az atmoszférikus levegő. (Gondoljunk a nagyfeszültségű távvezetésekre, vagy a szabadtéri alállomásokra.) Mint minden szigetelőanyag, így a levegő is csak bizonyos villamos igénybevételt visel el, vagyis van egy olyan kritikus térerősség érték, amely felett elveszti szigetelőképességét, „átüt”. Ezt a kritikus térerősséget nevezzük átütési vagy villamos szilárdságnak.

A gyakorlatban a levegő, mint szigetelőanyag, eltérő potenciálú elektródok között helyezkedik el. Azt a feszültséget, amelyet az elektródok közé kapcsolva a levegő elveszti szigetelőképességét, átütési feszültségnek nevezzük. Homogén erőterben adott elektródtávolság ( $d$ ) mellett az átütési feszültség ( $U_{\bar{u}}$ ) és a villamos szilárdság ( $E_{\bar{u}}$ ) között az

$$U_{\bar{u}} = E_{\bar{u}}d \quad (1)$$

egyszerű összefüggés áll fenn. Enyhén inhomogén erőterek esetén, bár a térerősség nagysága a levegő különböző pontján más és más, a legnagyobb  $E_{\max}$  a legkisebb  $E_{\min}$  térerősség aránya ( $E_{\max}/E_{\min}$ ) alig haladja meg az 1-et, így (1) összefüggés jó közelítést ad. Erősen inhomogén erőterekben, ahol  $E_{\max}/E_{\min}$  a 10-es értéket is meghaladja, (1) már nem alkalmazható.

A villamos szilárdság meghatározásakor az elektródok közötti feszültséget folyamatosan növeljük, amíg az átütés be nem következik. Erősen inhomogén erőterek esetén egy bizonyos feszültség szint elérésekor a nagy térerősségű helyeken a levegő már elveszíti szigetelőképességét (ún. koronakisülés alakul ki), noha a teljes elektródközben még nem jön létre átütés. A nagy térerősség hatására felgyorsuló elektronok ugyanis ütközési ionozás útján újabb és újabb töltéshordozókat hoznak létre, így alakul ki az ún. elektronlavina, ebből pedig a halvány fényszálakat formáló pamatos kisülés. Ha pamatok árama meghalad egy kritikus értéket (hőionozási határáram), a kisülés jellege megváltozik, a töltéshordozók létrehozásában már a hőionozás is részt vesz és kialakul az átütési csatorna.

Az átütést követően - elegendően nagy tápteljesítmény esetén - villamos ív jön létre, amelyet jó vezetőképesség, és nagy áram jellemez, a töltéshordozók pedig ütközési ionozás helyett a hő ill. fotoionozás révén jönnek létre. Ilyenkor az elektródokra kapcsolt nagyfeszültségű próbatranszformátor feszültsége az ív hatására hirtelen lecsökken.

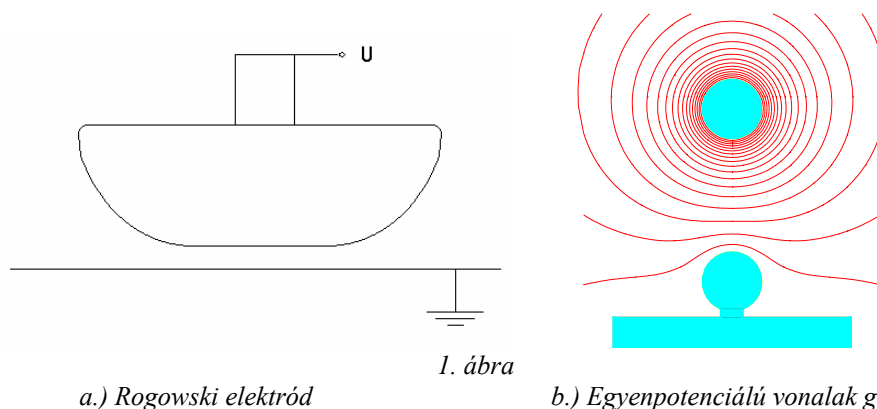
- A villamos szilárdság értékét több tényező befolyásolja. Ezek az alábbiak
- az alkalmazott feszültség fajtája (egyen-, váltakozó- vagy lökfeszültség /feszültség impulzus/)
  - az elektródok távolsága
  - az elektródok alakja
  - az elektródok polaritása
  - az igénybevétel időtartama (ill. a feszültségváltozás sebessége)
  - a levegő nyomása, hőmérséklete, páratartalma.

