

## A szél hatása a nagyfeszültségű szigetelőláncok ívállósági vizsgálatánál

MIHÁLKOVICS TIBOR, Budapest\*

DK 551.55:621.315.624.027.3:621.317.333.6

A nagyfeszültségű hálózaton szennyezett körülmények között, az üzemi feszültség vagy kapcsolási túlfeszültség hatására bekövetkező átívelések a szigetelőlánc jelentős sérülését okozhatják. Az ebből eredő üzemzavarok elkerülése érdekében nagy jelentősége van a szigetelők és ívvédő szerelvényeik ívállósági vizsgálatának.

A külföldi és hazai gyakorlatban eddig alkalmazott ívállósági vizsgálati módszerrel kapcsolatban előzetes kísérleteink alapján számos megoldandó kérdés merült fel. A problémakör mélyebb kikutatása céljából 1970-ben a Villamosenergetikai Kutató Intézet zárlati próbaállomásán a Nehézipari Minisztérium megbízásából 3 éves kutatás indult, amelynek tárgya a szabadvezeteki szennyezett tartószigetelők ívállósági vizsgálatának módszere [1, 2].

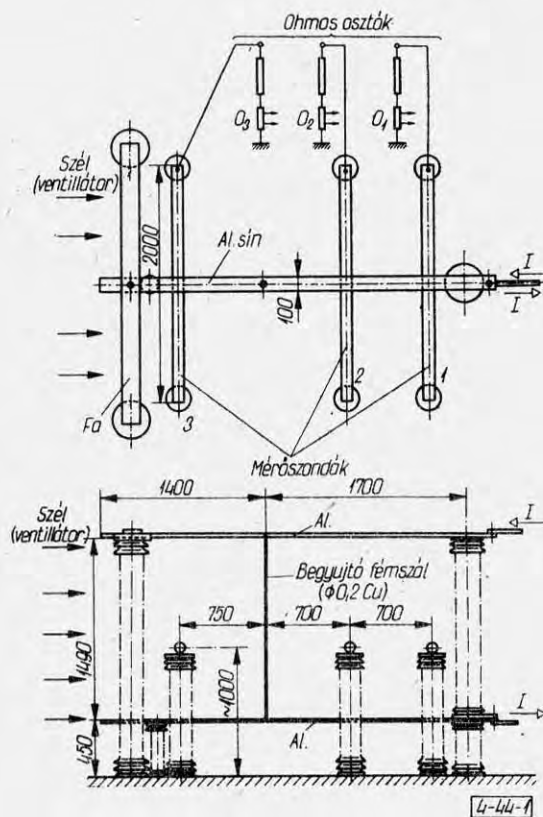
Már a 120 kV-os, 7 db egysapkás (ES) tagból álló szigetelőláncon végrehajtott első 3 kA-es kapcsolások nagysebességű (1000 felvétel/s) filmfelvételei felhívták a figyelmet arra, hogy a szél befolyásolja a kialakult nagyáramú ívek mozgását. A filmek kiértékelésekor megállapítható volt, hogy már enyhe ( $v = 3 \dots 5$  m/s sebességű) – az elektrodinamikus erőhatással ellentétes irányú – szelek esetében is a nagyáramú részívek síkja a szél irányába fordult be és az ív az elektrodinamikus erőhatással szemben, a szél irányába tágult.

Ezek a megfigyelések szükségessé tették egyrészt azt, hogy a további vizsgálatokat szélszélben (illetve legfeljebb  $v = 1 \dots 1,5$  m/s szélben) folytassuk le. Ez felel meg ugyanis a valóságos szennyezett átívelés körülményeinek, hiszen a ködös időben bekövetkező szennyezett átívelés létrejöttékor általában szélszél van. Másrészt szükségessé vált annak tisztázása, hogy a szél hogyan befolyásolja a hosszú, szabadon égő, nagyáramú villamos ívek mozgását.

