

750 kV-os szigetelőláncok ívállósági vizsgálatai

DR. KERTÉSZ VIKTOR, Budapest – D. G. KOLKER, Szlavjanszk – DR. MIHÁLKOVICS TIBOR, Budapest – I. L. SLEJFMAN, Moszkva*

DK 621.315.624.027.875:621.3.014.31.001.4

1978 szeptemberében a moszkvai NIC–VVA Nagyteljesítményű Laboratóriumában a NIC–VVA, a budapesti VEIKI és a szovjet „Elektroszetyizoljacija” Tröszt részvételével a NIC–VVA és a VEIKI tudományos-műszaki együttműködésének keretében a szovjet-magyar 750 kV-os összekötés magyar szakaszán beépített 2×44 db PSZ 12A tagú tartó szigetelőláncok ívállósági vizsgálataira került sor.

A vizsgálat célja többretű volt. Egyrészt az irodalomban [1, 2] leírt ívállósági vizsgálati módszert kellett kipróbálni a 750 kV-os feszültség-szintű láncokon. Ilyen hosszú láncokon ívállósági vizsgálatokat az irodalom tanúsága szerint még nem végeztek. Másrészt a lánc ívállóságának és a szerelvények védőképességének vizsgálata és az ív mozgását befolyásoló tényezők tanulmányozása volt a cél.

Az elvégzett vizsgálatok lehetővé tették a leírt célok elérését. Sőt az ívfeszültség részletes analízise – összevetve a korábban kisebb feszültségű láncokon nyert eredményekkel – bizonyította, hogy az irodalomban használatos adatok az UHV és EHV feszültség-szintű láncokon a hosszú, szabadon égő, nagyáramú ívekre nem helytállóak.

1. A vizsgálatok módszere

A vizsgált, 44 tagú, PSZ 12 A szigetelőkből álló, üzemszerűen felszerelt kettős tartó szigetelőlánc rajza az 1. ábrán látható.

A próbakamrában elhelyezett szigetelőlánc felfüggesztését a 2. ábra mutatja. A próbatárgy és a tartó daru-horog közé 14 tagú szigetelőláncot iktattunk be.

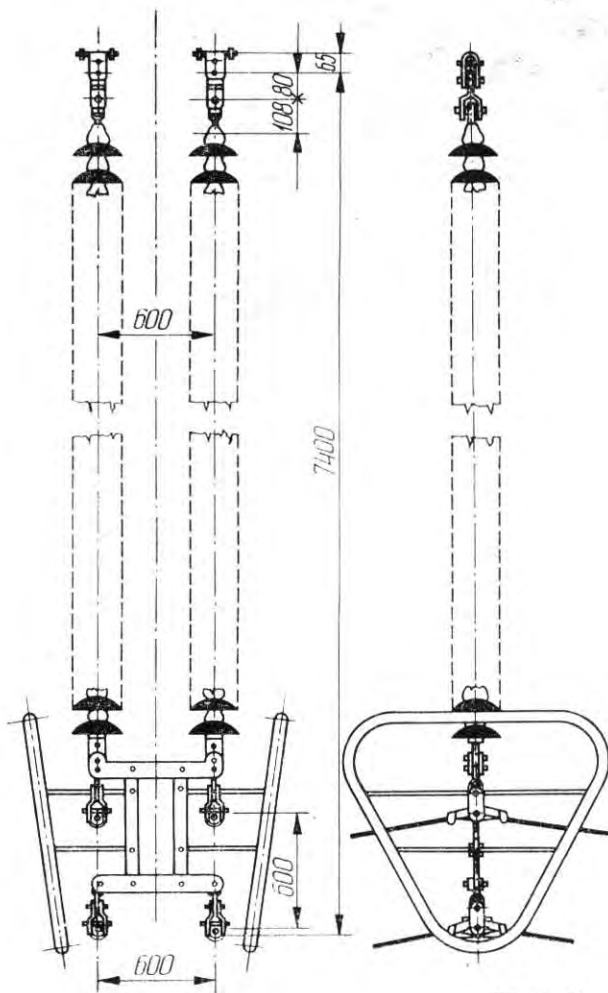
A 4 köteges fázisvezetőt kb. 6 m hosszón az üzemszerű állapotnak megfelelően képeztük le (ld. 3. és 4. ábra). Az áram hozzávezetés a valóság-nak megfelelően két oldalról történt. Két szélső esetet alapulvéve, aszimmetrikus fázisoldali betáplálásnál $I_1 = 0$, $I = I_2$ volt, ill. szimmetrikus fázisoldali betáplálás esetén $I_1 \approx I_2 \approx I/2$ közel egyenlő zárlati áram folyt az ívbe.

* Dr. KERTÉSZ VIKTOR okl. villamosmérnök, a műszaki tudományok kandidátusa, a Budapesti Műszaki Egyetem docense, a vizsgálatok idején a Villamosenergiaipari Kutató Intézet tudományos főmunkatársa;

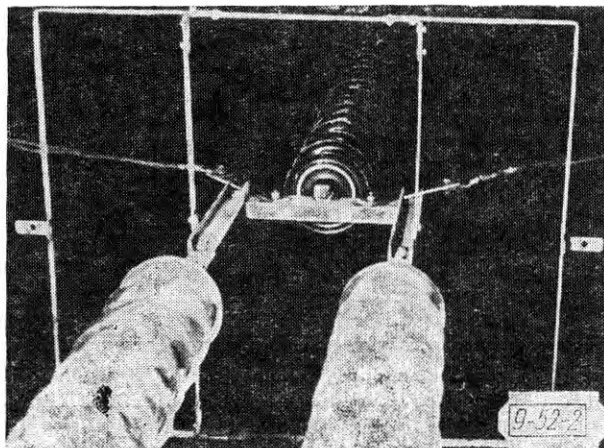
D. G. KOLKER okl. mérnök-elektrofizikus, az Elektroszetyizoljacija Tröszt Különleges Szigetelő- és Armatúra Szerkesztési-Technológiai Irodájának (Szlavjanszk) osztály-vezetője;

Dr. MIHÁLKOVICS TIBOR okl. villamosmérnök, a műszaki tudományok kandidátusa, a Villamosenergiaipari Kutató Intézet (Budapest V., Zrínyi u. 1.) osztály-vezetője;

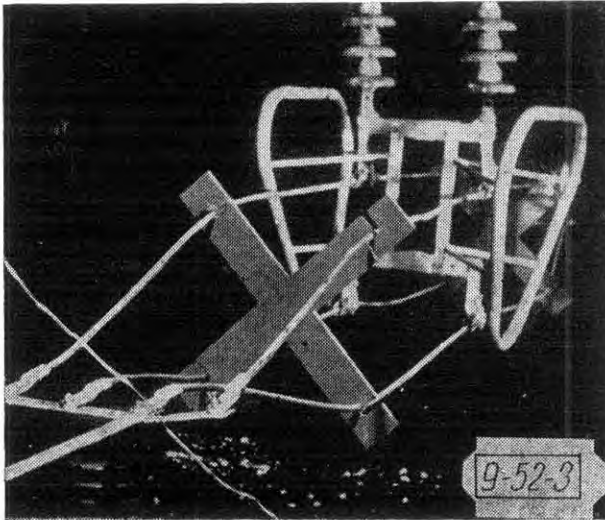
I. L. SLEJFMAN okl. elektromérnök, a műszaki tudományok kandidátusa, a Nagyfeszültségű Készülékek Vizsgálatának Tudományos Kutató Központja (NIC–VVA, Moszkva) Nagyteljesítményű Laboratóriumának vezetője.