A feszültség fajtája és a feszültségváltozás sebessége azért befolyásolja a villamos szilárdság értékét, mert az átütési csatorna kialakulásához szükség van bizonyos időre. Ha tehát egy gyors felfutási meredekségű impulzust alkalmazunk, ahol rövid idő alatt nagymértékben változik a feszültség, nagyobb villamos szilárdság értéket fogunk kapni, hisz az átütési csatorna kialakulását rövidebb idő alatt csak nagyobb feszültséggel lehet biztosítani.

Adott alakú elektródok esetén az elektródköz növelésével az átütési feszültség nő, a villamos szilárdság viszont csökken. Adott elektródtávolság mellett az elektródok görbületi sugarának csökkentésével az átütési feszültség csökken, a villamos szilárdság viszont nő. (Ez a látszólagos ellentmondás annak köszönhető, hogy a homogén erőterre érvényes értéknél nagyobb térerősség az elektród felületén az erős inhomogenitás miatt már olyankor is létrejön, ha az elektródok közötti feszültség a homogén esethez képest kisebb. A könnyebb érthetőség kedvéért az 1.b. ábrán egy olyan szikraköz erőtere látható, amelyben a gömbök átmérője 2 cm, távolságuk pedig 4 cm. A nagyfeszültségre kapcsolt elektród felületén a térerősség a homogén érték mintegy 4-szerese.)

A nyomás hatását az ún. Pashen-törvény írja le, amelynek lényege, hogy adott elektródelrendezés esetén van egy olyan nyomásérték, ahol az átütési feszültség minimális, ennél kisebb és nagyobb értékek esetén az átütési feszültség nő. A nyomás és a hőmérséklet egymással összefügg, mindkettő az elektronok átlagos szabad úthosszának változása révén fejt ki hatását. Állandó nyomáson a hőmérsékletet növelve nő az átlagos szabad úthossz, ezáltal az ionozás hatásossága, így az átütési feszültség csökken. A páratartalom növekedése ugyanakkor az ionozás hatásosságát gátolja, ezért a villamos szilárdságot növeli.

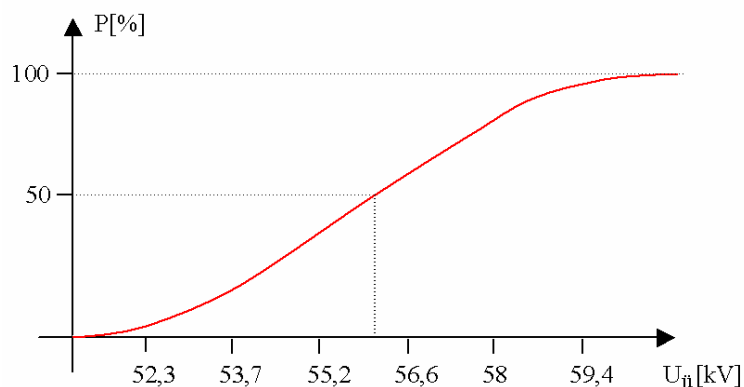
Homogén térerősséget elvben két, végtelen hosszú sík lemez között hozhatunk létre. Véges kiterjedésű párhuzamos lemezek esetén azonban a lemezek szélénél a térerősség megnövekszik. Emiatt az 1.a. ábrán látható, ún. Rogowski elektródot használjuk, ami biztosítja a fenti hatás kiküszöbölését. Enyhén inhomogén erőteret gömb-sík v. gömb-gömb elrendezés esetén kaphatunk, míg erősen inhomogén erőteret csúcs-sík elrendezés esetén alakíthatunk ki.



a.) Rogowski elektród

b.) Egyenpotenciálú vonalak gömbszikraközben

Ha az átütési feszültség meghatározásakor egy adott elektródelrendezésnél egymás után több mérést is elvégezzünk, azt tapasztaljuk, hogy a kapott átütési feszültségértékek egymástól kis mértékben eltérnek. Ezt a tényt statisztikailag úgy kezelhetjük, hogy egy adott feszültségértékhez egy ún. átütési valószínűséget rendelünk, ami megadja, hogy a próbálkozások hány százalékában várható átütés az adott feszültségszinten. Ha a kapott eredményeket a feszültség függvényében ábrázoljuk, a 2. ábrán látható ún. „S”-görbéhez jutunk. A gyakorlatban általában a 0%, 50% és 100% átütési valószínűséghez tartozó feszültségértéket szokták megadni.