### 1. A szél villamos ívek mozgására gyakorolt hatásának mérése

Az irodalom általában a légnymósos és a mágneses fúvású megszakítók szemszögéből vizsgálja az ívek mozgását, kevés publikáció foglalkozik az 1 méter feletti hosszúságú, szabadon égő, nagyáramú (3... 20 kA) ívek mozgásával a szélesebbé függvényében.

A [3] szerzőjének számításai szerint az 1. ábra szerinti elrendezéshez hasonló áramkörben pl. 5 kA



1. ábra. Elrendezés a szél ívre gyakorolt hatásának vizsgálatához

áram és 5 m/s szélesebbé esetén az ívre ható átlagos elektrodinamikus erő és a szél okozta erőhatás viszonya 82, tehát a szél hatása gyakorlatilag elhanyagolható.

A [4] szerzői a CESI laboratóriumában 145-, 245- és 420 kV-os szigetelőláncokon lefolytatott ívállósági vizsgálataikról számolnak be. Véleményük szerint az ívre ható különféle erők közül az elektrodinamikus erőnek van nagy jelentősége, a termikus felhajtóerő és a szél hatása kismértékű.

Az [5] szerzői utalnak arra, hogy a nagyfeszültségű szigetelőláncokon végrehajtott ívállósági vizsgálatoknál jegyezték a szél sebességét és irányát. A következőket írják: „Mivel a szélesebbé 3 m/s alatt volt, a rövid időtartamú nagyáramú íveket a szél ritkán fújta el.”

A [6] szerzői a 120- és 220 kV-os hálózat szigetelőinek termikus igénybevételét számolják. Számításaik közben megállapítják, hogy az ívhossz  $t$  idő múlva:

$$L = L_{\min}(1 + C \nu t)$$

\* MIHÁLKOVICS TIBOR okl. villamosmérnök, a Villamosenergetikai Kutató Intézet tudományos munkatársa (Budapest XV., Cserevka M. u. 99-101.)

ahol  $L_{min}$  – a legkisebb ívhossz ( $t = 0$ )  
 $C$  – állandó  
 $v$  – szélesebbesség  
 $t$  – idő

Véleményük szerint tehát az ív a széllal együtt mozog.

Az egymásnak ellentmondó irodalmi megállapítások, valamint a szigetelőláncok ívállósági vizsgálatainál készült nagysebességű filmjeink kiértékeléséből származó az a megfigyelésünk, amely szerint a szél erősen befolyásolja a nagyáramú

villamos ívek mozgását, szükségessé tették, hogy a kérdés tisztázása érdekében vizsgálatorozatot végezzünk.

A szél ív mozgására gyakorolt befolyásának vizsgálatához az 1. ábra elrendezésében nagyszámú kapcsolást hajtottunk végre. A két egymástól 1490 mm-re elhelyezett Al sin között begyűjtött nagyáramú ívet az elektrodinamikusan erőhatás balra, az  $\varnothing 0,2$  Cu begyűjtő száltól kb. 12 méterre, szemben elhelyezett ventilátor által keltett szél pedig jobbra igyekszik elmozdítani. A két Al sin távolsága közelítőleg a 120 kV-os szí-