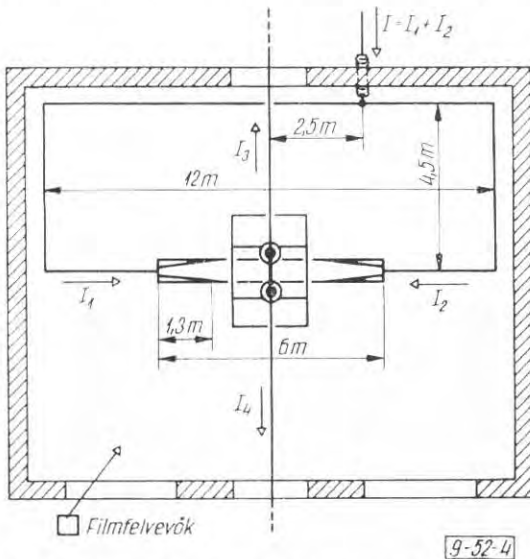
1. ábra. A 750 kV-os kettős tartólánc



2. ábra. A vizsgált kettős lánc felfüggesztése és a távvezeték-oszlop lánchoz közeli részét leképező keret



3. ábra. A 4 köteges fázisvezető leképzése a vizsgálatoknál



4. ábra. A vizsgált kettős szigetelőlánc elhelyezése a próbakamrában

A 4. ábrán a láncot felülnézetben ábrázoltuk a vizsgálati kamra alaprajzának feltüntetésével. A távvezeték oszlopnak a lánchoz közeli részét a 2. ábrán látható keret szimulálta. Az áramelvezetés itt is a két szélső esetet követte: a portál

oszlop szélső fázisán fellépő íves zárlatnak megfelelő aszimmetrikus földoldal esetén $I_4 = 0$, $I_3 = I$ volt, ill. a portáloszlop középső fázisának megfelelő szimmetrikus földoldal esetén $I/2 \approx I_4 \approx I_3$. A 4. ábrán látható fázisoldali áramhuroknál lényegesen nagyobb áramhurokkal értük el az $I_3/I_4 \approx 0,7 \dots 0,8$ arányt.

Az áram hozzá- és elvezetéseket tekintve háromféle áramkörben dolgoztunk:

- szimmetrikus elrendezésben, ahol a fázisoldali hozzávezetés és az oszlopoldali elvezetés szimmetrikus volt;
- aszimmetrikus elrendezésben, ahol a fázisoldali és az oszlopoldali áramvezetés egyaránt aszimmetrikus volt;
- félszimmetrikus elrendezésben, ahol a fázisoldali hozzávezetés aszimmetrikus, míg az oszlopoldali elvezetés szimmetrikus volt.

Valamennyi vizsgálatot megfelelően nagy belső köbtartalmú vizsgálati kamrában végeztük el, így a legszigorúbb esetet, a szélcsendes, ködös időben bekövetkező szennyezett átívelés esetét képeztük le. A szél ívmozgást befolyásoló hatását tehát vizsgálatainknál kiküszöböltük.

A zárlati áramot 2 db, egyenként 1600 MVA zárlati teljesítményű generátor táplálta. Ennek megfelelően a 0,44–0,46 s hosszúságú zárlat folyamán a zárlati áram effektív értéke a kezdeti értékhez képest 14...24%-kal csökkent. Az 1. táblázatban a zárlat közepe táján mért áram effektív értékét adtuk meg.

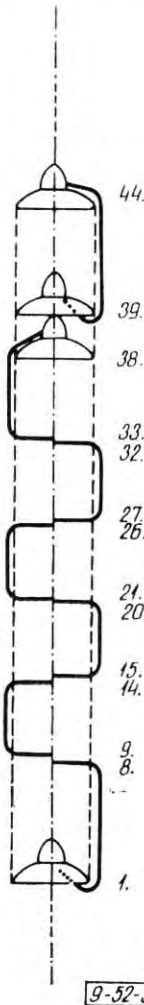
A zárlatok folyamán regisztráltuk az ívfeszültséget és az ívben folyó zárlati áramot, valamint 2 filmfelvevővel 1000 felvétel/s sebességgel gyorsfilmfelvételeket készítettünk. Az ívnyomokról nagyszámú fényképfelvételt készítettünk. Az egyes zárlatok után a szerelvénnyek, sodronyok stb. kézzel érzékelhető hőmérsékletnövekedése és a megfigyelhető sérülések, ívtalponnyomok alapján már azonnal a helyszínen is jó képet nyertünk az ív mozgásáról.

Az akkor készült feljegyzéseket később a filmekkel és a fényképekkel egybevetettük. Az így nyert információk megfelelően részletesek és megbízhatóak.

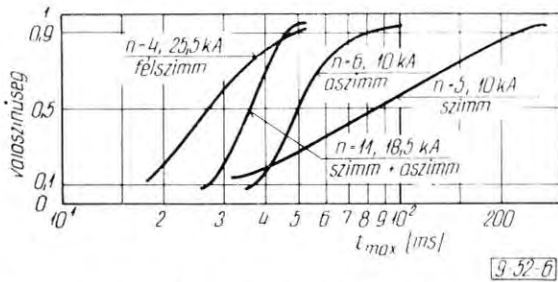
1. táblázat

A 750 kV-os láncon végrehajtott vizsgálatok

Kapcsolás sorszáma	Tápfeszültség [kV]	Zárlati áram [kA]	Zárlati idő [s]	Áramköri elrendezés	Vizsgálati csoport szimbolikus jele
1... 6	70	10	0,44–0,46	szimmetrikus	10/SZ
7... 12	70	10		aszimmetrikus	10/ASZ
13	70	18,5		szimmetrikus	20/SZ
14... 18	35	18,5		aszimmetrikus	20/ASZ
19... 23	35	18,5		aszimmetrikus	20/ASZ
24... 27	35	25,5		félszimmetrikus	25/FSZ



5. ábra. Az ívkezdemenyezésnél alkalmazott fémszál elhelyezési mód



6. ábra. Leghosszabban fennálló közbenső talpponti időelozslás-függvény: $F(t_{max})$

2. Az elvégzett vizsgálatok

A jó áttekinthetőség érdekében az elvégzett vizsgálatokat az 1. táblázatban foglaltuk össze. Az ívállósági vizsgálat során a tápfeszültséget oly módon kell megválasztani, hogy az iváram ne szenvedjen torzulást. E kritérium betartása a tápfeszültség és az ívfeszültség arányától függ. Tapasztalataink szerint elegendő – a begyújtó fémszál elolvadásának pillanatában mért túlfeszültséget nem tekintve – ha a $\frac{\sqrt{2} U_{táp}}{U_{iv,max}} \cong 2,5 \dots 3$.