2. ábra: Az „S”-görbe

A gyakorlatban kizárólag atmoszférikus levegőt nem használhatunk szigetelésre, hiszen minden vezetőt rögzíteni kell, egyúttal elszigetelve a földpotenciáltól. Ehhez szilárd szigetelőre van szükség. Ebben az esetben, ha vezető feszültsége egy kritikus értéket meghalad, a kisülés a levegő mint szigetelő gáz és a szilárd szigetelő **határfelületén** alakul ki. Ha a kisülés nem a teljes felületen halad (kúszik) végig, akkor részletörésről, kúszókisülésről beszélünk. Ha a kisülés elektródtól elektródig ér, tehát a szigetelő felületén a teljes elektródközt áthidalja, **átívelésről** beszélünk. Ugyanazon elektródtávolság esetén az átívelési feszültség az átütési feszültségnél jelentősen kisebb. Értékét a kúszóút növelésével lehet növelni. (Kúszóútnak nevezzük a kisülés által a szigetelő felületén megtett utat.)

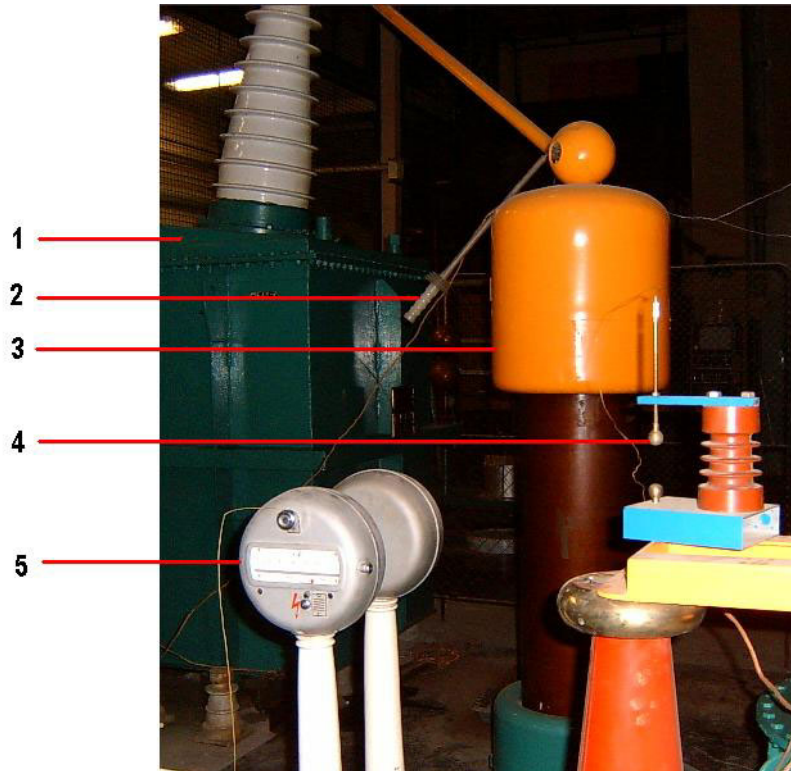
Ennek legelterjedtebb módja a szigetelő ernyőzése. (Ernyőzött szigetelőket láthatunk például a távvezetékek oszlopain.) Az átívelési feszültség értékét jelentősen befolyásolja a felületi szennyeződés. Az átívelési feszültség drasztikusan csökken, ha a szilárd szigetelő felületére jó vezetőképes anyag, pl. víz kerül (vagy éppen grafit egy grafitbomba robbanása után, amely azt a célt szolgálja, hogy a szigetelők felületén kialakuló ív által okozott, önmagától meg nem szűnő zárlat megbénítsa az ellenség villamos hálózatát...)

Ha a szigetelő felület visszanyeri tisztaságát, az átütési feszültség ismét megnő.

