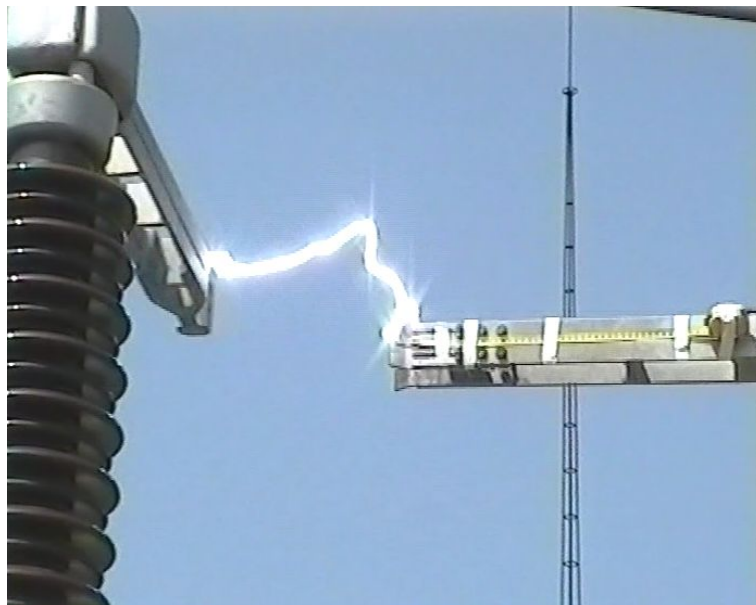




Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamos Energetika Tanszék  
Villamosművek és Környezet Csoport

PhD disszertáció

# Különböző névleges feszültségű rendszerek elektromágneses kölcsönhatása többrendszerű távvezetéseken



Készítette:

**Danyek Miklós**

okleveles villamosmérnök

Témavezető:

**Dr. Bán Gábor**

egyetemi tanár

A disszertáció nyilvános védéséről készült jegyzőkönyv és a bírálatok a Villamosmérnöki és Informatikai Kar Dékáni Hivatalában a későbbiekben elérhetők.

Alulírott Danyek Miklós kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2005. június 29.

Danyek Miklós

## **Köszönetnyilvánítás**

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni konzulensemnek, Dr. Bán Gábor professzor úrnak a munka során nyújtott segítségéért, kritikai észrevételeiért, valamint az OVIT Rt vezetőinek és munkatársainak a kísérlet elvégzésének lehetőségéért. Ezen túlmenően köszönettel tartozom mindazon kollégáknak és barátoknak, akik hasznos tanácsaikkal elősegítették a kutatási munka eredményeinek elérését.

## Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1 A munka felépítése</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Többrendszerű távvezetékek problémaköre</b> .....	<b>11</b>
<b>3. A szekunder ív</b> .....	<b>16</b>
<b>I. TÉZIS</b> .....	<b>18</b>
<b>4. Többrendszerű távvezetékek szekunder ív folyamatai</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1 Főbb sajátosságok</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2 A vizsgált jelenség részletes ismertetése</b> .....	<b>20</b>
4.2.1 Az alapjelenség .....	20
4.2.2 Szimulációs eredmények.....	23
<b>4.3 A jelenség igazolására szolgáló kísérlet</b> .....	<b>26</b>
4.3.1 Az áramkör működése.....	29
4.3.2 A 4.2.2. fejezetben tett állítások igazolása .....	31
4.3.3 A kísérlet egyéb eredményei .....	39
<b>II. TÉZIS</b> .....	<b>42</b>
<b>5. A valóságot jól közelítő kísérleti áramkör</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1 A korábbi kísérleti eredmények felhasználhatósága</b> .....	<b>43</b>
<b>5.2 A megtervezett áramkör</b> .....	<b>44</b>
<b>5.3 A tápláló generátor</b> .....	<b>45</b>
<b>5.4 A rendszerek közötti csatolás</b> .....	<b>45</b>
5.4.1 Induktív csatolás és modális hullámterjedés .....	46
5.4.2 Kapacitív csatolás.....	48
<b>5.5 A kisebb feszültségű rendszer</b> .....	<b>48</b>
5.5.1 Az 5 $\Pi$ tagos és az LCC modell közötti különbség vizsgálata .....	51
<b>5.6 Ívképzés, regisztrálás</b> .....	<b>56</b>
5.6.1 Ívképzés.....	56
5.6.2 Mérőváltók, regisztrálás .....	57
5.6.3 A szélesség mérése .....	58
<b>III. TÉZIS</b> .....	<b>59</b>
<b>6. A túlfeszültség korlátozók hatása</b> .....	<b>60</b>
<b>7. A kikapcsolt vezetők kialakuló potenciál meghatározása algebrai módszerrel</b> .....	<b>65</b>
<b>8. Az induktív feszültségváltó hatása</b> .....	<b>74</b>
<b>IV. TÉZIS</b> .....	<b>77</b>
<b>9. Vizsgagyújtási energiák és -feszültségek a távvezetéken</b> .....	<b>78</b>
<b>9.1 Közös oszlopsoron futó rendszerek</b> .....	<b>82</b>
<b>9.2 Közös/külön oszlopsoron futó rendszerek</b> .....	<b>85</b>

<i>10. Ívszimulációs módszerek összehasonlítása.....</i>	<i>96</i>
<i>11. Irányzatok többrendszerű távvezetékek tervezéséhez.....</i>	<i>99</i>
<i>12. A kutatási munka eredményeinek összegzése és a további lehetőségek.....</i>	<i>101</i>
<i>13. Irodalomjegyzék.....</i>	<i>103</i>
13.1 A disszertáció témájához kapcsolódó saját publikációk.....	105
13.2 Egyéb saját publikációk.....	105
<i>14. Melléklet.....</i>	<i>105</i>
<i>15. Függelékek.....</i>	<i>106</i>

## Jelölések 2/1

Jelölés	Jelentés
$S_{közös}$	Többrendszerű, eltérő feszültségintézi távvezetéseknél a háromfázisú rendszerek egy közös oszlopsoron vezetett hossza
$S_{külön}$	A kisebb feszültségű rendszernek az a hossza, amelyen külön oszlopsoron van elhelyezve a nagyobb feszültségű rendszertől.
$S_{teljes}$	$S_{közös} + S_{külön}$
$A_{DM}$	$S_{külön}/S_{közös}$
$C_{0X}$	X fázisvezető földkapacitása
$C_{XY}$	X és Y fázisvezetők közötti kapacitás
$U, C_{osztó}$	FN zárlat esetén az ép fázisok Thevenin helyettesítő áramkörének elemei
$U_X$	X fázis feszültsége
$-U_{A/2}, 2C_{AB}$	A fázisban bekövetkező FN zárlat esetén az ép fázisok Thevenin helyettesítő áramkörének elemei
$C_0, C_{AB}$	Szimmetrizált három fázisú távvezeték fázisvezetőinek ön és kölcsönös kapacitása
$R_{iv}$	Szekunder ív ellenállása
$U_{szek, iv}$	A szekunder íven eső feszültség
$U_{ind.}$	Az induktív csatolás hatására létrejövő feszültség elemi feszültséggenerátora a kikapcsolt fázisvezetőben
$i_{ép}$	Szimmetrizált távvezeték esetén a nem kikapcsolt fázisokban folyó áram pillanatértéke
$M$	Szimmetrizált távvezeték esetén a fázisvezetők közötti kölcsönös induktivitás hosszegységre eső része
$I_{ind.}, I_{ind.}''$	$U_{ind.}$ által a kikapcsolt fázisvezető-föld hurkokban létrehozott áramok
$U_{csatolt}$	a kikapcsolt fázisvezető kikapcsolás utáni kezdeti potenciálja
$U_{csatolt, csúcs}$	$U_{csatolt}$ amplitúdója
$I_{csúcs}$	A folytonos szekunder ív áramának csúcsértéke
$I_{primer iv}$	A primer ív áramának csúcsértéke
$U_{tápláló}, C_{osztó}$	A kisebb feszültségű rendszer egyik fázisában létrejövő zárlat esetén az ép fázisok (másik és saját rendszer) Thevenin helyettesítő áramkörének elemei
$T_{bef.}$	Távvezeték befutási ideje
$U_0$	Egyenfeszültségű vezető feszültsége
$Z_{táv.}$	A távvezeték adott fázisának földhurok hullámimpedanciája
$R$	Kisütő ellenállás
$a$	$R/Z_{táv.}$
$U'$	Az első áram-nullaátmenetben való árammegszakítás után a vezető potenciálja
$T_{ívelés}$	Az ív fennállásának ideje
$\Delta U_{csatolt, max}$	Az $U_{csatolt}$ -nak az ívelési idő alatt bekövetkező maximális változása
$X_{C0}$	$C_0$ földkapacitás reaktanciája
$X_{Cosztó}$	$C_{osztó}$ kölcsönös kapacitás reaktanciája
$I_{iv}$	Íváram
$U_{üillövési}$	A visszagyújtás utáni félperiódusban kialakuló feszültség maximális értéke
$U_{50Hz}$	50 Hz-es feszültség
$LCC$	Az ATP-EMTP[15] szimulációs program Line/Cable Component modellje
$C_{0felső}$	A kapacitív osztó felső tagját jelképező kondenzátor
$C_{0alsó}$	A kapacitív osztó alsó tagját jelképező kondenzátor
$C_{táp}$	A megvalósított kísérleti áramkörben a betáplálást erősítő pufferkondenzátor
$R_{sönt}$	Az áramsönt ellenállása
$L_{sönt}$	áramsönt parazita induktivitása
$Z_{sönt}$	Áramsönt impedanciája
$X_{Lsönt}$	Áramsönt reaktanciája
$R_{kisütő}, L_{kisütő}$	A megvalósított kísérleti áramkörben az ív kisütő körében lévő párhuzamos RL kör elemei
$L_{soros}$	A megvalósított kísérleti áramkörben a kikapcsolt fázisvezető induktivitását leképező légmagos tekercs induktivitása
$U_{induktív}$	A megvalósított kísérleti áramkörben a táppont feszültségét mérő induktív feszültségváltó feszültsége
$U_{C0}$	A megvalósított kísérleti áramkörben a lebegő pont potenciálját mérő kapacitív osztó feszültsége
$U_{sönt}$	A megvalósított/megtervezett kísérleti áramkörben elhelyezett áramsöntön mért feszültség
$A_C$	A $C_{osztó}/C_0$ arány
$X_{Cosztó}$	$C_{osztó}$ reaktanciája
$X_{C0felső}$	$C_{0felső}$ reaktanciája
$X_{C0alsó}$	$C_{0alsó}$ reaktanciája
$X_{Lsoros}$	$L_{soros}$ reaktanciája
$R_m$	Mögöttes hálózat átütési pontra vonatkoztatott ellenállása
$C_m$	Mögöttes hálózat átütési pontra vonatkoztatott kapacitása
$L_m$	Mögöttes hálózat átütési pontra vonatkoztatott induktivitása
$U_m$	Mögöttes hálózat átütési pontra vonatkoztatott tápfeszültsége
$I_L$	Mögöttes hálózat átütési pontra vonatkoztatott induktivitásának árama
$U_C$	Mögöttes hálózat átütési pontra vonatkoztatott kapacitásának feszültsége

Különböző névleges feszültségű rendszerek elektromágneses kölcsönhatása többrendszerű távvezetéseken

## Jelölések 2/2

Jelölés	Jelentés
$\rho$	Visszaverődési tényező a vezeték végén
$T_{\text{hóltidő EVA}}$	Egyfázisú visszakapcsolás esetén a holtidő
$T_{\text{hóltidő HVA}}$	Háromfázisú visszakapcsolás esetén a holtidő
$L_{\text{gen}}$	A megtervezett kísérleti áramkörben a mögöttes hálózat induktivitása
$R_{\text{táp}}$	A megtervezett kísérleti áramkörben a mögöttes hálózat ellenállása
$C_{\text{pi}}$	A megtervezett kísérleti áramkörben a kikapcsolt fázist szimuláló $\Pi$ tagok kondenzátorelemének kapacitása
$L$	A megtervezett kísérleti áramkörben a kikapcsolt fázist szimuláló $\Pi$ tagok légmagos tekercsének induktivitása
$\dot{U}_{\text{fesz}}$	A megtervezett kísérleti áramkörben az $\dot{U}$ feszültsége
$R_{\text{kötés}}$	A megtervezett kísérleti áramkörben a kötések ellenállása
$U_{\text{felső}}$	A $C_{\text{osztó}}$ kondenzátor nagyobb feszültségű rendszer felé eső pontjának potenciálja
$U_{\text{alsó}}$	A $C_{\text{osztó}}$ kondenzátor kisebb feszültségű rendszer felé eső pontjának potenciálja
$U_{\text{GEN}}$	A megtervezett kísérleti áramkör tápponti feszültsége
$U_{120,2}$	A megtervezett kísérleti áramkör $\dot{U}$ feszültsége
$U_{\text{nagyobb, csúcs}}$	A nagyobb névleges feszültségű rendszer fázisfeszültségének csúcserőértéke
$W(s)$	Átviteli függvény
$\omega_0$	Az áramkör sajátfrekvenciája
$W_0$	A sajátfrekvenciához tartozó erősítés
$\xi$	A sajátfrekvenciához tartozó csillapítás
$p_{x,y} = a \pm j b$	$p_x$ és $p_y$ komplex konjugált póluspárok $a$ valós és $b$ képzetes tagokkal felépítve
$n$	A megtervezett kísérleti áramkör $\Pi$ tagjainak száma
$f_{\text{max}}$	A kísérleti áramkörön átvinni kívánt maximális frekvencia értéke
$f_{\text{határ}}$	Egy $\Pi$ tag esetén a vágási (határ) frekvencia
$c$	Fénysebesség = 300000 km/s
$t_{\text{nyúlás}}$	Gravitációs ivszimulációnál a mozgó ívhúzó érintkező esési ideje
$S_{\text{maximális, hossz}}$	Gravitációs ivszimulációnál a mozgó ívhúzó érintkező maximális mozgási hossza
$g$	9,81 m/s <sup>2</sup>
$C_{\text{felső tag}}$	A megtervezett kísérleti áramkörben a kapacitív osztó felső tagjának kapacitása
$T_{\text{visszagújtás}}$	Visszagújtás során az áramimpulzus talpideje
$f_{\text{visszagújtás}}$	1/ $T_{\text{visszagújtás}}$
$L_{\text{feszváltó}}$	Induktív feszültségváltó fázisonkénti induktivitása
$U_{\text{névleges, kikapcsolt}}$	A kikapcsolt rendszer névleges feszültsége
$D_{\text{fázis}}$	az adott rendszer fázisvezetői közötti távolság, egy síkban fekvő vagy egyenlő oldalú háromszög elrendezésben levő vezetőknél
$D_{\text{rendszer}}$	a két rendszer fázisvezetőinek síkja, vagy az egyelő oldalú háromszög esetén a másik rendszer fázisvezetői által alkotott sík és a $\Delta$ alsó két vezetője által alkotott sík távolsága
$M_{\text{XYZ}}$	XYZ névleges feszültségű rendszer távolsága a földtől
$U_{\text{kialvás+1előtti}}$	Az első áram-nullaátmenetben való árammegszakítás után következő 1. félperiódus végén a vezető potenciálja
$U_{\text{kialvás+2előtti}}$	Az első áram-nullaátmenetben való árammegszakítás után következő 2. félperiódus végén a vezető potenciálja
$U_{\text{x.visszagújtás}}$	x-ik visszagújtás után fél periódussal a lebegő-pont potenciálja
$A_{\text{Ex}}$	A vezeték hossza mentén az x-ik visszagújtások közül a legnagyobb és a legkisebb energiájúnak a %-os aránya
$R_{\text{szekiv}}$	A szimulációban a szekunder $\dot{U}$ helyettesítésére használt ellenállás
$E_{\text{visszaverődő}}$	A hullám diszkontinuitási ponton visszaverődő energiája
$E_{\text{teljes}}$	A hullám energiája
$T_{\text{bef, közelebbi vég}}$	Távvezeték közelebbi végéhez számított befutási ideje
$E_{\text{x.visszagújtás}}$	x. visszagújtás energiája
$U_{\text{min, x}}$	Az 1. átütéshez szükséges minimális feszültség értéke x [m] ívhúzó érintkező távolság esetén.
$E_{\text{min, x}}$	Az 1. visszagújtáshoz szükséges minimális energia értéke x [m] ívhúzó érintkező távolság esetén.
$v_{\text{szél}}$	szélsebesség

## 1. Bevezetés

A villamosenergia-rendszer stabilitásának és ezzel a biztonságos energiaellátásnak az egyik feltétele a nagy átviteli képességű távvezetékek kiesésének elkerülése. A kiesések csökkentéséhez alapvetően szükséges a gyors és hatékony zárlathárítás, amit egy- és háromfázisú gyors, ill. lassú visszakapcsolások kombinációival végeznek.

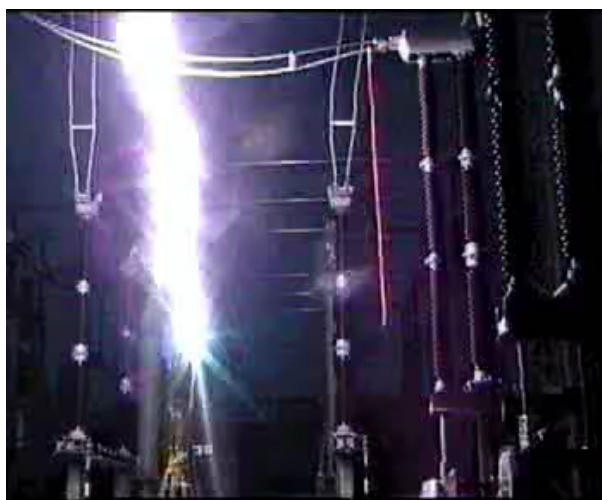
A szigorodó pénzügyi feltételek miatt a sikertelen zárlathárítás anyagi veszteséget jelent az áramszolgáltatóknak. (pl. büntetés fizetési kötelezettség energiakimaradás vagy szerződésben rögzített, de nem teljesített tranzitenergia szállításnál). A villamosenergia-piac liberalizációja okán a rendszer üzemeltetésében egyre nagyobb szerepet kap majd a nyereségesség kérdése, szemben az üzembiztonsággal és a tartalékolás igényével. Emiatt a stabilitási határhelyzetet megközelítő üzemállapotok számának növekedése várható, amelyeknél a sikeres és minél rövidebb idő alatt kivitelezhető zárlathárítás lényeges feltétel.

A visszakapcsolások sikerességéhez szükség van a zárlati idő alatt és az azt követő kikapcsolási holtidőben lezajló folyamatok ismeretére. Így a nagy, de különösen az igen-nagy feszültségű hálózatok (>220 kV) zárlathárításánál figyelembe kell venni a visszakapcsolási holtidőben lejátszódó *szekunder ív folyamatot*, ugyanis, ha az automatikus visszakapcsolás holtidejének végére a szekunder ív véglegesen nem alszik ki, a visszakapcsolás sikertelen lesz.

A távvezetékek hosszúsága, a szél sebessége és iránya, de főleg a feszültség nagysága alapvetően befolyásolja a szekunder ívet, olyannyira, hogy egyrendszerű távvezetékek esetében az előfordulásuk csak 220 kV felett várható.

A szekunder ív ismert fogalom, számos irodalom foglalkozik vele (pl. [1]-[14]), sokféle aspektusból tárgyalják, a rövid idejű kioltására azonban nem található általános, átfogó megoldás. Adott vezetékekre és regisztrált ívekre bemutatnak szekunder ív modelleket, továbbá olyan megoldásokat, amelyek az adott esetre beváltak, ezek azonban általánosan nem használhatók. Pl. az egyfázisú visszakapcsolás (EVA) az FN zárlatok hárítására csak akkor hatékony, ha a szekunder ív a holtidőben spontán kialszik. A [46] alapján Magyarországon - feszültségszinttől függően - 1÷2 másodperces EVA holtidővel 90 %-ot meghaladóan sikeresek a visszakapcsolások.

1998-ban a Hévíz-Tumbri 2\*400 kV-os távvezeték üzembehelyezésekor az elvégzett kísérletek során önmagától nem kialvó szekunder ív keletkezett, amely 29 másodpercig égett és csak a betáplálási megszakítóval sikerült megszüntetni. Az ívről jellemző képet mutat be az 1-1. ábra, a teljes felvételt a CD mellékleten lévő *400\_kV\_szekunder\_iv\_1.avi* fájl tartalmazza.



1-1. ábra – A Hévíz-Tumbri 2\*400 kV-os távvezeték üzembehelyezésekor keletkezett szekunder ív

Az említett hálózati körülmények között előállott kísérleti eredmény nagy mértékben hozzájárult ahhoz, hogy a szekunder ív kérdése ismét aktuálissá váljon. Uí. az ehhez hasonló, ki nem alvó ívek elkerülésére még jobban meg kell ismerni a jelenség tulajdonságait, valamint a hálózati és környezeti paraméterektől való függést.

A tárgyalás és ezen belül a jelen dolgozat aktualitását többek között az is alátámasztja, hogy a nehezebb vezetékjog-szerzési lehetőségek miatt egyre nő a kettő vagy több háromfázisú rendszert tartalmazó távvezetékek száma, továbbá a rendszerstabilitás növelésének, és a villamosenergia igény kiszolgálásának szükségessége.

Jelen munka ezeknek a többrendszerű vezetékeknek az egyik fajtáján kialakuló szekunder ív jelenségével foglalkozik, amelynek különlegességet az adja, hogy az ívelés, a háromfázisú rendszerek közötti megnövekedett csatolás következtében, 220 kV-on vagy annál kisebb névleges feszültség szinteken is kialakulhat.

## **1.1 A munka felépítése**

A munka során áttanulmányoztam a szekunder ív leírásával, viselkedésével, a többrendszerű távvezetékekkel kapcsolatban fellelhető mindazon forrásanyagokat, amelyek a kitűzött cél szempontjából meghatározó információt tartalmaztak.

Alapvetően támaszkodtam az Alternative Transient Program-ElectroMagnetic Transients Program-ra [15] (továbbiakban ATP-EMTP), amelynek beépített áramköri elemeit használtam fel a szimulált távvezetékek és a többi elem (generátor, megszakító, túlfeszültség levezető stb.) leképezésére.

Számos előzetes szimuláció után lehetőség nyílt kísérletek elvégzésére is az OVIT Rt. kezelésében lévő Göd-i alállomás területén, amelyek – a korlátozott lehetőségek következtében nem teljes körűen -, de a valósághoz kapcsolódóan alátámasztották megfogalmazott eredményeimet, ill. lehetőséget nyújtottak a kísérletnél tapasztaltakból további következtetések levonására.

A bevezetést követően (2. fejezet) bemutatom a többrendszerű távvezetékek problémakörét, alátámasztva számos irodalomban fellelhető elméleti és gyakorlati eredménnyel. Ezekből kiviláglik, hogy a témakör igen sokrétű, számos eddig nem vizsgált olyan területe is van, amely több kutató számára is elegendő kutatási lehetőséget nyújthat.

A következőkben (3. fejezet) ismertetem a szekunder ív általános ismérveit, ennek során kitérek a távvezetékek fázisvezetői közötti csatolásokra, és bemutatom azt az áramkört, amit az irodalom szerint a szekunder ív modellezésére általánosan használnak, annak ellenére, hogy a jelenségben meghatározó hullámfolyamatokat ez az áramkör nem képes leképezni.

Az I. tézis ismerteti azt a megállapítást, miszerint a többrendszerű, többfeszültségintű távvezetékek esetében a szekunder ív olyan névleges feszültséginteken és távvezeték hosszakon is kialakulhat, ahol eddig ez nem volt megszokott.

A 4. fejezetben bemutatom az általam használt szimulációs áramkört, majd ismertetem azt a fajta különleges szekunder ív jelenséget, amelynél a kikapcsolt fázisvezető potenciálja a névleges feszültség fölé képes növekedni.

A megállapításaim igazolására elvégzett kísérletet a 4.3. fejezetben elemzem.

A kísérlet eredményeiből és az abból levont következtetésekből kiindulva - a II. tézis kapcsán - az 5. fejezetben bemutatok egy részletesen megtervezett kísérleti áramkört, amely a vizsgált szekunder ív létrejöttére és lefolyására hatással lévő folyamatokat – ide értve a tranzienseket is - a valóságot jól közelítő módon képezi le. Ebben a részben tárgyalom - többek között - az ívképzés, a mérés-regisztrálás feltételeit, bemutatom azokat az egyenleteket, amelyekkel különböző távvezeték hosszakra meghatározhatók a valóságot hűen leképező II tagok elemeinek értékei.

A III. tézisben ismertetem,

- a távvezeteki túlfeszültségkorlátozók és
- az induktív feszültségváltók

hatását a vizsgált különleges szekunder ívre. A 6. és a 8. fejezetekben bemutatom, hogy ezek a nagyfeszültségű áramkörü elemek – általában, és konkrétan az általam tanulmányozott távvezeték konfigurációkban - milyen mértékű hatást gyakorolnak a vizsgált jelenségre, valamint ismertetek egy módszert (7. fejezet), amellyel meg lehet határozni a kikapcsolt fázisvezetők kialakuló legnagyobb potenciált a csatolással átkerülő feszültség és a távvezeték hullámimpedanciájának ismeretében. Az eredményeket szimulációval nyert mérési eredményekkel és számításokkal támasztom alá.

Többrendszerű, eltérő feszültségű távvezetéseken olyan megoldásokat is alkalmaznak, hogy a háromfázisú rendszereket egy adott távolságon közös oszlopsorra, (a közös oszlopsorú távolság neve a későbbiekben:  $S_{közös}$ ), majd ezután külön oszlopsorokra – esetlegesen más nyomvonalat követve – helyezik el. A kisebb feszültségű rendszernek azt a hosszát, amelynél a nagyobb feszültségűtől külön oszlopsoron halad, a továbbiakban  $S_{külön}$ -nek nevezzük.

A IV. tézisben (9. fejezet) azt az eredményt ismertetem, miszerint az  $\frac{S_{külön}}{S_{közös}}$  aránytól függetlenül

az I. tézisben ismertett különleges szekunder ív energiája - hasonlósági invariánsokat alkalmazva - egy adott görbesereggel jellemezhető. Megvizsgálom a kikapcsolt fázisvezető potenciálemelkedésének alakulását a kisebb feszültségű rendszer hossza mentén, bemutatom a szekunder ív ellenállás-változásának hatását a potenciálemelkedés folyamatára. Meghatározom az

$A_{DM} = \frac{S_{külön}}{S_{közös}}$  arány értékében azt a küszöböt, amely felett az általam vizsgált 400/120 kV-os

távvezetéknel az I. tézisben bemutatott szekunder ív jelenség kialakulásának a valószínűsége elhanyagolható. A megállapításokat számítógépes szimulációval kapott és az irodalmakban fellelhető eredmények alapján teszem.

A 11. fejezetben olyan eljárást mutatok be, amelynek segítségével többrendszerű, eltérő feszültségű vezeték tervezésénél - a kiesési idő csökkentésére és a kompaktizálás alkalmazására – felhasználható iránymutatásokat lehet megfogalmazni.

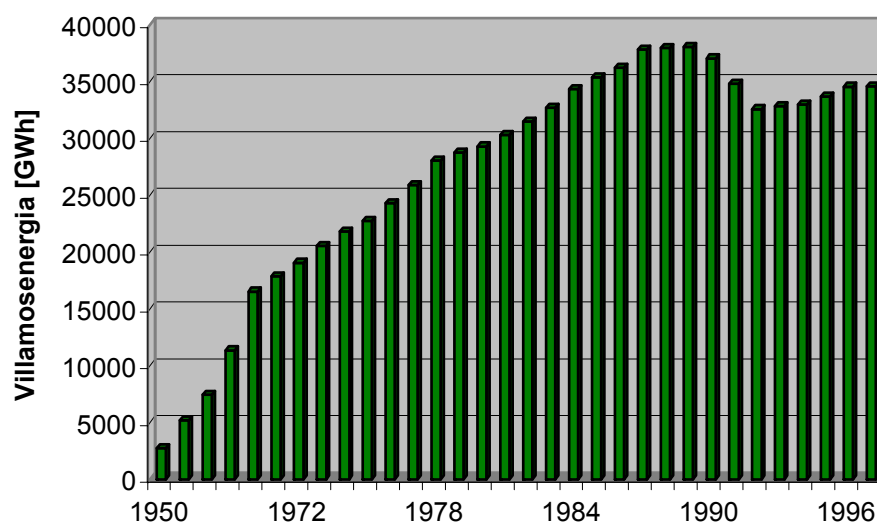
Végezetül összefoglalom az elvégzett munka eredményeit és kitekintést adok a további kutatási lehetőségekre (12. fejezet).

## 2. Többszörös távvezetékek problémaköre

A fogyasztók villamos energia igénye folyamatosan nő, ui. egyre több olyan háztartási és ipari készülék kerül forgalomba, amely ezzel az energia fajtával működtethető. Általános alkalmazása elsősorban annak köszönhető, hogy univerzálisan és egyszerűen használható fel, másrésztől a felhasználás helyét nem terhelik környezetkárosító melléktermékek.

Igaz, a villamos energia csak a felhasználás környékén tűnik környezetbarátnak, mivel előállításakor jelentős mennyiségben keletkezik olyan melléktermék is, amely környezetkárosító. Előny azonban, hogy az így keletkezett szennyezés lokálisabb, jobban kezelhető, szűrőkkel, porleválasztókkal, füstgáz visszavezetéssel korlátozható, szemben a közvetlen gáz- vagy egyéb fosszilis energiafelhasználási módokkal.

A következő diagram Magyarország éves villamosenergia igényének változása látható 1950 és 1998 között [42]. Folyamatos növekedést lehet tapasztalni – kivéve az 1990-es évek elején bekövetkezett gazdasági recessziós időszakot.



2-1. ábra – Magyarország éves bruttó villamosenergia fogyasztása

Mára az energiaigény növekedésében némi szerkezeti változás is kimutatható. Pl. napjainkban jóval nagyobb a különbség két jelentősen eltérő hőmérsékletű nyári nap villamosenergia felhasználása között, mint 10 vagy 20 évvel ezelőtt. (1. táblázat).

Dátum	T [°C]	t <sub>csúcs</sub> [óra]	E <sub>csúcs</sub> [MW]
2004. január 22.	0÷-5	17	5845
2004. január 29.	-2÷-7	18	5841
2004. július 1.	20÷24	16	5147
2004. július 8.	30÷32	15	5343

1. táblázat – Villamosenergia igény jellemző időszakokban [42]

A táblázat szerint meleg nyári napokon, amikor a klímaberendezések üzemben vannak, kb. 200 MW-al nagyobb a csúcsteljesítmény-igény (5343 MW) a mérsékelt hőmérsékletű napokhoz képest (5147 MW). Szintén ezzel magyarázható, hogy - az itt nem részletezett statisztika szerint - kisebb a különbség a téli-nyári napok teljesítményigénye között is, mint 10 évvel korábban. Másrésztől, ha az egy emberre vetített villamosenergia igényt tekintjük, akkor is jelentős növekedés tapasztalható, mind az urbanizált, mind a vidéki környezetben [42].

*Ezzel a növekedéssel kell lépést tartania a villamosenergia rendszernek, ami csak úgy lehetséges, hogy vagy újabb távvezetékek létesülnek, vagy a meglévőket a korábbiakhoz képest nagyobb energiaátviteli képességűvé alakítják át.*

A települések, városok folyamatosan terjeszkednek, növekszik a földterületek azon része, amely magántulajdonban van. Ez költségessé és nehezen kivitelezhetővé teszi az új vezetékjogok megszerzését.