Ekkor, figyelembevéve a zárlati áramkör induktív jellegét, még az ívfeszültség 3 : 1 arányú csökkenése esetén is az áramnövekedés csak 8,1...5,4%. Ezt bizonyítja az is, hogy vizsgálatainknál az ívfeszültség szempontjából nem láttunk különbségeket az áramkör 70 kV és 35 kV feszültségű táplálási esetei között.

A nagyfeszültségű szigetelők korábbi és jelenlegi vizsgálatánál általunk alkalmazott tápfeszültségek a következők:

szigetelőlánc (kV)	tápfeszültség (kV)
120	11,25
220	15 – 18,75
400	18,75 – 22,5
750	35 (70)

A vizsgálatok folyamán a szigetelők és a szerelvények cseréjét a 4. pontban tárgyaljuk.

3. Az ív mozgása a szigetelőlánc, az ív okozta igénybevételek

Az ív mozgására egybeként a begyújtáskor kialakult nyomvonal jelentős befolyást gyakorol. Az alkalmazott begyújtó fémszál elhelyezési móddal (1. 5. ábra) lényegében a szigetelőre nézve a legnagyobb igénybevételt jelentő esetet, a szennyezett állapotban történő átívelés esetét képeztük le. Mivel a paralel lánc szennyezett átívelésekor az átívelés nagy valószínűséggel az egyik láncon jön létre, az $\varnothing 0,2 \dots 0,3$ mm Cu begyújtó szálát az egyik láncon helyeztük el. A begyújtó fémszál megszakítási-átváltási pontjainál közbenső talppontokat kényszerítettünk ki. Ezek a talppontok mindaddig fennmaradnak, amíg az ívoszlop egyéb részei között létrejövő átütéssel kialakuló új ívcsatorna ezeket a talppontokat – többnyire egyenként – le nem söntöli.

Mint a szigetelő sérülésére jellemző paramétert, az egyes vizsgálatcsoportokban meghatároztuk a leghosszabban fennálló közbenső talppont fennállási idejének (t_{max} [ms]) empirikus eloszlásfüggvényeit (l. a 6. ábrát). A 20/SZ és 20/ASZ csoport pontjait – mivel lényeges eltérést nem tapasztaltunk – együtt ábrázoltuk.

Az ábrából megállapítható, hogy növekedő árammal t_{max} várható értéke és szórása csökken. Ez azt jelenti, hogy a kisebb áramoknál az előforduló lényegesen nagyobb t_{max} idők miatt (az előfordult legnagyobb t_{max} 10 kA-nál 215 ms, míg 25,5 kA-nál csak 44 ms volt!) a nagyobb áramok esetével egyenértékű vagy nagyobb igénybevételek is felléphetnek a közbenső tagokon.

10 kA-nál szembetűnő az áramköri elrendezés hatása. Szimmetrikus esetben az áramvezetőktől eredő elektrodinamikusan erőhatás az ívet a szigetelő felé hajtja, míg aszimmetrikus esetben a szigetelőtől eltávolítani igyekszik. A 10/SZ és 10/ASZ csoportnál t_{max} várható értéke 107 ms, ill. 58 ms, tehát kb. 2 : 1 arányban változik.

Nagyobb áramnál ez a hatás jelentéktelenebb, amely minden bizonnyal elsősorban azzal ma-

gyarázható, hogy a nagyobb árammal együttjáró nagyobb ionozottság az ívoszlop mozgásától függetlenül megkönnyíti a közbenső talppontok átütésekkel történő kisöntölését.

A láncon a 6×2 kikényszerített közbenső talpponti hely talppontjainak átlagos fennállási idejét (1. 2. táblázat) tanulmányozva megállapíthatjuk, hogy a láncon belül egyik hely sem kiütemezett. Az átlagos talpponti idők egy kis szórástól eltekintve megegyeznek.

2. táblázat

A kikényszerített közbenső talppontok átlagos fennállási ideje t_i [ms]

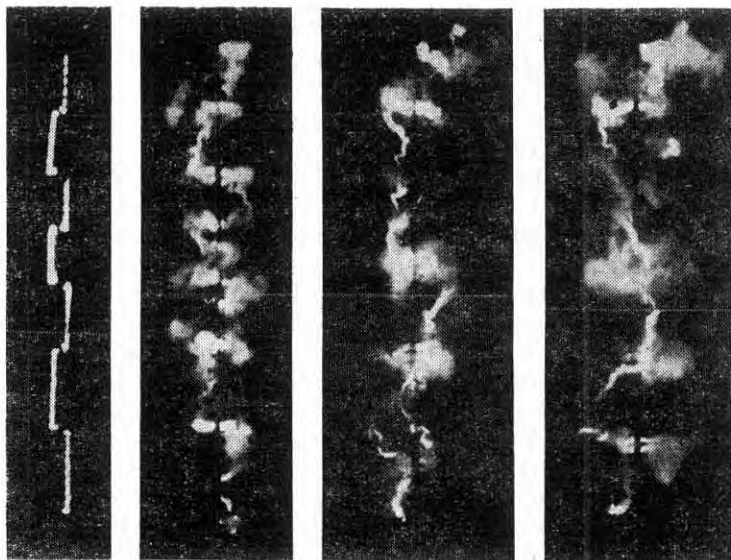
Talppont helye (szigetelőtag száma)	Vizsgálati csoport jele				
	10/SZ	10/ASZ	20/SZ	20/ASZ	25/FSZ
38.	49	40	29	25	28
32.	77	44	25	29	20
26.	40	44	23	29	18
20.	40	32	28	21	18
14.	40	31	27	26	20
8.	45	36	28	26	14
$\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 t_i$	49	38	27	26	20

A 2. táblázat utolsó sorában az egyes kikényszerített helyek átlagos talppont-fennállási idejét valamennyi helyre, vagyis az egész láncre átlagolva láthatjuk. Feltűnő, hogy itt sem az áramtól, sem az áramköri kialakítástól való függés nem olyan erőteljes, mint a maximális talpponti idők esetében (6. ábra). Ennek az oka feltehetően a következő. Az ív begyújtása utáni állapotban az egyes talpponti helyek között égő ívoszlop szakaszok

hatnak egymásra: a közeli (egymás alatti) ívszakaszok viszonylag könnyen egyesülnek függetlenül minden egyéb hatástól. A legutolsó talppontpár esetében már nincsenek egymás alatt ívszakaszok, a két átellenben égő ívoszlop rész közötti átütéshez ezeknek az ívszakaszoknak egymáshoz közeli síkba fordulása szükséges.