A mérés során az átívelési feszültség feldolgozásakor nem az átütésnél megismert S görbét fogjuk alkalmazni. Ennek oka, hogy míg átütés után a levegő regenerálódik, azaz visszanyeri eredeti szigetelőképességét, addig a felületi kisülés befolyásolja a felület minőségét, így az átütési feszültséget is. (a felület kormozása rontja, a nedvesség elpárologtatása javítja a szigetelőképességet.) Emiatt egy mérési sorozat elvégzése után a mért átütési feszültség minimális, maximális és átlagos értékét számítjuk ki.

### 3. A mérés során használt eszközök, berendezések ismertetése

#### A 250 kV-os mérőtranszformátor kezelése



3. ábra: Mérési elrendezés váltakozó feszültségű átütésvizsgálathoz  
1: próbatranszformátor, 2: földelő rúd, 3: kapacitív osztó, 4: próbatest  
5: elektrosztatikus voltmérő

A mérési elrendezés fényképét a 3. ábra mutatja. A próbatranszformátor bemenetére változtatható feszültséget kapcsolunk, amelynek értékét a 4. ábrán látható vezérlőpultról tudjuk állítani. Ennek hatására a transzformátor kimenetén 0 és 250 kV közötti feszültség jelenik meg.

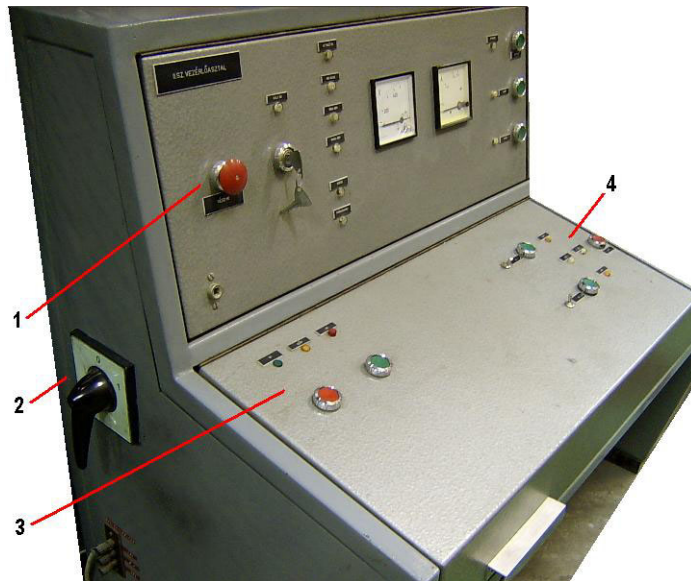
A feszültséget kétféleképpen mérhetjük. Egyik lehetőség a kapacitív osztó alkalmazása, amely egy nagyfeszültségű és egy kisfeszültségű kondenzátorból áll. A kisfeszültségű kondenzátoron a teljes feszültséggel arányos, de közvetlenül oszilloszkópra csatlakoztatható nagyságú jelet kapunk. Az osztásarány a berendezés kapacitástáblájáról olvasható le.

A másik lehetőség az elektrosztatikus voltmérő használata. Ez alapvetően tekintve egy olyan kondenzátor, amelynek egyik lemezét földeljük, másik lemezét pedig a mérendő feszültségre kötjük. A feszültség hatására a kondenzátor fegyverzetein ellentétes előjelű töltések halmozódnak fel, amelyek egymásra elektrosztatikus vonzóerőt fejtenek ki. Az egyik fegyverzet közepén egy torziós szárra fűzött fém lapka található, amelyet az előbbi erő elmozdít, és elmozdulása arányos lesz a kondenzátor belsejében lévő térerősséggel. Homogén erőterben ez a térerősség egyenesen arányos a feszültséggel, így az eszköz alkalmas a feszültség mérésére. A méréshatárváltás egyszerű, hiszen csak a lemezek távolságát kell megváltoztatni ahhoz, hogy ugyanakkora térerősséghez nagyobb feszültség tartozzék.

**Felhívjuk a figyelmet arra, hogy az elektrosztatikus voltmérő effektív értéket mutat.** Az átütési folyamatoknál a feszültség csúcserőértékét szeretnénk meghatározni, ezért az elektrosztatikus voltmérővel mért értékeket szinuszos feszültség esetén  $\sqrt{2}$ -vel szorozni kell.