1. táblázat

A szél befolyása az ívállósági vizsgálatokra

Kapcsolás sorszáma	Áram [kA]	Zárlati idő [ms]	Szél [m/s]	1. szondán (O <sub>1</sub> osztó) mért idő [ms]	2. szondán (O <sub>2</sub> osztó) mért idő [ms]	3. szondán (O <sub>3</sub> osztó) mért idő [ms]
1	3	500	~0	∅	∅	(140) 360
2	3	500	~0	∅	∅	(140) 360
3	3	510	~0	∅	∅	(130) 380
4	3	490	2,5–3,5	(380) 50	(80) 410	∅
5	3	500	2,5–3,5	∅	(160) 220	(360) 140
6	3	500	2,5–3,5	∅	(280) 160	(240) 260
7	3	490	2–3	∅	(80) 300 (90) 20	(140) 350
8	3	500	2–3	(460) 40	(100) 400	∅
9	3	510	2,5–3,5	∅	(90) 420	(140) 370
10	3	500	4,5–6	(180) 320	(70) 430	∅
11	3	490	4,5–6	(230) 130 (50) 80	(70) 420	(410) 80
12	3	490	4,5–6	(280) 210	(100) 390	(230) 260
13	3	510	8,5–10	(140) 370	(50) 220 + (70) 40 + (30) 100	∅
14	5	500	~0	∅	∅	(120) 380
15	5	500	~0	∅	∅	(70) 430
16	5	500	4,5–6	(450) 50	(45) 455	∅
17	5	500	4,5–6	(250) 250	(70) 430	(120) 180 (50) 150
18	5	500	4,5–6	(200) 160 (100) 40	(65) 435	∅
19	5	500	7–9	(200) 300	(70) 430	∅
20	5	500	7–9	(440) 60	(70) 130 (50) 250	(440) 60
21	5	500	8–9	(140) 50 (80) 230	(40) 460	∅
22	9	450	~0	∅	(110) 50	(70) 380
23	9	450	~0	∅	(70) 120	(70) 380
24	9	450	~0	∅	∅	(80) 370
25	9	450	4,5–6	∅	(120) 330	(130) 320
26	9	460	5–6	(320) 50	(75) 385	(320) 40
27	9	450	4–6	∅	(150) 80 (120) 100	(100) 350
28	9	450	4–6	(250) 50	(50) 220	(75) 375
29	9	450	8–9	(160) 290	(45) 405	(180) 270
30	9	450	8–9	(150) 300	(60) 390	(140) 100
31	9	450	8–9	(240) 210	(55) 395	(240) 210
32	9	450	10–11	(150) 300	(55) 395	∅
33	9	450	9–10	(130) 70 (220) 30	(55) 395	2 esetben 10–20
34	18	450	~0	∅	∅	(30) 420
35	18	450	~0	∅	∅	(45) 405
36	18	440	10–11	(260) 180	(50) 390	(50) 390
37	18	450	10–11	(120) 40 (200) 60	(30) 180 (60) 120	(40) 260

getelőlánc hosszának felel meg, eredményeink tehát közvetlenül alkalmazhatók a 120 kV-os láncok ivállósági vizsgálatára.

A szélesség változtatása a ventilátor fordulatszámának szabályozásával történt. A kapcsolás alatt az ív mozgását, illetve helyzetét az 1, 2 és 3 jelű, szigetelten elhelyezett mérőszondákhoz csatlakozó  $O_1$ ,  $O_2$  és  $O_3$  ohmos osztók jele mutatja; az ívvel érintkező mérőszondán feszültség jelenik meg.

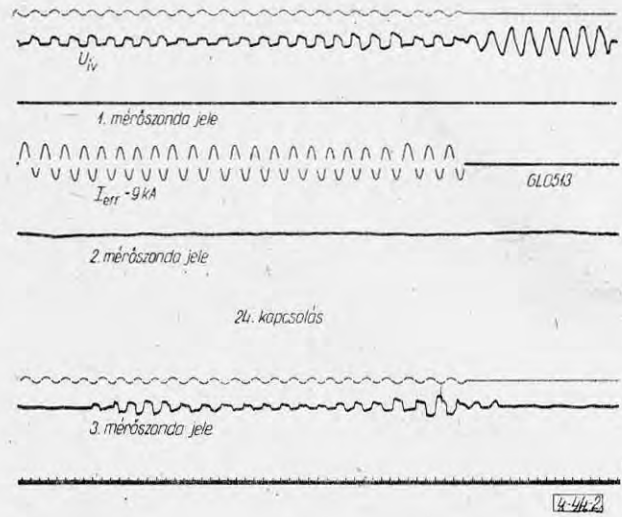
A 3, 5, 9 és 18 kA-es zárlati áram és különböző szélességek ( $v = 0 \dots 12$  m/s) mellett végrehajtott kapcsolások eredményét az 1. táblázatban foglaltuk össze. Az ív mérőszondákon való tartózkodásának idejéből megállapítható, hogy az ív hogyan, melyik irányba mozdult el. A zárójelbe tett számok a szünet-időket adják, tehát azokat az időtartamokat, amelyekben az ív nem tartózkodik a szóban forgó mérőszondán.