Az új vezetékjog megtakarításának egyik lehetséges módja, hogy a régi nyomvonalakon olyan távvezetékeket létesítenek, amelyeknél egy oszlopsorra több (kettő, három, négy, stb.) háromfázisú rendszert szerelnek fel.

A külön oszlopsoron vezetettekhez képest az ilyen *többrendszerű távvezetékek* az alábbi gyakorlati előnyökkel rendelkeznek:

- kisebb a földterület igény,
- kisebb a bekerülési költség a kevesebb oszlopanyag miatt,
- relatíve kedvezőbb a környezetkép a kisebb oszlop darabszám miatt,
- kompaktizált oszlopok esetén tovább csökken a földterület igény.

Az előnyök mellett azonban addicionális gondok, ill. feladatok is jelentkeznek:

1. Az így elhelyezett sodronyoknak, szigetelőknek és magának az oszlopszerkezetnek a karbantartása körülményesebb, mivel ha egy rendszert kikapcsolnak, akkor is ott marad az oszlopsoron legalább még egy feszültség alatt álló rendszer, amely pl. szigetelőcsere, oszlopfestés során korlátozza a kikapcsolt rendszer megközelíthetőségét.
2. A többrendszerű távvezetékeken a rendszerek közötti távolságok kisebbek a külön oszlopon egymás mellett futókéhoz képest, így a közöttük lévő csatolás és emiatt az induktív, kapacitív, tranziens, stacioner áthatás mértéke megnő. Ennek következménye, hogy a megkívánt biztonságú üzem fenntartásához plusz stabilitási, zárlathárítási feladatokat kell megoldani.

Jelen munka a 2. pontban felsorolt problémakörökkel foglalkozik.

A fentiekhez kapcsolódóan a legtöbb értékezés és cikk a többrendszerű távvezetékeken alkalmazandó „hagyományos” távolsági védelmeknél felmerülő problémákat, megoldásokat elemzi. Tekintsünk át ezek közül néhányat.

A [17] olyan módszert mutat be, amely kiküszöböli a rendszerek közötti csatolásnak a földzárlati hurokimpedanciára gyakorolt torzító hatását. A szerző sorrendi hálózatokat használó számítási módszere számításba veszi az előzetes terheltségi állapotot, ill. a mögöttes hálózatok impedanciáját is.

A [18] fuzzy logikára épülő számítási módszert ismertet a többrendszerű vezetéseken kialakuló zárlattípusok (pl: FN, 2FN stb.) meghatározásra. A számítási algoritmus kellően gyors és pontos ahhoz, hogy mikroprocesszoros védelmekben is alkalmazható legyen.

A [19] olyan módszert ír le, amely a fázisvezetőkre szuperponálódott jelekből sorrendi hálózatokon alapuló módszerrel megállapítja - a védelem felszerelési helyéhez képest - a vezeték túlvégén lévő megszakító kikapcsolását, valamint detektálja a védett szakaszon belül kialakuló zárlatot, anélkül, hogy külön kommunikációs csatornát igényelne a vezetékvégek között. Az ismertetés szerint - szimulációs tesztekkel igazolva - ez a módszer is kellően gyors és pontos ahhoz, hogy védelmi eszközökben lehessen alkalmazni.

A távvezetékeken a leggyakoribb zárlatfajta az egysarkú földzárlat, amelynek érzékelése többrendszerű vezetéseknél nem olyan egyszerű, mint az egyrendszerűnél. [20] szerint a szomszédos rendszer üzemi állapota erőteljesen befolyásolja a zérussorrendű jellemzők kiértékelhetőségét. Ennek kiküszöbölésére a szerző eljárása az ép rendszer zérus sorrendű árama helyett egy - a mindenkori rendszerállapottól függő – korrekciós tényezőt alkalmaz a távolsági védelemben.

A neurális hálózatokat napjainkban egyre gyakrabban használják, így a többrendszerű vezetékek védelmeinek kialakításánál több példa is fellelhető.

A [21] a különböző (unsupervised/supervised) módon tanított, a távvezetéken létrejövő zárlatfajták megkülönböztetésére alkalmazható neurális hálózatok eredményeit hasonlítja össze.

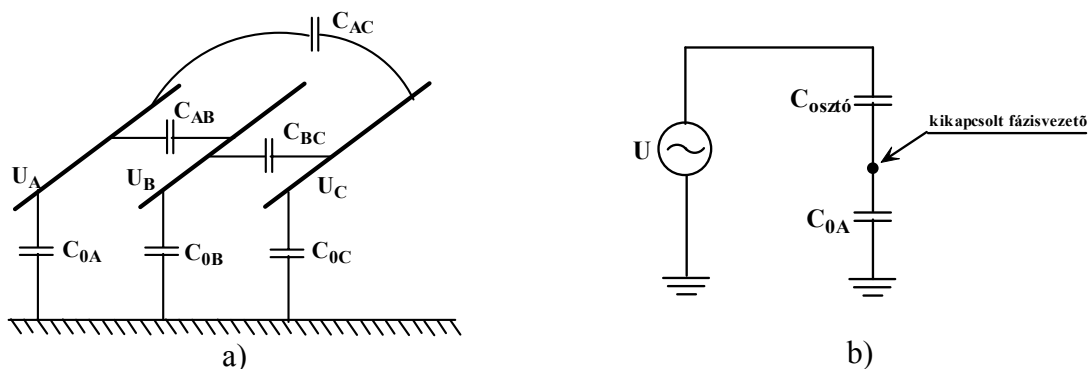
A [22] módszere szimulációs eredményekkel tanított neurális hálózatot használ adaptív háromfázisú visszakapcsolások [16] megvalósítására.

A neurális hálózatok a tanításon alapuló flexibilitásuk miatt a szekunder ív detektálására, meghatározására és modellezésére is felhasználhatók, újabb távlatokat nyithatnak a szekunder ív megismerésére.

A két és többrendszerű vezetékeken átvitt villamos energia általában nagyobb, mint az egyrendszerűeken, ezért előfordulhat, hogy az elektromágneses interferenciás jelenségek mértéke is nagyobb. [23] a Dél-Koreában, a KEPCO által felépített 765 kV-os, kísérleti távvezetéken végzett interferencia vizsgálatokat elemzi.

Azonos alapterületen, nagyobb energiaátvitelt célzó megoldások egyike a napjainkban egyre terjedő kompaktizálás. [24] szerint kompakt távvezetékeket évek óta sikerrel alkalmaznak városi és elővárosi viszonylatban. Ennek azonban van egy nem elhanyagolható hátránya is. Amíg a kompakt oszlopokon a kisebb zsinórtávolságú, de a szokványoshoz képest közel azonos átütési szilárdságú szigetelőknél a földelt oszloptesthez való átívelési gyakorisága a megkívánt üzembiztonságot nem veszélyezteti, az egy rendszer fázisvezetői közötti és a másik rendszer vezetőihez képesti villamos csatolások mértéke megnő. Emiatt a csatolások által befolyásolt minden jelenség előfordulási gyakorisága, ezen belül a 3. fejezetben bemutatásra kerülő szekunder ívé is növekszik.

Egyrendszerű, háromfázisú távvezeték fázisvezetőinek egymáshoz és a földhöz képesti kapacitív csatolását a 2-2. ábra a) részén látható áramkörrel lehet leképezni.



2-2. ábra – A távvezeték, mint kapacitív osztó az EVA holtidejében

Abban az esetben, ha az egyik (itt az A) fázisban FN zárlat jön létre és ezt EVA-val hárítja a védelem, akkor a visszakapcsolás holtidejében a kikapcsolt fázisvezető potenciálja egy kapacitív feszültségosztó ( $C_{0A}$ ) alsó tagján megjelenő feszültséggel válik egyenlővé. Az  $U$  feszültségforrás és a  $C_{osztó}$  a két ép fázis feszültsége és a kikapcsolt fázis felé irányuló kapacitív csatolások Thevenin helyettesítésével nyerhető. A potenciál nagysága fizikailag az oszlopgeometria és a rendszer névleges feszültségének függvénye (lásd. 2-2. ábra b) része).

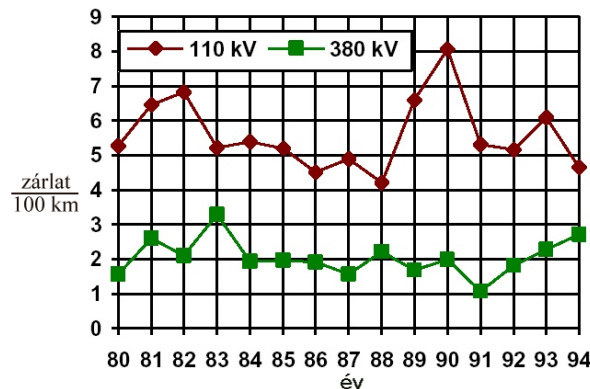
Hazánkban még nem, de Nyugat-Európában és a világ más részein már régóta használnak *többfeszültségű, többrendszerű* (pl. 380/110, 380/220 kV) távvezetékeket [25]. Mint minden többrendszerű távvezeték esetén, itt is - a fázisok közötti megnövekedett csatolás következtében - a kikapcsolt vezet(ők)ön a külön oszlopsoron elhelyeztetkez képest jelentősebb feszültségek várhatók. Ez főleg akkor gond, amikor a kisebb feszültségű rendszeren történik a kikap-

csolás, ui. a kikapcsolt fázisvezetőn a nagyobb (többnyire ultranagy) feszültségű hálózat által keltett emelt szintű feszültség nagyobb valószínűséggel üti át az ívcsatornát.

Azaz, a kisebb feszültségű rendszeren megnő a szekunder ív kialakulásának lehetősége, sőt olyan feszültségű hálózatokon is előfordulhat, ahol ez eddig nem volt jellemző (pl. 120 vagy 220 kV). Mivel eddig a 120 és 220 kV-os üzemviteli gyakorlatban ez nem fordult elő, így teljesen új és szokatlan jelenségként fog megjelenni olyannyira, hogy alapvető befolyással lehet a visszakapcsolási holtidőkre, sőt megváltoztathatja az eddig alkalmazott védelmi filozófiát is.

Abban az esetben, ha a körülmények adottak a - 4.2. fejezetben részletesen bemutatásra kerülő - jelenség számára, jelentős potenciálemelkedés is kialakulhat a kikapcsolt vezető(kö)n, ezáltal létrehozva az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívet*. Ez a szekunder ív pedig még inkább késlelteti a spontán, végleges ívkialvást, így jobban veszélyeztetve a visszakapcsolás sikerességét.

Németországban már évek óta működnek többfeszültségű, többrendszerű távvezetékek, ezért jó kiindulási alapot adnak az ott kialakult zárlati statisztikák. Tekintsük a 380 kV-os és a 110 kV-os névleges feszültségű rendszereken szerzett tapasztalatokat (lásd. 2-3. ábra [26], [27]).



2-3. ábra – [26] és [27] szerint Németországban a zárlatok száma  $\frac{\text{zárlat}}{100\text{km}}$ -ben

A két feszültségű közötti ~2÷3 szoros arányt [26] szerint az okozza, hogy a közös, magas oszlopokra (380 kV-nak megfelelő magasság, lásd [25]) szerelt, de eltérő névleges feszültségű rendszerek közül a kisebb szigetelési szintűn következik be nagyobb számban visszacsapás. Ebből következően az azonos kiesési idő biztosításához a közös oszlopsorra szerelt, kisebb névleges feszültségű rendszerek zárlathárításának hatékonyabbnak kell lenni a külön oszlopsoron vezetethez képest.

1998-as adatok alapján Németország 110 kV-os hálózatnak 92 %-a - az FN zárlatokra kevésbé érzékeny - kompenzált csillagpontú, a többi közvetlenül földelt [26]. Mivel ezen arányok ellenére a zárlatok számában az említett gyakoriságbeli eltérés adódott (lásd. 2-3. ábra), így hazánkban – mivel 120 kV-on és a felett minden hálózat közvetlenül földelt – valószínűleg legalább ekkora zárlati arányra és ebből következően megnövekvő kiesési időre lehet számítani a többfeszültségű, többrendszerű távvezetékek alkalmazása esetén.

A fejezetben bemutatott problémák sokfélesége mutatja, milyen szerteágazó azoknak a jelenségeknek a köre, amelyek a megnövekedett csatolás következtében a többrendszerű távvezetékek esetében jelentősek, míg egyrendszerű vezetéseken csak elhanyagolható mértékű hatásuk van. A disszertáció ezeknek csak egy részét tárgyalja, főleg a szekunder ívelés folyamatával foglalkozik.

A tématerület átfogó vizsgálatához el kellene végezni az 5. fejezetben bemutatásra kerülő kísérletet, aminek eredményeként:

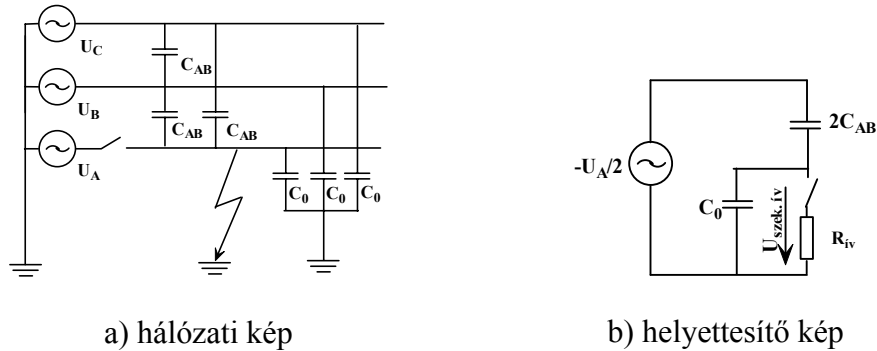
- további ismereteket lehet szerezni az általam vizsgált különleges szekunder ívről,

- a kapott eredményeket - a fejezetben leírt feltételek betartása mellett - fel lehet használni a szekunder ív, mint jelenség részletekbe menő elemzéséhez.

A kiesési idő csökkentése egy nem műszaki probléma következtében is fontos. Ahogyan a bevezetőben említettem - a villamos hálózat tulajdonosának minden olyan esetben büntetést kell fizetnie, amikor a szerződésben rögzített, de valamilyen okból (beletartozik az előre látható és a nem látható is) nem tudja az adott mennyiségű villamos energiát szállítani. Ezek az összegek a több tíz millió Ft/napos körökben mozognak, így nem csak a technológiai megbízhatóság szempontjából lényeges a folyamatos és lehető legkisebb kiesési idővel bíró távvezeték üzemeltetés.

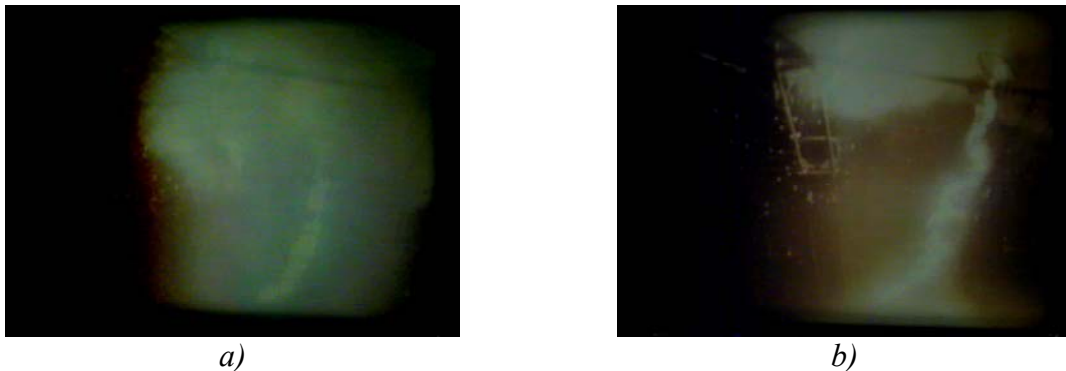
### 3. A szekunder ív

A háromfázisú távvezeték fázisvezetői között induktív és kapacitív csatolás van, amelyek nagysága az oszlopok geometriájától és a távvezeték hosszától függ. A csatolások értéke olyan mértékű, hogy normál üzemi körülmények között (nincs kikapcsolt vezető, üzemi áram folyik a fázisvezetőkben) a csatolással átkerülő energia a szállítottéhoz képest elhanyagolható. Abban az esetben, ha egy nagy- vagy ultranagy feszültségű távvezetéken – földrövidzárlat következtében – egyfázisú automatikus visszakapcsolási (EVA) ciklus indul meg, a megszakítók a hibás fázist a távvezeték mindkét végén kikapcsolják (lásd. 3-1. ábra a) része). A kialakuló primer ív helyén visszamarad egy forró, ionozott - igen jó vezetőképeséggel rendelkező - ívcsatorna.



3-1. ábra – A szekunder ív

A 3-2. ábra a) része azt az állapotot mutatja, amikor a primer ív már kialakult, de megmaradt az ionfelhő és a szekunder ív elkezd kialakulni (lásd a világosabb ívet az ábra közepén). A 3-2. ábra b) része a primer ív ionfelhőjének erőteljes nyúlása, hülése (rekombinációja) utáni, tisztábban kivehető szekunder ívet mutatja.



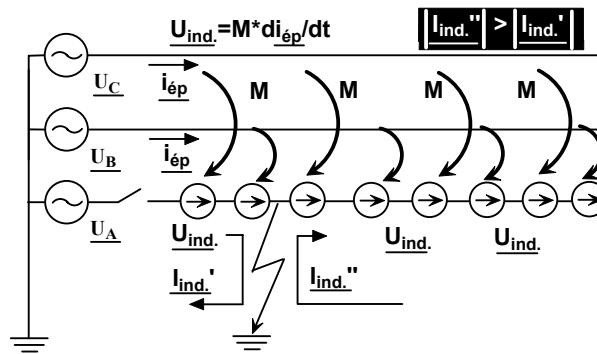
3-2. ábra - A primer és a szekunder ív közötti különbség [30]

A folyamat során a két ép fázisról a kikapcsolt, lebegő potenciálú fázisvezetőre - az előbb említett csatolások útján – töltések jutnak át. Az induktív csatolás hatására a kikapcsolt fázisvezetőben indukált feszültség jön létre, amelyet elemi feszültséggenerátorokkal lehet leképezni (lásd.  $U_{ind}$ . 3-3. ábra). Az eredő indukált feszültség nagyságát két tényező határozza meg:

1. az elemi generátorok feszültség értéke, amelyek a két ép fázison átvitt teljesítménytől függenek ( $U_{ind} = M \cdot di_{ép}/dt$ ),
2. a zárlat helye a vezeték hossza mentén, mivel az elemi indukált feszültségek és az ezekből kialakuló  $I_{ind}'$  és  $I_{ind}''$  áramok az egyes hosszakon vektorialisan összegződnek

Az induktív csatolást e két tényező bizonytalanná teszi, másrészt az indukált úton átjutó energia - a szekunder ív kialakulásakor fennálló üzemi állapotban - egy nagyságrenddel kisebb a

kapacitív csatolással átkerülőhöz képest, ezért a szekunder ív vizsgálatánál - általában - el szokták hanyagolni.



3-3. ábra – Az induktív csatolás leképzése

Az előzőekből következően a kikapcsolt fázisvezetőnek a kikapcsolás utáni kezdeti potenciálját (továbbiakban:  $U_{csatolt}$ ) alapvetően a  $C_{AB}$  és a  $C_0$  kapacitások egymáshoz képesti nagysága határozza meg (lásd. 3-1. ábra *b* része). Mivel a leválasztott vezetőt csak kapacitások kötik a környező potenciálokhoz, ezért lebegő-potenciálú pontként fog viselkedni (amit a továbbiakban lebegő-pontnak nevezek). A földhöz képesti potenciál képes a visszamaradt ionozott csatornát átütni, és ott létrehozni a kis áramú szekunder ívet. Az ívelés alapvetően kétféle lehet:

- **Folytonos:** Általában a primer ív utáni közvetlen időszakban alakul ki, így nagy mennyiségben tartalmaz ionizált gázt. Jellemzője az 50 Hz-es áram-nullaátmenet közvetlen közelében - elhanyagolható nagyságú áramlevágással - kialakuló, majd utána kis feszültségértékeknél újragyulladó (ezért folytonosnak látszó) aránylag kicsi áramú ív ( $I_{csúcs} = 20 \div 150$  A).
- **Intermittens:** Az ívcsatorna folyamatosan nyúlik, veszt az ionizált gáz mennyiségéből, ezért az ívelés későbbi szakaszában nagyobb feszültségértékeknél alszik ki, majd gyullad újra az ív, jelentős áramlevágásokat okozva a kialakásnál.

Zárlathárítási szempontból a problémát az okozza, hogy ha a szekunder ív az automatikus visszszakapcsolási holtidő végéig nem alszik ki véglegesen, a visszakapcsolás sikertelen lesz, mivel a megjelenő névleges feszültség és a jelentős mögöttes hálózati teljesítmény újabb zárlatot hoz létre a szekunder ív által - a holtidő alatt - folyamatosan ionozott csatornában.

A szekunder ívnek legalább ugyanakkora hosszon kell fennmaradnia (lásd. 3-2. ábra *b* részét), mint a jóval nagyobb energiatartalmú primer ívnek (kA nagyságrendű), így a környezeti hatások a primer ívhez képest erőteljesebben befolyásolják a hosszú, kis áramú ív „sorsát”. A legnagyobb súlyú tényező a szél, közel szélcsendben a szekunder ív 20÷30 másodpercig is képes fennmaradni (lásd. *400 kV szekunder ív 1.avi* fájl a CD mellékleten), amely idő jóval meghaladja a visszakapcsolási holtidőt.

A [28] szerint 5 kA-es primer ívnél - függőleges csatorna-elrendezésben - már a 4,5÷6 m/s-os szél is jelentős 70÷80 cm/s-os sebességgel képes elmozdítani az ívcsatornát, így a szekunder ívet – nagy valószínűséggel – 1÷2 perióduson belül (20-40 ms) véglegesen kiolthatja.

Bár a szél pillanatnyi értékének függvényében az ívcsatorna alakja és hossza sztochasztikusan változik, a szimulációk során legtöbbször a 3-1. ábra *b* részén látható egyszerű helyettesítő áramkört alkalmazták. A  $-U_A/2$  és a  $2C_{AB}$  a nagyobb feszültségű rendszer Thevenin elvű helyettesítő kapcsolását, a  $C_0$  a kikapcsolt fázisvezető földkapacitását, az  $R_N$  a szekunder ív ellenállását, a kapcsoló pedig az ív kialakását-újragyulladását szimulálja. Ez a modell a csatolások leképzésekor nem veszi figyelembe az elosztott paraméterű hálózat hatását, valamint elhanyagolja a távvezetéken lezajló hullámfolyamatokat is, ami a szekunder ív kialakását egyébként alapvetően befolyásolja [29]. Ezért az áramkörnek szimulációk és kísérletek során való alkalmazása legalább olyan irányú módosítást igényel, hogy a távvezetéknek a szekunder ívelésre gyakorolt hatása már megjelenik az áramkörben (lásd az 5. fejezetben).

## **I. TÉZIS**

Eltérő névleges feszültségű távvezeték rendszereket azonos nyomvonal esetén közös vagy külön oszlopsoron lehet vezetni. Az első esetben a kisebb és a nagyobb feszültségű rendszerek közötti szorosabb csatolás folytán, a kisebb feszültségű rendszer egy- és háromfázisú automatikus visszakapcsolásának (EVA és HVA) holtidejében - a sikeres zárathárítást alapvetően befolyásoló - szekunder ív kialakulásának és tartósabb fennmaradásának esélye jelentősen nagyobb a második esethez képest (lásd. a 4.1. fejezetben leírtakat).

*A 4.2.2. fejezetben ismertetett számítógépi szimulációs vizsgálataim eredményei kimutatják, hogy ezen a kisebb feszültségű rendszeren – amennyiben a szekunder ív rövid, nagy áramú viszszaugyújtások sorozatából áll – a kikapcsolt fázisvezető(kö)n feszültség eszkaláció folytán olyan mértékű földhöz képesti potenciálemelkedés alakulhat ki, amely a sikeres visszakapcsolást nagy valószínűséggel megakadályozza. Ezt a folyamatot önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívnek nevezem.*

*A szimulációs eredményeimet nagyfeszültségű kísérleti áramkörben végzett mérésekkel is alátámasztom, amelyek részletes elemzését a 4.3. fejezet tartalmazza.*

*A szimuláció és a mérés eredményei alapján a következő megállapításokat teszem:*

- *Azonos oszlopsoron való vezetésnél a potenciálemelkedés és ezáltal a visszakapcsolás sikertelensége megnövekedett valószínűséggel fog bekövetkezni a kisebb feszültségű rendszerrel nemcsak EVA, hanem HVA esetében is.*
- *A szekunder ív olyan névleges feszültségű (220, 120 kV) rendszereken is kialakul, ahol ezzel a veszéllyel külön oszlopsoron való vezetésnél egyáltalán nem kell számolni.*

## 4. Többrendszerű távvezetékek szekunder ív folyamatai

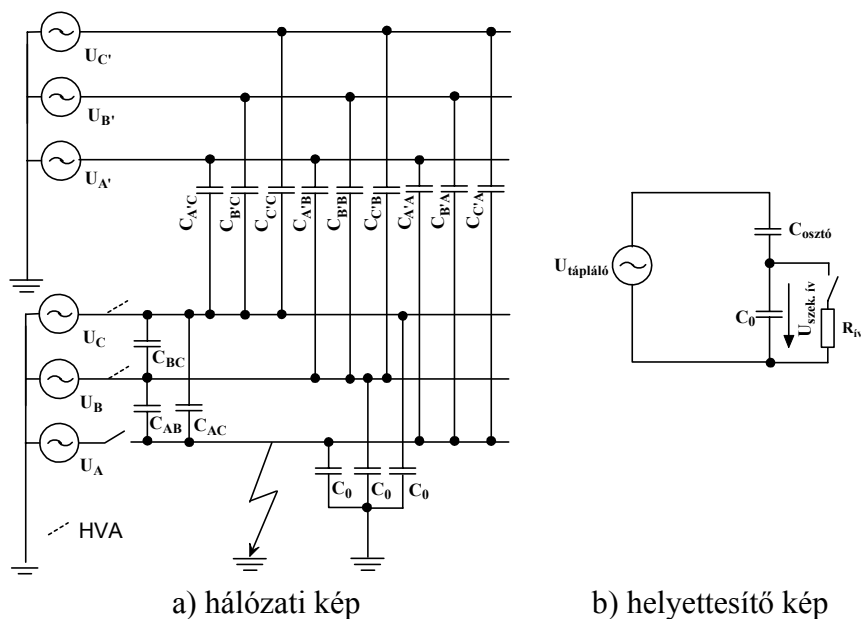
### 4.1 Főbb sajátosságok

A címben említett folyamat legfontosabb eltérései az egyrendszerűekhez képest (lásd. 3. fejezet) a következőkben foglalhatók össze:

A kétrendszerű, pl. 2\*220 vagy 2\*400 kV-os távvezetéseknél az egyik rendszeren zajló EVA ciklus alatt a szekunder ívet a kapacitív csatoláson keresztül nemcsak a saját rendszer ép fázisai, hanem a másik rendszer fázisvezetői is táplálják (lásd 4-1. ábra *a*) része). Az egyszerűsített helyettesítő képen (4-1. ábra *b*) része) a saját és a másik rendszer ép fázisainak Thevenin elvű helyettesítését az  $U_{\text{tápláló}}$  és a  $C_{\text{osztó}}$  jelenti. A többi áramköri elem megegyezik a 3-1. ábra *b*) részével.

Lényeges eltérés, hogy ilyen távvezetéseken nemcsak EVA, hanem háromfázisú automatikus visszakapcsoláskor (HVA) is képes kialakulni szekunder ív a kikapcsolt fázisvezető(k) és a föld közötti ionozott csatorná(k)ban, ugyanis a másik rendszer fázisai folyamatosan tudják táplálni a szekunder ívet háromsarkú kikapcsolás esetén is (lásd. a szaggatott jelölést a 4-1. ábra *a*) részén).

A megállapítás a kettőnél több rendszert tartalmazó vezetésekre is érvényes, ugyanis eltérés csak a tápláló fázisok számában van.



4-1. ábra – A szekunder ív többrendszerű távvezetéken

Magyarországon még nem, de Nyugat-Európában és a világ más részein már régóta használnak olyan többrendszerű távvezetéseket, amelyeknél különböző feszültség szintű (pl. 400/120 kV, 750/120 kV, 380/110 kV) rendszerek futnak együtt. Mint minden többrendszerű távvezeték esetén, így itt is – a megnövekedett kapacitív csatolás miatt – a kikapcsolt vezet(ők)ön megjelenő feszültség(ek) nagyobb(ak) lehet(nek)a különállókhöz képest. Ez különösen akkor problémás, amikor a kisebb feszültségű rendszeren lép fel az EVA vagy a HVA, ui. a kikapcsolt fázisvezetőn megjelenő nagyobb feszültség nagyobb valószínűséggel üti át az ívcsatornát.

*Tehát legfontosabb sajátosságként megállapítható, hogy a többrendszerű, eltérő névleges feszültség szintű távvezetékek kisebb feszültségű rendszerén megnő a szekunder ív kialakulásának valószínűsége, sőt olyan feszültség szinten is előfordulhat, ahol ez eddig nem volt jellemző (pl. 120 kV vagy 220 kV).*

## 4.2 A vizsgált jelenség részletes ismertetése

### 4.2.1 Az alapjelenség

A kiindulási állapot a jelenség kutatásához - a [47]-ben közölt - egyszerű szimulációs számítások és vizsgálati eredmények adták.

Ahogy arról korábban szó volt, a kikapcsolt fázisvezető a visszakapcsolási holtidő alatt csak csatolások útján kapcsolódik a földpotenciálhoz és a többi bekapcsolt fázisvezetőhöz, potenciálját a primer ív kialakása után a csatolások egymáshoz képesti aránya, valamint a visszagyújtások során lezajló töltés átrendeződés határozza meg.

Abban az esetben, ha valamilyen (villamos és/vagy termikus) folyamat következtében ennek a vezetőnek a földhöz képesti potenciálja megnő, akkor nagyobb valószínűséggel képes átütni, majd folytonosan ionizálni a primer ív után visszamaradt csatornát. Ha a szekunder ív intermittens szakaszában – a távvezetéken kialakuló hullámjelenségek következtében – a visszagyújtások rövididejű ( $2 * T_{ibef.} = 40 \div 400 \mu s$ ), nagy áramú (50 ÷ 2000 A) áramimpulzusokat keltenek [16], amelyek az első áram-nullaátmenetük egyikében nagy áramlevágással szűnnek meg, akkor az egymás után bekövetkező visszagyújtások a kikapcsolt fázisvezető potenciálját a földhöz képest az  $U_{csatolt, csúcs}$  többszörösére emelik.

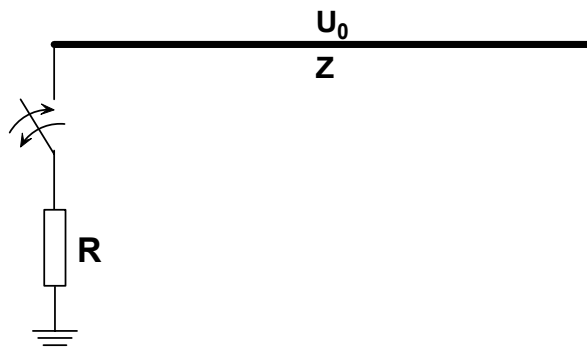
A folyamat magyarázata egyenfeszültségű leképzéssel könnyebben követhető [16]:

Az  $U_0$  feszültségre feltöltött,  $Z$  hullámimpedanciájú vezetőnek az egyik végén  $R$  ellenálláson keresztül való kisütésekor (lásd. 4-2. ábra) a vezető potenciálja az

$$U = U_0 * \frac{a}{1+a}$$

1. egyenlet

értékre csökken le, ahol  $a = \frac{R}{Z}$ .