Külön felhívjuk a figyelmet a földelő rúdra, minden mérés befejezése után a rudat vissza kell helyezni a transzformátor kivezetésére. Ezen kívül a nagyfeszültségű tér ajtaját nyitva kell hagyni. Az ajtót ugyanis

reteszeléssel látták el, ami annyit jelent, hogy egy kapcsoló csak az ajtó csukott állapotában engedélyezi a mérőpult bekapcsolását.



4. ábra: A 250V-os transzformátor vezérlőpultja  
1: Vészleállító nyomógomb, 2: kézi kapcsoló, 3: mágneskapcsoló nyomógombjai  
4: feszültségszabályzó nyomógombok



5. ábra: az egyfázisú próbatranszformátor vezérlőpultjának kezelőszervei

Ennek megfelelően minden mérés (vagy mérési sorozat) megkezdése előtt a földelő rudat el kell távolítani a transzformátor nagyfeszültségű kivezetéséről és a nagyfeszültségű mérőtér ajtaját be kell csukni.

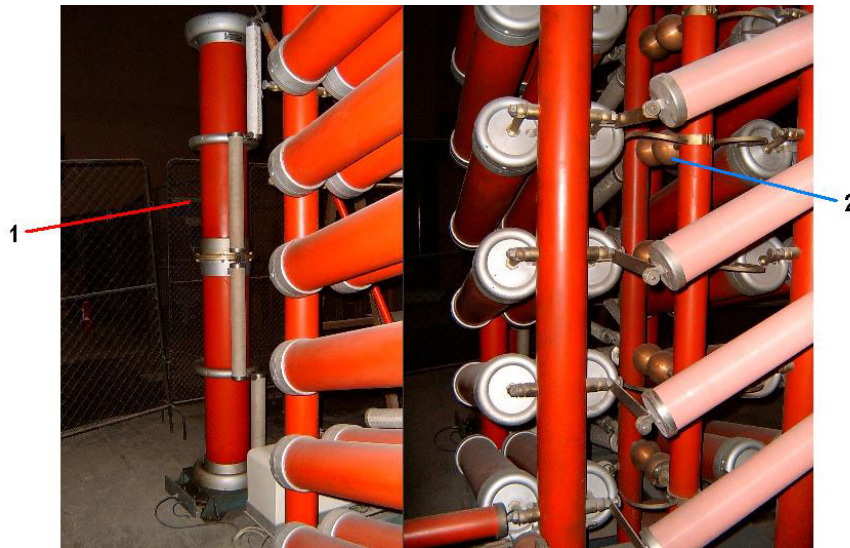
A nagyfeszültségű próbatranszformátor bekapcsolásához két kapcsolási folyamat szükséges. Először a 4. ábrán „2”-es számmal jelölt kézi kapcsolót kell „1” állásba fordítani, majd a vezérlőpulton található nyomógombok közül a mágneskapcsolóhoz tartozó zöld gombot kell megnyomni, hogy a mérőhely feszültség alá kerüljön (ld. 5. ábra bal oldali képét.)

A feszültség felszabályozását - bekapcsolás után - manuálisan, a „FEL” feliratú nyomógomb folyamatos nyomva tartásával végezzük. Ekkor a labor alatti pincében elhelyezett indukciós szabályzó egyenletes sebességgel növeli a transzformátor feszültségét.

Adott feszültség elérésekor áttűtés keletkezik, ekkor a pultot a mágneskapcsoló piros nyomógombjával (3. ábra bal oldali kép) kell kikapcsolni. Kikapcsolás után az indukciós szabályzó automatikusan leszabályoz mindaddig, amíg el nem éri az alsó véghelyzetet. Ezt az „AVH” feliratú lámpa jelzi, újabb bekapcsolást csak akkor lehet végezni, ha a lámpa már világít.

Ha valaki bármilyen rendellenességet vagy veszélyhelyzetet észlel, a teljes vezérlőpultot valamint a próbatranszformátort a piros vészleállító nyomógomb azonnali megnyomásával kapcsolja ki!