Három jellemző oszcillogramot mutatunk be a 2., 3. és 4. ábrákon. A 24. kapcsolásról készült, 2. ábrán bemutatott oszcillogramon látható, hogy szélcsebben a 9 kA-es ív az elektrodinamikusan erős hatására a 3. szonda felé mozdul el, az 1. és 2. mérőszondán nincs jel. A 25. kapcsolásról készült, 3. ábrán bemutatott oszcillogramon látható, hogy a 9 kA-es ív a 4,5...6 m/s sebességű szélben a 2. és 3. mérőszondák között tartózkodik, a két ellentétes erőhatás közelítőleg egyensúlyban van. A 32. kapcsolásról készült, 4. ábrán bemutatott oszcillogramon látható, hogy a 9 kA-es ív a 10–11 m/s sebességű szélben az elektrodinamikusan erős hatás mellett a szél irányában mozdult el, csak az 1. és 2. mérőszondákon van jel.

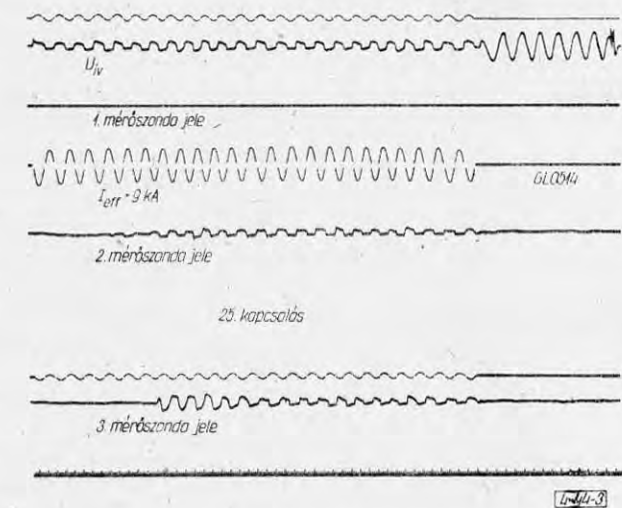
A 3., 4. ábrán és az 1. táblázat más kapcsolásainál is látható, hogy egyidejűleg két mérőszondán is lehet jel. Ennek magyarázata az, hogy a nagyáramú ív által erősen ionozott térben az ohmos osztók és az ív között átütés jön létre.

Az 1. táblázatból látható, hogy azonos áram és szélesség esetén is a mérőszondákon mért időben, tehát az ív mozgásában jelentős szórás van. Ez azonban természetes, hiszen a két vizsgált hatás, az elektrodinamikusan erős hatás és a szél hatása mellett jelentkezik a harmadik fontos tényező, a plazmakifújás, a talppont „odragadásának” hatása is. A szél (illetve elektrodinamikusan erős hatás) elsősorban az ív középső szakaszára hat, az ív ezen része a szél (illetve a hurok) irányába mozdul el. Az ívoszlop talppontokhoz közeli szakasza a fémen rögzülő talppontokból kiinduló plazmakifújásban halad (lásd részletesen [7]-ben), így a talppont „ugrása” követi, illetve mintegy kíséri az ív talpponttól távolabbi részeinek mozgását.