Az utolsó közbenső talppontpár esetében (t_{\max}) tehát tisztábban jelentkezik az áram nagyságának (ionozottság) és az áramköri elrendezésnek a hatása.

A 7. ábrán a 750 kV-os szigetelőláncon végrehajtott 3. számú kapcsolás (10 kA szimmetrikus áramkörben) néhány jellemző filmkockáját mutatjuk be. Az 1. ms-ban készült felvétel az ív begyújtását mutatja, átváltási pontok az alulról számított 8., 16., 22., 28., és 33. és 38. tagoknál voltak kiképezve. A 20. ms-ban készült felvételen a 8., 16., 21. és 23. (a két utóbbi paralel), 28., 32. és 33. (a két utóbbi paralel) és a 38. tagon égő közbenső ívtalppontpárok láthatók. Megfigyelhető továbbá, hogy alul az 1. tag alatti bunkón és az ívterelő szerelvényen paralel összesen 3 ívtalppont ég. A 63. ms-ban készült felvételeken már csak a 16. és 38. tagokon ég a begyújtási helyen ívtalppont, a 24. és 25. tagokon paralel égő talppontok a 23. tagon égőből később alakultak ki. Látható továbbá, hogy a 44. tagon égő és a vaskeretre kiugrott felső ívtalppont paralel ég. A 96. ms-ban készült felvételen már csak a 38. tagon ég a begyújtási helyen ívtalppontpár, ez majd csak a 163. ms-ban szűnik meg. A 6. és 7. tagon paralel égő ívtalppontok az ív mozgása során később keletkeztek átütéssel. A 3. felvételhez hasonlóan a 44. tagon égő és a vaskeretre kiugrott felső ívtalppont stabilan paralel ég.



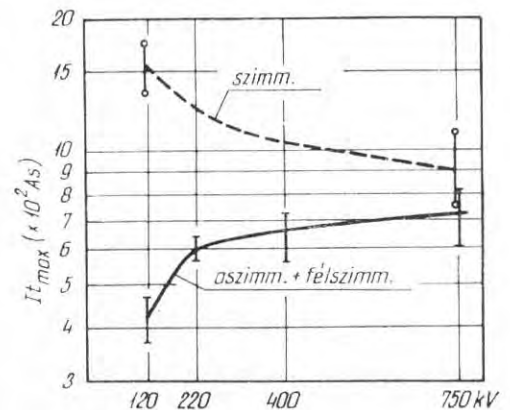
1. ms

20. ms

63. ms

96. ms

9-52-7



9-52-8

8. ábra. A szigetelő ív okozta igénybevételre jellemző $I_{t,\max}$ szorzat a feszültség szint függvényében szimmetrikus és aszimmetrikus áramköri elrendezés esetén

7. ábra. 750 kV-os szigetelőláncon végrehajtott vizsgálat néhány jellemző filmkockája (3. kapcsolás, $I = 10$ kA, szimmetrikus áramkör)

A 6. ábra eloszlásfüggvényeit a 120, 220 és 400 kV feszültségű láncokon végrehajtott ívállósági vizsgálatok eredményeivel [1; 2] egybevetve a következőket állapíthatjuk meg:

- Aszimmetrikus áramkörben a t_{\max} idő, pontosabban mondva: t_{\max} várható értéke, a lánc hosszával együtt egy határig nő. Ennek az az oka, hogy az ívet a szigetelőtől eltávolítani igyekvő elektrodinamikusan hatás az áramvezetők távolsága miatt a hosszabb láncnál kisebb. Konkrétan 120 kV-on a legkisebb t_{\max} értéke, 220, 400 és 750 kV-on 120 kV-hoz képest nagyobb, de egymáshoz képest már csökkenő a különbség.
- A t_{\max} idő teljesen szimmetrikus esetben a rövidebb láncon nagyobb mint a hosszabb láncon, mivel az előző esetben az áramvezetők közelsége miatt nagyobb az ívet a szigetelőre rákényszerítő elektrodinamikusan hatás.

Az összefüggéseket a 8. ábrán szemléltettük. Az ábrához a következő megjegyzéseket kell fűzünk.

A szigetelő ív okozta igénybevételére jellemző I_{\max} szorzat egy feszültség szinten jó közelítéssel állandónak vehető, így az I és t_{\max} összefüggést log-log skálában ábrázoló egyenes helyett elegendő egyetlen pont ábrázolása is az I_{\max} -ot és a feszültség szintet mint koordinátákat tartalmazó koordináta rendszerben. A 400 és 750 kV-os feszültség szinten az aszimmetrikus esetekkel együtt ábrázoltuk a hozzájuk közel álló félszimmetrikus eseteket is.

A 750 kV-os lánchosszra az is jellemző, hogy a kikényszerített talppontok megszűnte után új talppont a 400 kV-hoz képest [2] kisebb számban keletkezik. Ez minden bizonnyal azzal magyarázható, hogy a 750 kV-nál az ívnek a szigetelőtől való, a 400 kV-os hosszhoz viszonyítva azonos relatív eltávolodásához kb. kétszeres abszolút eltávolodás tartozik.

A rövidebb nagyfeszültségű láncokon végzett vizsgálatokhoz képest egy további változást jelent, hogy a 750 kV-os láncon gyakran lehetett tapasztalni stabilan paralel égő, hosszú, több méteres ívcatornát. A 9. ábra felvétele (5. kapcsolás, 10 kA, szimmetrikus áramkör), a szigetelőlánc felső feléről a 84. ms-ban készült. A felvételeken a kb. 4 m hosszú párhuzamos ívcatornák láthatók.