## A TUR típusú lökésgerjesztő kezelése

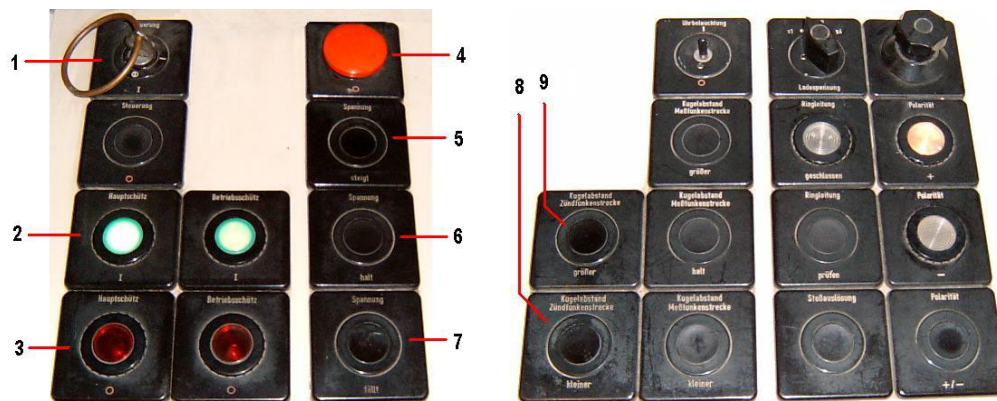


6. ábra: lökésgerjesztő berendezés. 1: kompenzált lököfeszültség osztó; 2: szikraköz

A mérés második részéhez szükséges nagyfeszültségű impulzusok előállításához a 7. ábrán látható berendezést használjuk. A nagyfeszültségű impulzusokat olyan feszültségosztó segítségével csökkentjük az oszcilloszkóp számára megfelelő nagyságúra, amely alakhű jelátvitelt biztosít (kompenzálja a szórt kapacitások hatását). A lökésgerjesztő berendezést az 8. ábrán bemutatott mérőpultról vezérelhetjük.

A mérési sorozat megkezdése előtt eltávolítjuk a földelő rudat a lökésgerjesztő kimenetéről, majd a nagyfeszültségű mérőteret elhagyva bezárjuk annak ajtaját.

Méréskor célunk annak megállapítása, hogy egy adott feszültségszinten milyen valószínűséggel következik be az átütés. Így tehát először be kell állítanunk a kívánt kimenő csúcshőfeszültséghez tartozó gömbszikraköz-távolságot. Ezt a 7. ábra 8 és 9 gombjaival tehetjük meg. Az aktuális gömbtávolság egy, a mérőpultba épített numerikus kijelzőn jelenik meg, illetve villamosan visszamért jele egy digitális multiméterről olvasható le.

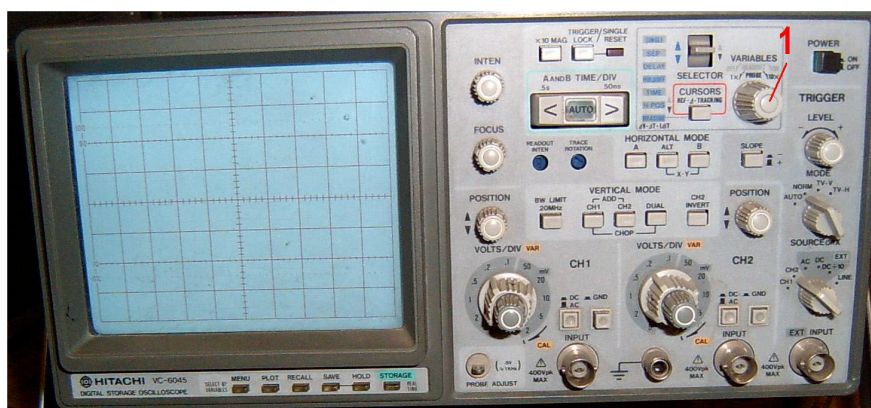


7. ábra: a TUR típusú lökésgerjesztő vezérlőpultjának kezelőszervei

- 1: kulcsos kapcsoló (CSAK a mérésvezető használhatja!);
- 2: fő- és készenléti mágneskapcsoló „be” nyomógombjai (Hauptschutz, Betriebshutz);
- 3: fő- és készenléti mágneskapcsoló „ki” nyomógombjai;
- 4: vészgomb;
- 5: tápfeszültség felszabályozó gombja (Spannung steigt);
- 6: tápfeszültség leszabályozást megállító nyomógomb (halt);
- 7: tápfeszültség leszabályozó nyomógomb (Spannung fällt);
- 8: szikraközt csökkentő nyomógomb (Kugelabstand kleiner);
- 9: szikraközt növelő nyomógomb (Kugelabstand größer)