4-2. ábra –  $U_0$  feszültségre feltöltött,  $Z$  hullámimpedanciájú vezeték kisütése  $R$  ellenálláson

Az első áram-nullaátmenetben való árammegszakítás után a vezető

$$U' = U_0 * \frac{a-1}{a+1}$$

2. egyenlet

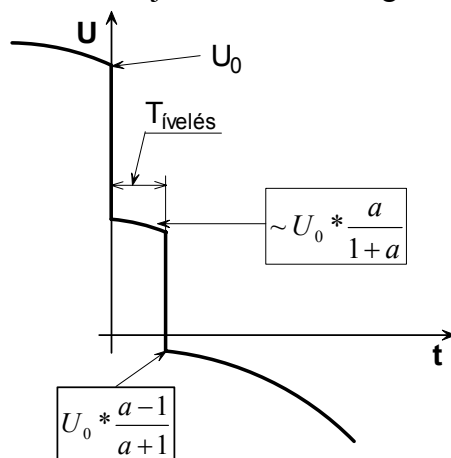
feszültségére növekszik meg, aminek során

$$\Delta U = (2) - (1) = U_0 \frac{a-1}{a+1} - U_0 \frac{a}{1+a} = -\frac{U_0}{a+1}$$

3. egyenlet

potenciálváltozás következik be.

A többrendszerű távvezeték kikapcsolt fázisvezetőjén a visszamaradt ionozott csatornában bekövetkező rövid, nagy áramú impulzusokkal történő átütés esetén a potenciálváltozások az előbb ismertetett folyamatnak megfelelően zajlanak le, azzal az eltéréssel, hogy a váltakozó áramú (50 Hz) táplálás miatt az ívelés ideje alatt a feszültség értéke változik (lásd. 4-3. ábra)



**4-3. ábra – A kikapcsolt vezetők potenciáljának alakulása az átütés során, 50 Hz-es  $U_{\text{csatolt}}$  esetén**

Ez a változás azonban elhanyagolható a kialakulás és a visszagyújtás során kialakuló  $\Delta U$ -hoz, valamint az  $U_{\text{csatolt, csúcs}}$ -hoz képest, mivel

$$2 * T_{\text{bef. } 100\text{km}} = 0,66\text{ms} < 0,04 * T_{\text{periódus } 50\text{Hz}} \text{ és ekkor}$$

$$\Delta U_{\text{csatolt, max}} \leq U_{\text{csatolt, csúcs}} * 0,1$$

#### 4. egyenlet

A szekunder ív árama két részből tevődik össze:

- A kikapcsolt vezetékben tárolt töltéseknek ( $C_0$ ) az  $R_{iv}$  ellenálláson keresztül történő kisütő áramából.
- A tápláló rendszer irányából  $X_{\text{Cosztó}}$ -ón keresztül érkező áramból.

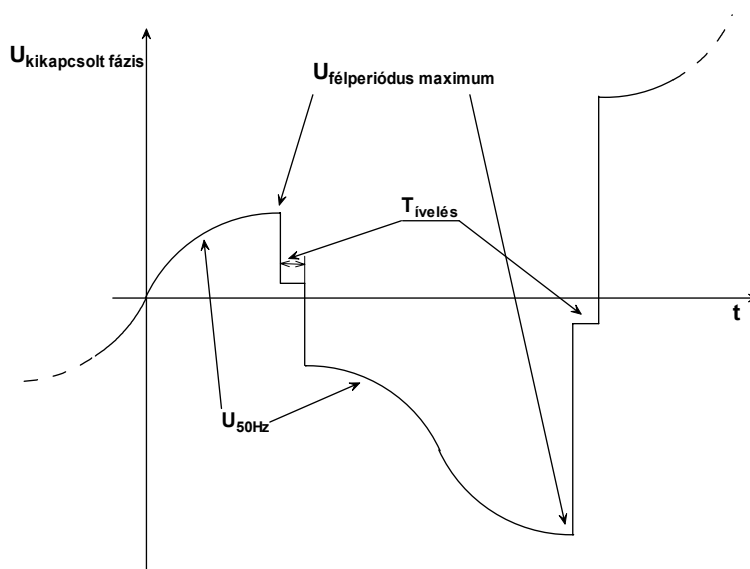
A többrendszerű vezetékek esetében általánosan igaz a következő egyenlőtlenség:

$$|X_{\text{Cosztó}}| > |X_{C0}| \gg |R_{iv}|$$

#### 5. egyenlet

A dolgozatban általánosan vizsgált 400/120 kV-os oszlop esetén (lásd. 4-6. ábra *b*) része) az 5. egyenletben  $\frac{X_{\text{Cosztó}}}{X_{C0}} \approx 10$  arány áll fenn. Utóbbiból és az 5. egyenletből következik, hogy az ív-

áramban a  $C_0$ -t kisütő komponens a domináns, így a 4-2. ábra által mutatott folyamatnak megfelelően változik a vezeték potenciálja az ívelés során. A nagyobb feszültségű rendszerről - kapacitív csatolás útján - átkerülő 50 Hz-es feszültség a kialakulás utáni potenciálra szuperponálódva tovább növeli a földhöz képesti potenciált, aminek következtében nagy valószínűséggel újabb átütés fog bekövetkezni. Ekkor az  $U_0$  értéke már nagyobb lesz, így az ívkialakulás utáni potenciáleltolás is megnövekszik. Ezt a folyamatot mutatja be a 4-4. ábra, két visszagyújtás esetére. Amennyiben nem a következő félszériódus feszültség maximumánál történik az újabb átütés, a potenciálnövekedés nem lesz ennyire meredek, de ugyan így növekvő jelleget mutat.

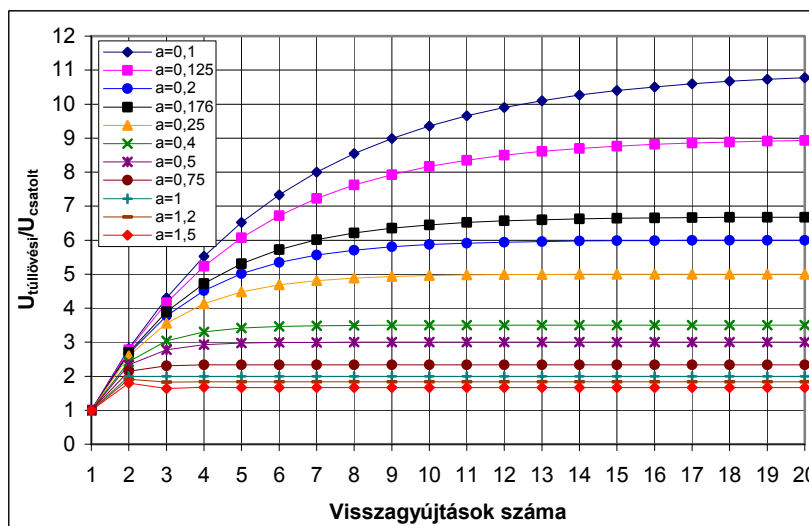


4-4. ábra – Az ívelés során bekövetkező potenciálcsökkenés, majd az 50 Hz-es feszültség szuperonálódása az ívkialvás utáni feszültségre

A visszagyújtásoknak folyamatosan, minden félperiódusban a maximális feszültségnél való bekövetkezése esetén (ahogyan a 4-4. ábra mutatja) a potenciál értéke jelentősen megnövekedhet, az  $U_{csatolt,csúcs}$  többszöröse is kialakulhat. A növekedés felső korlátját az ívellenállás ( $R_{iv}$ ) és a távvezeték hullámimpedanciájának (továbbiakban:  $Z_{táv}$ ) aránya határozza meg. A 2. egyenlet

alapján az  $\frac{U_{túllövési}}{U_{csatolt,csúcs}}$  aránynak a visszagyújtások és az  $a = \frac{R_{iv}}{Z_{táv}}$  paraméter függvényében való

alakulását mutatja be a 4-5. ábra.

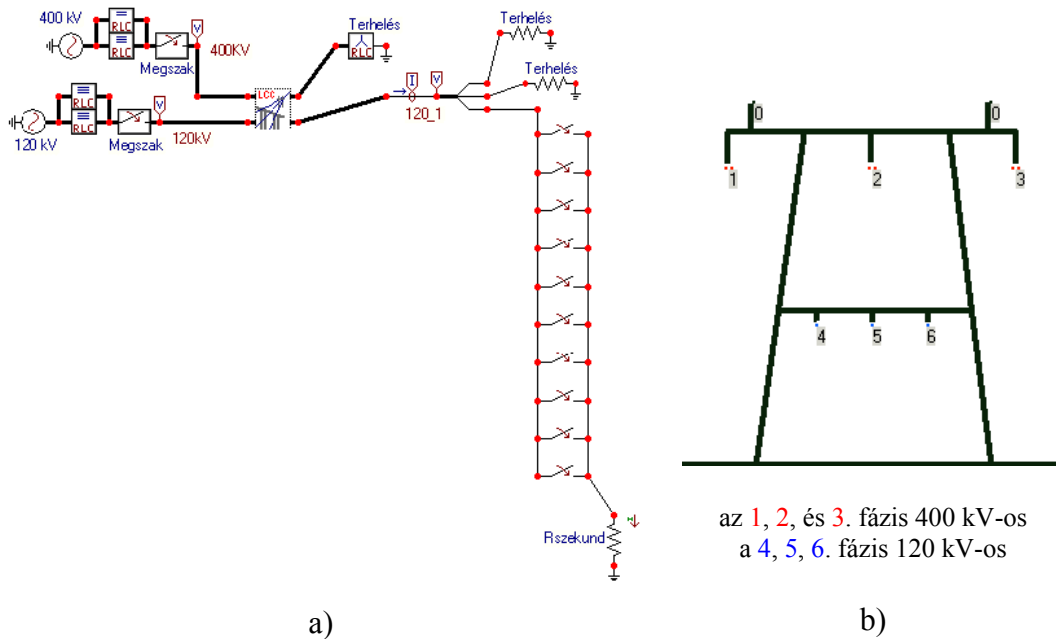


4-5. ábra – Az  $\frac{U_{túllövési}}{U_{csatolt,csúcs}}$  arány alakulása a visszagyújtások függvényében, különböző  $a = \frac{R_{iv}}{Z_{táv}}$  értékek esetén

Az  $U_{túllövési,max} = 2 \div 11 * U_{csatolt,csúcs}$  -ből látható, hogy jelentős eltérések lehetnek a maximális potenciál értékében. A gyakorlatban előfordul  $R_{iv}$  és  $Z_{táv}$  esetén az  $a \geq 0,2$  törvényszerűség áll fenn [30], ekkor a 10-11-ik visszagyújtástól kezdve a potenciál abszolút értéke nem változik. Ez azt jelenti, hogy létrejön egy egyensúlyi állapot, amikor a csatolások által átkerülő töltések száma megegyezik az átütések során kisülő töltések számával.

## 4.2.2 Szimulációs eredmények

A 4.2.1. fejezetben bemutatott jelenség vizsgálatához a legmegfelelőbb eszköznek a számítógépes szimuláció bizonyult, a felhasznált program az ATP-EMTP [15] volt. A szimuláció során egy kétrendszerű, eltérő névleges feszültségű távvezetékben indultam ki, amelynek a kisebb feszültségű rendszerén FN zárlat következtében az egyik fázisban kikapcsolás történt. Feltételeztem, hogy a primer ív már kialudt, a szekunder ív folytonos intervalluma már lezajlott, az ívfeszültség értéke megnőtt akkorára, hogy csak az  $U_{csatolt,csúcs}$  feszültség közelében képes létrejönni átütés, az előbb bemutatott intermittens szekunder ívelésnek megfelelően. A kialakított alap szimulációs áramkört a 4-6. ábra a) része mutatja.



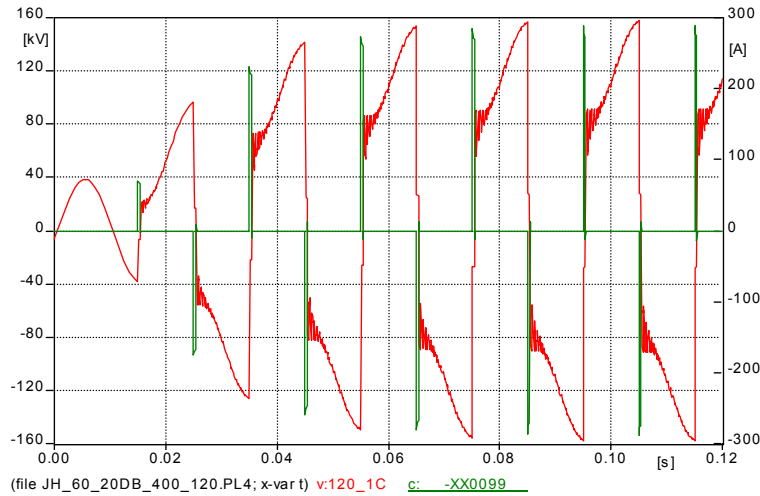
4-6. ábra - Az ATP-ben [15] alkalmazott alap szimulációs áramkör (a) és az alap oszlopkép (b))

Az áramkörben egy 400/120 kV-os 60 km hosszú távvezeték képeztem le az ATP-EMTP LCC (Line/Cable Component) eleme segítségével, a 4-6. ábra b) része által mutatott oszlopképpel. Ez a modell az oszlopképnek, a vezetők fajlagos ellenállásának, geometriai elrendezésének és a föld fajlagos ellenállásnak ismeretében frekvenciafüggő csillapítású, végtelenül finoman elosztott paraméterű hálózattal - a valóságot jól közelítő módon - képezi le a távvezeték. A munka során azonban a leképzés következő korlátjába ütköztem: az LCC alapján megadott távvezeték paramétereinek kiszámításakor az EMTP Laplace tartományban dolgozik; végül azonban az időfüggvények számításához az időtartományba konvertálja a paramétereket. Ezt Laplace-időtartomány konverzióval teszi meg, aminek eredményeként egy megadott frekvencia környékén lesz pontos a modell; azaz szélesebb időspektrumot igénylő szimuláció esetén az LCC modell már korlátot jelent. Jelen feladatnál mind az 50 Hz-es ( $U_{csatolt}$ ), mind a tranziensek frekvenciatartományában (lásd. 4-4. ábra visszagyújtások) fontos lett volna a valóság-hű szimuláció. Megoldásképpen a konvertálási frekvenciát a tranziens tartományba állítottam, az 50 Hz-es pontatlanság kiküszöbölésére pedig a kapott időfüggvényeknél korrekciós faktort alkalmaztam. Minden időfüggvény esetén az 50 Hz-re állított LCC modell által meghatározott  $U_{csatolt}$  adta az alapot, az ettől való eltérés határozta meg a korrekciós faktor értékét.

A 4-6. ábra által mutatott oszlopképen a piros színű vezetők a 400 kV-os (1-es, 2-es és a 3-as), a kékek a 120 kV-os (4-es, 5-ös és 6-os) fázisokat jelölik, a két db 0-s vezető a védővezető. A háromfázisú rendszerek megszakítók közbeiktatásával névleges (400 kV és 120 kV) feszültségű táplálást kapnak és a névleges terhelést leképző hullámimpedanciákkal vannak lezárva. A kikapcsolás a C fázisban történik, az ábra jobb alsó részén látható a szekunder ív visszagyújtásait

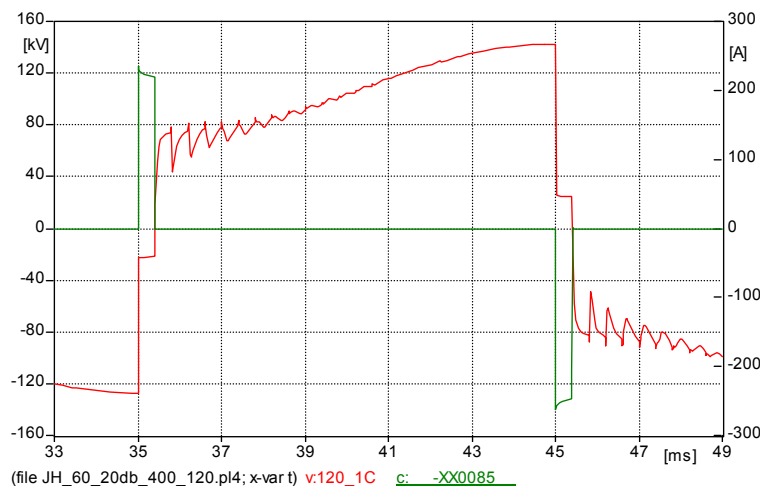
szimuláló 10 db kapcsoló és az ívet leképező 100 Ω-os ellenállás. Az ívleképzési módszerek hatását a 80. oldalon és a 10. fejezetben tárgyalom.

A 4.2.1. fejezetben ismertetett folyamat (lásd. 4-4. ábra) eredményeképpen a kikapcsolt C fázisban kialakuló **potenciálnövekedést** és az azt okozó **áramimpulzusokat** a 4-7. ábra mutatja.



**4-7. ábra – A kikapcsolt vezető megnövekvő potenciálja és az azt okozó rövid, nagy amplitúdójú áramimpulzusok szimulációval meghatározva**

A rövid áramimpulzusok talpszélességét a távvezeték befutási idejének a kétszerese, ebből következően a távvezeték hossza, az amplitúdóját pedig – a 21. oldalon leírtaknak megfelelően – a kikapcsolt fázis és a föld közötti kapacitásban tárolt töltések száma határozza meg. Jól kivehető az ábrán az előző fejezetben bemutatott alternáló előjellel növekvő potenciál és az annak megfelelően folyamatosan növekvő amplitúdójú áramimpulzusok is. A visszagyújtások ugyanakkora ( $2 \cdot T_{bef.}$ ) áramimpulzus szélessége miatt ez növekvő energiát, ebből következően növekvő ívhőtartalmat és csatorna ionozottságot jelent. A növekedés egészen a 9÷10-ik visszagyújtásig tart, ahonnan a gradiens már közel nulla, s így létrejön az előző fejezet végén említett egyensúlyi állapot. Két visszagyújtás kinagyított időfüggvényét a 4-8. ábra mutatja.

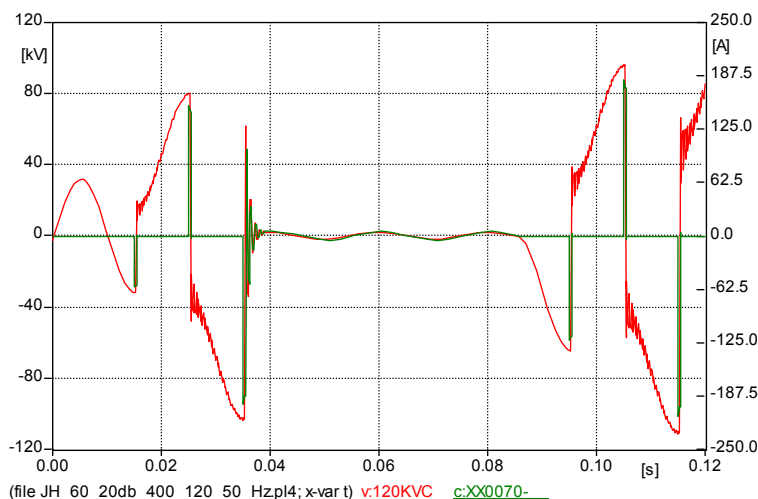


**4-8. ábra – A 4-7. ábra kinagyított visszagyújtásai**

Jól megfigyelhető az ívelés ideje alatt az előző fejezetben leírtaknak megfelelően lecsökkenő (35 ms-nál  $\sim 20$  kV), majd az ívkialvás után megnövekvő potenciál, amire az 50 Hz-es feszültség szuperonálódik, tovább növelve a kikapcsolt fázisvezető potenciálját. A kialvás utáni rárezgő, csillapodó amplitúdójú összetevő az ívkialvás következtében a távvezetéken meginduló feszültség hullám reflektálódásából alakul ki. Periódusideje megegyezik a visszagyújtás talpidejével, amplitúdóját a távvezeték hosszanti ellenállásai folyamatosan csökkentik. Az áramimpul-

zus amplitúdója – igaz elhanyagolható mértékben – változik az ívelés ideje alatt, amit a visszagyújtás hatására a távvezetéken meginduló kiegyenlítő áramhullám okoz. Az ábrán a 2. visszagyújtás nagyobb feszültségértékről történik (45 ms-nál  $\sim 145$  kV), mint az előzőnél (35 ms-nál  $\sim 130$  kV), így az ívkialvás után bekövetkező potenciálcsökkenés is nagyobb lesz.

Ha a feszültség értéke megemelkedett és kellő hőtartalmú visszagyújtás tud bekövetkezni, akkor nem fog az ív az első tranziens áram-nullaátmenetek egyikében kialudni, hanem - amennyiben a csatorna kellően ionozott a teljesítményívhez - kialakul az 50 Hz-es ív, a kikapcsolt fázisvezető potenciálja pedig lecsökken (lásd. 4-9. ábra  $\sim 35$  ms).



**4-9. ábra – Megnövekedett hőtartalom hatására folytonos szekunder ívbe visszaalakuló, majd újból intermittenssé váló szekunder ív feszültsége és árama szimulációval meghatározva**

Az 50 Hz-es ív sajátosságaiból adódóan (kürtöhatás, elektrodinamikusan erőtér) önmagától nyúlik, kifelé tágul (lásd. CD melléklet 1. avi és 2. avi), így a meglévő (lecsökkent) potenciálkülönbségnek egyre hosszabb, tehát nagyobb feszültségű ívet kell fenntartania. Erre egy adott ívfeszültség felett már nem képes, így ismét elérkezik az az állapot, amikor az 50 Hz-es ív az egyik áramnullaátmenet után közvetlenül (kis feszültségértéknél) nem tud újragyulladni (lásd. 4-9. ábra  $\sim 86$  ms) és egy félperióduson belül nagyáramú visszagyújtás jön létre ( $\sim 95$  ms). Ezután újból a rövid visszagyújtásokból álló ívelési szakasz következik. Ez a két fajta ívelés egymást váltogatva elnyújthatja a szekunder ívet a visszakapcsolási holtidő végéig, sikertelenné téve azt. Számos oszloptípus és a névleges feszültségek (750, 400, 120 kV) kombinációjával elvégzett szimulációk alapján a következő állításokat teszem:

- I. A kisebb feszültségű, kikapcsolt fázisvezető(k) potenciálja rövid, nagy áramú visszagyújtások hatására a kapacitív csatolás útján átkerülő feszültség értékének többszörösére emelkedhet, megnövelve ezáltal a szekunder ív fennmaradásának valószínűségét. A megnövekedett feszültség értéke meghaladhatja a kisebb feszültségű rendszer névleges feszültségét.
- II. A minden félperiódusban bekövetkező átütések hatására, a kikapcsolt vezető potenciáljának félperiódusonkénti maximumai ezen a megnövekedett feszültségszinten maradnak (lásd. 4-7. ábra félperiódusonkénti **feszültségmaximumai** 0,075 másodperctől).
- III. A félperiódusonként kialakuló átütések következtében a szekunder ív eltarthat a visszakapcsolási holtidőt meghaladó ideig is, sikertelenné téve ezáltal a visszakapcsolást.
- IV. Ha a feszültség értéke megemelkedett és kellő energiatartalmú visszagyújtás tud bekövetkezni, akkor az ív az első tranziens áram-nullaátmenetben nem alszik ki, hanem a csatorna kellő ionozottsága esetén kialakul az üzemi frekvenciájú teljesítményív, a lebegő-pont potenciálja pedig lecsökken (lásd. 4-9. ábra). Az 50 Hz-es ív önmagától nyúlik, így a meglévő potenciálkülönbségnek hosszabb, tehát nagyobb feszültségű ívet kell fenntartania. Erre egy érték felett nem képes, ismét elérkezik az az állapot, amikor az 50 Hz-es ív az egyik

áram-nullaátmenet után közvetlenül (kis feszültségértéknél) nem tud újragyulladni, hanem (egy félperióduson belül) újból nagyáramú visszagyújtás történik. Ez az intermittens/folytonos ívelési folyamat eltarthat a visszakapcsolási holtidő végéig, sikertelen visszakapcsolást okozva.

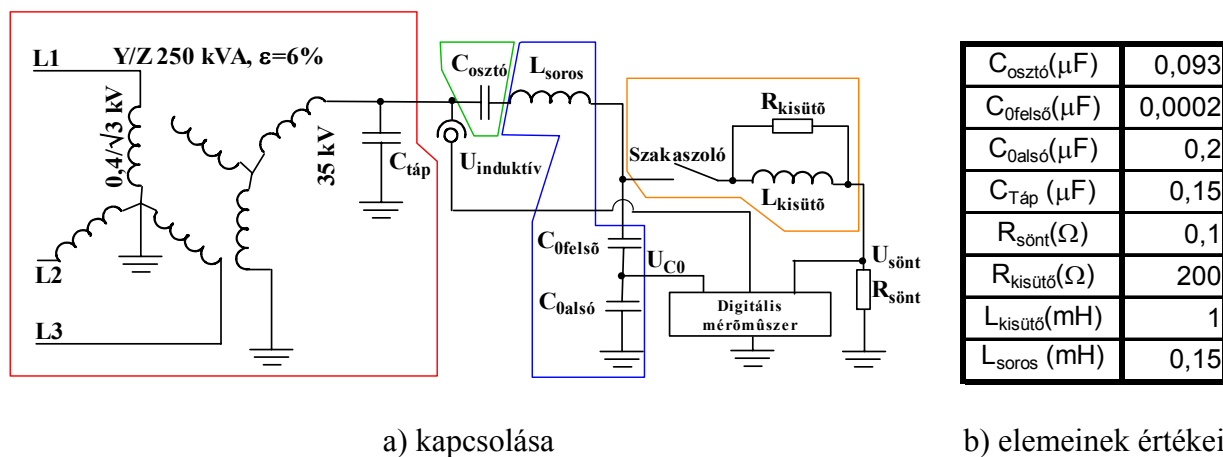
A felsorolt tulajdonságokkal meghatározott jelenséget *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív*nek nevezem.

### 4.3 A jelenség igazolására szolgáló kísérlet

Szükséges volt a szimulációval vizsgált *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* kialakulásának ellenőrzése kísérleti úton, mivel egyrészt a valóságban (hálózaton/kísérleti áramkörben) olyan körülmények befolyásolják a folyamatot, amelyek egy szimuláció során csak megszorításokkal modellezhetők, másrészt a jelenség újdonság volta is ezt indokolta.

Hálózati mérésre – finanszírozási okból – nem volt lehetőség, így a kísérlet tervezése során csak koncentrált elemekből kialakítható áramkörben tudtam gondolkodni. A primer áramkört, a mérési és kísérleti körülmények kialakítását az OVIT Rt. rendelkezésére álló és általa egyszerűen beszerezhető, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszékén meglévő - korlátozott lehetőségeket biztosító - áramköri és mérő elemek, valamint a lehetőségek szerinti helyszín és betáplálási mód határozták meg. Ezek függvényében a kísérlet tervezése során arra törekedtem, hogy elsősorban a jelenség meglétét tudjam igazolni, nem a hálózati elemek (pl: távvezeték) teljesen precíz leképzése volt a fő cél.

A kivitelezésre az OVIT Rt. kezelésében lévő Göd-i alállomás 4.sz. transzformátor mezőjében került sor, ahol egy kis terhelhetőségű táphálózattal rendelkező, diszkrét elemekből álló, nagyfeszültségű áramkört alakítottunk ki. A kísérleti áramkör kapcsolását a 4-10. ábra a) része, az áramköri elemek értékeit a 4-10. ábra b) részén látható táblázat mutatja.



4-10. ábra – A 4.2.2. fejezet végén tett állítások igazolására szolgáló nagyfeszültségű kísérleti áramkör

Az áramkörnek 5 elkülöníthető része van:

- A nagyobb feszültségű rendszert (**piros keret**) az Y/Z kapcsolású 0,4/35 kV-os transzformátor és a  $C_{táp}$  kondenzátor alkotja. Az átütésekkor szükséges lökészerű energiaigények kiszolgálását bekorlátozná a 250 kVA-es transzformátor kis impulzusüzemű terhelhetősége, ezért erre a célra a  $C_{táp}$  kondenzátorban tárolt töltést használtuk fel.
- A  $C_{osztó}$  kondenzátor a nagyobb és a kisebb feszültségű rendszer közötti kapacitív csatolást helyettesíti (**zöld keret**).
- Az  $L_{soros}$  induktivitás a kikapcsolt, kisebb feszültségű fázisvezető hosszirányú induktivitását, a két tagból álló ( $C_{0felső}$  és  $C_{0alsó}$ ) kapacitív osztó a földhöz képesti kapacitását szimulál-

ja (kék keret). A kapacitív osztó tagjai közül a  $C_{0felső}$  az áramkörben lezajló folyamatok szempontjából a meghatározóbb.

- A kézi működtetésű szakaszoló az ívképző elem (lásd. 4-11. ábra a) része), a kisütő párhuzamos RL kör ( $R_{kisütő}/L_{kisütő}$ ) az áram korlátozását, valamint a visszagyújtáskor a távvezeték kialakuló hullámfolyamatok leképezését szolgálja (narancssárga keret).
- Az áramkör keretezés nélküli elemei a mérő és regisztráló részt mutatják. A nagyobb feszültségű rendszer feszültségét a beépített induktív feszültségváltó ( $U_{induktív}$ ), a kikapcsolt fázisvezető (lebegő-pont) potenciálját a kapacitív osztó alsó tagja ( $U_{C0}$ ), az ív áramát a földelés elé beiktatott áramsönt ( $I_{ív} = \frac{U_{sönt}}{R_{sönt}}$ ) szolgáltatja.

Mint előbb említettem a kísérleti áramkör kialakításakor a szimulációhoz képest egyszerűsítéseket kellett alkalmazni. A fontosabb eltérések és kompromisszumok a következők voltak (lásd. 4-10. ábra):

- A nagyobb feszültségű rendszer feszültsége jelentősen kisebb (35 kV), mint a szimuláció során alkalmazott (400 kV).
- A  $C_{osztó}$  és a  $C_0$  egymáshoz viszonyított aránya ( $A_{C,kísérlet} = \frac{C_{osztó}}{C_0} = 465$ ) nem felel meg a szimulációval vizsgált 400/120 kV-os távvezetékénél fennálló  $C_{osztó}$  és  $C_0$  aránynak ( $A_{C,400/120} \approx 8$ ), ezért a táppont ( $U_{induktív}$ ) villamosan közel áll a lebegő-ponthoz ( $U_{C0}$ ).
- Az állandósult ív árama kisebb ( $\sim 0,8 A_{eff.}$ ), mint a 400/120 kV-os távvezeték szimulációja során kapott (lásd. 4-9. ábra,  $\sim 3,5 A_{eff.}$ ).
- A  $C_{táp}$  kondenzátor soros rezgőkört alkot a 0,4/35 kV-os transzformátorral.