Az ívnek a felső sapkán történő mozgását a következők jellemzik. Az ív 200...300 ms ideig a begyújtási helyen ég. Még a begyújtási helyen való égés folyamán az ívoszlop és a szomszédos felső tag, ill. a távvezeték oszlopot leképző vasrács között átütés jön létre. Az így kialakuló új talppont és a begyújtási hely talppontja sokszor 50...100 ms-ig is paralel ég (1. a 7. ábra felvételét). A szomszédos felső tagon, attól függően, hogy az a begyújtási helyhez képest abban az



9. ábra. A 750 kV-os láncon égő stabil, párhuzamos, több méteres ívcatornák (5. kapcsolás, 10 kA, szimmetrikus áramkör, 84. ms)



10. ábra. Az ívterelő szerelvényen befelé forduló, a 2., 3., 4. és 5. tagra kb. 130 ms hosszan ráfújó plazmakifújás (13. kapcsolás, 18,5 kA, szimmetrikus áramkör)

irányban van-e, amely felé az ívet az elektrodinamikusan erő kényszeríteni akarja, illetve ellenkező irányban, vagy éppen a szimmetrikus elvezetés miatt az elektrodinamikusan erők elhanyagolhatók, az ív különböző ideig ég ($t = 80...390$ ms). A vaskeleten az ív átlag 200 ms-ig tartózkodott. A vaskeleten való hosszas tartózkodás alátámasztja a távvezetékoszlop leképzésének a fontosságát.

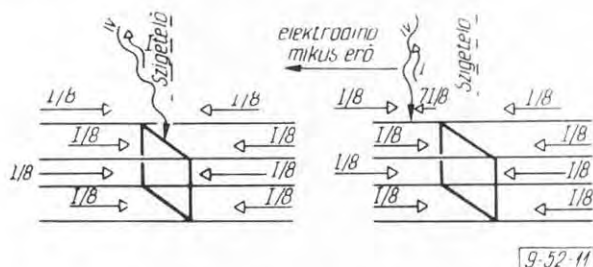
A felső sapkákon a hosszú talpponti idők okozta igénybevételt enyhíti az a körülmény, hogy a tagok üvegszigetelőinek felső felülete sima, rajta mintegy „elsiklik” az ív és a tag ernyő alatti részén égő ívhez képest lényegesen kisebb igénybevételt okoz.

A legelső tag alatt már veszélyesebb a hosszabb ideig égő ív. Itt fontos szerepet kell az ívterelő szerelvénynek betölteni. A szigetelő tagok védelmén túlmenően a sodronyt is védenie kell a ráugró ívtől. Az alkalmazott ívterelő szerelvény feladatainak nem tesz maradéktalanul eleget. Az ív több

esetben is 150 ms körüli időig a begyújtási helyen (tehát az egyik alsó tag alatt) égett. Az ív nehezen ugrik ki az ívterelőre, az ívterelőről gyakran a láncra irányul a plazmakifújás, az ív sokszor visszamegy valamelyik alsó tag fémszerelvényére, ahol veszélyes igénybevételeket okoz.

A 10. ábra felvételén (13. kapcsolás, 18,5 kA, szimmetrikus áramkör) az ívterelő szerelvényen égő és befelé forduló, a 2., 3., 4. és 5. tagra kb. 130 ms hosszon ráfújó plazmakifújás látható. A kapcsolás után a fenti tagokon sérülés volt tapasztalható.

Az aszimmetrikus és félszimmetrikus elrendezésekben az ív igen gyakran a sodronyra ugrik, ahol a keletkező és megszűnő talppontok révén az ív a szigetelőtől távolodó ugrásszerű mozgást végez. Az alsó ívtalppont sodronyon való tartózkodásának összideje egyes kapcsolásoknál elérte a 150–200 ms-ot is. A sodronyra kiugró ív megváltoztatja a sodronyköteg 4 szálában az árameloszlást. Az újonnan kialakuló árameloszlás az ívet a szigetelőtől távolodni kényszeríti, ezáltal megnehezíti az ívterelőre való visszajutását (l. 11. ábra).



11. ábra. Az árameloszlás megváltozása 4 kötegű sodronyban az ívtalppont sodronyra való kiugrása esetén

4. A tapasztalt sérülések, a PSZ – 12A típusú szigetelők ivállósága

A vizsgálatok során biztosítottuk, hogy az íves zárlatok mindig új vagy kevésbé sérült szigetelőtagokból felépülő láncokat vegyenek igénybe. A 10/SZ és 10/ASZ sorozatot egyetlen új kettős láncon hajtottuk végre. Ugyanez volt a helyzet a 20/SZ és 20/ASZ sorozatnál, ahol az előző 2 sorozat befejeztével valamennyi szigetelőtagot és az ívterelő szerelvényeket kicseréltük. A 25/FSZ sorozat előtt a kettős láncon egyikét és az ívterelőket újra cseréltük, a másik láncon pedig csak a sérült tagokat cseréltük ki. A vizsgálatok folyamán a törött, ill. erősen sérült tagokat többnyire azonnal cseréltük.

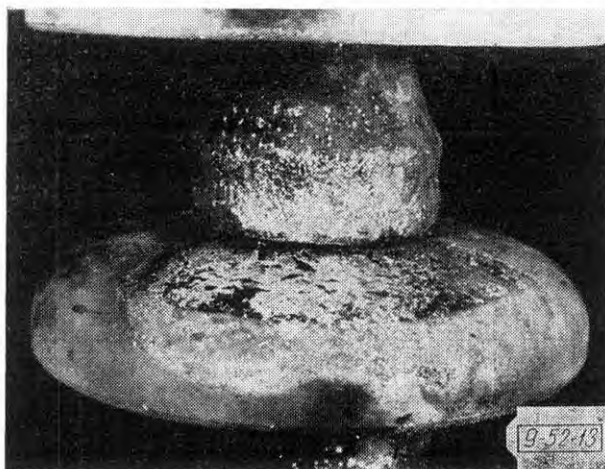
A zárlatokat a kettős láncon váltakoztatva, hol az egyik, hol pedig a másikon hoztuk létre, hogy a halmozódó igénybevételeket ezáltal is csökkentjük.

Az üvegszigetelők ivállósága kitűnőnek bizonyult. A sérülések túlnyomó része csak egy vékony felületi réteg megpörköléséből, lehámlásából állt.

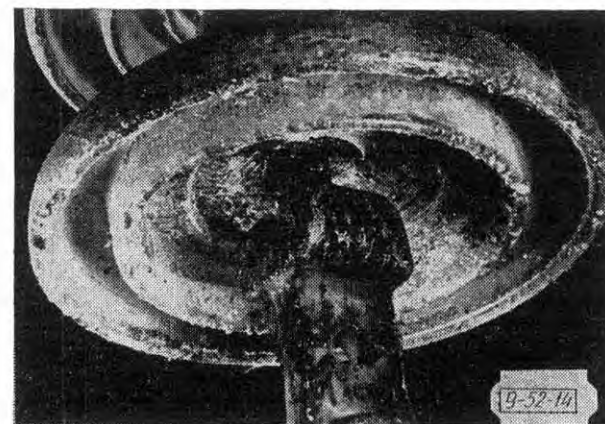
Példaképpen a 12. ábra felvételén az első 10 kA-es kapcsolásnál fellépő közbenső talppont okozta jellegzetes felületi pörkölést mutatjuk be.