Ezt követően az impulzusok gyakoriságát állítjuk be, amit a tápláló feszültség változtatásával tehetünk meg. A zölden világító nyomógombok megnyomása után a lökésgerjesztő feszültségét a 7. ábra 5. sz. gombjával növeljük mindaddig, amíg a lökésgerjesztő első szikraközei át nem ütnek. Ekkor megvizsgáljuk, hogy két átütés között mennyi idő telik el. Ha ez az idő 2-3 másodpercnél nagyobb, a feszültséget a 7. ábra 7. számú nyomógombja segítségével csökkenteni kezdjük. Mivel a berendezés a feszültséget a gomb megnyomása után folyamatosan csökkenti, a leszabályozást a 6. számú „halt” gombbal meg kell állítani.

A lökésgerjesztő működtetésével előállított impulzus időfüggvényét tárolós oszcilloszkópon jelenítjük meg. Az oszcilloszkóp beállításait a mérés elején a mérésvezető határozza meg, a hallgatók feladata az impulzus csúcsértékének meghatározása. Ehhez a mérésvezető az oszcilloszkópot „Measure” állásba állítja, majd az egyik kurzort az impulzus nullvonalára mozgatja. A hallgatók a másik kurzort az impulzus csúcsához mozgatják a 8. ábra 1-es számú potenciométerének segítségével. Az aktuális érték voltban jelenik meg az oszcilloszkóp képernyőjén. Tekintettel arra, hogy a mért érték egy 1:1000 osztó leosztott feszültségele, így a voltban kapott érték a valóságban kV-ot jelent. Így a kívánt szikraköz távolsághoz tartozó tényleges csúcsfeszültség érték meghatározható.



8. ábra: Hitachi VC-6045 tárolós oszcilloszkóp

A megfelelő impulzusgyakoriság beállítása után a hallgatók feljegyzik, hogy 20 impulzusból hány okozott átütést az adott elektródelrendezésben.

## 4. Elvégzendő mérések (kitöltendő jegyzőkönyv)

A mérés megkezdésekor minden mérőcsoportnál legyen egy nyomtatott példány a kitöltendő mérési jegyzőkönyvből!

A mérés dátuma: ..... Mérőcsoport sorszáma: .....

Mérésvezető: .....

A mérőcsoport tagjai

Név	NEPTUN-kód	éremjegy (mérésvezető tölti ki!)

### 4.1 Levegő átütési szilárdságának meghatározása

Nagyfeszültségre kapcsolt Rogowsky elektród és földelt ellenelektrod távolsága:  $d = \dots\dots\dots$  cm

#### Váltakozófeszültségű mérés

10 egymást követő alaklommal az átütési feszültség értéke:

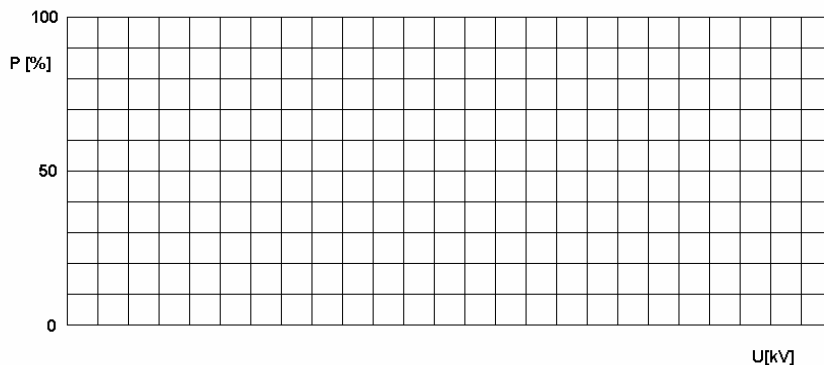
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U[kV]										

#### Impulzusüzemű mérés

5 különböző feszültség szinten az átütési gyakoriság

Próbaimpulzus sorszáma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U <sub>1</sub> [kV] =																				
U <sub>2</sub> [kV] =																				
U <sub>3</sub> [kV] =																				
U <sub>4</sub> [kV] =																				
U <sub>5</sub> [kV] =																				

Az S görbe



Az 50%-os átütési valószínűség alapján a villamos szilárdság:  $E = U_{50\%}/d = \dots\dots\dots$  kV/ $\dots\dots\dots$  cm =  $\dots\dots\dots$  kVcm.