#### A felsorolt kompromisszumok hatása a kísérleti áramkör megfelelésére:

Alapvető követelménye volt az áramkörnek, hogy a lebegő-ponton ( $U_{C0}$ ) megjelenő feszültség értéke elérje a 35-40 kV<sub>csúcs</sub>-ot, mivel a szimuláció során ekkora volt a 400/120 kV-os távvezeték kikapcsolt 120 kV-os fázisán a csatolással megjelenő feszültség ( $U_{csatolt}$ ) amplitúdója (lásd. 4-7. ábra). Az áramkör elemeinek értékét állandósult állapotra (50 Hz) kiszámítva a következőt kapjuk:

$$X_{C0,felső} = 16M\Omega \gg X_{Cosztó} = 35k\Omega > X_{C0,alsó} = 16k\Omega \gg X_{Lsoros} = 0,314\Omega$$

#### 6. egyenlet.

Ebből következik, hogy az

$$U_{C0} \approx U_{induktív} = 35kV_{eff} * \sqrt{2} = 50kV_{csúcs}$$

#### 7. egyenlet

így az első visszagyújtás előtt a lebegő-ponton biztosított a kellő nagyságú 50 Hz-es feszültség. Azonban ez az egyenlőség felveti azt a kérdést, hogy a villamos távolság – ami a szimulációk során jóval nagyobb – elegendő lesz-e a jelenségnek a kísérleti áramkörben való kialakulásához? A villamosenergia-hálózaton lévő és a szimulációk során alkalmazott 400 kV-os feszültség merev tápfeszültség, értéke nem változhat. A kísérleti áramkör egy kb. 500-600 m hosszú 0,4 kV-os kábelén keresztül kapta a betáplálást a Göd-i alállomás 0,4 kV-os segédüzeméből. A kábel és a 35/0,4 kV-os transzformátor impedanciája miatt a transzformátor 35 kV-os oldalán megjelenő feszültség nem olyan merev, mint a szimulációk során használt generátoré, ezért az induktív feszültségváltó feszültsége a visszagyújtások pillanatában el tud tolni, ahogyan azt a 4-14. ábra és a 4-17. ábra mutatja. Hálózati körülmények között a tápfeszültség merev, a villamos távolság biztosítja a lebegő-pontnak a szeparálódási lehetőséget; a megvalósult kísérletnél a lecsökkent villamos távolságot a jelentős mögöttes impedanciák által okozott nem merev táp-

feszültség ellensúlyozta. Ezek alapján az *A.* és a *B.* pontban említett kompromisszumok megengedhetőek voltak a vizsgált jelenség bizonyításának szempontjából.

A kísérlet elsődleges célja az volt, hogy az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* jelenségén belül bizonyítsa a megnövekvő potenciál kialakulásának és a holtidőt meghaladó ideig való fennmaradásának lehetőségét, nagyfeszültségű körülmények között. Az 50 Hz-es ív kifejlődése ezekhez képest csak addicionális szerepet játszott. Akkor van lehetőség arra, hogy a jelenségnek ezt a részét is „valósnak” tekinthető körülmények között tudjuk vizsgálni, ha az állandósult ív árama egy kísérleti áramkörben elérheti és meghaladhatja azt a küszöböt, amelyet a szimuláció során meghatároztam. Ezt csak a II. tézisben és a hozzá tartozó 5. fejezetben bemutatásra kerülő - a valóságot híven leképező - áramkör megépítésével, vagy tényleges hálózati kísérlet elvégzésével lehet megteremteni, a megépített kísérleti áramkörben a táptranzformátor korlátos terhelhetősége miatt erre nem volt lehetőség. Mivel azonban a *C.* kompromisszum az 50 Hz-es ív kialakulására vonatkozik, így esetleges nem kialakulása a kísérlet bizonyító voltát nem csökkenti.

A beépített  $C_{táp}$  kondenzátor következtében kialakuló (*D.* pontban megjelölt) rezonancia jelenség frekvenciája olyan nagyságú (~300 Hz), hogy nincs hatása sem a visszagyújtások, sem az 50 Hz-es ívjelenségek kialakulására, ill. lefolyására. A szekunder ív igazolásának szempontjából csak, mint a regisztrátumokban megjelenő, vizuálisan megfigyelhető, de a kísérleti eredményeket nem megmásító tényező van jelen.

Ezek a kompromisszumok az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* kialakulásának szempontjából kedvezőtlen (gyenge táphálózat, kis villamos távolság) irányba egyszerűsítették a kísérleti áramkört. Mivel a jelenség ezen „megszorító” körülmények ellenére kialakult (lásd. 4.3.2. fejezet), ezért nagy valószínűséggel a jelentősebb villamos távolságot és erősebb táphálózatot biztosító hálózati körülmények között is létrejön.

Az áramköri összeállítás két részletét a 4-11. ábra mutatja, az *a)* részen az ívképző 120 kV-os szakaszoló látható. A *b)* részen az első sorban (balról jobbra) az  $U_{induktív}$  jelet szolgáltatató feszültségváltó, az  $L_{soros}$  induktivitás és a  $C_{osztó}$  kondenzátorok, a másodikban pedig az  $R_{kisütő}$ -t leképező két db FÁNOE ellenállás és az  $L_{kisütő}$  induktivitás helyezkedik el.



ívképző szakaszoló

a)



az áramkör egy része

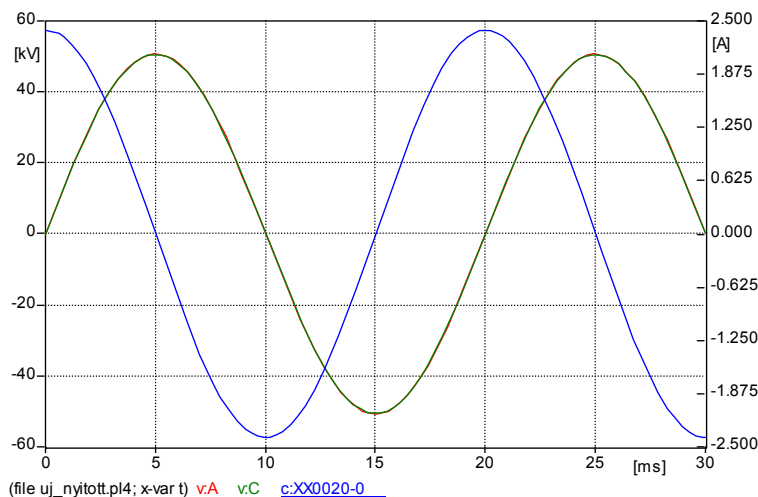
b)

**4-11. ábra. A 4-10. ábra által mutatott kísérleti áramkör megvalósulása**

A mért értékek regisztrálását többcsatornás digitális műszerrel végeztem, ezen túlmenően az ívekről videó felvétel is készült (lásd. *1.* és *2.avi* a CD mellékleten), így a későbbi kiértékelés során a mért jelalakok és a kialakuló ívek visszajátszása megoldható volt.

### 4.3.1 Az áramkör működése

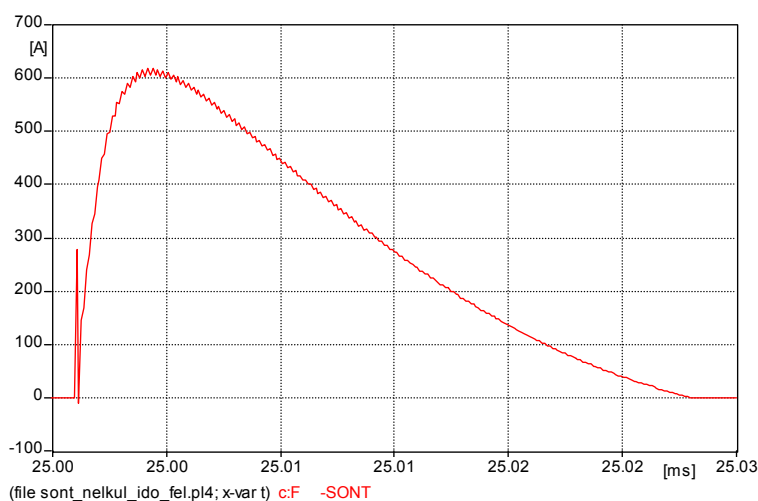
Bekapcsoláskor a kézzel működtetett szakaszoló nyitva volt, az áramkör a  $C_{osztó}$ ,  $L_{soros}$ ,  $C_{0felső}$ ,  $C_{0alsó}$  soros ágon és az ezzel párhuzamosan kötött  $C_{táp}$ -on keresztül záródott. A 6. egyenlet és a 7. egyenlet értelmében az áramkör ekkor kapacitív feszültségosztóként működött, az **induktív feszültségváltó** és a **kapacitív osztó** egybeeső feszültségét, valamint az **Y/Z transzformátor 35 kV-os oldalán mérhető áramot** a 4-12. ábra mutatja.



**4-12. ábra – A szakaszoló nyitott állapotában az **induktív feszültségváltó** és a **kapacitív osztó** egybeeső feszültsége valamint az **Y/Z transzformátor 35 kV-os oldalán mérhető áram** szimulációs leképzéssel meghatározva**

Ez az állapot megfelel annak, amikor még nem történt visszagyújtás az ívesatornában. Mivel a kisütő körben nem folyt áram, így a szakaszoló pofái között  $U_{C0}$  nagyságú volt a potenciálkülönbség. Ha a szakaszolót elkezdtük zárni, akkor ez a potenciálkülönbség átütötte a pofák közötti légréteget és megindította a - két komponensből álló - áramhullámot a kisütő kör irányába:

1. az első komponens a  $C_0$ -ban és a  $C_{táp}$ -ban tárolt energia rendkívül rövid időállandóval való ( $\sim 0,2 \mu s$ ) kisülése képezte,
  2. a második az  $R_{ív}-L_{kisütő}$  soros kör által meghatározott időállandójú ( $10 \div 30 \mu s$ ) áramhullám.
- A 4-13. ábra mutatja a két áramhullám eredőjeként létrejött rövid áramimpulzus kinagyított időfüggvényét.



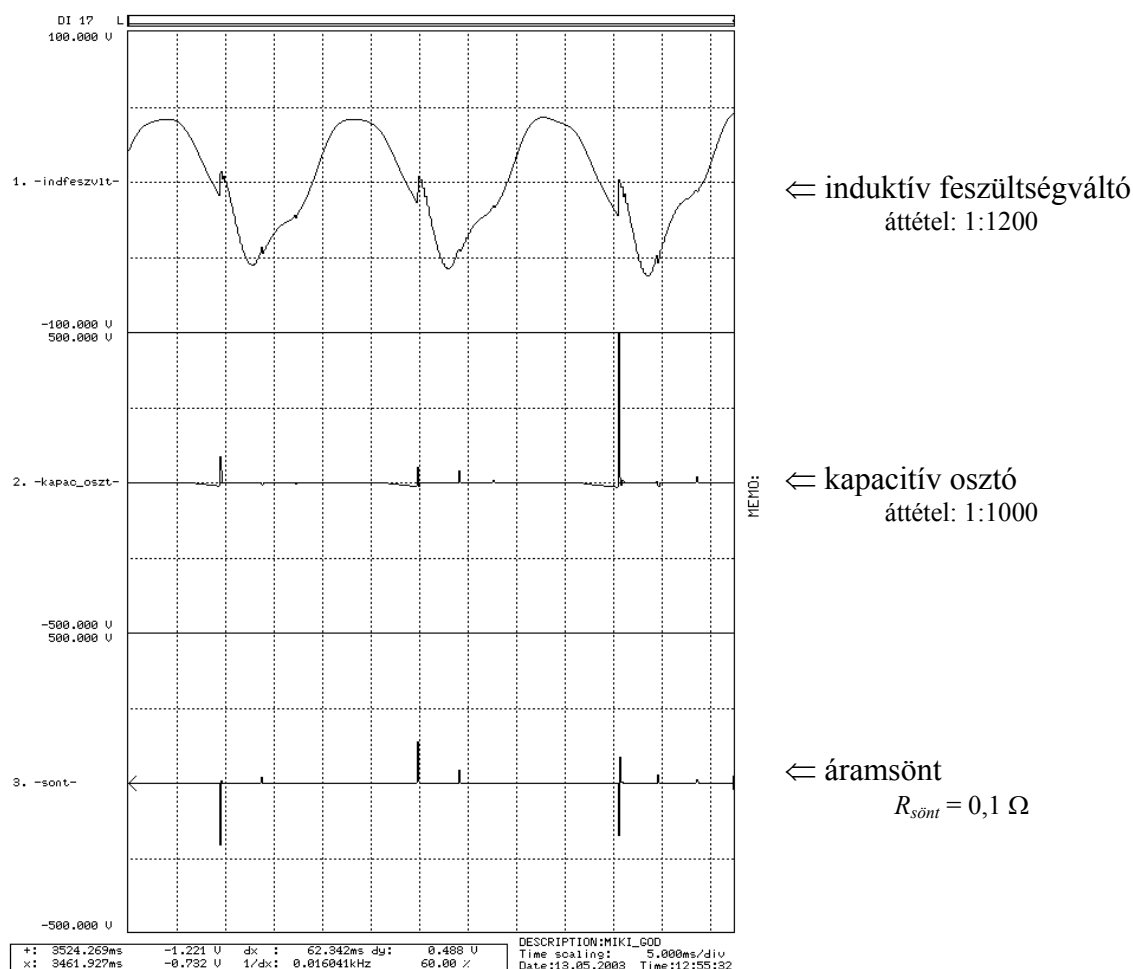
**4-13. ábra – A szakaszoló pofáinak átütésekor kialakuló áramhullám, az előzetes szimulációk alapján**

A 4.2.1. fejezetben elmondottakkal analógiában az ív megszakadt a nagyobbik időállandóval rendelkező áramhullám nullaátmenete környékén, ezáltal kialakult a potenciáletolás, amire a tápfeszültség szuperponálódott tovább növelve a lebegő-pont potenciálját. Az ívelés és az utána következő feszültségnövekedés megfelelt a 4-7. ábra által mutatott átütéseknek.

Az első visszagyújtás létrejötte után a folyamat alakulását alapvetően a hosszú, kisáramú ívek környezeti és villamos paraméterek hatására bekövetkező nyúlása, hülése, alakváltozása és ezekből eredően az ívfeszültség, az ívkialvások utáni feszültségeltolások, a visszagyújtásokhoz szükséges átütési feszültségek határozták meg. A szakaszolópórák léghözéneke változtatásával csak korlátozott mértékben lehetett befolyást gyakorolni az ívelésre.

A regisztrált jelek vizsgálata során a következő probléma merült fel:

A kapacitív osztó és az áramsönt időfüggvényében nagy amplitúdójú, rövid ( $< 1\div 2 \mu\text{s}$ ) feszültségcsúcsok láthatók, a jelalak többi része pedig zavar szint alatti, értékelhetetlen. Erre mutat példát a 4-14. ábra.



**4-14. ábra – A kísérlet során a túlfeszültségvédelem által megmásított regisztrált eredmény**

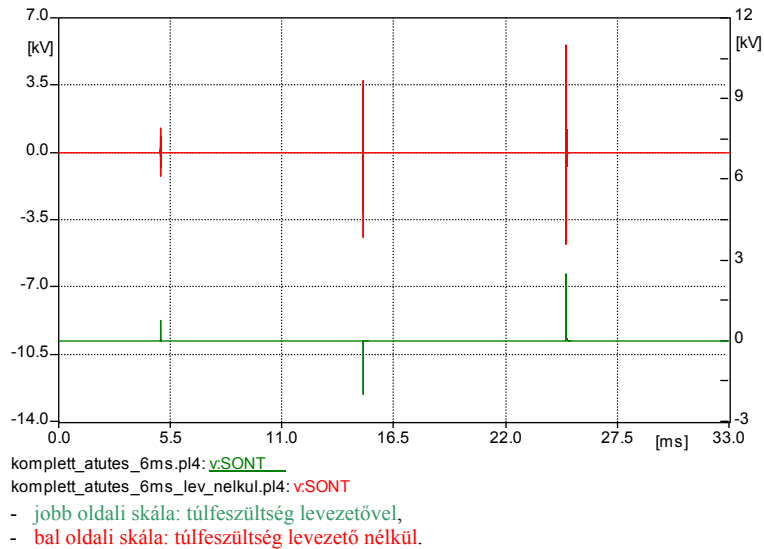
A legfelső *indfeszvlt* jel a várt szinuszos alapú, amplitúdójú, az átütésekkor eltolódó, a *kapac\_oszt* és a *sont* az említett, értékelhető információt nem szolgáltató jelalak. Az átütések ideje tisztán kivehető mindhárom időfüggvényből, de az ívelés, ívkialvás és a kapacitív osztón ezek hatására létrejövő feszültségeltolás nem látható.

A jelenség a következő folyamat miatt alakult ki: a  $C_0$  és a  $C_{táp}$  kapacitások kisülésekor kialakuló  $\sim 0,2 \mu\text{s}$  széles,  $200\div 400 \text{ A}$ -es áramimpulzusok hatására a  $di/dt$  értéke  $2000\div 4000 \text{ A}/\mu\text{s}$ -ra növekszik meg a kisütő körben. A felhasznált (nem ideális,  $L_{sönt} \approx 0,3\div 0,4 \mu\text{H}$ ) áramsönt impedanciája a kisütéshez tartozó  $\frac{1}{0,2 \mu\text{s}} = 5 \text{ MHz}$ -es frekvencián  $10\div 17 \Omega$ , a rajta eső feszültség

$2 \div 5,6 \text{ kV}$ , amihez hozzáadódik az induktivitásban keletkező  $L_{\text{sönt}} * \frac{di}{dt} = 0,6 \div 1,6 \text{ kV}$  indukált feszültség is.

Ezek hatására a kapacitív osztó és az áramsönt szekunder kábelcsatlakozásaihoz elhelyezett túlfeszültségvédelmi szikraközök megszólaltak, megmásítva a regisztrált értékeket, de ugyanakkor megvédve a mérőberendezést a túlfeszültségektől.

Az áramsöntön eső – szimulációval ellenőrzött – feszültséget, túlfeszültség levezetővel és anélkül, a 4-15. ábra mutatja.



**4-15. ábra – A túlfeszültség levezetővel és a levezető nélküli**

**áramsönt feszültségek a regisztráló műszeren szimulációval rekonstruálva**

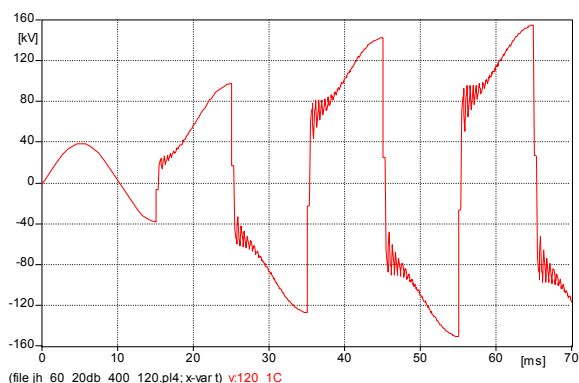
Látható, hogy **levezetővel** a feszültség értéke maximum  $\sim 2,5 \text{ kV}$ -ot ért el, szemben **a levezető nélküli** konfigurációval, amikor is  $\sim 6 \text{ kV}$  lett. A mérőműszer maximális méréshatára  $1 \text{ kV}$ , a  $6 \text{ kV}$ -os feszültségcsúcs nagy valószínűséggel károsította volna a műszert.

A rendelkezésre álló szűkös eszközkészlet miatt nem volt lehetőség más áramsönt beszerzésére. Szimulációs vizsgálatokkal igazoltam, hogy a nem ideális áramsönt eltávolításával megszűnnek a méréskor tapasztalt rövid, impulzusszerű túlfeszültségek, ezért az áramsönt elhagyása mellett döntöttem. Ezáltal elveszett az ív áramának regisztrálási lehetősége, de a jelenség meglétének vizsgálata szempontjából elegendő volt a lebegő-pont potenciálváltozásának regisztrálása. A mérés megismétlésekor nem következett be az ismertett probléma, így a mérési eredmények értékelhetőek voltak.

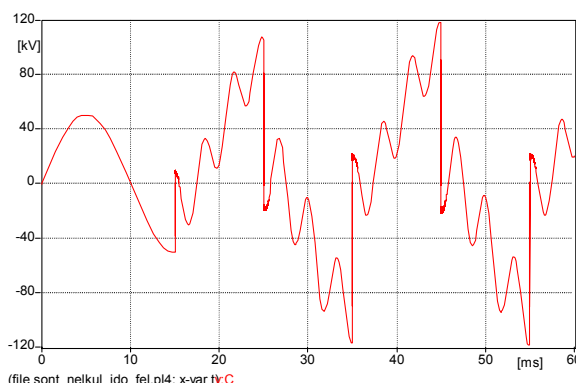
### **4.3.2 A 4.2.2. fejezetben tett állítások igazolása**

Az eredmények értékelése során a 4-6. ábra *b)* része által mutatott oszlopképpel kapott feszültséggörbét hasonlítom össze a kísérleti áramkör elemeit tartalmazó szimulációs áramkör feszültséggörbéivel és a kísérlet során készített feszültség-regisztrátumokkal.

1. Az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulásának igazolása. A 4-16. ábra *a)* része a  $400/120 \text{ kV}$ -os, LCC modellel leképezett, kétrendszerű távvezetéken az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* következtében kialakult feszültséget mutatja. A 4-10. ábra által bemutatott kísérleti áramkörnek a szimulációs programban való leképezésével a 4-16. ábra *b)* része által mutatott jelalak adódott a primer (a kikapcsolt fázisvezetőt jelképező lebegő-pont)  $U_{C0}$  feszültségére.



LCC modell  
a)

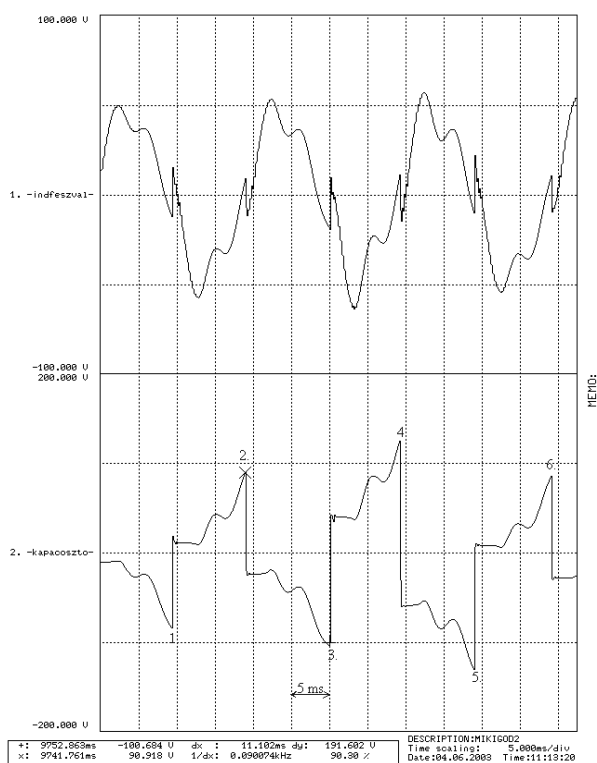


4-10. ábra elemeiből összeállított áramkör  
b)

**4-16. ábra – A szimulációs leképzések potenciálemelkedései**

A két jelalakot összehasonlítva látható, hogy a feszültségnövekedés alapvetően megegyezik, eltérés csak az ív kialakása után a jelre szuperponálódó 300 Hz-es felharmonikus miatt van. Az utóbbit - a 25. oldalon már említett - a tápforrás véges teljesítménye (kímélése) miatt be-tett  $C_{\text{átp}}$  kondenzátor és a táptranzformátor induktivitása által képzett soros rezgőkör hozta létre.

Az eddig bemutatott szimulációs feszültségek primer értékek voltak, a kísérletnél a lebegő-pont potenciálját a kapacitív osztó áttételével (1:1000) leosztva lehetett mérni, így a 4-17. ábra feszültséggörbéje a valóságban kV-os nagyságrendű.



⇐ induktív feszültségváltó  
áttétel: 1:1200

⇐ kapacitív osztó  
áttétel: 1:1000

- 1...6. = a visszagyújtások sorszáma

**4-17. ábra - A kapacitív osztón a kísérlet során regisztrált potenciálemelkedés**

Az ábrából kiolvasható, hogy a 2. visszagyújtás után a potenciálemelés értéke megnőtt (~25 kV-ra), majd folyamatosan növekedett a 3. és a 4. visszagyújtás során egészen ~70 kV-ig. A potenciálnövekedés a 4.2.1. fejezetben leírtaknak megfelelően alakult, mindig az adott félperiódushoz tartozó feszültségmaximum közelében jött létre a visszagyújtás. Az 5-ik után

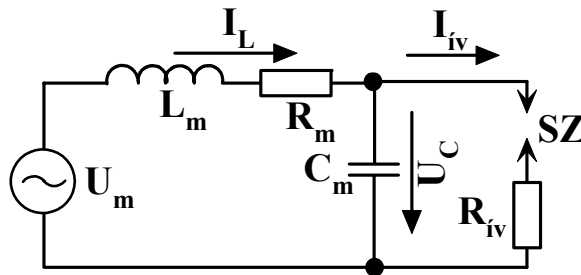
a potenciálettolás lecsökkent a kezdeti ~20 kV értékre, majd a 6. után megint megnőtt ~35 kV-ra.

A kísérleti regisztrátumokban számos helyen fellelhető a 4-17. ábra által mutatotthoz hasonló feszültségnövekedés (pl. 1.sz. függelék), tehát kijelenthető, hogy ugyan úgy, mint a két szimuláció esetében, a kísérlet során is kialakult az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív.

A 300 Hz körüli rárezgő feszültség-jelalak is tisztán látható, a szimuláció során le nem képezhető csillapításokból (a valóságos kör csillapító elemei pontosan nem határozhatók meg) adódóan az amplitúdója kisebb, mint a szimulált áramköré (lásd. 4-16. ábra b) része).

Megfigyelhető a regisztrátumokon (4-17. ábra), hogy a feszültség értéke minden visszagyújtás után ~3 ms ideig nem változik. Ennek az a magyarázata, hogy a feszültségeltolás létrejötté után kialakultak az *impulzusívnek* (ilyen a vizsgált jelenség is) *teljesítményívbe* (folytonos, 50 Hz-es ív) való *indirekt átfejlődésekor létrejövő utólagos, többszörös visszagyújtások*. Ezt a jelenséget és a kísérleti eredményekhez való kapcsolódását - a [16] 6.3.3.1. fejezete és [31] alapján – a következőkben ismertetem:

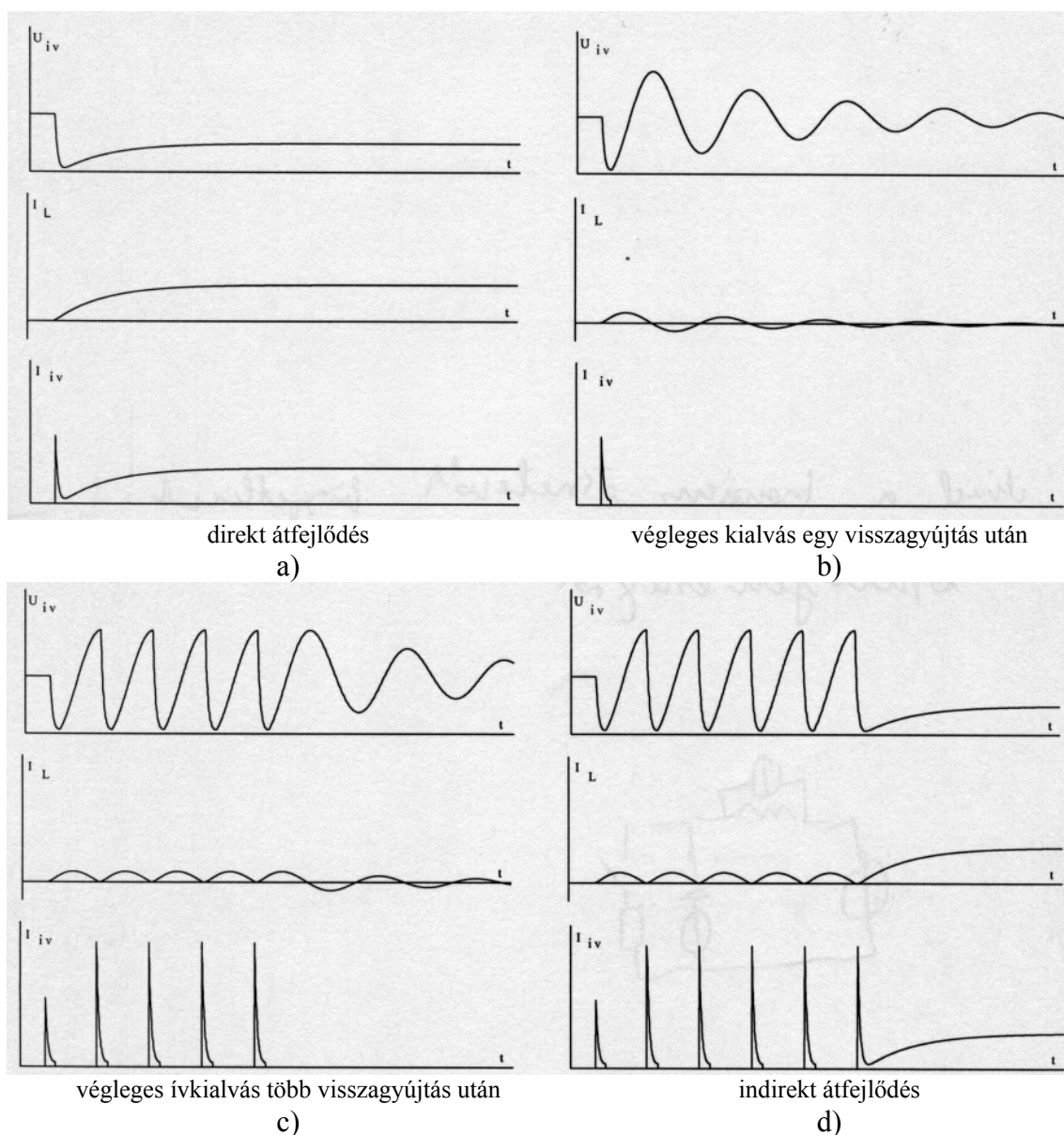
Induljunk ki az ívelési folyamat alapáramköréből (4-18. ábra), amely az átütési pontra való Thevenin elvű redukálással hozható létre. Az  $R_m$  ellenállás és az  $L_m$  induktivitás a hálózat mögöttes impedanciáját, a  $C_m$  kondenzátor a hálózatnak az átütési pontra vonatkoztatott kapacitását, az  $R_{iv}$  az állandónak tekintett ívellenállást jelenti. Az SZ szikraköz az átütés helyét jelöli.



4-18. ábra – Az ívelési folyamat alapáramköre [31]

Tekintsük a folyamatot először egyenáramú körben. A szikraközben kialakuló átütést követően az ív árama két komponensre bontható fel: a körben lévő kondenzátor kisütő áramára, valamint a feszültségforrás és a mögöttes hálózat impedanciája által meghatározott áramra, hasonlóan a 4-13. ábra áramimpulzusához. A két áram összegét a 4-19. ábra a) részének  $I_{iv}$  feliratú görbéje mutatja, a hozzá tartozó ívfeszültséggel és induktivitás árammal. Ekkor az íváramnak egy jól meghatározható minimuma van, amelyet a két áramkomponens időállandójának az aránya határoz meg. Minél nagyobb ez az arány, annál kisebb a minimum értéke. Ha ez a minimum meghaladja az ív fenntartásához szükséges áramküszöböt, akkor a kapacitás által kialakított impulzusív átfejlődik a feszültségforrás feszültsége és a mögöttes hálózat által meghatározott teljesítményívbe (lásd. 4-19. ábra a) része). Ezt nevezzük direkt átfejlődésnek.