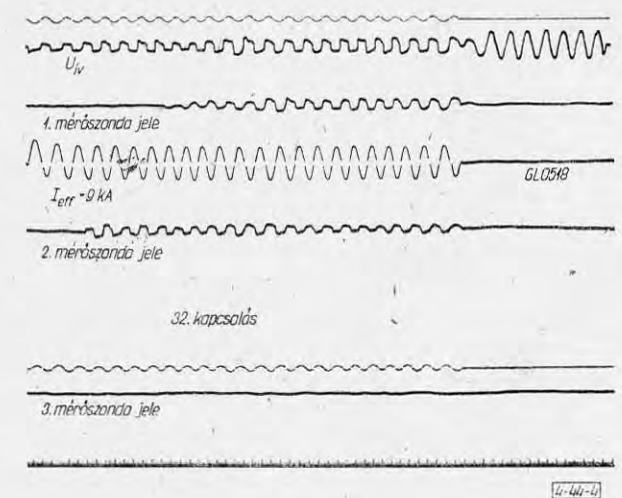
A plazmakifújás, illetve a talpponti hatás ellenére mérési eredményeink alkalmasak a szél ívek mozgására gyakorolt befolyásának vizsgálatára és segítségükkel megállapíthatóak az ivállósági vizsgálatoknál megengedhető maximális szélességek.



2. ábra



3. ábra



4. ábra



Az 1. táblázat szerinti szélsébség-értékeket a felső sánnál mértük. Az alsó sánnál ennek kb. 75%-a, középen kb. 90%-a mérhető. Ezzel magyarázható az a megfigyelés, hogy – főként azon esetekben, amikor az ívre ható elektrodinamikusan erőhatás és az ellentett irányú szél hatása kiegyenlíti egymást – a felső ívtalppont a 2. és 1., az alsó ívtalppont

pedig a 3. mérőszonda felé mozdult el. Erre utalnak az 1. táblázat olyan esetei, amikor egyidejűleg mind a három mérőszondán van jel.

Az 1. táblázat alapján a 2. táblázatban foglaltuk össze az ív mérőszondákon való átlagos tartózkodási idejét a zárlati áram és a szélsébség függvényében.

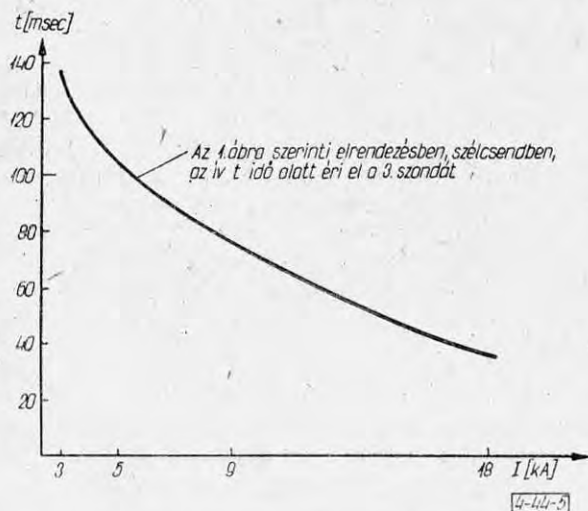
Az ív mérőszondákon való átlagos tartózkodási ideje