12. ábra. 10 kA-es közbenső talppont okozta jellegzetes felületi pörkölődés (1. kapcsolás, szimmetrikus áramkör)



13. ábra. 5 db 18,5 kA-es kapcsolás (20/ASZ sorozat) által okozott felületi sérülés a begyújtási helyen ($\sum t_{\max} = 104$ ms)



14. ábra. 5 db 18,5 kA-es kapcsolás (20/ASZ sorozat) által okozott sérülés a legalsó tagon ($\sum t = 140$ ms)

A 13. ábrán 5 db 18,5 kA-es (20/ASZ sorozat) zárlat hatására a 20. tagon elszenvedett halmozódott felületi sérülést láthatunk. A talpponti idők összege 104 ms volt. Ugyancsak e sorozat után a legalsó tagot láthatjuk alulról a 14. ábrán. Az ívtalppont összegezett égési ideje 140 ms volt. A 25/FSZ sorozat után a legfelső tagot láthatjuk a 15. ábrán. A 4 db 25 kA-es ívtalppont összesen 800 ms-ig égett a begyújtási helyen.

A szigetelők kitűnő ívállóságát bizonyítja, hogy a 27 zárathoz tartozó 378 kikényszerített talppont ellenére csupán 6 tag törése fordult elő.

Az első 10 kA-es zárlat után eltört a begyújtási helyen levő alsó sapka üvegernyője. A 20/SZ sorozatban a 16. kapcsolásnál, tehát 4 db 18,5 kA-es íves zárlat hatására (összegezett talpponti idő: 1138 ms) letörött a felső sapka ernyője a begyújtási helyen. A 20/ASZ sorozatban a 21. kapcsolásnál (összegezett talpponti idő: 1730 ms) szintén a felső sapka ernyője törött le. A harmadik 10 kA-es kapcsolásnál (10/SZ sorozat) a 39. tag ernyője tört le a kikényszerített talppont helyén (közbenő talppont fennállási ideje 163 ms volt).

Eltört továbbá a 14. (20/SZ sorozat 2. kapcsolása) kapcsolásnál a 12. sapka, a 21. (20/ASZ sorozat 3. kapcsolása) kapcsolásnál a 19. sapka. Az utóbbi két sérülésre egyaránt az erősebb talpponti nyomok hiánya a jellemző. E két törés közül egyik sem a kikényszerített talppontnál volt. A sérült 19. sapkát a 16. ábra mutatja. A törés feltehetően az üvegben levő feszültségre (öntörés) vezethető vissza, nem elsősorban az ív okozta igénybevétellel magyarázható.

Végül a sodronyon tapasztalt jellegzetes sérüléseket mutatjuk be. A 17. ábra a 10/SZ sorozat után megfigyelt beégéseket mutatja. Az égést szenvedett elemi szálak ugyan nem szakadtak el, de keresztmetszetük jelentősen lecsökkent.

5. A szigetelők egyéb vizsgálatai az ívállósági vizsgálatok után

A PSZ-12A edzett üvegszigetelők beépítési magassága 138 mm, az ernyők átmérője 260 mm, garantált mechanikai törőerő 120 kN.

Az ívállósági vizsgálatokat követően a szigetelők gondos szemrevételezésére került sor, majd ezután végeztük a hőlékési, mechanikai és villamos szilárdsági vizsgálatokat.

A szemrevételezés során a következő elváltozások voltak megfigyelhetők: az ív közvetlen hatásának helyein a szigetelő üvegbordáinak néhol kisebb sérülése, letörése, a felület lehámlása 5–30 mm átmérőjű és 0,2...0,3 mm vastagságú pikkelyek formájában, valamint a szigetelő fémrészeinek felületén az ív talppontjainak nyomai láthatók (lásd a 13., 14., 15. ábrát).

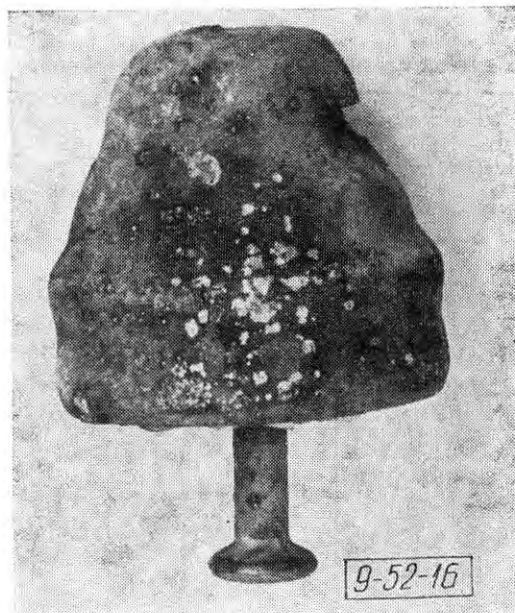
Az ív által elgőzöltetett fémrészek az üveg felületén csapódtak le. Különösen sok fémlécsapódás volt megfigyelhető a lepattogzott üvegpikkelyeken.

Az üvegrészek felületein több helyütt szerteágazó mikropedések keletkeztek. E repedések elhelyezkedése és az ív mozgása között nem sikerült valamiféle konkrét kapcsolatot felfedezni.

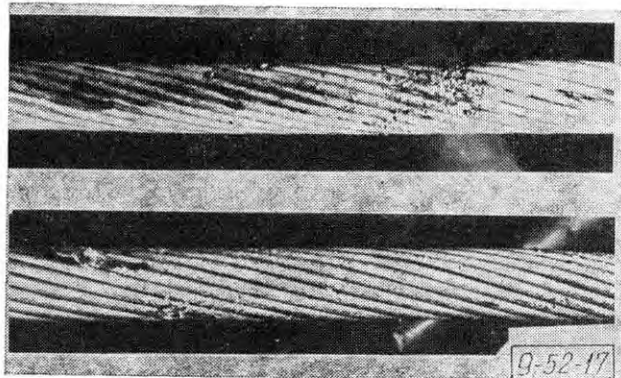
Az ív által okozott felületi üvegréteg lehámlások átvizsgálása nem mutatta az üvegszerkezet kívülről észrevehető elváltozását. Sőt, a később elvégzett kémiai analízisek és elektro-mikroszkopikus vizsgálatok ugyancsak azt támasztották alá, hogy nem történt észrevehető kémiai vagy szerkezeti elváltozás az üvegben.