Ellenkező esetben kialszik az ív, a szikraköz csúcsai között kialakul a szintén két összetevőre bontható visszaszökő feszültség: az egyik a tápfeszültség és a mögöttes hálózat által meghatározott időfüggvény szerint alakul, a másik pedig az ív megszakadásának pillanatában felvett értékétől függő, exponenciálisan csillapodó feszültséglengés. Amennyiben ezek összege nem képes újabb visszagyújtást létrehozni a szikraközben, akkor végelegesen kialszik az ív (lásd. 4-19. ábra b) része).

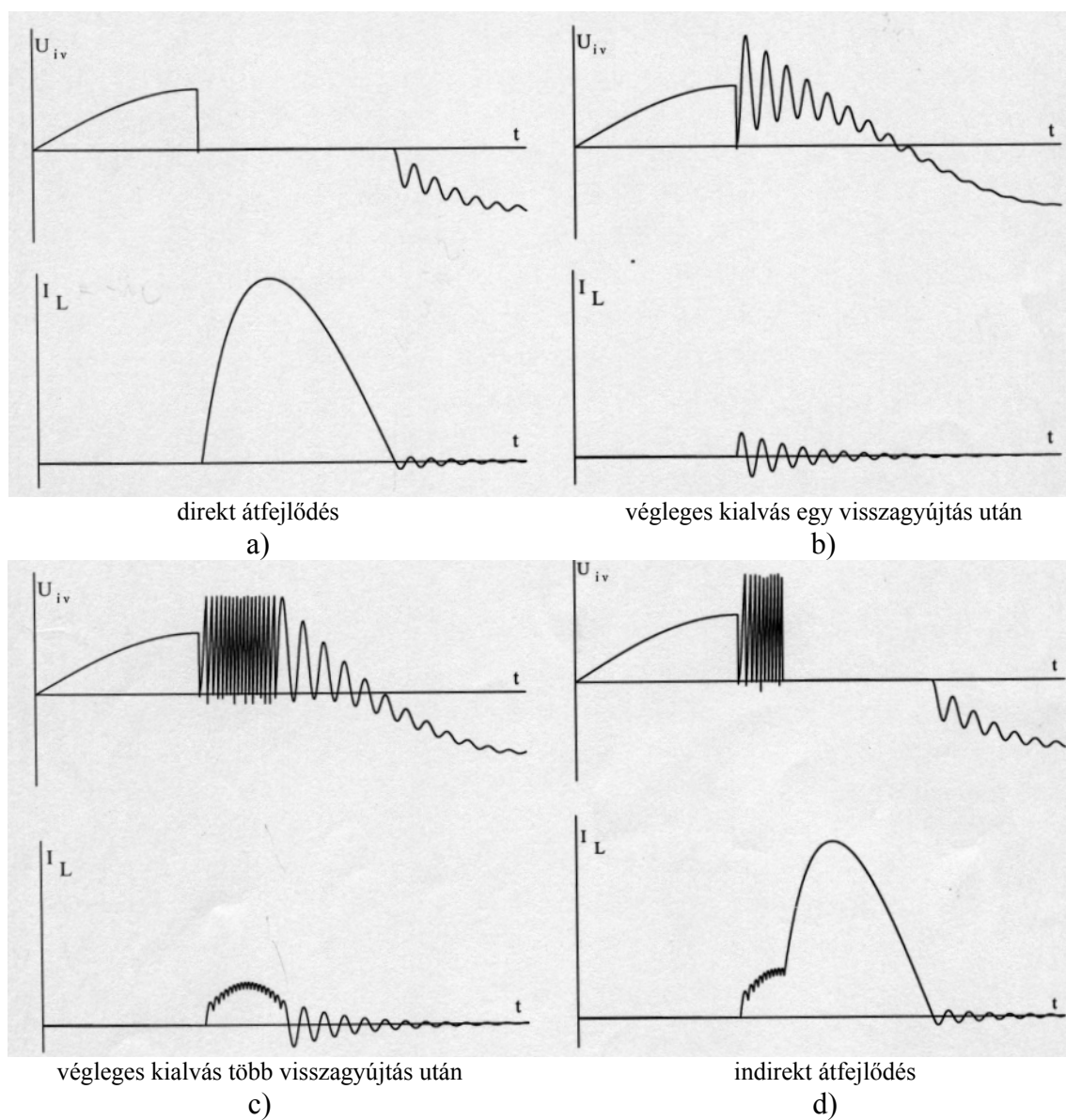


**4-19. ábra – Az impulzusív átalakulása teljesítményívbe egyenáramú körben [31]**

Ha azonban létrejön a visszaszökő feszültség hatására egy újabb visszagyújtás, akkor az  $i_v$  áramát az előbb említett két komponensen kívül egy harmadik is befolyásolja, amely attól függ, hogy a visszagyújtás a visszaszökő feszültség mekkora értékénél következett be. Ha ebben az esetben az  $i_v$  minimuma elegendő a teljesítményív fenntartásához, akkor kialakul a folytonos  $i_v$ , ha nem, akkor újból megszakad az  $i_v$  minimumánál és a szikraközön megjelenik a visszaszökő feszültség. Ennek a folyamatnak az egymás utáni többszöri ismétlődését nevezzük az impulzusív teljesítményívbe való indirekt átalakulásának, amely végződhet végleges kialvással (4-19. ábra c) része), vagy teljesítményívbe való átfejlődéssel (4-19. ábra d) része).

Ha az áramkör váltakozó áramú, akkor az átütést követően kialakuló  $i_v$  árama három komponensre bontható. Ebből kettő az egyenáramú átütés során már megismert összetevő, a harmadik pedig a váltakozó áramú tápfeszültség által a mögöttes hálózaton létrehozott áram. Az  $i_v$  áramban ebben az esetben is van egy minimum, amelynél – az előzőeknek megfelelően – kialakulhat a teljesítményív direkt átfejlődéssel (lásd. 4-20. ábra a) része), vagy ha az áram nem elegendő a fenntartáshoz az  $i_v$  kialszik. Amennyiben ez végleges kialvás, akkor megjelenik a szikraközben egy a rendszerfrekvenciájú feszültségre szuperponálódó, csillapodó feszültséglengés, ahogy azt a 4-20. ábra b) része mutatja. Nem végleges kialvás

esetén a szikraköz átütő feszültségét elérő visszaszökő feszültség hatására újból bekövetkezik a visszagyújtás, megismételve a folyamatot. Több visszagyújtás után vagy véglegesen kialszik az ív (lásd. 4-20. ábra *c*) része) vagy indirekt átfejlődéssel kialakul a teljesítményív (lásd. 4-20. ábra *d*) része).



**4-20. ábra – Az impulzusív átalakulása teljesítményívbe váltakozó áramú körben [31]**

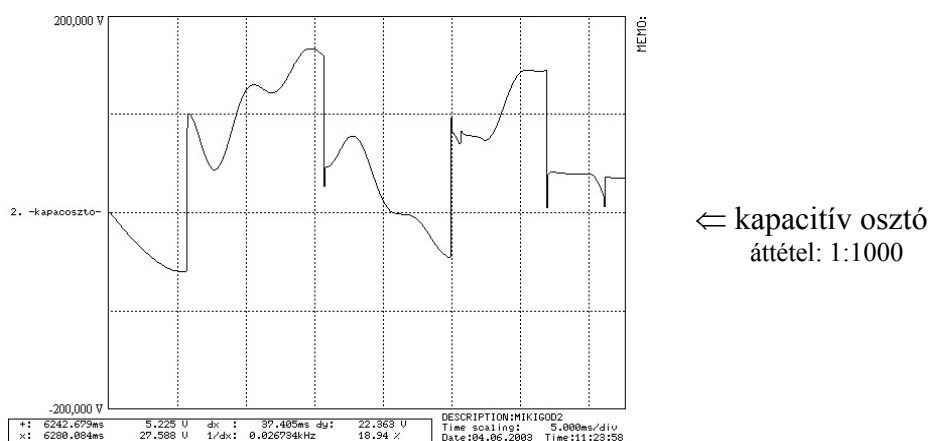
Térjünk vissza a kísérlet során felvett regisztrátum kérdéses  $\sim 3$  ms-os szakaszához. Ennek során a 4-20. ábra *c*) része által mutatott igen gyors visszagyújtások alakultak ki, megakadályozva, hogy a táplálás felől érkező  $50+300$  Hz-es feszültség jelenjen meg a lebegő-pont potenciáljában. A kísérleti áramkör gyenge táppontja miatt (lásd. a C. kompromisszumot a 27. oldalon) a teljesítményív sem direkt, sem indirekt módon nem tudott kialakulni a szakaszoló pofái között; számos utólagos visszagyújtás után végül kialudt, a 4-20. ábra *c*) részének megfelelően. Az itt fellépő gyors feszültségváltozások rögzítéséhez a regisztráló műszer felbontása nem volt elegendően nagy, ezért látszik úgy, hogy ebben a „határozatlan” szakaszban a feszültségjel értéke nem változik. A 4-17. ábra szerinti regisztrátum részletesen megfigyelhető, hogy a 3. visszagyújtás után egy kisebb rárezgés jelenik meg a kapacitív osztó feszültségjelében: ez az utólagos, többszörös visszagyújtások egy „elcsípett” mintájának tekinthető. A  $\sim 3$  ms után bekövetkező ívkialvást az is elősegíti, hogy a 300 Hz-es fe-

szültséghöz tartozó áramkomponensnek az áram-nullaátmenete is a visszagyújtás után  $\sim 3$  ms-al következett be.

A regisztrátumok ezen szakaszai magukban hordozzák a konkrétan nem meghatározható jelleget, de az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* szempontjából a kísérlet eredményességét és bizonyító voltát nem csökkentik. A direkt/indirekt ívátfejlődést erőteljesen befolyásolják a mindenkorai áramkörü paraméterek és a környezeti hatások, a kísérlet során adott körülmények kedvezőek voltak a kialakulásukhoz (gyenge táphálózat, kis szélsébség).

A kísérlet során rögzített regisztrátumok elemzése alapján az áramkörben több esetben is kialakult az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* jelensége (pl. a 4-17. ábra és az 1.sz. függelék időfüggvényei), így a 4.2.2.fejezet végén tett I. állítás igazolást nyert.

2. Utólagos visszagyújtások nélküli átütésnél a lebegő-pont feszültsége a 4-21. ábra által mutatott módon alakul, azaz a kialvás után azonnal az eltolt feszültségre szuperponálódik az 50+300 Hz-es tápfeszültség, ahogyan azt a szimulációs leképzés során a 4-16. ábra b) része is mutatta.

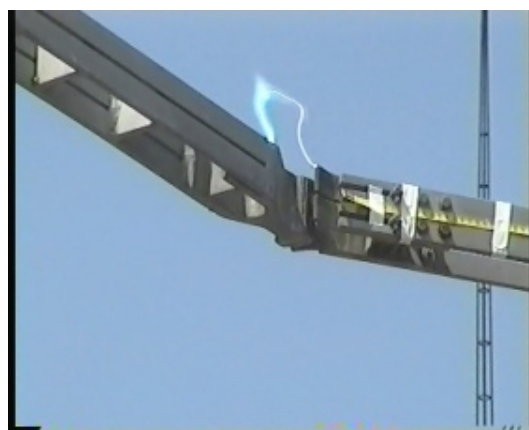
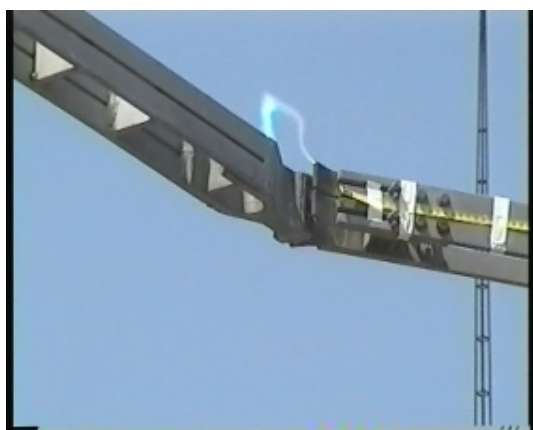
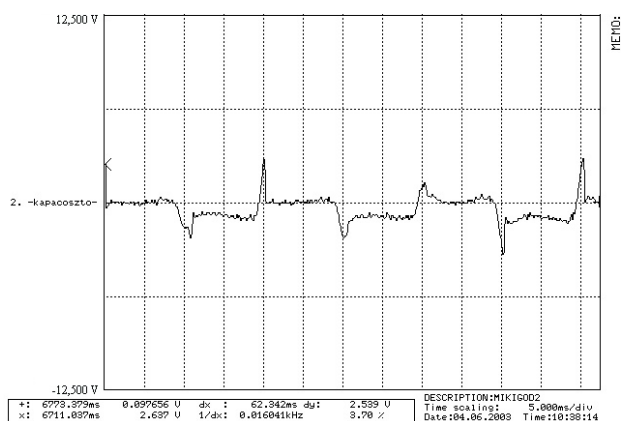


**4-21. ábra. Utólagos visszagyújtások nélküli ívkialvás esetén a regisztrált  $U_{C0}$**

Abban az esetben következhet be ilyen kialvás, ha valamilyen erőteljes környezeti behatás - erőteljesebb szellőkés - hatására alszik ki az ív.

3. Az 50 Hz-es ív kialakulása. A nagyobb feszültségű rendszer a rövid nagy áramú visszagyújtásokat ki tudta szolgálni a  $C_{táp}$  booster kondenzátor támogatásával, azonban az állandósult ív áramát már korlátozni kellett. Ezt a  $C_{osztó}$  kondenzátor és a párhuzamos kör ( $R_{kisütő}/L_{kisütő}$ ) végezte, aminek következtében az állandósult ív áramának effektív értéke ( $I_{iv, effektív}$ ) a szimulációs számítások és a kísérlet regisztrátumai alapján is  $0,8 \div 1$  A körül alakult. Az ehhez tartozó hőtartalom nem volt elegendő ahhoz, hogy a kísérlet során a 4-9. ábra által mutatott intermittens/teljesítmény (50 Hz) ív közötti ismétlődő át/visszafejlődési jelenség ki tudjon alakulni. Az 50 Hz-es ív több esetben is létrejött, csak kisebb szakaszolópofo távolságok esetén, mint amekkoránál a rövid, nagy áramú visszagyújtások képesek fenntartani az ívet. Erre mutat példát a 4-22. ábra regisztrátum részlete, ahol tisztán látszik a félperiódus elején újragyulladó, majd a vége felé kialvó 50 Hz-es teljesítményív feszültsége.

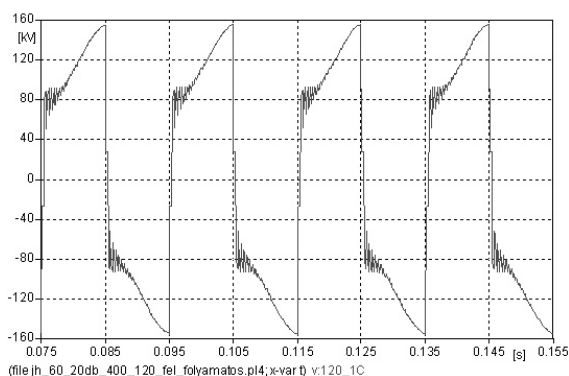
Szintén a 4-22. ábra mutatja azokat a videofelvételből készített képkockákat, amelyeken tisztán kivehető az 50 Hz-es, állandósult ív jellegzetes kékes-fehéres, aránylag vastag plazmacsatornája, valamint az a tulajdonsága, hogy - állandó szakaszolópofo távolság mellett - önmagától tágul, nyúlik.



**4-22. ábra – A kísérlet során kialakult, folytonos 50 Hz-es ív a regisztrátumon és a videón**

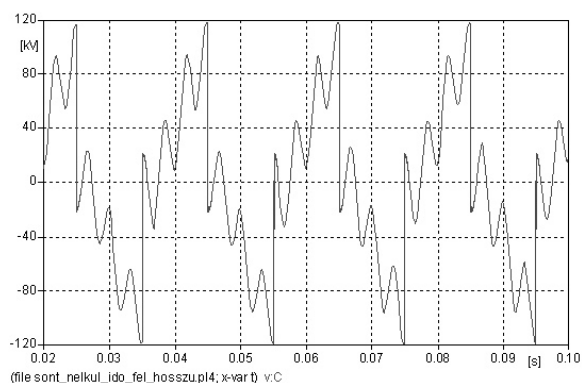
A videofelvételeken és a feszültség-regisztrátumokban több esetben is láthatóan kialakult a folytonos szekunder ív, de ennek ellenére a 4.2.2. fejezet végén tett IV. állítás igazolása a kísérlet során nem volt sikeres. Ha a tápláló hálózat erőssége képes lenne biztosítani a kísérlet során rendelkezésre állónál nagyobb áramot az állandósult ív számára, az alternáló ívfolyamat is ki tudna alakulni. Erre csak hálózati méréssel vagy nagyobb zárlati teljesítményű kísérleti áramkörrel lehet egyértelmű választ kapni (lásd. az 5. fejezetben).

4. A 4.2.2. fejezet végén a következő állítást tettem (II.): a minden félperiódusban bekövetkező átütések hatására a kikapcsolt vezető potenciáljának félperiódusonkénti maximumai az  $U_{csatolt}$ -hoz képest megnövekedett értéken maradnak. Ezt a 4-1. ábra b) részén látható áramkör elemeinek egymáshoz képesti aránya határozza meg. A jelenség kialakul a vizsgált 400/120 kV-os távvezetéknek és a kísérleti áramkörnek a szimulációja során is, valamint több ízben látható a regisztrátumokon (lásd. a 4-23. ábra időfüggvényeit).



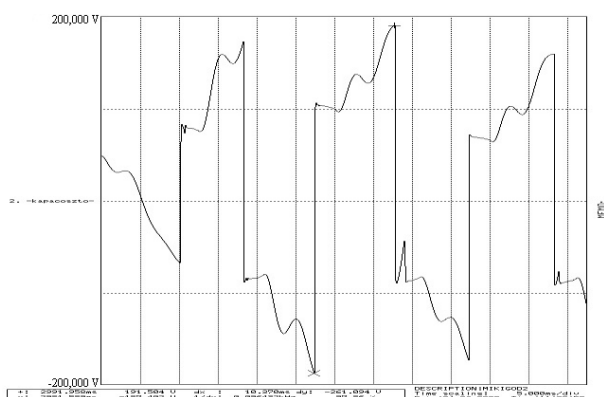
LCC modell

a)



4-10. ábra elemeiből összeállított áramkör

b)



← kapacitív osztó

áttétel: 1:1000

c)

**4-23. ábra - A megnövekedett potenciál fennmaradása a szimulációk során (a; b) és a kísérleti regisztrátumban (c)**

A regisztrátumrészletben (4-23. ábra c) része) látható a visszagyújtások utáni 3 ms-os „határozatlan” potenciál, befolyásoló hatása azonban itt sem mutatkozik. A három ábra összevetéséből kiderül, hogy hasonlóan az e fejezetbeli 1. ponthoz a le nem képezhető csillapítások kivételével a szimulációs és a kísérleti eredmények megegyeznek, így kijelenthető, hogy a 4.2.2. fejezet végén tett II. állítás is igazolást nyert.

5. A regisztrátumok szerint az ívelés folyamata több alkalommal 1÷5 másodpercig fennállt, nagy értékű (> 50 kV) feszültségsúcsokkal. Erre mutat egy példát a 2. sz. függelékben látható regisztrátumrészlet, ami alapján kijelenthető, hogy a kísérlettel a III. állítás is igazolást nyert.

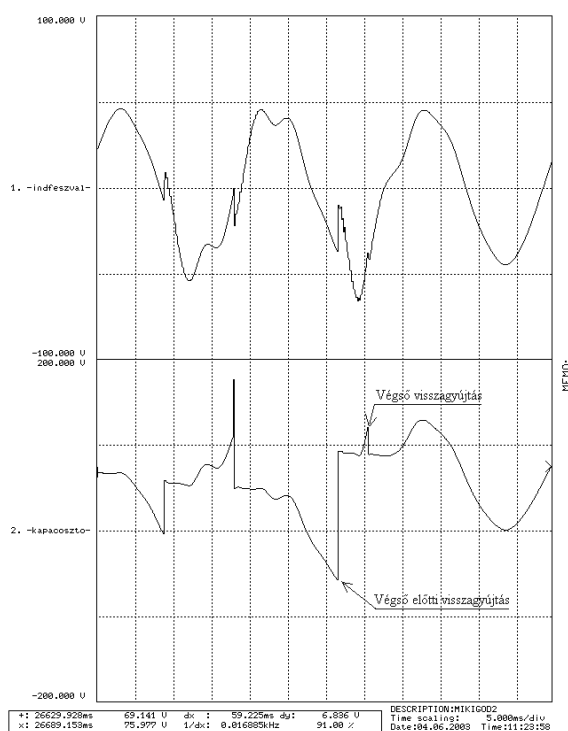
A 4.3.2. fejezetben bemutatott eredmények elemzése során a 4.2.2. fejezet végén tett 4 állításból 3 igazolást nyert (I, II, III), a IV. állításban megfogalmazott intermittens/folytonos ívelés nem tudott kialakulni. Ez a probléma azonban valós hálózaton vagy kellő nagyságú mögöttes teljesítménnyel rendelkező kísérleti áramkörben elvégzett mérésekkel (pl. 5. fejezet) áthidalható.

A regisztrátumok időfüggvényei és az előbbieken elmondottak alapján a kísérlet elegendőnek bizonyult az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulásának igazolására, mivel a jelenség létrejött és fennmaradt a holtidőket ( $T_{holtidő\ EVA} = 1$  másodperc,  $T_{holtidő\ HVA} = 3$  másodperc) meghaladó ideig is. Ezek alapján kijelenthető, hogy a 4. fejezetben leírtak igazolták az I. tézis állításait.

### 4.3.3 A kísérlet egyéb eredményei

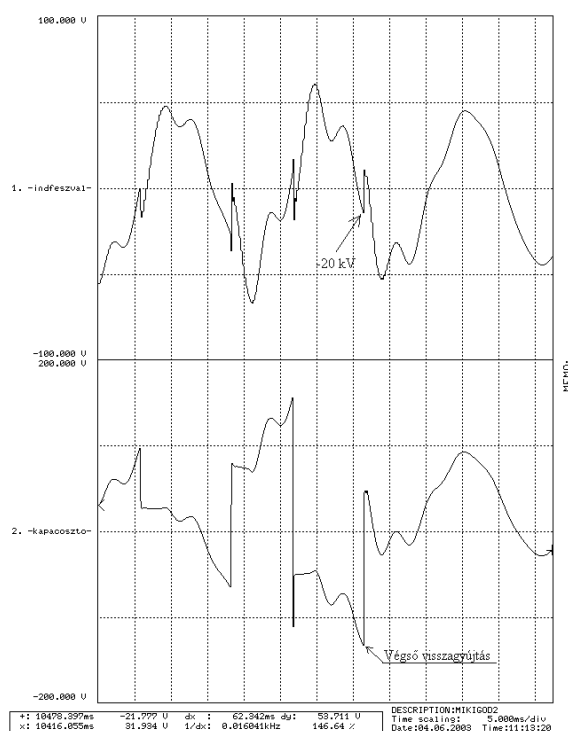
Ebben a fejezetben azokat az eredményeket ismertetem, amelyek nem kapcsolódnak szorosan az I. tézis bizonyításához, de az ív térbeli (erősen sztochasztikus) mozgásától függenek, ezért csak nagyfeszültségű kísérleti áramkörben végzett mérések során figyelhetők meg.

1. Az ív végleges kialakása. A kísérlet során legjellemzőbb végleges ívkialvási feszültségjelenséget a 4-24. ábra a) része mutatja be. A „Végso előtti visszagyújtás” címkével jelölt időpillanatnál az előzőeknek megfelelően alakul a folyamat és létrejönnek az utólagos, gyors visszagyújtások. Ezután elkezd nőni a lebegő-pont potenciálja 120 kV-ig, ahol létrejön egy újabb visszagyújtás, de az utána elmaradó potenciáletolás következtében „pozitív” marad a potenciál (lásd a „Végso visszagyújtás” időpillanatot!). A gyors, utólagos visszagyújtások után a szuperonálódó 50 Hz-es feszültség eleinte növeli (~120 kV-ra), majd csökkenti a lebegő-pont potenciálját, a tápfeszültség alakulásának megfelelően (lásd. „1. -indfeszval” jel). A szakaszoló pofáinak nyitása miatt az ívet egyre nagyobb hosszon kellene fenntartani, erre a csökkenő feszültség nem képes, így újabb visszagyújtás hiányában az ív véglegesen kialszik.



A legjellemzőbb végleges ívkialvás

a)



Gyors, utólagos visszagyújtás nélküli végleges ívkialvás

b)

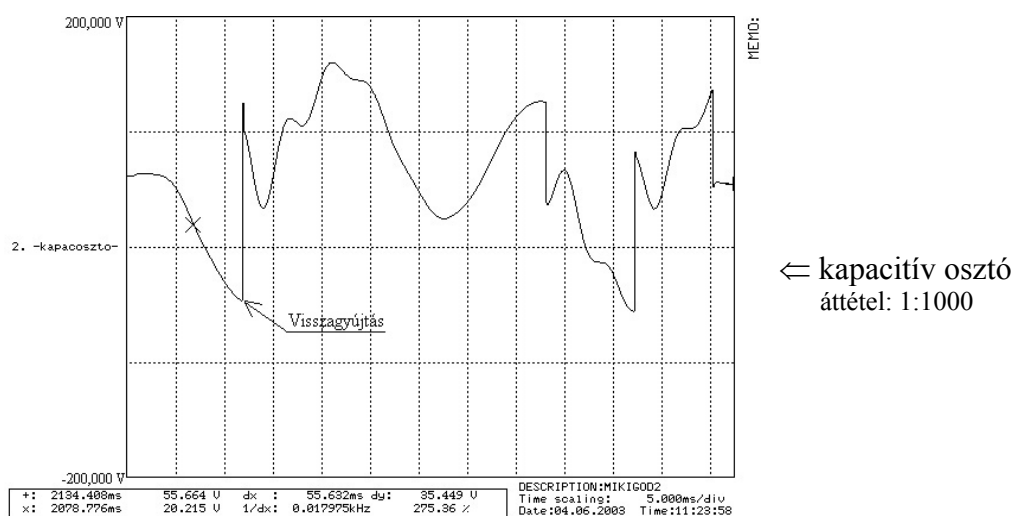
4-24. ábra – A kísérlet során jellemző ívkialvások

Amennyiben nem alakultak volna ki a „Végso visszagyújtás” után a gyors, utólagos visszagyújtások, a tápfeszültség követésével kellő nagyságú potenciál tudott volna létrejönni az újabb átütéshez, a folyamat mehetett volna tovább. A kialvási jelenség ennél pontosabb megfigyelésére az 5. fejezetben bemutatásra kerülő, a valóságot jól leképező kísérleti áramkörrel nyílnak lehetőségek.

A 4-24. ábra b) része olyan végleges ívkialvást mutat be, amelynél nem jöttek létre gyors utólagos visszagyújtások, így a kialvás után egyből a tápfeszültség határozta meg a lebegő-pont potenciálját. A végso visszagyújtás a tápfeszültség nullaátmenete után ~1 ms-al következik be (lásd. 4-24. ábra b) részén: 1. -indfeszval ~-20 kV). Az ívkialvás utáni potenciáletolással ~50 kV alakult ki a lebegő-ponton, azonban a tápfeszültség negatív gradiense miatt

a földhöz képesti potenciálja lecsökkent, így nem volt elegendő a potenciálkülönbség ahhoz, hogy visszagyújtsa az ívet ugyanakkor hosszon, mint az előző félperiódusban. Ezt a fajta végleges ívkialvást nem befolyásolják a kísérleti áramkör adottságai, így valóságos hálózati körülmények között nagyobb valószínűséggel jöhet létre, mint a 4-24. ábra a) része által mutatott.

2. A 4-10. ábra elemeit felhasználva előzetes szimulációval meghatároztam a visszagyújtások várható energiatartalmát. Ezen eredmények és az átütendő távolság alapján azt feltételeztem, hogy ha a kísérlet során egy félperiódusban kimarad a visszagyújtás, akkor ez olyan mértékű energiavesztést jelent az ívnek, hogy a következő félperiódusban már nem tud újabb átütés kialakulni. Azaz egy félperiódusnyi kihagyás az ívelésben már végleges kialvást okoz. Megnézve a 4-25. ábra által mutatott regisztrátum részletet látható, hogy a „Visszagyújtás” feliratnál bekövetkező visszagyújtás után eltelik 1,5 periódus és utána is képes az ív visszagyújtani.



**4-25. ábra. A kísérlet során az ív képes újragyulladni 1,5 periódusnyi kihagyás után is**

Az ívkialvás utáni feszültségeltolás és a szuperponálódott tápfeszültség elegendő potenciálkülönbséget tudott okozni ahhoz, hogy kialakuljon a visszagyújtás 30 ms elteltével is. Amennyiben kisebb feszültségeltolás alakul ki, valószínűleg nem elegendő a potenciálemelkedés a 1,5 periódusnyi kihagyás utáni újabb átütéshez, és ezért a 1. pontban bemutatottakhoz hasonlóan kialudna az ív. Valóságos távvezetési szekunder ív esetén a mögöttes hálózat zárlati teljesítménye jelentősen nagyobb a kísérlet során rendelkezésre állóénál, ezért a visszagyújtások energiatartalma is várhatóan nagyobb, így lehetséges, hogy 2÷2,5 periódus elteltével is újragyullad az ív. Ha a jelenség többrendszerű távvezetési oszlopon következik be az oszlop magassága miatt a szél erőssége feltehetően nagyobb lesz, de az előbb említett ténynél fogva a visszagyújtások energiája is nagyobb, ezért nehezebben hűl az ív. Annak függvényében, hogy melyik körülmény lesz az erősebb hatású a végleges kialvás előtt lehetséges az ívelésben fellépő hosszabb szünet.

3. Mivel a kísérletet két időpontban lehetett elvégezni, így a bizonyos mértékig eltérő időjárási körülmények arra adtak lehetőséget, hogy összevegyük - a két időponthoz tartozóan - a kézel irányított szakaszoló pofáinak közelítésekor az első átütések, valamint a nyitáskor bekövetkező végső kialvások szakaszolópofa távolságait. Az első alkalommal szélcsendes időben kezdődött a kísérlet, félidőtől azonban ~1,8÷2 m/s-os szél fújt, néha erősebb lökésekkel. Ezzel szemben a második alkalommal gyakorlatilag szélcsend volt. Az ívről készített videók elemzése alapján kijelenthető, hogy a szélcsendes kísérlet során a szakaszolópofák közelítésekor az első átütések átlagos hossza kb. 1,2 cm-el nagyobb volt, mint a nem szélcsendes

Különböző névleges feszültségű rendszerek elektromágneses kölcsönhatása többrendszerű távvezetéseken

kísérletnél; a végleges kialakások hosszánál ugyanez a növekedés 2,2 cm. Az előbbi - a begyújtási távolságra vonatkoztatva - 14%-al, az utóbbi - a végleges kialakási távolságra vonatkoztatva - 13%-al nagyobb átlagos távolságot jelent szélcsendes időben, ami alapján valószínűsíthető, hogy a szél kismértékű növekedése nem okoz számottevő változást *az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* végleges kialakásához szükséges távolságban. Erőteljesebb szélsébségnél ez a változás markánsabb lehet, mivel az ívsatorna sokkal intenzívebben nyúlik, valamint több vezető ion távozik két visszagyújtás között [28].