2. táblázat

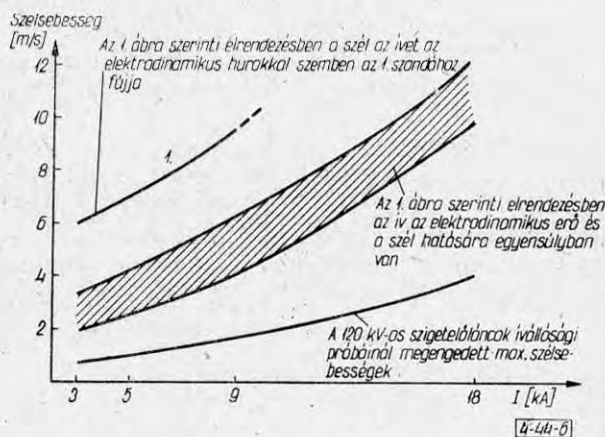
Zárlati áram [kA]	Szél [m/s]	1. szondán [ms]	2. szondán [ms]	3. szondán [ms]	Figyelembe vett kapcsolások
3	~0	0	0	366	1 – 3
3	2,5 – 3,5	15	322	187	4 – 9
3	4,5 – 6	246	413	113	10 – 12
3	8,5 – 10	370	360	0	13
5	~0	0	0	405	14 – 15
5	4,5 – 6	167	440	110	16 – 18
5	7 – 9	213	424	20	19 – 21
9	~0	0	57	377	22 – 24
9	4 – 6	25	279	272	25 – 28
9	8 – 10	240	396	122	29 – 33
18	~0	0	0	412	34 – 35
18	10 – 11	140	345	325	36 – 37

Az 5. ábrán felrajzolt görbe annak átlagos idejét adja, hogy szélcsendben, a fémszállal begyújtott ív mennyi idő alatt éri el a 3. mérőszondát az elektrodinamikusan erő hatására.

Az ívre ható elektrodinamikusan erőhatással akkor tart egyensúlyt a szél hatása, ha a 2. és 3. mérőszondákon az ív átlagos tartózkodási ideje közel egyenlő. A 2. táblázat alapján felrajzolt egyensúlyi sávot a 6. ábra mutatja. Ugyanezen ábrán felrajzolt 1. görbe azon szélsébséget adja, amely az



5. ábra. Az 1. ábra szerinti elrendezésben, szélcsendben, az ív t(ms) idő alatt éri el a 3. szondát



6. ábra. Szél hatása az ív mozgására

elektrodinamikusan erőhatással szemben már egyértelműen elfújja az ívet. Tehát az ív a 2. és 1. mérőszondákat érinti, a 3. mérőszondán nincs vagy csak rövid ideig van jel.

A szigetelők ivállósági vizsgálatainál csak olyan szélsébségek engedhetők meg, amelyek nem befolyásolják lényegesen az ív mozgását. Ezért ajánlatos az ivállósági próbákat lehetőleg szélcsendben lefolytatni, illetve a maximálisan megengedett szélsébség értékére a 6. ábra 2. görbéjét javasoljuk.

A 120 kV-os szigetelőláncokon végrehajtott nagyszámú kapcsolás filmfelvételei igazolták, hogy 0,2–0,5 s zárlati idő esetén maximálisan ezen szélsébségek (az egyensúlyi sávba tartozó szél-

sebességek kb. 1/3-a) engedhetők meg az ívállósági próbák során.

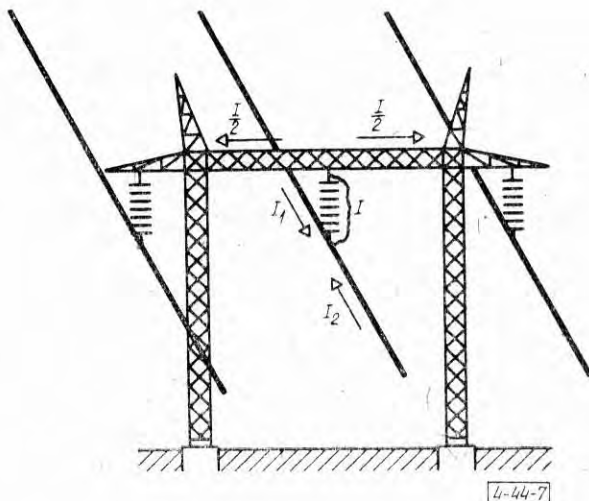
Megjegyezzük, hogy ezen szélesebbég – zárlati áram függvények az 1. ábra elrendezésére, tehát lényegében a 120 kV-os szigetelőláncok ívállósági próbáira vonatkoznak. Eredményeink azonban – a 220, illetve 400 kV-os szigetelőláncok közel 2, illetve 3-szoros hosszának figyelembevételével – extrapolálhatók a magasabb feszültségű szigetelőláncok ívállósági vizsgálataira is.