## 4.2. Átívelési feszültség meghatározása

Helyezzünk a Rogowsky-elektrod és a földelt fémlap közé henger alakú, sima felületű szigetelőt! Határozzuk meg az átívelési feszültség minimális, maximális és átlagos értékét!

### Váltakozó feszültségű mérés

10 egymást követő alkalommal az átívelési feszültség értéke:

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U[kV]										

$U_{\min}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\max}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\text{átl}}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$

### Impulzusüzemű mérés

5 különböző feszültség szinten az átütési gyakoriság

Próbaimpulzus sorszáma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_1[\text{kV}] =$																				
$U_2[\text{kV}] =$																				
$U_3[\text{kV}] =$																				
$U_4[\text{kV}] =$																				
$U_5[\text{kV}] =$																				

$U_{\min}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\max}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\text{átl}}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$

## 4.3. Átívelési feszültség meghatározása

Cseréljük ki a sima felületű szigetelőt ernyőzött (bordázott) szigetelőre! Határozzuk meg az átívelési feszültség minimális, maximális és átlagos értékét!

### Váltakozófeszültségű mérés

10 egymást követő alkalommal az átívelési feszültség értéke:

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U[kV]										

$U_{\min}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\max}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\text{átl}}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$

### Impulzusüzemű mérés

5 különböző feszültség szinten az átütési gyakoriság

Próbaimpulzus sorszáma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_1[\text{kV}] =$																				
$U_2[\text{kV}] =$																				
$U_3[\text{kV}] =$																				
$U_4[\text{kV}] =$																				
$U_5[\text{kV}] =$																				

$U_{\min}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\max}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$      $U_{\text{átl}}[\text{kV}] = \dots\dots\dots$

Értékelés: ugyanazon elektródtávolság mellett a 4.1-4.3 pontokban mérhető átütési/átívelési feszültség összehasonlítása, a különbség oka:

#### 4.4. Középfeszültségű távvezetékszakasz veszélyes megközelítése

Kössük át a nagyfeszültségű csatlakozást a középfeszültségű fázisvezető-modell elektródjára! Határozzuk meg, hogy a mérésvezető által megadott távolságban elhelyezett földelt fémgömb és a fázisvezető között mekkora feszültség mellett történik átütés!

##### Váltakozófeszültségű mérés

10 egymást követő alkalommal az átívelési feszültség értéke:

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U[kV]										

$U_{\min}$ [kV] = .....  $U_{\max}$ [kV] = .....  $U_{\text{át}}$ [kV] = .....

##### Impulzusüzemű mérés

5 különböző feszültség szinten az átütési gyakoriság

Próbaimpulzus sorszáma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_1$ [kV] =																				
$U_2$ [kV] =																				
$U_3$ [kV] =																				
$U_4$ [kV] =																				
$U_5$ [kV] =																				

$U_{\min}$ [kV] = .....  $U_{\max}$ [kV] = .....  $U_{\text{át}}$ [kV] = .....

#### 4.5 Nagyfeszültségű távvezetékszakasz veszélyes megközelítése

A mérést a mérésvezető bemutató jelleggel végzi a 600 kV-os próbatranszformátor használatával.

#### 5 Ellenőrző kérdések

- Mi a villamos szilárdság?
- Mitől függ a villamos szilárdság értéke?
- Hogyan függ villamos szilárdság értéke a próbafeszültségtől?
- Hogyan függ villamos szilárdság értéke a nyomástól?
- Hogyan függ villamos szilárdság értéke a páratartalomtól?
- Hogyan függ villamos szilárdság értéke az elektródok alakjától?
- Mi az S görbe?
- Mit nevezünk átívelésnek?
- Miért készítenek ernyőzött szigetelést?

Készítette:  
 Dr. Kiss István  
 Villamos Energetika Tanszék  
 2006