## **II. TÉZIS**

*Az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kísérleti vizsgálata alapján nagyszámú, statisztikai feldolgozásra alkalmas eredményeket szolgáltató kísérleti áramkört terveztem, amelynek kapcsolási rajzát az 5-2. ábra mutatja. Az értekezés kiterjed az ívképzés, a méréstechnika és a szimuláció alábbi kérdéseire:*

- *az ívképzés módja és az ív vizuális rögzítése beleértve a szél sebességétől való függés elemzésének lehetőségét (ívidő, ívnyúlás, nagyellenállású részek mozgásának megfigyelése), ahogyan az 5.6. fejezet mutatja,*
- *a mérőváltóknak a regisztrációra (lásd. 5.6.2. fejezet) és a tápláló generátornak (lásd. 5.3. fejezet) az ívfolyamatra gyakorolt hatása,*
- *a mérendő értékek regisztrálásakor szükséges minimális mintavétel meghatározása (lásd. 5.6.2. fejezet),*
- *az áramkör nagyfeszültségű elemeinek a hullámfolyamatok pontos és a valóságot jól közelítő leképezésének kidolgozása (lásd. 5.4. és 5.5. fejezetek).*

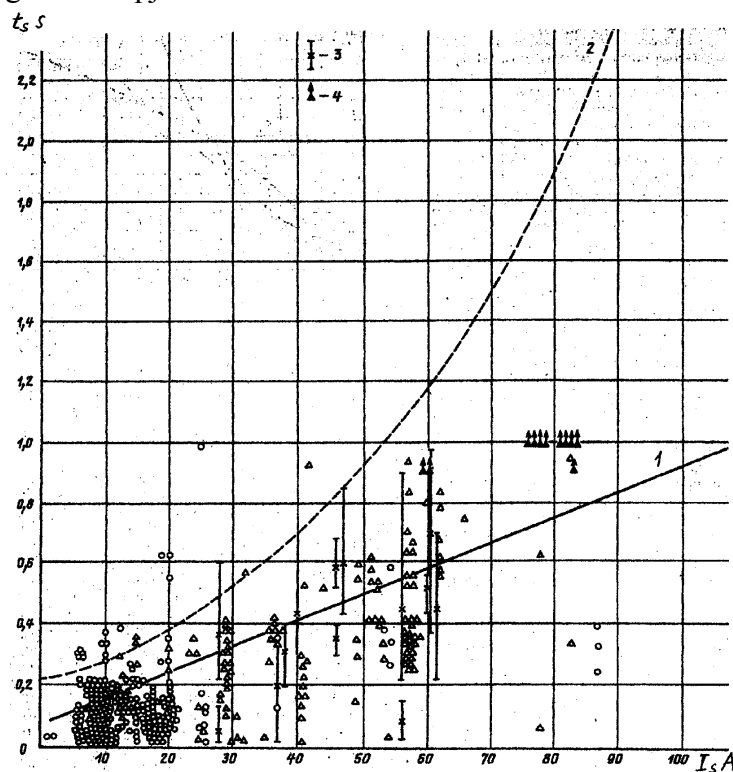
*Az 5.6. fejezet által bemutatott ívképzési módok és regisztrációs lehetőségek alapján állítom, hogy az áramkör megvalósulása esetén a rajta elvégezhető mérések lehetőséget biztosítanak az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív szisztematikus vizsgálatára és a kapott eredmények statisztikai elemzésére is.*

*A kísérleti áramkör a valós távvezeték a rendszerek közötti csatolást (kondenzátor) és a kisebb névleges feszültségű rendszert (5 db II tag) tartalmazó modellel képezi le (lásd. 5.5. fejezet). Ugyanebben a fejezetben mutatom be azokat az összefüggéseket, amelyek alkalmasak - különböző távvezeték hosszúságok esetén – az elemek felépítésére használt kondenzátorok és tekercsek paraméterértékeinek kiszámítására. A disszertációban szereplő elemzés az alapul vett 400/120 kV-os kétrendszerű távvezetésekre vonatkozik, más rendszerkonfiguráció (névleges feszültségek, oszlopképek) esetén az összefüggések felhasználásával az értékek meghatározhatók.*

## 5. A valóságot jól közelítő kísérleti áramkör

### 5.1 A korábbi kísérleti eredmények felhasználhatósága

A szekunder ív problémaköre az ultranagy feszültségű távvezetékek bevezetésével együtt (kb. 40 ÷ 50 évvel ezelőtt) automatikusan megjelent, amiből következően számos cikk, tudományos értekezés, sőt könyv foglalkozik vele, ahogyan azt már a disszertáció bevezetőjében is ismerttettem. Hosszú ideig azonban nem került előtérbe, hogy az ív égése során a szélesség milyen fontos befolyásoló tényező, ezért az irodalmakban bemutatott kísérletek, mérések eredményei ritkán tartalmazzák a pontosan regisztrált szélességet, általában csak utalás található arra, hogy erős, közepes vagy közelítőleg mekkora volt a szélesség nagysága [2, 5, 10]. A [9]-ben például sokkal több utalás található arra, hogy milyen volt az időjárás, de magáról a szélességről nem tesz említést. Amennyiben nem hálózati, hanem laboratóriumi kísérletet végeztek - túlnyomó többségben - a 3-1. ábra b) része által mutatott egyszerű áramkörből indultak ki és nem vették figyelembe, hogy az előbb említetten kívül a hullámfolyamatoknak is alapvető szerepe van a szekunder ív lefolyásában, különös tekintettel az intermittens szakaszra [2, 6]. Szintén a környezeti paraméterek elhanyagolásával számos olyan eredmény is született, amely csak számítógépes szimuláción alapszik (pl: [32, 33]). Amennyiben [1] alapján ábrázoljuk az irodalmakban fellelhető folytonos szekunder ív áramokat és a hozzájuk tartozó kialvási időket, akkor a következő diagramot kapjuk.



o – Orosz mérési eredmények; Δ – nem orosz mérési eredmények; 1 – regressziós görbe;  
2 – 90%-os valószínűségű kialvás görbéje; 3 – Haubrich és Thomas eredményei [2];  
4 – az ív nem aludt ki a megadott ideig

#### 5-1. ábra – A szekunder ív kialvási ideje a folytonos szekunder ív áram függvényében [1]

Mivel az előbb említett paramétereket nem vették figyelembe, így a kapott értékek erőteljes szórást mutatnak, elemzésük statisztikai módszerekkel is nehézkes. Annak ellenére, hogy már korábban is születtek a szélnek az ívre gyakorolt befolyását vizsgáló kísérletek (pl. [28]) a szekunder ívnél fennálló erőteljes nyújtó és rekombináló hatásra csak az utóbbi 10-15 évben fi-

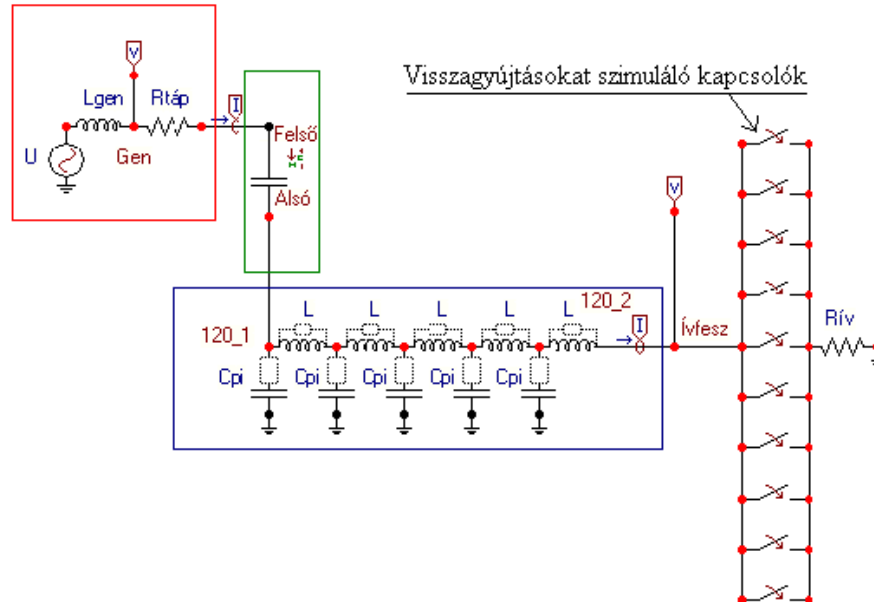
gyeltek fel. Az egyik legjobb példa erre a bevezetőben már említett 1998-as Hévíz-Tumbri 2\*400 kV-os távvezeték üzembehelyezésekor keletkezett, önmagától nem kialvó szekunder ív. A fenti ismeretek birtokában, felhasználva a 4.3. fejezetben bemutatott kísérletnél szerzett tapasztalatokat és eredményeket, terveztem meg a következőkben bemutatásra kerülő áramkört, a hozzá tartozó kiegészítő elemekkel.

## 5.2 A megtervezett áramkör

Az I. tézis igazolásához elvégzett kísérlet során számos korlátba ütköztem, amelyek miatt a regisztrálásnál valamint az áramköri elemek megválasztásánál erőteljes egyszerűsítéseket kellett tennem. A pontosabb gyakorlati eredmények eléréséhez két út létezik:

- hálózati kísérletek (ez anyagi okokból hazailag nem lehetséges),
- olyan kísérleti áramkörök alkalmazása, amelyekben
  - a kisebb névleges feszültségű rendszer kikapcsolt fázisa a hullámfolyamatok pontosabb leképezését adó, több (az oszlopkonfigurációnak megfelelő kondenzátorokból és tekercsekkel felépített)  $\Pi$  tagból áll,
  - a nagyobb feszültségű rendszert a valóságot jól megközelítő teljesítményű hálózat táplálja,
  - a szekunder ívet befolyásoló paraméterek kontrollálhatók (a szél sebességének és irányának valamint az ívhúzó érintkezők távolságának pontos mérése),
  - megoldható a kellő pontosságú mérés és regisztrálás (pl. Rogowski tekercssel az íváram mérésére).

Ezeknek a szempontoknak a figyelembe vételével - a 4-10. ábra által mutatott kísérleti áramkörből kiindulva - terveztem meg az 5-2. ábra szerinti kísérleti áramkört, amivel az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívet* - a 4.3. fejezetben bemutatott kísérletnél - pontosabban és részletesebben lehet meg vizsgálni.



- Az áramkör értékeiben megfelel a korábban bemutatott 400/120 kV-os oszlopképnek

### 5-2. ábra – A valóságot jól leképező kísérleti áramkör szimulációs kapcsolása

Az áramkör főbb részei a következők:

- A **piros** kerettel határolt rész a nagyobb feszültségű rendszer betáplálását szimulálja egy 400 kV-os generátorral és a mögöttes hálózat impedanciájával. A feladata a nagyobb feszültségű rendszer „kemény” feszültségének és a kísérlet számára szükséges teljesítménynek a biztosítása.

- A **zöld** kerettel jelölt rész (lásd. 5-2. ábra) a 400 kV-os és a 120 kV-os rendszer közötti csatolást képezi le. Az 5.4. fejezetben bemutatom, hogy elegendő a  $C_{osztó}$  kondenzátor a rendszerek közötti csatolás leképzésére, valamint hogy a  $\Pi$  tagok mentén a bekötési pontja nem meghatározó a vizsgált jelenség szempontjából. A kondenzátor pontos kapacitás értéke a szimulálni kívánt távvezeték oszlopképétől és hosszától függ.
- A **kék** kereten belüli áramkör (lásd. 5-2. ábra) a kisebb feszültségű - esetemben 120 kV - rendszert képezi le, a felsorolt szempontok alapján kialakított  $\Pi$  tagokkal. A tekercsek és a kondenzátorok értéke - hasonlóan a  $C_{osztó}$ -hoz - a kívánt vezetékhozz és az oszlopgeometria függvénye.
- Az áramkör jobb szélén (lásd. 5-2. ábra) a nem körbekerített rész a visszagyújtásokat szimuláló kapcsolókat (ennek a gyakorlati megvalósítását az 5.6.1. fejezet ismerteti) és a szekunder ív ellenállását ( $R_{iv}$ ) tartalmazza.

A következőkben részletesen bemutatom az egyes áramköri elemeket, kiemelve azokat a paramétereket, amelyeknek adott határon belül tartása feltétlenül szükséges a valóságghú kísérlet sikeres elvégzéséhez.

### 5.3 A tápláló generátor

Ahhoz, hogy a szimuláció szerinti körülményeknek megfelelő legyen a kísérlet, elengedhetetlen a vizsgált 400/120 kV-os oszlopképnél kialakuló  $U_{csatolt, csúcs} = \sim 30 \div 40$  kV feszültség (lásd. 4-7. ábra) biztosítása a kisebb feszültségű rendszer kikapcsolt vezetőjén. Ha a tápláló generátor névleges feszültségét a szimulációnak megfelelően  $400/\sqrt{3}$  kV<sub>effektív</sub>-re választjuk, akkor az előbb említett feszültség akkor tud kialakulni, ha az  $A_C = 8,1 \div 10$  érték teljesül. A  $C_0$ -ban tárolt töltések és a  $C_{osztó}$  értéke határozza meg a visszagyújtás során az áramimpulzus amplitúdóját - így részben az ív hőtartalmát -, tehát az ívfolyamat szempontjából nemcsak az egymáshoz viszonyított, hanem az abszolút értékük is meghatározó. A két kapacitás közül a  $C_0$  a domináns, az általa közvetített töltési energia szolgáltatja az áramimpulzus energiatartalmának a  $\sim 80$  %-át.

Ahhoz, hogy a *holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* ki tudjon alakulni a „kemény” tápfeszültség mellett szükséges a kellő nagyságú villamos távolság a lebegő-pont és a nagyobb feszültségű rendszer között. Ebből a szempontból, megfelelő  $A_C$  érték esetén, a 120 kV-os táplálás is elegendő lehet, amennyiben azonban a valós körülményeknek megfelelő értékeket és feszültségviszonyokat kívánunk a kísérlet során megvalósítani, akkor a 400 kV-os rendszereknek megfelelő táplálást (és  $A_C$ -t) kell biztosítani.

A tápáramköri transzformátornak is van impedanciája, amit a mögöttes hálózati elemek ( $L_{gen}$ ,  $R_{táp}$ ) tartalmazzák. A kísérleti áramkör szimulációs vizsgálata során a magyar energiaátviteli rendszer egy valós transzformátorával ( $\epsilon_{400kV} = 15$  %,  $S = 250$  MVA,  $U_N/U_k = 400/120$ kV) számoltam, amely csak elhanyagolható mértékű eltérést jelentett a transzformátor impedancia nélküli eredményekhez képest. Ha ettől jelentős mértékben eltérő paraméterű transzformátort kívánunk alkalmazni, akkor szükséges a kísérletre gyakorolt hatását előzetesen vizsgálni.

Annak függvényében, hogy milyen távvezeték képezünk le az áramkörben, változik a tápláló hálózattal szemben támasztott teljesítmény igény. A kísérletnél felmerülő leghosszabb vezeték esetén (100 km lásd. 50. oldal, 2. táblázat) 1,5 MVA szükséges állandó (50 Hz-es) teljesítményként, impulzus üzemben (visszagyújtások) 18-20 MVA.

### 5.4 A rendszerek közötti csatolás

A rendszerek egymásra hatását a köztük kialakuló induktív és a kapacitív csatolás határozza meg. Ebben a fejezetben azt mutatom be, hogy a kettő közül csak a kapacitívnek van hatása az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívre*.

### 5.4.1 Induktív csatolás és modális hullámterjedés

Abban az esetben, ha egy hullám a terjedése során diszkontinuitási ponthoz érkezik, a hullám egy része - a két közeg hullámimpedanciáinak arányától függő mértékben – visszaverődik, a másik része behatol a megváltozott hullámimpedanciájú közegbe. A visszaverődési arányt a

$$\rho_U = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

8. egyenlet [16] és a

$$\rho_I = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1}, \rho_I = -\rho_U$$

9. egyenlet [16]

szerinti összefüggések határozzák meg. A hullámimpedanciák értelmezését az 5-3. ábra mutatja.



5-3. ábra – A visszaverődési tényező ( $\rho$ ) során használt hullámimpedanciák értelmezése [16]

Abban az esetben, ha az egyik végén üresen járó vezetékről van szó ( $Z_2 = \infty$ ), akkor az áramhullámok  $-1$ , a feszültség-hullámok  $+1$ -es szorzóval fordulnak vissza. A hullámimpedanciával való lezárás esetén a  $\rho$  értéke 0, így a hullám számára úgy látszik, mintha folytatódna a vezeték és nem is lenne diszkontinuitási pont. Földelt vezeték vég esetén a feszültség-hullámok  $-1$ , az áram-hullámok pedig  $+1$ -es szorzóval verődnek vissza. A modális hullámterjedés hatásának vizsgálatához meg kell néznünk, hogyan befolyásolják a rendszerek lezárási impedanciái az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* alakulását. Ennek során a kikapcsolt fázisvezetőkön kívül mindegyik vezető mindkét végi lezárása érintett.

Ahogy a 3. fejezetben bemutattam, az induktív csatolás  $U_{ind.} = M * \frac{\partial i_{ép}}{\partial t}$  összefüggéssel le-

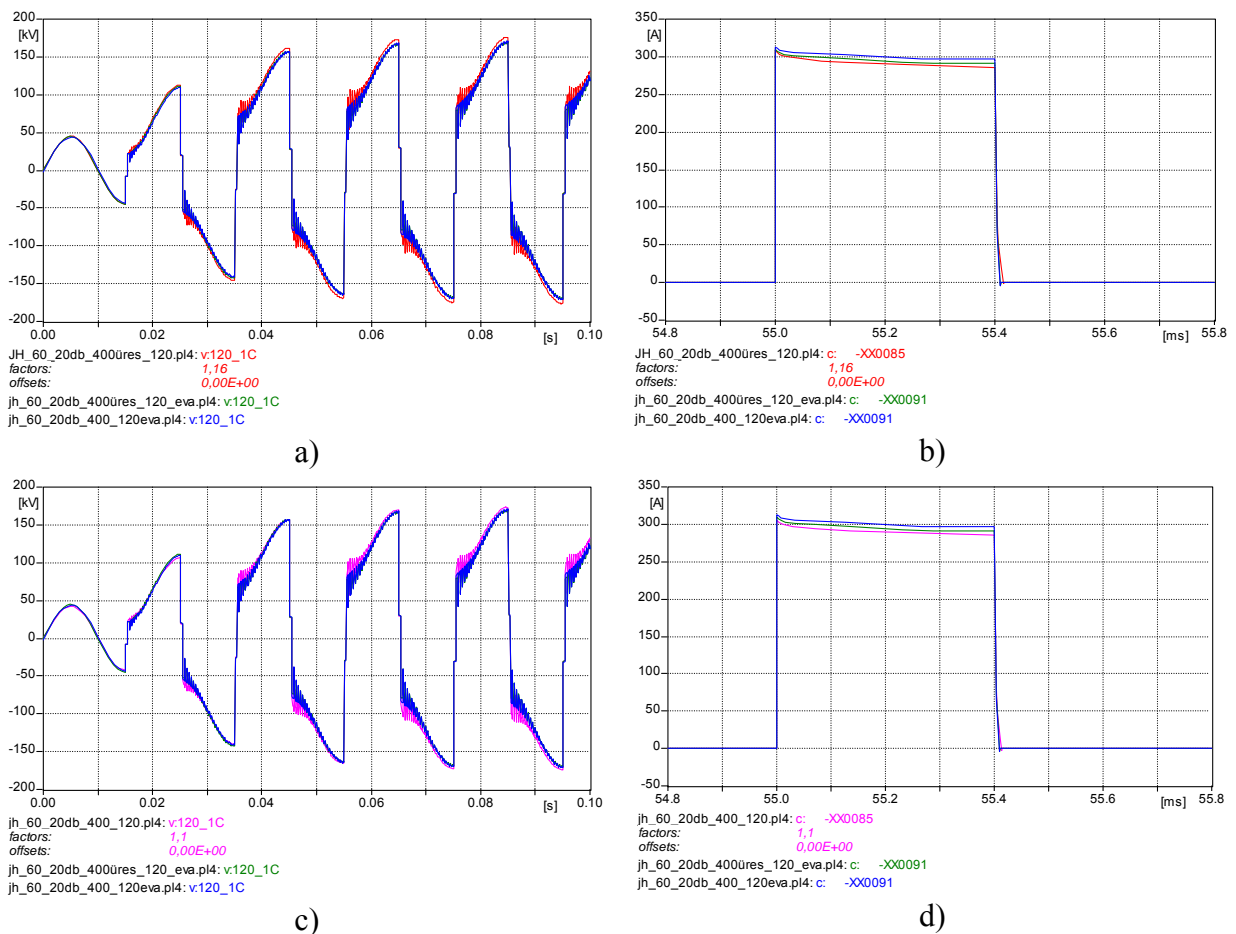
írható hatását a szekunder ívre elemi feszültséggenerátorokkal lehet leképezni. (lásd. 3-3. ábra). Mivel a csatolási tényező ( $M$ ) értéke egy konkrét oszlopkonfiguráció esetében állandó, így csak a nem kikapcsolt fázisvezetőkben folyó áram ( $i_{ép}$ ) hatása érvényesül. Ha változtatjuk a fázisvezetők lezárási impedanciáját, az együtt jár az ép fázisvezetők áramának üresjárású és névleges érték közötti változtatásával is, így a modális hullámterjedés és az induktív csatolás befolyásoló hatását együtt tudjuk vizsgálni.

A vizsgált fázis a 400/120 kV-os, 60 km hosszú távvezeték 120 kV-os, 6. fázisa (lásd. 4-6. ábra b) része). Mindkét hatás vizsgálatára a következő üzemi állapotok összehasonlításából adódó eredmények alkalmasak:

1. **A 120 kV-os rendszeren HVA történik, a 400 kV-os rendszer névleges üzemi terheléssel megy.** Ebben az esetben a modális terjedés a 400 kV-os rendszeren közel zérus, mivel a vezeték mindkét vége hullámimpedanciával van lezárva; az általa okozott induktív áthatás (csatolás) viszont közel maximális, mivel a névleges áram folyik rajta. A 120 kV-nak nincs hatása, mivel a két ép fázis szimmetrikusan van lezárva és csak a kapacitív töltőáram folyik rajta, ami a névlegesnek a töredéke.
2. **A 120 kV-os rendszeren HVA történik, a 400 kV-os rendszer üresen jár.** Ebben az esetben érvényesül a 400 kV-os rendszer modális terjedése, ui. a két végén aszimmetrikusan van lezárva a vezeték; ezzel szemben az induktív áthatás (csatolás) viszont minimális, mivel csak a töltőáram folyik rajta. A 120 kV-os rendszer hatása megegyezik az előző esettel.

3. A 120 kV-os rendszeren EVA történik, a 400 kV-os rendszer üzemi terheléssel megy. A 400 kV-os rendszer hatása hasonló az 1. alatt bemutatotthoz, a 120 kV-os rendszer ép fázisain a névleges áram folyik, így az  $U_{ind.}$  értéke maximális.
4. A 120 kV-os rendszeren EVA történik a 400 kV-os rendszer üresen jár. A 400 kV-os rendszernek csak a modális terjedésben érvényesül a hatása, a 120 kV-os rendszer hatása megegyezik a 3. alatt ismertetettel.

A vizsgált 6. fázison az  $U_{csatolt}$  értékében ~15 % eltérés mutatkozik annak függvényében, hogy a 120 kV-os rendszeren EVA vagy HVA van. Ebből látható, hogy - ennél az oszlopkonfigurációnál - a saját rendszer ép fázisainak hatása az  $U_{csatolt}$ -ra nem jelentős, ami azonban változhat más konfigurációk esetén. Az eltérés kiküszöbölésére mind a feszültségnél, mind az áramnál korrekciós faktort alkalmazok; az így kapott időfüggvényeket a következő ábrák mutatják.



- Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

#### 5-4. ábra – Az induktív csatolás és a modális hullámterjedés hatása az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívelésre

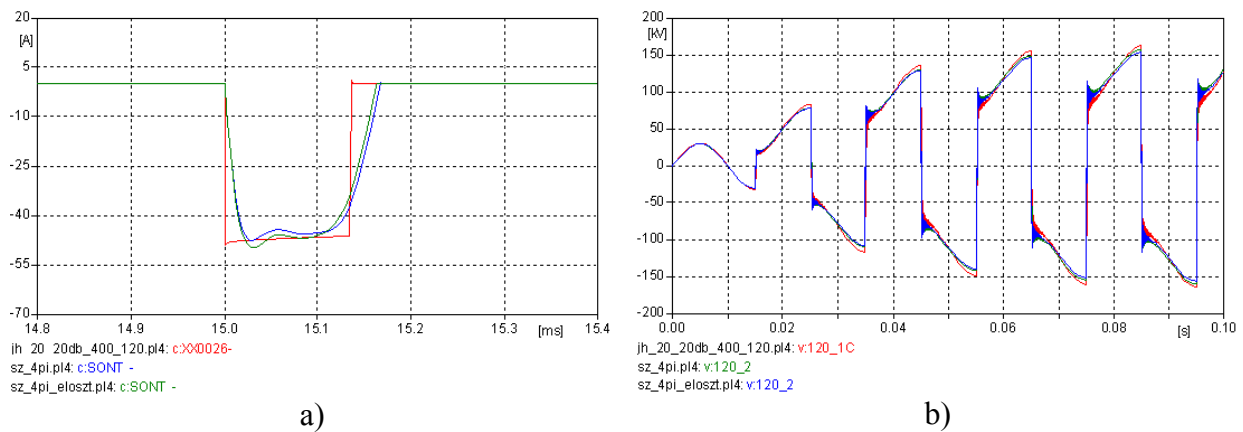
Az a) és a b) ábrák az 1, 2. és a 3. üzemállapot során előálló feszültségnövekedéseket és iváramokat hasonlítják össze, a c) és a d) ábrák ugyan ezt teszik a 2, 3. és 4. üzemállapotokkal. Tiszán látható, hogy egyik esetben sem térnek el egymástól az időfüggvények 5÷8 %-nál nagyobb értékben, azaz az üzemállapotoktól függetlenül ugyan úgy alakul az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív. Ebből az következik, sem az induktív csatolásnak, sem a modális hullámterjedésnek nincs számottevő hatása a vizsgált folyamat lefutására, tehát a kísérleti áramkörben is elhanyagolható.

A következőkben tekintsük a kapacitív csatolás egyszerűsítésnek lehetőségét.

### 5.4.2 Kapacitív csatolás

A távvezeték sodronyai között kapacitív csatolás van, amit kísérleti áramkör készítése során a vezetékeket helyettesítő áramköri elemek hossza mentén elhelyezett kondenzátorokkal lehet leképezni. Annak függvényében, hogy milyen - a távvezetéken kialakuló - jelenséget kívánunk az adott áramkörrel leképezni, lehet növelni vagy csökkenteni a kondenzátorok számát.

Az áramkör tervezése során megvizsgáltam, hogy milyen mértékben másítja meg az eredményeket, ha a kisebb feszültségű rendszer  $\Pi$  tagjainak számával megegyező, vagy csak az első  $\Pi$  tag elejéhez csatlakoztatott – megfelelő értékű – 1 db kondenzátorral (lásd. 5-2. ábra  $C_{osztó}$  eleme) képzem le ezt a csatolást. Az eredmények szemléltetésére tekintünk az 5-5. ábra időfüggvényeire, amelyek 4  $\Pi$  tagnál az említett **elosztott** és **koncentrált** kapacitások esetén kialakuló potenciálnövekedéseket és áramimpulzusokat hasonlítják össze az **LCC modell**ével.



- Az időfüggvények az ATP-EMTP-vel [15] végzett szimulációval készültek

**5-5. ábra – Az LCC modell, az elosztott és a koncentrált  $C_{osztó}$  esetén a visszagyújtási áramimpulzus és a potenciálnövekedés alakulása**

Az ábra a) részét tekintve látható, hogy nincs lényegi különbség a **koncentrált** és az **elosztott** kapacitások esetén az áramimpulzusok között. A hullámzásokat az impulzus tetején, valamint az elején és a végén - az LCC-hez képesti - kisebb  $di/dt$ -t a korlátozott számú  $\Pi$  tag okozza; ennek ellenére az **LCC modellt** mindkettő jól közelíti. Ha a vizsgált jelenség szempontjából lényegesebb potenciálemelkedések időfüggvényeit mutató b) részt tekintjük, akkor látszik, hogy az LCC-hez képest az eltérés a **koncentrált** és az **elosztott** kapacitások esetén is  $< 5\%$ , egymáshoz viszonyítva pedig  $< 2\%$ . Amennyiben a  $C_{osztó}$  alsó csatlakozási pontját mozgatjuk a  $\Pi$  tagok mentén (lásd. 5-2. ábra 120\_1 pontjától az utolsó  $C_{pi}$  bekötési pontjáig) ugyan ekkora nagyságrendű eltérést tapasztalunk.

Az 5.4.1. és a jelen fejezetben leírtak alapján kijelenthető, hogy az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív vizsgálatára szolgáló kísérleti áramkörben (lásd. 5-2. ábra) a rendszerek közötti csatolásnak egy darab kondenzátorral ( $C_{osztó}$ ) való leképezése megengedhető.

## 5.5 A kisebb feszültségű rendszer

Mivel az előző két fejezet szerint a modális hullámterjedésnek és az induktív csatolásnak a hatása elhanyagolható, valamint a kapacitív csatolás leképezésére elegendő egy kondenzátor, így csak a kisebb feszültségű rendszer kikapcsolt fázisvezetőjét képezzük le  $\Pi$  tagokkal.

A  $C_{osztó}$ -nak és a  $\Pi$  tagok elemeinek meghatározása a következő paraméterekből kiindulva lehetséges:

- A kikapcsolt fázisvezető földhurok hullámimpedanciája.
- A leképezendő vezeték hossza.

- Az  $U_{csatolt}$  értéke a kikapcsolt vezetőről, aminek meghatározáshoz a 7-2. ábra ÷ 7-8. ábra oszlopképei és görbéi nyújtanak segítséget.
- A nagyobb feszültségű rendszer névleges feszültsége.

Az elemek meghatározáshoz a 10. és a 11. egyenletből indulok ki:

$$T_{bef.} = \frac{S}{c}$$

**10. egyenlet**

ahol:

S = a kikapcsolt fázisvezető hossza [km],

c = fénysebesség [km/μs],

$T_e$  = egy Π tag befutási ideje [μs],

n = a Π tagok száma.

$$T_e = \frac{T_{bef.}}{n}$$

**11. egyenlet**

A  $T_e = \sqrt{L * C_{pi}}$  és a  $Z_{táv.} = \sqrt{\frac{L}{C_{pi}}}$  egyenletekből [16] kifejezve kapjuk a Π tagok elemeit ké-

pező tekercsek, kondenzátorok induktivitásának és kapacitásának kiszámításhoz szükséges összefüggéseket:

$$L = T_e * Z_{táv.} * 1000$$

**12. egyenlet**

ahol:

$Z_{táv.}$  = a kikapcsolt fázisvezető földhurok hullámimpedanciája [Ω],

L = egy Π tag tekercsének induktivitása [mH],

$C_{pi}$  = egy Π tag kapacitása [μF].

$$C_{pi} = \frac{T_e}{Z_{táv.}}$$

**13. egyenlet**

Az 5.4. fejezetben beláttuk, hogy az ép fázisokkal fennálló csatolások közül elegendő csak a kapacitívtól figyelembe venni egy  $C_{osztó}$  kondenzátorral. Meghatározása a következő egyenlettel lehetséges:

$$C_{osztó} = n * C_{pi} * \frac{U_{csatolt, csúcs}}{U_{nagyobb, csúcs} - U_{csatolt, csúcs}}$$

**14. egyenlet**

ahol:

$U_{nagyobb, csúcs}$  = a nagyobb névleges feszültségű rendszer fázisfeszültségének csúcserőértéke [kV].