15. ábra. 4 db 25 kA-es kapcsolás (25/FSZ sorozat) által okozott sérülés a legfelső tagon ($\Sigma t = 800$ ms)



16. ábra. Az enyhe ív okozta igénybevétel miatt elsősorban az üvegben levő mechanikai feszültségre (öntörés) visszavezethető törés (21. kapcsolás, 18,5 kA, 19. tag)



17. ábra. 10/SZ sorozatnál keletkezett sérülések a sodronyra kiugró ív hatására

Az üvegrészek felületi sérülése azonban azt a következtetést teszi indokolttá, hogy a hálózaton az íves zárlatot követően a szigetelők szennyezett-

sége növekedni fog, az öntisztuló képesség romlik és következőképpen a szigetelő szennyezésállósága csökken.

24 szigetelő hőlkés vizsgálatára került sor az idevágó IEC publikációban [3] lerögzített módszerrel. A hőmérsékletesés 100 °C volt. E vizsgálat alkalmával 14 szigetelő tört el. Feltételezhető, hogy a töréseknél az üveg fent említett felületi hajszálrepedései játszottak döntő szerepet. A 100 °C értékű hőmérsékletcsökkenés a repedések továbbfejlődését váltotta ki, amely végül is az üvegrészek felületi összenyomott rétegének töréséhez vezetett.

A mechanikai vizsgálatok során egyrészt a kizárólag csak ívállósági vizsgálatnak kitett szigetelők, másrészt az ezen túlmenően a hőlkési vizsgálatot is kiállott szigetelők törőerejének a meghatározása történt meg. Az eredmények a 3. táblázatban láthatók.

3. táblázat

A PSZ-12A típusú szigetelők mechanikai szilárdsága

Próbátárgy	Vizsgált mennyiség [db]	Mechanikai törőerő			Szórási együttható [%]
		Közepes érték [kN]	Minimális érték [kN]	Maximális érték [kN]	
Szigetelők a 25/FSZ vizsgálat sorozat után	15	174	156	196	7,0
Szigetelők a 25/FSZ vizsgálat sorozat és az azt követő hőlkési vizsgálat után	14	170	147	197	16,0
Egyéb, csak ívállósági vizsgálatoknak kitett szigetelők	10	162,5	128	188	11,2
Egyéb, ívállósági és hőlkési vizsgálatoknak kitett szigetelők	10	136	126	159	7,3

A mechanikai vizsgálatok eredményeinek analízise azt mutatja, hogy a PSZ-12A szigetelők az ív ráhatása után is nagy mechanikai szilárdsággal rendelkeznek. Ez a tény közvetve alátámasztja azt a megállapítást, hogy az ív okozta sérülések tisztán felületi jellegűek: 29 szigetelőből csak 2-nél történt az üvegrész törése, 27-nél pedig az armatúra törött.

A maradék szigetelők villamos szilárdsági vizsgálatait azt mutatták, hogy ezek villamos szilárdságának koordinálása ipari frekvenciájú feszültségen és szabványos 1,2/50 μs-os lökhullámú feszültségen egyaránt jó: a vizsgált szigetelőknek csak 5%-a ütött át a fejen belül, a többinél pedig átívelés történt az üveg felületén. Ez az eredmény közel áll a [4]-ben közölt eredményekhez.

6. A hosszú, nagyáramú ívek feszültséggradiense

Valamennyi 750 kV-os kapcsolás alatt mértük az ívfeszültséget. Egy jellegzetes oszcillogramot a 18. ábra mutat. Az ívfeszültség jellemzőit a 4. táblázatban foglaltuk össze.

4. táblázat

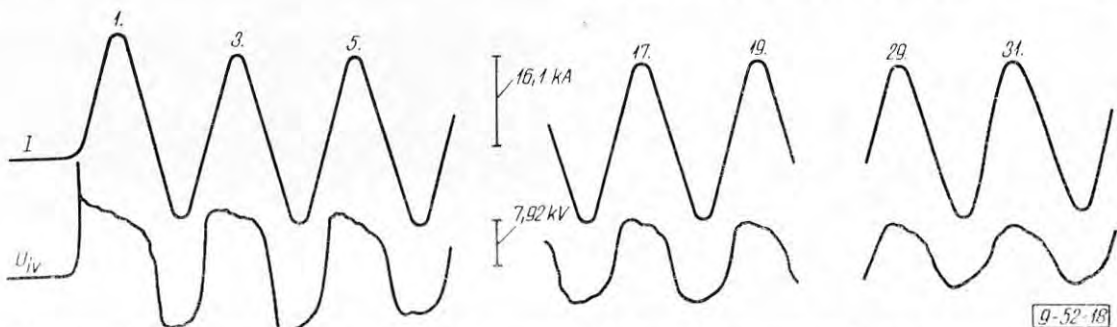
Az ívfeszültség jellemzői

$\sqrt{2} I$ [kA]	$U^* = U_{iv1}/l_{min}$ [V/cm]	U_{iv1} [kV]	U_{iv2}/U_{iv1}	U_{iv3}/U_{iv1}
14	6,62	4,04	2,12	1,1
26	6,56	4,0	2,18	1,29
36	7,98	4,87	1,8	1,18

Jelmagyarázat:

- U_{iv1} – az áramcsúc pillanatában mért minimális ívfeszültség;
- U_{iv2} – az áramcsúc pillanatában mért maximális ívfeszültség (az első félperiódust a begyújtó fémszál elolvadásának pillanatában keletkező túlfeszültség miatt nem vesszük figyelembe);
- U_{iv3} – az ívfeszültség maximális értéke a minimális ívfeszültségű félperiódusban (ahol U_{iv1} fellép);
- $l_{min} = 610$ cm – a 750 kV-os szigetelőlánc minimális átütési távolsága a felső tag fémsapkája és az alsó ívvédő szerelvény felső pontjai között mérve.