## 2. A szélesebbég hatása az ív mozgására, ha az ívre ható elektrokinamikai erőkhatások elhanyagolható

A probléma megértéséhez tekintsük a 7. ábrát. A kétoldról táplált távvezetéken fellépő egyfázisú földrövidzárlat (FN) esetén a zárlati áram a fázisvezetőn két irányból folyik ( $I_1$  és  $I_2$  áramok) az ívbe, és a két oszlopon az ív áramának közel fele-fele folyik a föld, illetve földvezető felé. Ha  $I_1 \approx I_2$ , akkor a fázisvezetőkben és a vasszerkezetben való szimmetrikus árameloszlás miatt az ívre ható elektrokinamikai erőkhatás elhanyagolható, tehát az ív mozgását (a kezdeti ívképen túlmenően) döntően a szél és a plazmakifújás hatása határozza meg.

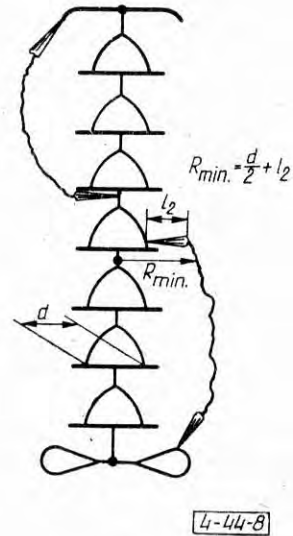
Az itt röviden bemutatott hálózati esetben fellépő ív okozta igénybevételt [1] tárgyalja részletesen. Jelen munkában csak annyiban foglalkozunk a szimmetrikus betáplálás esetével, amennyiben az ívállósági vizsgálatoknál megengedhető maximális szélesebbég meghatározása szempontjából jelentős.

Az [1] részletesen tárgyalja, hogy a szennyezett körülmények között átívelő, egy- és kétsapkás tagokból álló nagyfeszültségű szigetelőláncokon az átívelés pillanatában a részívek tagonként, egymáshoz képest véletlenszerűen eltolt síkokban égnék a palást mentén körben. A részívek ilyen vé-



7. ábra. Szimmetrikus fázis és földoldali árameloszlás

letlenszerű eloszlásának eredményeként nagy valószínűséggel jönnek létre a *közbenső fémrészekben tartósan fennálló talppontok*. Jellemző állapotot mutat a 8. ábra, a két részív egymással kb. 180°-ot zár be.



8. ábra

A közbenső talppont „odaragadása” a talppontból kiinduló plazmakifújás révén erősen megnöveli a szigetelőlánc közbenső részeinek termikus igénybevételét. Az elektrokinamikai erő és a szél hatása a részíveket egy síkba igyekszik rendezni, tehát a közbenső talppontok megszűnésének irányába hat.

Szimmetrikus betáplálás esetén, tehát ha az ívre ható elektrokinamikai erő elhanyagolható, feltételezhetjük, hogy az ív, mint a levegő magas hőmérsékletre felhevült része (ha a plazmakifújás hatásától eltekintünk) a széllal együtt mozog. A maximálisan megengedhető szélesebbég azon feltételből állapítható meg, hogy a zárlat ideje alatt az ív a szél hatására ne mozduljon el számottevően, azaz olyan mértékben, amely jelentősen befolyásolja az ívállósági vizsgálat eredményét.

Ez a 8. ábrán bemutatott állapotra vonatkozóan azt jelenti, hogy a szél hatására a részívek síkjai ne kerüljenek az erősen ionozott térben közel egymáshoz, mert a részívek közötti átütés eredményeként a közbenső talppontok megszűnnek; a szigetelőlánc igénybevétele a valóságos viszonyokhoz képest lecsökken.