A 400/120 kV-os oszlopkép (lásd. 4-6. ábra b) része) vizsgált 6. fázisának esetében a

$$Z_{táv.} = 566 \Omega, \text{ és az}$$

$$U_{csatolt, csúcs} = 31 \text{ kV.}$$

Ezekből az értékekből kiindulva és a 10. egyenlet ÷ 14. egyenleteket felhasználva a 2. táblázat mutatja a kísérleti áramkör értékeit, különböző hosszok és Π tagszámok esetén.

U <sub>nagyobb csúcs</sub> (kV)	327	327	327	327	327	327	327	327	327	327	327	327
U <sub>csatolt csúcs</sub> (kV)	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Z <sub>táv.</sub> (ohm)	566	566	566	566	566	566	566	566	566	566	566	566
S (km)	20	20	20	20	60	60	60	60	100	100	100	100
n (db)	2	5	6	7	2	5	6	7	2	5	6	7
T <sub>def.</sub> (us)	66,67	66,67	66,67	66,67	200,00	200,00	200,00	200,00	333,33	333,33	333,33	333,33
L (mH)	18,87	7,55	6,29	5,39	56,60	22,64	18,87	16,17	94,33	37,73	31,44	26,95
C <sub>pi</sub> (uF)	0,06	0,02	0,02	0,02	0,18	0,07	0,06	0,05	0,29	0,12	0,10	0,08
Cosztó (uF)	0,01234	0,01234	0,01234	0,01234	0,03701	0,03701	0,03701	0,03701	0,06168	0,06168	0,06168	0,06168
f <sub>max</sub> (Hz)	7500	7500	7500	7500	2500	2500	2500	2500	1500	1500	1500	1500
f <sub>határ</sub> (Hz)	4774,65	11936,62	14323,94	16711,27	1591,55	3978,87	4774,65	5570,42	954,93	2387,32	2864,79	3342,25
f <sub>max</sub> <1/2*f <sub>határ</sub> ?	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+

- Az utolsó három sor magyarázatát az 55. oldalon lévő 18. egyenlet tartalmazza.

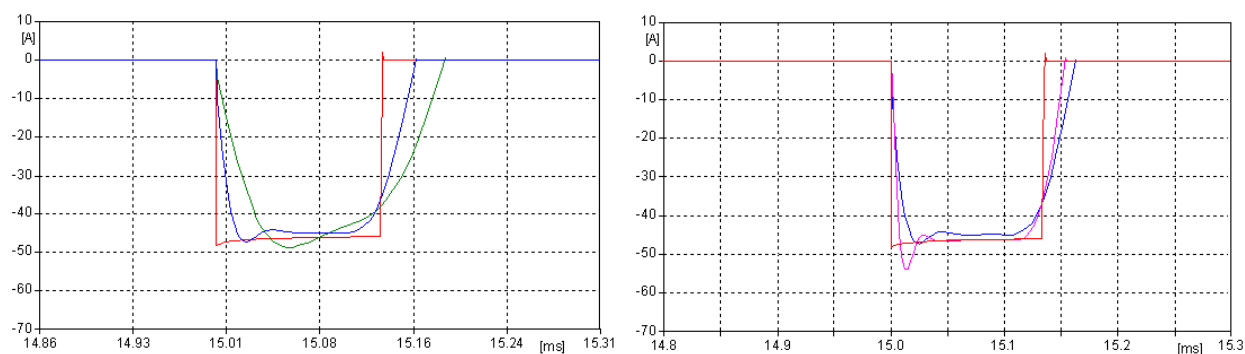
## 2. táblázat – A 400/120 kV-os oszlopképen alapuló kísérleti áramkör elemei

A bemutatott képletek felhasználásával tetszőleges számú  $\Pi$  tagra ki lehet számolni a kísérleti áramkör elemeinek értékét. A gazdaságosságot és az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* leképzésben megkívánt pontosságot szem előtt tartva meg lehet határozni egy minimális tagszámot. Ezt egy adott távvezeték hosszánál a különböző elemszámú  $\Pi$  tagok és a valós távvezeték (LCC modell)

1. áramimpulzusainak és
2. potenciálnövekedéseinek

időfüggvényeit összehasonlítva lehet megtenni.

1. Tekintsük a vizsgált 400/120 kV-os vezeték 20 km-es hossza esetén a **2**, **5**, **10**  $\Pi$  tagból álló áramkör és az **LCC** modell által produkált áramimpulzusok időfüggvényeit.



a) 2, 5  $\Pi$  tag és LCC modell

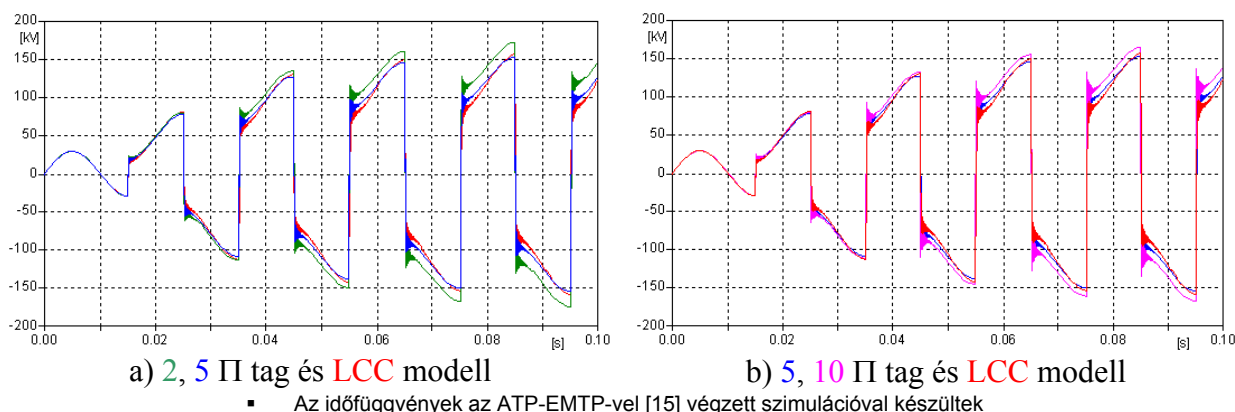
b) 5, 10  $\Pi$  tag és LCC modell

- Az időfüggvények az ATP-EMTP-vel [15] végzett szimulációval készültek

## 5-6. ábra - Az áramimpulzusok alakulása a 400/120 kV-os vezetéken

Az ábra a) részéből látszik, hogy a 2  $\Pi$  tagos leképzés eléggé „gömbölyű” a többihez képest. Az 5 és a 10  $\Pi$  tag közötti eltérés nem olyan markáns, mint a 2 és az 5 között. Az LCC-hez képest mindegyik  $\Pi$  tagos di/dt-je kisebb az áramimpulzus elején és végén; a vizsgált jelenség szempontjából azonban a 2. pontban tárgyalt összehasonlítás a lényegesebb.

2. Lássuk ugyanezt az összehasonlítást a potenciálnövekedések időfüggvényeivel.



5-7. ábra – A potenciálnövekedés alakulása a 400/120 kV-os vezetéken

Az a) részt tekintve látszik, hogy a 2 Π tagos leképzés potenciálja jelentősen nagyobb (~18 kV ≈ 11 %), mint az LCC modellé, ezzel szemben az 5 Π tagos szinte egybe esik az LCC-vel. A b) részen az eltérések kisebbek, a 10 Π tagosnak ~8 kV ≈ 5 %-al nagyobb az értéke, mint az LCC modellé.

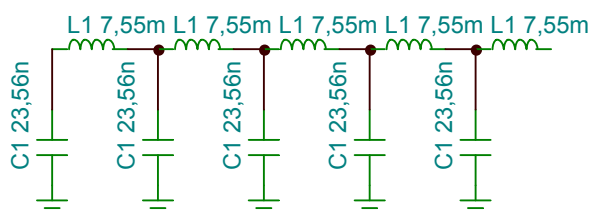
Az 1. és a 2. pontban kapott eredményeket összehasonlítva alapján: 2 Π tag esetén jelentős eltérés mind az áramimpulzus, mind a potenciálnövekedés időfüggvényében, az 5 és a 10 Π tagos leképzés között viszont nincs jelentős különbség.

Ezek alapján az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívnek az 5-2. ábra által mutatott kísérleti áramkörben való vizsgálatok elegendő a kisebb névleges feszültségű rendszer ki-kapcsolt fázisát 5 Π tagból felépíteni.

A következő fejezetben részletesen megvizsgálom az LCC modell és az 5 Π tagos leképzés közötti különbséget.

### 5.5.1 Az 5 Π tagos és az LCC modell közötti különbség vizsgálata

Ha a Π tagokból álló távvezetékmodell frekvencia-átviteli szempontból nézzük, akkor passzív LC elemekből álló aluláteresztő szűrőt vizsgálunk (lásd. 5-8. ábra), azaz egy adott frekvenciaérték fölött a kimenetén a bemeneten beadott jel csak igen kis amplitúdóval jelenik meg [50].



5-8. ábra – A kisebb feszültségű rendszer, mint passzív LC szűrő

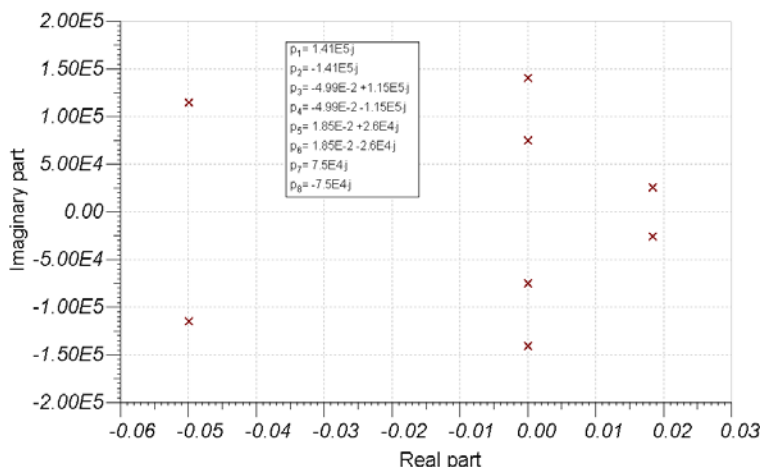
Az ábrán látható áramkör átviteli függvényét meghatározva

$$W(s) = \frac{1}{1 + 1,8 \cdot 10^{-10} s^2 + 4,74 \cdot 10^{-19} s^4 + 4 \cdot 10^{-29} s^6 + 3,2 \cdot 10^{-34} s^8}$$

#### 15. egyenlet

látható, hogy az aluláteresztő szűrőknek megfelelően csak pólusokból áll. Kiszámítva és a komplex számsíkon ábrázolva a pólusokat (lásd. 5-9. ábra) látható, hogy 4 konjugált komplex

gyökpárja van, amelyek közül egynek pozitív ( $p_5-p_6$ ), kettőnek pedig 0 ( $p_1-p_2$  és  $p_7-p_8$ ) a valós része. Ez azt jelenti, hogy a rendszerünk szabályozástechnikai szempontból nem stabilis és az említett három póluspárhoz tartozó sajátfrekvenciánál ( $\omega_0$ ) az erősítésének szélsőértéke van.



**5-9. ábra – Az 5 II tagos aluláteresztő szűrő pólusai [51]**

Az  $\omega_0$ -nál az erősítést ( $W_0$ ) a póluspárhoz tartozó csillapítási tényező ( $\xi$ ) értéke határozza meg:

$$\xi = -\frac{a}{\omega_0} \qquad W_0 = \frac{1}{2\xi}$$

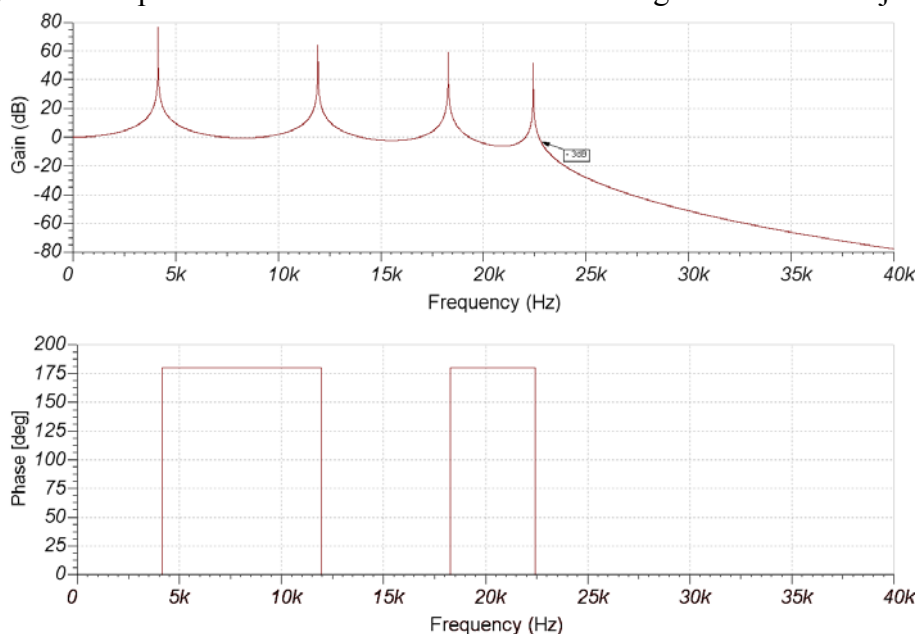
**16. egyenlet**

**17. egyenlet**

ahol:

a konjugált komplex póluspár a  $p_x = a + jb$  és a  $p_y = a - jb$  alakban írható.

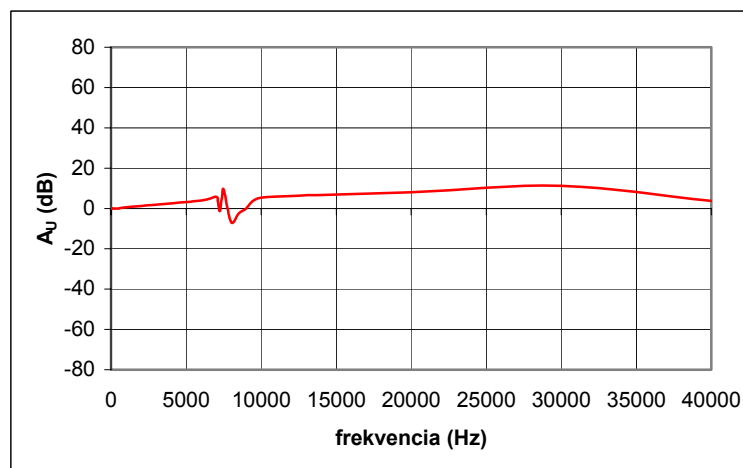
Mivel a  $p_3-p_4$  és a  $p_5-p_6$  póluspárok esetén is  $10^{-2}$ -os nagyságrendben van a valós rész, ezért mind a négy póluspárnál - a 16. és a 17. egyenletek értelmében - az  $\omega_0$  frekvenciákon az erősítés a  $\infty$ -hez tart, a fázisdiagram pedig  $0^\circ$  és  $180^\circ$  között ugrásszerűen változik. Ezek alapján az 5 II tagos helyettesítő képre az 5-10. ábra által mutatott Bode diagramot lehet felrajzolni.



**5-10. ábra – Az 5 II tagos aluláteresztő szűrő Bode diagramja**

A legnagyobb sajátfrekvencia után (~22,5 kHz) a szűrő levág, az erősítés a 4 pólusparú aluláteresztő szűrőnek megfelelően  $2 * 4 * -20 \frac{dB}{dekád} = -160 \frac{dB}{dekád}$  meredekséggel csökken.

Az LCC modell átvitelének meghatározásakor a 0 dB-es jelszintet az 1 Hz-es 400 kV-os feszültség hatására mérhető  $U_{csatolt}$  jelenti. A  $\Pi$  tagos modellel megegyező frekvenciatartományban felvett amplitúdómenet (lásd. 5-11. ábra) erősítése a  $-7 \div +12$  dB-es sávban mozog, tehát az 5  $\Pi$ -hez képest arányos átviteli tagnak tekinthető.

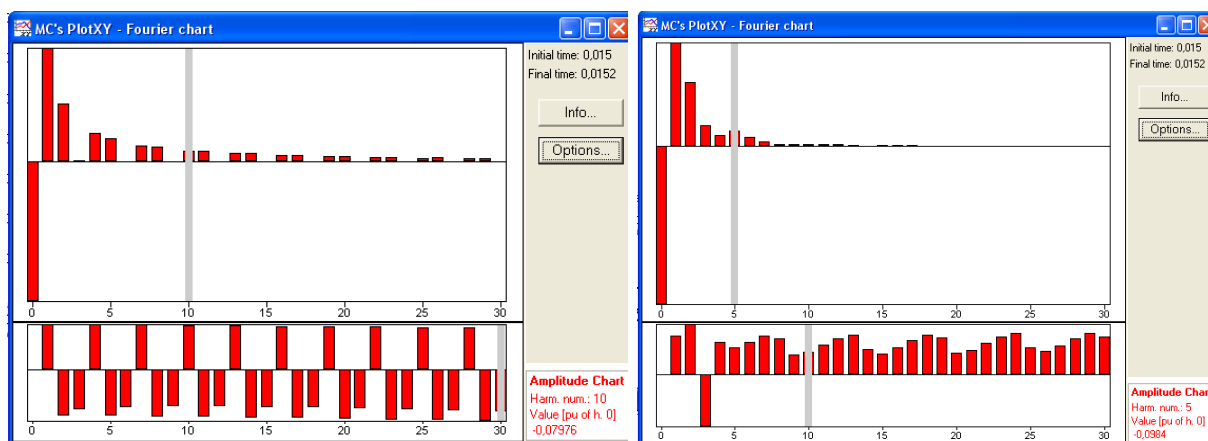


5-11. ábra – Az LCC modell amplitúdó-menete

A két amplitúdómenet közötti különbség azzal magyarázható, hogy az ATP-EMTP LCC modellje végtelenül finoman elosztott paraméterű, frekvenciafüggő csillapítású helyettesítést ad szemben az 5  $\Pi$  tagos modell fix értékű elemeivel.

A frekvenciamenetek vizsgálata után tekintsük az előző fejezetben meghatározott időfüggvények elemzését.

Első lépéseként vizsgáljuk az LCC modelles és az 5  $\Pi$  tagos leképzés áramimpulzusainak Fourier spektrumait (lásd. 5-12. ábra).



a) LCC modell


b) 5  $\Pi$  tag

- Az amplitúdó a 0. harmonikusra vonatkoztatott viszonylagos egység

5-12. ábra – Az áramimpulzusok Fourier felbontása

A két felbontás alapfrekvenciája:

$$f_{alap} = \frac{1}{Finaltime - Initialtime} = 5000Hz \text{ (lásd. 5-12. ábra).}$$

Látható, hogy az első két harmonikus amplitúdójában (lásd. felső  diagrammsor) nincs jelentősebb eltérés, azonban a harmadikban már igen, az 5  $\Pi$ -s modellé 0,1 v.e, szemben az LCC modell  $\sim 0$  értékével. Utóbbinál a következő jellegzetességek figyelhetők meg:

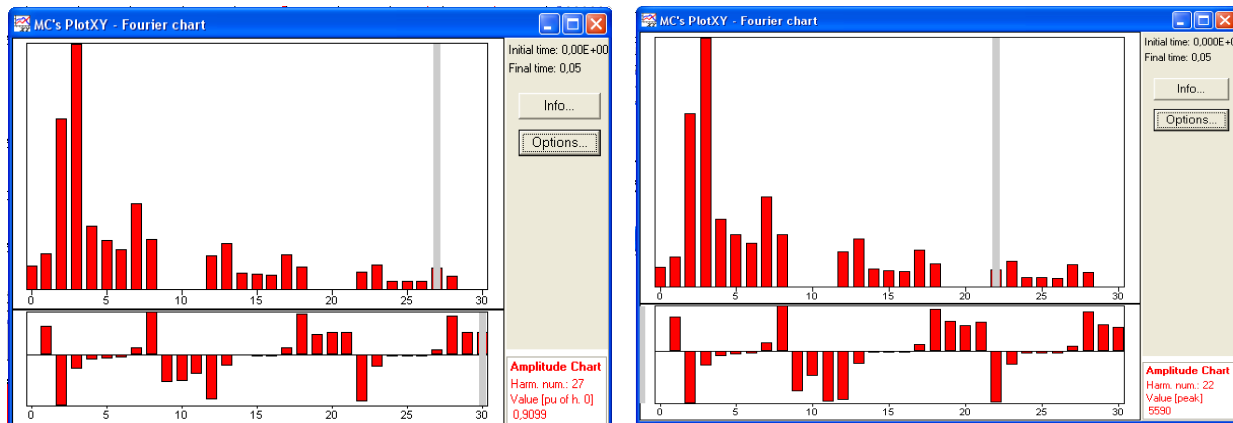
- Monoton csökken a felharmonikusok amplitúdója, kivéve minden 3-at, ami mindig 0.
- A 8. harmonikus (40 kHz) az első, amelynek az amplitúdója kisebb, mint 0,1 v.e, tehát elhanyagolhatónak minősíthető.

Ezzel szemben az 5  $\Pi$  tagos modellnél:

- a csökkenés nem teljesen monoton,
- az 5. harmonikus amplitúdója nagyobb, mint a 4,
- ennek ellenére az 5. harmonikus amplitúdója is 0,1 v.e. alatt van, így a felharmonikusok a 4-től kezdve elhanyagolhatók.

Megállapítható, hogy a Fourier spektrumokban is tükröződik a két eltérő frekvenciamenetnek az áramimpulzusok időfüggvényére gyakorolt hatása.

Második lépésként hasonlítsuk össze - az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder iv* szempontjából dominánsabb hatással bíró – potenciálnövekedések Fourier spektrumait. Ha tekintjük ezeket (lásd. 5-13. ábra) látható, hogy az eltérések jelentősen kisebbek, mint az áramimpulzusok esetén.



a) LCC modell

b) 5  $\Pi$  tag

- Az amplitúdó a 0. harmonikusra vonatkoztatott viszonylagos egység

### 5-13. ábra – A potenciálnövekedések Fourier spektruma

Az azonos rendszámú felharmonikusok közötti különbségek maximális értéke (amplitúdó és fáziszög tekintetében is) kisebb, mint 0,1 v.e, ez okozza a relatíve kisebb eltérést az 5-7. ábra által mutatott feszültség időfüggvények között. Az alapharmonikus frekvencia:

$$f_{alap} = \frac{1}{Finaltime - Initialtime} = 20Hz \text{ (lásd. 5-13. ábra).}$$

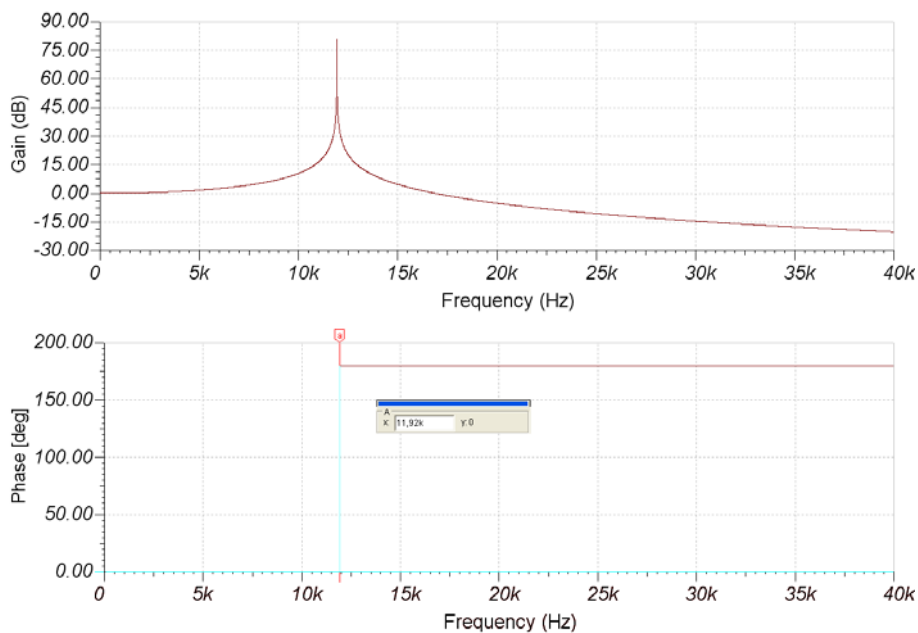
A legnagyobb rendszámú 0,1 v.e. feletti harmonikus a 23-ik, a hozzá tartozó frekvencia:  $23 * 20Hz = 460Hz$ , ami jelentősen alatta van az 5  $\Pi$  tagos modell vágási frekvenciájának (lásd. 5-10. ábra,  $\sim 22,5$  kHz). Ez magyarázza a potenciálnövekedések közötti elhanyagolható különbséget, az áramimpulzusok tekintetében mutatkozó relatíve nagyobb alakbeli (lásd. 5-6. ábra) és Fourier felbontásbeli (lásd. 5-12. ábra) eltérés ellenére.

A [16] szerint - tapasztalatok alapján - a 10÷13. egyenletekkel meghatározott  $\Pi$  tagokból álló távvezeték modell a  $\Pi$  tagok határfrekvenciájának (rezonancia frekvencia) felével megegyező vagy annál kisebb frekvenciájú jeleket kis torzítással viszik át. Egyenlettel felírva:

$$f_{\max} = \frac{1}{2} * f_{\text{határ}} = \frac{1}{4\Pi\sqrt{L * C_{pi}}}$$

### 18. egyenlet

A kísérleti áramkör esetében a maximális átvindó frekvenciát ( $f_{\max}$ ) az áramimpulzus szélessége ( $T_{bef.}$ ) határozza meg. Egy  $\Pi$  tag esetén a szűrő sajátfrekvenciája ( $\omega_0$ ) megegyezik a határfrekvenciával, így felette az amplitúdómenetben -40 dB/dekád gradienssel vág a szűrő, a fázismenetben pedig 180°-os tolődás van. A 2. táblázat alapján egy 20 km hosszú, 5  $\Pi$  tagból álló modell esetén a határfrekvencia ( $f_{\text{határ}}$ ) 11,9 kHz, ami megegyezik a kiszámított L és  $C_{pi}$  értékekből összeállított egy  $\Pi$  tagos passzív szűrő Bode diagramjának vágási frekvenciájával (lásd. 5-14. ábra).



5-14. ábra – Egy  $\Pi$  tagból álló passzív szűrő esetén a Bode diagram

A 2. táblázat utolsó három sora a 18. egyenlet által megadott feltétel teljesülését vizsgálja, különböző vezetékhozzok és  $\Pi$  tagszámok esetén. A  $T_{bef.}$  a vezeték hosszával növekszik, így csökken az  $f_{\max}$  értéke, mégis a 18. egyenlet feltétele alapján mind a három vizsgált vezetékhozzok esetén (20, 60, 100 km) minimálisan 7  $\Pi$  tag lenne szükséges a megkívánt pontosságú leképzéshez.

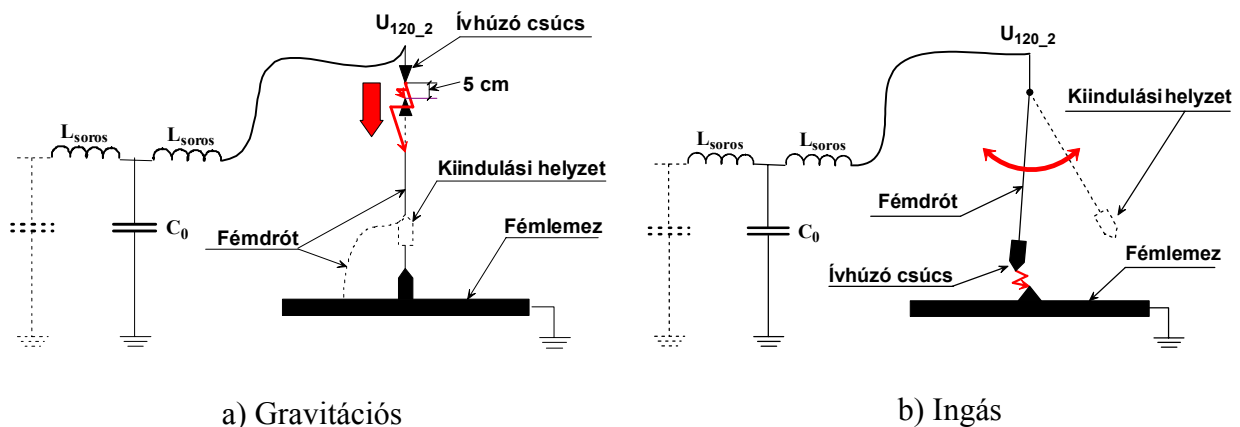
Ez a feltétel azonban túl szigorú a tárgyalt kísérleti áramkör szempontjából, mivel a fejezetben elemzett 5  $\Pi$  tagos és LCC modelles leképzések időfüggvényei és Fourier felbontásai között a különbség nem számottevő. Ez alapján kijelenthető, hogy a II. tézisben leírtaknak megfelelően 5  $\Pi$  tag elegendő a kisebb feszültségű rendszer kikapcsolt fázisvezetőjének megkívánt pontosságú leképzésére az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder iv vizsgáلتa szempontjából.

## 5.6 Ívképzés, regisztrálás

### 5.6.1 Ívképzés

Az 1. tézis bizonyítása során bemutatott kísérlet elvégzése során egy SOHK 12-31,5/2000 A-es szakaszoló kézi irányításával képeztük az ívet (lásd. 4-11. ábra *a* része). A megoldás az ív szabályozását korlátozottan tette lehetővé, azonban a szűkös kivitelezési lehetőségekhez képest bevált, a videokamerás rögzítést és a vizuális megfigyelést lehetővé tette. Amennyiben viszont tágabbak a lehetőségek az ívképzés kialakítására, az alább bemutatott módszerek valamelyikét kell alkalmazni.

1. A gravitációs ívképzés lehetőségének elvi elrendezését az 5-15. ábra *a*) része mutatja, az utolsó  $\Pi$  tagot is feltüntetve (lásd. 5-2. ábra).



5-15. ábra – Ívképzési módszerek

Az utolsó  $L_{soros}$  induktív elem potenciálja van egy fixen beállított ívhúzó érintkezőcsúcsra kivezetve, amellyel szemben egy mozgó, súly által a föld felé húzott másik érintkezőcsúcs áll szemben. A mozgó csúcs fémdrótval össze van kötve a földpotenciálú fémlappal.

A kiindulási helyzetben a fémdrót úgy van beállítva, hogy a fix és a földelt fémdrót végén lévő ívhúzó csúcsok között 5 cm távolság van, amit a bekapcsolás után az  $U_{csatolt,csúcs}$  (30÷40 kV) biztosan át tud ütni. Amint kialakult az ív (a kellő nagyságú mögöttes teljesítmény következtében nagy valószínűséggel 50 Hz-es) a mozgó csúcsot rögzítő damilszálat elvágjuk, ezek után a súly hatására a két csúcs között - rövid távon még viszonylag egyenletesen (a valóságban egyenletesen gyorsulva) - elkezd nőni a távolság. Amikor már nem tud az 50 Hz-es ív fennmaradni, kialakulnak a gyors, rövid visszagyújtások és létrejön a kívánt potenciálnövekedés. A végleges kialvás akkor következik be, amikor az ívhúzó csúcsok közötti távolságon a megnövekedett potenciál nem tud újabb visszagyújtást létrehozni.