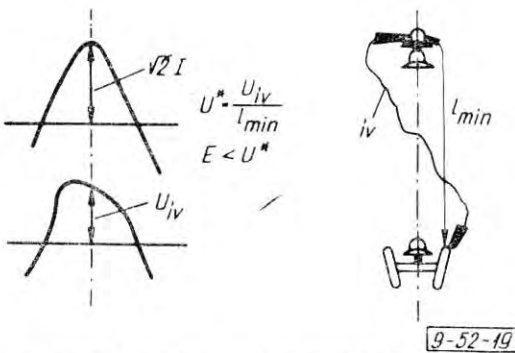
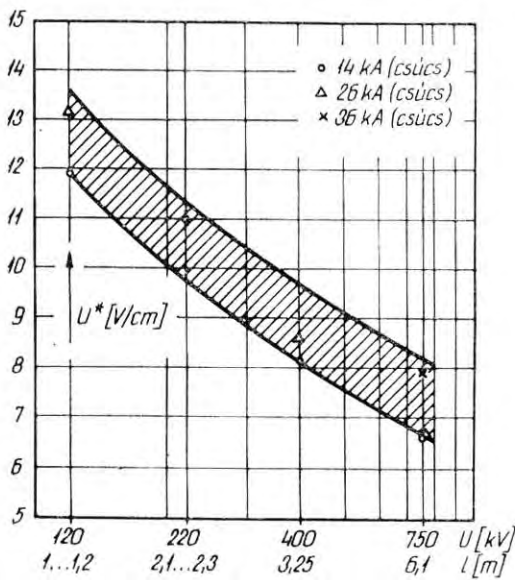
Az ív tényleges feszültséggradiense $E < U^*$, hiszen az ív tényleges hossza $l > l_{min}$. A 4. táblázat az irodalomból ismert [5, 6, 7, 8, 9], levegőben, szabadon égő ívekre vonatkozó feszültséggradiensekhez képest feltűnően kis értékeket ad. [5] a 100 A ... 20 kA-es szabadonégő ívekre 15 V/cm körüli értéket közöl. [7] több különböző szerzőre hivatkozva az 1000 A ... 30 kA csúcserékű váltakozóáramú ívekre $E = 15 \dots 18$ V/cm értéket ad. [8] 2 kA-ig terjedő, 7–12 m hosszúságú ívek-



18. ábra. Az ívfeszültség jellegzetes szakaszai (az időt a számozott félperiódusok mutatják). (3. kapcsolás, 10 kA, szimmetrikus áramkör)

kel végzett vizsgálatokról számol be. Itt az ív égésének feltételei lényegesen különböznek a 750 kV-os lánccal vizsgálatának feltételeitől: az ív közbelső talppontokat nem tartalmazott és jelentős hosszúságú vízszintes szakasszal rendelkezett. Az ívfeszültség gradiense a feszültség maximális értékénél, az első félperiódusban határozták meg. Ha a 750 kV-os láncon is ugyanakkor határozzuk meg az ívgradienst, akkor, bár ugyancsak 15 V/cm körüli értéket kapunk, azonban az utána következő félperiódusokban [8] szerint a gradiens az esetek többségében nőtt, míg a 750 kV-os vizsgálataink során az időbeli változás egészen más jellegű.

[9]-ben 1–20 kA-es, 30–120 cm-es ívek vizsgálatára került sor. A kapott eredmények megfelelnek a 19. ábra 120 kV-ra vonatkozó értékeinek.



19. ábra. Az ív feszültséggradiensének ($U^* > E$) értéke a szigetelőlánc hossza és az áram függvényében

Az ívfeszültség zárlat folyamán történő változását oszcillogramjaink kiértékelése szerint minden esetben 3 jól elkülöníthető szakasz jellemzi.

Az első szakasz a legelső félperiódus. Itt a begyújtó fémszál biztosítóbetétszerű gyors elégésével együttjáró meredek feszültségfelfutást olyan

ívfeszültség követ, amelynek akár legnagyobb pillanatértékét, akár az áramcsúcsához tartozó értékét tekintjük is, meghaladja a később előforduló megfelelő értékeket (l. 18. ábra). A második szakasz a közbelső 12 talppont fokozatos kiiktatódásával esik egybe. Ezt a szakaszt az jellemzi, hogy az ívfeszültség félperiódusról félperiódusra elég jó egyezéssel úgy csökken, ahogyan a közbelső talppontok kiiktatódnak (az oszcillogramokat a gyorsfilmekkel egybevetve állapítható meg ez a tény).

A 4. táblázatban feltüntetett, a zárlati áram csúcserékénél mért U_{iv1} ívfeszültség minimuma a 3. szakaszban, $\sqrt{2}I = 14, 26, \text{ ill. } 36 \text{ kA}$ esetén a 34., 25., ill. 17. félperiódusban található. Az ívfeszültség csökkenésére jellemző az U_{iv2}/U_{iv1} 4. táblázatban megadott értéke.

Az ívfeszültség második szakaszában a görbe szögletesebb, közel trapéz alakú, az ívfeszültség maximális értéke az áram nullaátmenetétől $\varphi = 30 \dots 45^\circ$ -ra van. Az ívfeszültség harmadik szakaszában a görbealak sima; hirtelen, gyors változásoktól mentes, csaknem szinuszos. Az ívfeszültség maximális értéke az áram nullaátmenetétől $\varphi = 55 \dots 70^\circ$ -ra van. Jellemző paraméter a 4. táblázatban feltüntetett U_{iv3}/U_{iv1} .

A korábban 120, 220 és 400 kV-os szigetelőláncokon mért, az ívfeszültség-gradienst felülről korlátozó U^* értékeket a 750 kV-os eredményekkel együtt a 19. ábrán tüntettük fel a feszültség-szint (hossz) és az áram függvényében. Szembetűnő és nehezen magyarázható a hosszról való függés.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a hosszú, nagyáramú szabadonégő ívek viselkedése még nem eléggé tisztázott, további rendszeres vizsgálatokra lenne szükség.

IRODALOM

- [1] KERTÉSZ, V. – MIHÁLKOVICS, T.: Power arcs occurring on H. V. insulators in networks and in laboratories. CIGRE 1978. 22–02, Paris.
- [2] KAROLAK, J. – KERTÉSZ, V. – MIHÁLKOVICS, T. – WIECZOREK, S.: Nagyfeszültségű szigetelőláncok ivállóságának vizsgálata. Elektrotechnika 71 (1978) 221–230.
- [3] IEC Publ. 383/1976.: Tests on insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V.
- [4] ARTEMEV, A. Sz. – TIHODEEV, N. N.: Raszceplenija girland sz povrezsennimi izoljatorami. Elektricseszkije sztancii, 1976. No. 6.
- [5] MAJKOPAR, A. Sz.: Dugovúe zamükianija na linijah elektroperedaci. Moskva, Energija, 1965.
- [6] BUTKEVICS, G. V.: Dugovúe proceszszü pri kommutacii elektricseszkih cepej. Moskva, Vüszsaja skola, 1967.
- [7] ZALESZSKIJ, A. M.: Elektricseszskaja duga otkljucsenija. Moskva – Leningrád, Goszenergoizdat, 1963.
- [8] BURGSDORF, V. V.: Otkrütüe elektricseszskie dugi bolsoj moscsnoszti. Elektricseszstvo, 1948. No. 3.
- [9] STROM, A. P.: Long 60–Cycle Arcs in Air. Electrical Engineering, 1946. No.3.