Ha a részívek síkjában maximálisan  $\varphi$  szögelfordulást engedünk meg, akkor az (1) képlet alapján számítható közelítőleg a maximálisan megengedett szélesebbég

$$R_{\min} \varphi \approx vt \quad (1)$$

ahol  $v$  a megengedhető szélesebbég;  $t$  a zárlat ideje;  $\varphi$  a megengedett szögelfordulás;  $R_{\min}$  az ív minimális távolsága a szigetelőlánc tengelyétől

$$R_{\min} \approx \frac{d}{2} + l_2 \quad (2)$$

ahol  $d$  – a szigetelő fémsapkájának átmérője az ívtalppontnál (ES szigetelőnél kb. 12 cm)

$l_2$  – a különböző zárlati áramokhoz tartozó plazmakifújások hossza

A (2) képletben azért szerepel  $l_2$ , mert az ívoszlop talppontokhoz közeli szakasza a nagy intenzitású, magas hőmérsékletű, jó villamos vezetőképeségű plazmakifújást követi [7]. A [7] 3. ábrája adja az  $l_2$  értékeket az áram függvényében.

Az (1) és (2) képlet alapján,  $\varphi = 60^\circ$ , valamint  $t_1 = 0,2$  s és  $t_2 = 0,5$  s zárlati idő esetére számolt, az ívállósági vizsgálatoknál maximálisan megengedett szélességeket a zárlati áram függvényében a 3. táblázatban foglaltuk össze. Látható, hogy a számolt értékek jól közelítik a 6. ábra 2. görbéjét.

3. táblázat

## A megengedhető szélességek közelítő számítása

	5 kA	10 kA	20 kA
$l_2$ (cm)	29	35	57
$R_{\min}$ (cm)	26	41	63
$t_1 = 0,2$ s $\varphi = 60^\circ$	1,37	2,15	3,3
$t_2 = 0,5$ s $\varphi = 60^\circ$	0,55	0,86	1,32

$v$   
(m/s)

Megjegyzés: Számításainknál  $\varphi = 60^\circ$ -ot vetünk fel. Ez kielégíti azt a feltételt, hogy kedvezőtlen irányú szélben az egymás felé forduló részívek síkjai a zárlat végén még mindig elég nagy szöget zárjanak be egymással. Fenti számítás természetesen csak közelítő becslésre alkalmas.

## IRODALOM

- [1] KERTÉSZ V. – MIHÁLKOVICS T.: A szabadvezetéki szigetelők ívállósági vizsgálatának módszerei. VBF 188., VEIKI Budapest, 1974, márc.
- [2] KERTÉSZ V. – MIHÁLKOVICS T.: Hosszú, nagyáramú, szabadon égő villamos ívek mozgása. VBF 170., VEIKI Budapest, 1974. febr.
- [3] MIKLÓS V.: Nagyfeszültségű szigetelőláncok és szerelvények zárlati ívállóságának vizsgálata. VEIKI 112., Budapest, 1970.
- [4] BRASCA, E. – COMELLINI, E. – DELL'OLIO, D.: Power Arc on Insulator Strings: Testing Procedures and Design of Guard Devices for HV Transmission Lines. IEEE Trans. on P. A. and S., Vol. Pas. – 89, No. 3. March 1970. p. 420–428.
- [5] OZAKI, Y. – SARUYAMA, Y. – MANABE, I.: High-Current Arcing Resistance of Insulators for Transmission Lines. Electrical Engineering in Japan, 1967/5, p. 91–101.
- [6] GESZTI O. – BENDÉS T.: Távvezetékek ívvédő szerelvényeinek hatásossága. Elektrotechnika 53 (1960) 310–314.
- [7] KERTÉSZ V. – MIHÁLKOVICS T.: Plazmakifújások villamos ívekben, villamos ívek mozgása. Elektrotechnika 66 (1973) 25–33.

Érkezett: 1974. VI.