Ennek a begyújtási módnak az előnye az, hogy függőlegesen (ahogyan tartó távvezetési oszlop esetében a szigetelő áll) tud az ív égni, valamint, hogy rövid távon csaknem egyenletes az ív által átütendő távolság hosszának növekedése, így rá van kényszerítve a (majdnem) egyenletes potenciálnövekedésre, vagy a kialvásra. Amennyiben megfelelően látható hossz mértéket helyezünk el az ív mellett, gyorsfilmfelvétellel jól elemezhető az átütendő távolság függvényében az ív hosszának és alakjának változása.

Hátránya, hogy viszonylag gyorsan lezajlik a kísérlet a gravitáció által megszabott sebesség miatt, mivel

$$t_{nyúlás} = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{\text{maximális\_hossz}}}{g}}$$

### 19. egyenlet

ahol:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

Így ha  $S_{\text{maximális\_hossz}} = 1 \text{ m}$ , akkor  $t_{nyúlás} \approx 450 \text{ ms}$ . Ennyi idő alatt 45 visszagyújtás tud kialakulni, ha minden félperiódusban egyszer történik átütés, azaz a feszültség  $U_{\text{tűllövési\_max}}$  értékig is megnövekedhet (lásd. 4-5. ábra).

2. Az ingás ívképzésre az 5-15. ábra *b*) része mutat példát. Kiinduláskor damillal van rögzítve az egyik szélső helyzetében a fémszálból és ívhúzó csúcscsal ellátott súlyból álló inga, akkora távolságra a földpotenciáltól, hogy csak a függőleges helyzethez közeli állapotban tudjon az  $U_{\text{csatolt,csúcs}}$  átütést létrehozni. A fémlemezre ugyan az vonatkozik, mint az 1. módszernél. A feszültség bekapcsolása után a damilt elvágjuk, és az inga megindul a függőleges helyzet felé. Amikor akkora távolságra lesz az ívhúzó csúcstól, hogy az  $U_{\text{csatolt}}$  hatására ki tud alakulni az átütés, begyullad az ív. Ezek után az inga lengésének függvényében változik az ív, amely egy-egy kilendülés során addig ég, amíg a potenciálkülönbség vissza tudja gyújtani az ívet az áram-nullaátmenetek után. Az inga egyre csökkenő amplitúdóval leng, majd egy idő után megáll; ezután az állandósuló ívet a betáplálás kikapcsolásával lehet kioltani.

Előnyei az 1. módszerhez képest:

- egyszerűbben megvalósítható,
- egy kísérlet során többször megnyúlik, majd lecsökken az átütendő távolság, így jobban megfigyelhető a megnövekvő majd lecsökkenő ívhossz hatására a jelenség alakulása,
- az inga hosszával és a rajta lévő súllyal jól szabályozható az inga és ezáltal az ív nyúlási sebessége.

Hátránya, hogy:

- az ív változó helyzetben (nem vízszintesen vagy függőlegesen) ég, ami nem felel meg sem a tartó- sem a feszítőoszlopos elrendezésnek.

Mind a két módszer esetén megismételhető a kísérlet többször, korlátot a kísérleti hálózat rendelkezésre állása, valamint az ívhúzó érintkezők állapota (fogyása) jelent.

## 5.6.2 Mérőváltók, regisztrálás

A pontos regisztráláshoz elengedhetetlen az ívhúzó érintkezők távolságának és az ív hosszának ismerete. A kísérlet során erre egy jól látható, milliméteres skálázással ellátott szigetelő rúdhoz való viszonyítás szolgál, ami az 1. módszernél függőlegesen áll a fémdrót mögött, vagy mellette a jobb láthatóság érdekében. A 2-nál az ingára van felerősítve, olyan módon, hogy függőleges helyzetben a fémlapon lévő alsó ívhúzó csúcs tetejéig érjen a skálázása, de ne érintse a földet a szabad lengés biztosítása érdekében.

Az elvégzett kísérlet tapasztalataiból kiindulva szükséges az íveknek egy normál, kézi videokamerával való folyamatos felvétele, valamint a későbbi pontosabb ívalak-változás nyomon követéséhez célszerű gyorsfilmfelvevő (< 2 ms/képkocka) alkalmazása is, legalább a kitüntetett ívbegyújtások esetén.

Az  $U_{\text{GEN}}$  (lásd. 5-2. ábra *GEN* pontja) méréséhez megfelelő az induktív feszültségváltó, áttételét a regisztráló műszer méréshatára és a kísérleti áramkör betáplálási feszültsége határozza meg (pl:  $400000/\sqrt{3}\text{V}/100/\sqrt{3}\text{V}$ ). Frekvencia-átvitel szempontjából elegendő az 50 Hz-es feszültség mérésére alkalmas készülék, mivel csak a tápfeszültség jelét kell szolgáltatnia.

A lebegő-pont potenciáljának méréséhez (lásd. 5-2. ábra *I20\_2* pontja) kapacitív feszültségosztó szükséges, a primer feszültségének minimálisan 200 kV<sub>csúcs</sub>-nak kell lennie (lásd. 5-5. ábra *b*) része), szekunder feszültsége a regisztráló műszerhez igazodik. Követelmény, hogy minél ki-

---

Különböző névleges feszültségű rendszerek elektromágneses kölcsönhatása többrendszerű távvezetéseken

sebb mértékben terhelje a kört, ha ugyanis túl nagy a kapacitása, a távvezeték szélső II tagjának aktív részét képezné. Ennek elkerülésére a  $C_{felső\ tag} < 0,5\text{ nF}$  feltételt teljesítő kapacitív osztó a megfelelő. A frekvencia-átvitele 80 kHz-ig közel lineáris kell legyen, mivel:

- a visszagyújtások áramimpulzusának talpszélessége a legrövidebb vizsgált vezeték hossz esetében  $2 \cdot T_{befutási, 20km} = 133,4\ \mu\text{s}$ -al egyenlő. Ennek megfelelő minőségű mintavételezéséhez 10 minta szükséges, így a mintavételi idő 13  $\mu\text{s}$ , amihez 77 kHz-es frekvencia tartozik.

Az ív áramát Rogowski tekerccsel szükséges mérni, a galvanikus leválasztás és a kis terhelés miatt [52]. Ennek átvitele szintén 80 kHz-ig megfelelő kell legyen, az elmondottak következtében. A tekercs elhelyezése a fémlap földelését biztosító vezeték mentén lehetséges.

A regisztráló műszernek és a hozzá tartozó szoftvernek a következő tulajdonságokkal kell rendelkeznie:

- A kísérleti helyszín függvényében (lásd. 5.6.3. fejezet) vagy
  - 3 független feszültség csatornája ( $U_{GEN}$ ,  $U_{I20\_2}$ ,  $U_{Rogowski}$ ), vagy
  - 3 független feszültség ( $U_{GEN}$ ,  $U_{I20\_2}$ ,  $U_{Rogowski}$ ) és a szélesebbesgmérő jelkimenetének függvényében egy további független feszültség/áram bemenete legyen.
- Csatornánként a felbontásának  $\leq 13\ \mu\text{s}$ -nak ( $> 80\text{ kHz}$ ) kell lennie a megfelelő minőségű jelrögzítéshez ( $2 \cdot T_{befutási, 20\text{ km}} = 133,4\ \mu\text{s}$ ).
- Minden egyes elvégzett mérés után vizuálisan lehessen megjeleníteni a mért adatsorozatot, valamint a korábbi méréseket is.
- Legyen lehetőség a mért értékek archiválására és későbbi reprodukciójára, beleértve az adatsorozatok általánosan használt formátumokba való konvertálását is (dat, txt stb.).

### 5.6.3 A szélesebbesség mérése

Ahogy a 3. fejezetben már említettem, a szabadon égő ívek és különösen a szekunder ív esetében sarkalatos jellemző a szél sebessége, ezért a kísérlet elvégzése során elengedhetetlen a szélesebbesség megbízható és pontos regisztrálása.

Annak függvényében, hogy nyitott, vagy minimálisan 3 oldalról fallal körülvett területen van lehetőség a kísérlet elvégzésére, eltér a regisztrációval szemben támasztott követelmény:

1. Nyitott terület esetén az ívvel megegyező magasságban és közvetlen közelében szükséges a mérés, a tápfeszültség bekapcsolt állapota esetén, folyamatosan. Az azonos időbélyegzéshez a jelet önálló bemenetként kell a regisztráló műszerbe vezetni, az előző fejezetben említett felbontással. Ebből következően 4 csatornás regisztráló műszer szükséges.
2. Amennyiben lehetséges a legalább 3 fallal körülvett kísérleti helyszín és a ventilátoros szélképzés megvalósítása, akkor elegendő az ív közelében és magasságában elhelyezett érzékelőjű, a tényleges szélesebbesget mérő mutatós műszer vizuális megfigyelése is. Ennél a megvalósításnál 3 feszültségbemenettel rendelkező regisztráló műszer szükséges.

Az 5. fejezetben leírt követelményeknek megfelelő kísérleti áramkör és körülmények megvalósulása esetén a távvezetéseken kialakuló viszonyokhoz közeli leképzést lehet biztosítani, így az I. tézis kapcsán ismertetett *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* igazolhatósága teljes körűen elvégezhető.

### **III. TÉZIS**

Minél nagyobb a kisebb feszültségű rendszer kikapcsolt fázisvezetőin kialakuló és a 7-9. ábra valamint a 24. egyenlet szerinti eszkalációs potenciál, annál nagyobb az esélye annak, hogy képes lesz a visszamaradt ionizált gázfelhőt sorozatosan átütni, így meghosszabbítva a szekunder ívidőt és megnövelve a visszakapcsolás sikertelenségének valószínűségét.

A távvezetéseknél az üzembiztos és megfelelő minőségű energiaátvitel szempontjából nélkülözhetetlen a túlfeszültség korlátozó és a feszültségváltó. Amennyiben egy fázisvezetőt mindkét végén kikapcsolunk a fenti áramköri elemek nem választódnak le a vezetékről.

*A 6-4. ábra és a 6-7. ábra alapján megállapítottam, hogy az I. tézisben bemutatott eszkaláció létrejöttét nem akadályozzák meg a távvezetésekre telepített túlfeszültség korlátozók, azonban korlátozzák a kialakuló feszültség nagyságát és így növelik a visszakapcsolás sikerességének valószínűségét. A 6-3. ábra, 6-4. ábra és a 6-7. ábra összevetésével bemutatom, hogy ennek a mértékét a rendszerek közötti névleges feszültségek különbsége, az oszlopgeometria és a beépített korlátozó karakterisztikája határozza meg.*

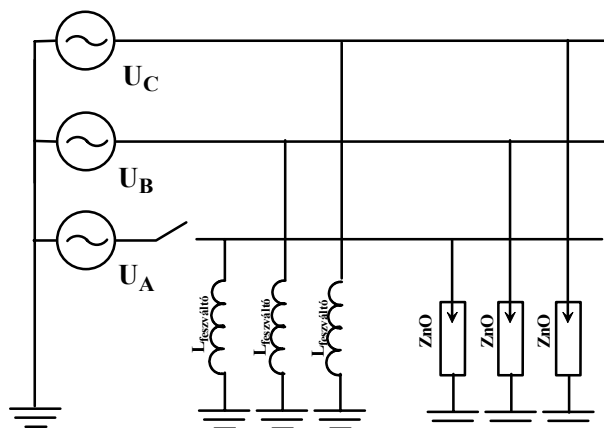
*Vizsgálataim alapján kijelentem, hogy a távvezetésekre telepített induktív feszültségváltók kisütő hatása az I. tézisben bemutatott eszkaláció létrejöttét szintén nem gátolja meg. Ugyanakkor a kialakuló maximális potenciál értékét - a vizsgált 400/120 kV-os elrendezések esetében 10 %-al - csökkentik, ezáltal növelik a visszakapcsolás sikerességének valószínűségét, ahogyan a 8-2. ábra mutatja. A visszagyújtások megszűnése után levezetik a kikapcsolt fázisvezető(kö)n felhalmozott töltéseket (lásd. 8-4. ábra és 8-5. ábra), ilyen módon csökkentve hosszabb idejű ívelési szünet után (2-3 periódus) az ívírnyúlás valószínűségét.*

A [16] szerint a távvezetéseken oppozíciós visszakapcsoláskor jelentős túlfeszültség tud kialakulni, amit a megszakító két oldalán lévő feszültségek közötti eltérés hatására meginduló kiegyenlítő feszültség hullám hoz létre.

*A túlfeszültség korlátozó és az induktív feszültségváltó hatására bekövetkező (a 6. és a 8. fejezet által bemutatott) földhöz képesti lebegő-pont potenciál csökkenés a távvezetési oldalon mérsékeli a feszültség nagyságát. Így oppozíciós és oppozíció-mentes visszakapcsolásnál egyaránt kisebb kiegyenlítő feszültség hullám indul meg a vezetéken, ami kisebb visszakapcsolási túlfeszültséget fog eredményezni.*

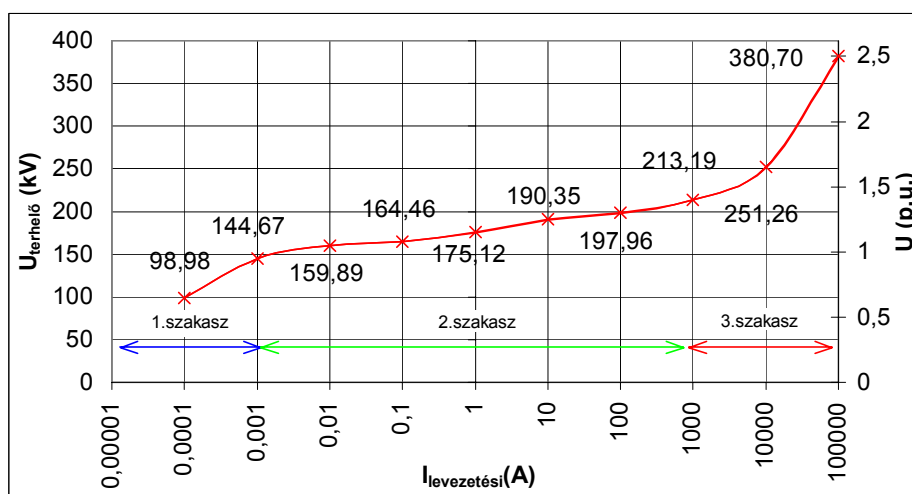
## 6. A túlfeszültség korlátozók hatása

A nagyfeszültségű távvezetékek fázisvezetőinek mindkét végén az állomásokban szinte mindenhol túlfeszültség korlátozók vannak felszerelve. Ezek az áramköri elemek a távvezetékek megfelelő túlfeszültség védelmének biztosítása érdekében úgy vannak elhelyezve, hogy ha a megszakítók a hibás fázis(oka)t kikapcsolja(ák), akkor is rajta maradjanak a távvezetéken (lásd. 6-1. ábra).



6-1. ábra – A túlfeszültség korlátozók és az induktív feszültségváltók elhelyezkedése a hálózaton

Ezek az elemek EVA vagy HVA esetén befolyásoló hatással lehetnek a lejátszódó folyamatokra, mivel a föld felé - működési elvükből és kialakításukból adódóan – állandó, nemlineáris villamos kapcsolatot jelentenek. A 6-2. ábra egy tipikus ZnO túlfeszültség korlátozó karakterisztikára mutat példát.



- 120 kV-os távvezetéken használt tipikus korlátozó [37]

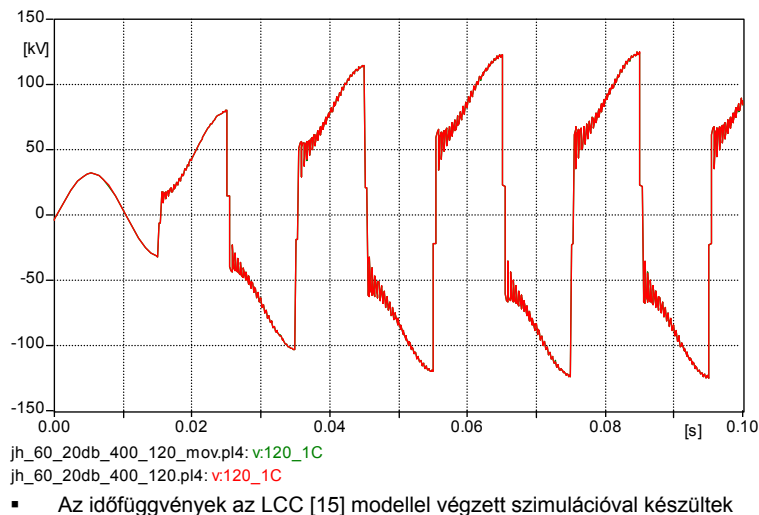
6-2. ábra – A vizsgált korlátozó karakterisztikája és a tényleges kV értékek

A vízszintes tengelyen a korlátozó árama, a jobb oldali függőlegesen a pillanatnyi feszültség ( $U_{\text{terhelő}}$ ) a bal oldalin pedig a pillanatnyi és a névleges feszültség [37] aránya van feltüntetve. A karakterisztika három szakaszra bontható:

- Kis villamos térerősségnél (1. szakasz) a ZnO magok közötti oxidréteg gátolja az elektronok mozgását, gyakorlatilag csak egy igen kis kapacitív áram folyik a korlátozón.
- Közepes villamos térerősségnél (2. szakasz) a szemcsék közötti oxidrétegben a villamos térerősség eléri a 100 kV/cm-t. Ekkor az alagúthatás következtében az elektronok képesek lesznek átlépni az elektrongátat, azaz már kis feszültségnövelés esetén is lényeges áramnövekedés következik be.

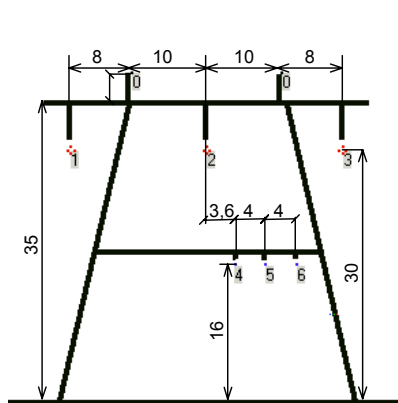
- Nagy villamos térösségnél (3. szakasz) az oxidréteg ellenállása elhanyagolhatóan kis értékre csökken le, csak a ZnO szemcsék ellenállása dominál, nem túl meredek hullámok esetén a korlátozó ellenállásként viselkedik.

A 4.2.2. fejezetben láttuk, hogy az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívelés* során a kisebb feszültségű rendszeren jelentős, akár a névleges feszültség értékét meghaladó földhöz képesti potenciál alakulhat ki. Vizsgálataim alapján a felszerelt túlfeszültség korlátozók befolyásoló hatással lesznek a folyamatra, de nem a potenciálemelkedés létrejöttét/nem létrejöttét befolyásolják, hanem azon belül mennyiségi változást okoznak. A 6-2. ábra alapján paraméterezett korlátozót illesztve az előző fejezetekben tárgyalt 400/120 kV-os távvezeték mindkét végére a lebegő-pont potenciálja nem változik meg a korlátozó nélkülihez képest (lásd. 6-3. ábra).



**6-3. ábra – A 400/120 kV-os vezetéknél a túlfeszültség korlátozó nem befolyásolja a lebegő-pont potenciálját (a két görbe egybe esik)**

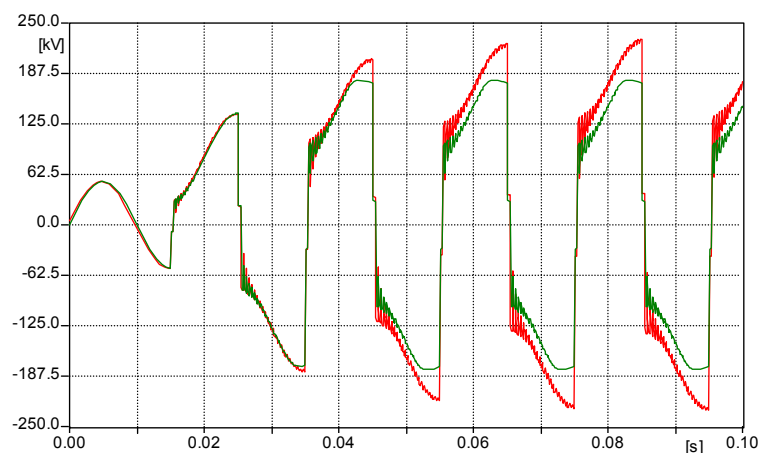
A korlátozó nincs befolyással a szekunder ív folyamatra, munkapontja a karakterisztika 1. szakaszában marad. Amennyiben nagyobb lenne az  $U_{csatolt}$  feszültség értéke, a lebegő-pont potenciálja is jobban megnőne (a részletes magyarázatot és kifejtést lásd a 4.2.1. fejezetben), így a korlátozó munkapontja a 2. szakaszba tolódna át, a nagyobb levezetési áramok környezetébe. Tekintsünk a 6-4. ábra *a*) része által mutatott - 2 db 120 kV-os és egy db 750 kV-os rendszerre tervezett - oszlopkonfigurációt, amelyre csak egy 120 kV-os rendszert szereltek fel. Látható (lásd. 6-4. ábra *b*) része), hogy a nagyobb rendszerek közötti távolságok ellenére a kialakuló  $U_{csatolt}$  maximális értéke (~54kV) jelentősen meghaladja a 400/120-as elrendezésnél kialakuló (~32kV). Mivel mindkét esetben a kisebb feszültségű rendszer 120 kV-os, ezért ugyan olyan korlátozót helyezünk fel rá. A 750/120 kV-on kialakuló nagyobb potenciál miatt azonban a korlátozó munkapontja eltolódik a 2. szakaszon belül és nem engedi megnőni a lebegő-pont feszültségét. A korlátozóval ellátott és az anélküli potenciált mutatja a 6-4. ábra *b*) része.



A méretek méterben értendők

**750/120 kV-os oszlopkép**

a)



a feszültségek alakulása korlátozóval és nélküle

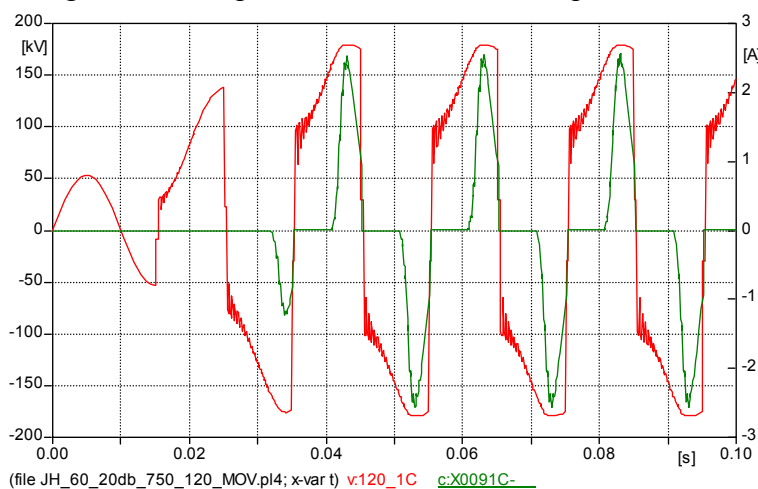
b)

- Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

**6-4. ábra – A 6. fázis potenciáljának változása a korlátozó (6-2. ábra) hatására**

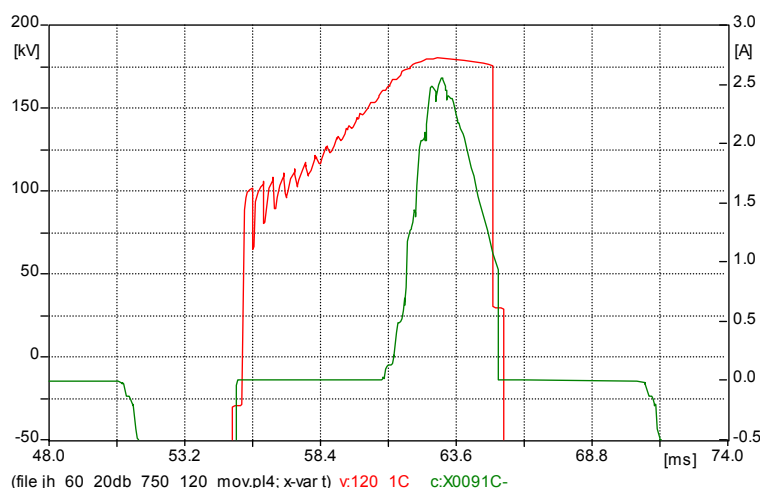
Mivel lassan emelkedő (50Hz) feszültségről van szó, a korlátozó túllövés nélkül határol, ellen-tétben egy villámáram által okozott feszültségcsúccsal, ahol először kis mértékű túllövés alakul ki, majd csak utána csökken vissza a korlátozó feszültsége a védett szintre.

A következő ábrán látható, hogy a korlátozónak ~160 kV körül elkezdi megnőni az **árama**, a munkapontja eltolódik a 2. szakaszon belül a néhány amperes levezetési irányba. Ez a növeke-dés folyamatosan tart egészen a kikapcsolt vezető ~180 kV-os potenciál értékéig.



**6-5. ábra – A korlátozó árama és a 6. fázis (6-4. ábra) potenciálja**

Ekkor a rendszerek közötti csatolás által átkerülő töltések és a korlátozón keresztül távozó töl-tések számának aránya megfordul, több sül ki a korlátozón keresztül, mint amennyi átkerül a nagyobb feszültségű rendszerről. Egy kinagyított részletet mutat a 6-6. ábra.

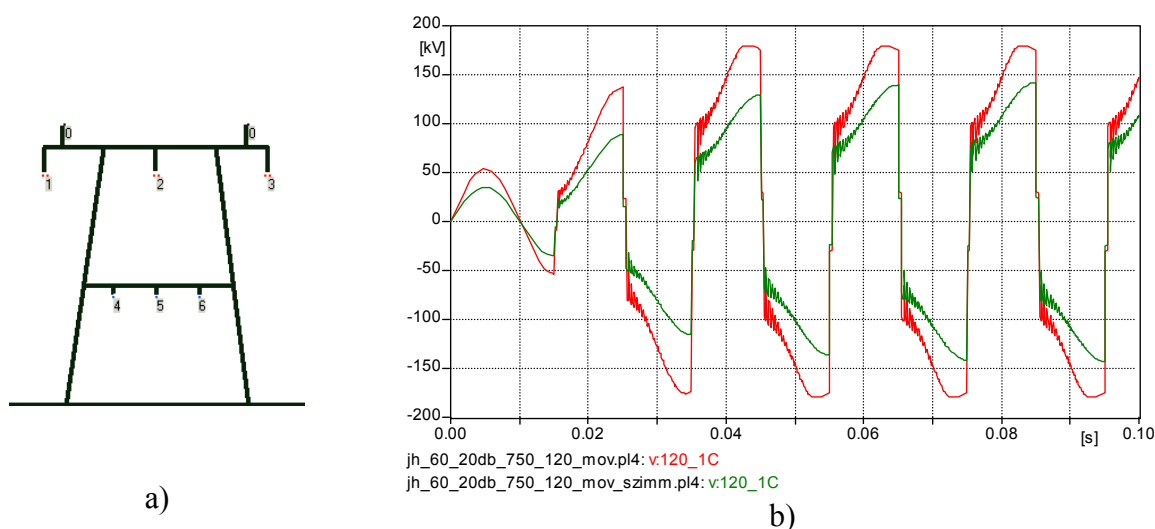


6-6. ábra – A 6-5. ábra kinagyított részlete

**A korlátozó munkapontja a 2. szakaszon (6-2. ábra) belül mozog**

A korlátozó árama folyamatosan növekszik; a kisebb csúcsokat a vezeték két vége között kialakuló kiegyenlítő áramhullámok okozzák. Amikor a feszültség értéke elkezd csökkenni, a korlátozó árama is csökken egészen addig, amíg be nem következik a szekunder ív újabb visszagyújtása. Mivel az ábrázolt áramú korlátozó a vezeték végein lévők közül a szekunder ívvel ellentétes végen van felszerelve, így csak a visszagyújtás bekövetkezése után  $T_{bef}$  idő múlva átérő törülő áramhullám hatására csökken le az árama nullára. Ebben az esetben a túlfeszültség korlátozó behatárolta a maximális potenciált a kisebb feszültségű rendszeren, az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulását* azonban *nem tudta megakadályozni*.

Tekintsük a 6-7. ábra a) része által mutatott konfigurációt, ahol ugyancsak 750/120 kV-os rendszerről van szó, az előzőhöz képest azzal az eltéréssel, hogy a meglévő 120 kV-os rendszer az oszlop függőleges tengelyére szimmetrikusan van elhelyezve. Ebben az esetben a szimmetrizálás miatt jelentősen kisebbek az  $U_{csatolt}$  feszültségek (lásd. 6-7. ábra b) része).



- Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

6-7. ábra – **Szimmetrikus** és **nem szimmetrikus** elrendezésű 120 kV-os rendszer esetén a lebegő-pont potenciálja túlfeszültség korlátozóval

A kisebb  $U_{csatolt}$  azt eredményezi, hogy a kikapcsolt vezető potenciálja nem nő meg akkorára, hogy ugyanannak a korlátozó munkapontja eltolódjon a 2. szakaszon belül a néhány amperes levezetési tartományba és beleavatkozzon a lebegő-pont potenciáljának alakulásába. Azaz

ugyanakkora névleges feszültségeknél, de eltérő oszlopkonfigurációknál lehetséges olyan elrendezés, hogy a korlátozó beavatkozzon, és olyan is, hogy nem.

A vizsgált elrendezéseknél tapasztaltakból megállapítható, hogy a (kisebb feszültségű) 120 kV-os rendszerre felszerelt ZnO túlfeszültség korlátozók

- az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulását megakadályozni nem tudják,
- ugyanakkor
  - a két rendszer névleges feszültségének különbsége, és
  - az oszlopkonfiguráció

függvényében mennyiségi hatással bírnak a jelenségre.

Az egy oszlopon lévő rendszerek névleges feszültségének és az oszlopkonfigurációknak a függvényben változik a kikapcsolt kisebb feszültségű rendszerre csatolással átkerülő feszültség értéke. Minél nagyobb a különbség a két rendszer névleges feszültsége között, annál nagyobb lesz az

$$A_U = \frac{U_{csatolt}}{U_{névleges, kikapcsolt}}$$

## 20. egyenlet

szerinti arány, azaz annál nagyobb az esély a visszamaradt forró ionszarnában létrejövő viszszagyújtásra. Itt

$$U_{névleges, kikapcsolt} = \text{a kikapcsolt rendszer névleges feszültsége}$$

A disszertációban bemutatott vizsgálataim során kizárólag 120 kV-os kisebb feszültségű rendszerrel dolgozom. Ennek okai a következők:

- a csillagpontkezelést tekintve alkalmas arra, hogy a tárgyalt szekunder ív kialakuljon rajta,
- a névleges feszültségéből következően jelentősen kisebb a szigetelési szintje a többi - Magyarországon alkalmazott - nagy feszültségű rendszerénél (220, 400 és 750 kV),
- oszlopközei lehetővé teszik, hogy a rendszert fel lehessen szerelni a nagyobb feszültségű rendszerekkel egy oszlopsorra (pl. a 20 kV-ot nem lehetne),
- a legkisebb olyan névleges feszültségű rendszer, amelynél egy-egy vezeték mindkét vége állomásban végződik és nincs benne közbenső leágazás (mint pl. 20 vagy 35 kV-on).

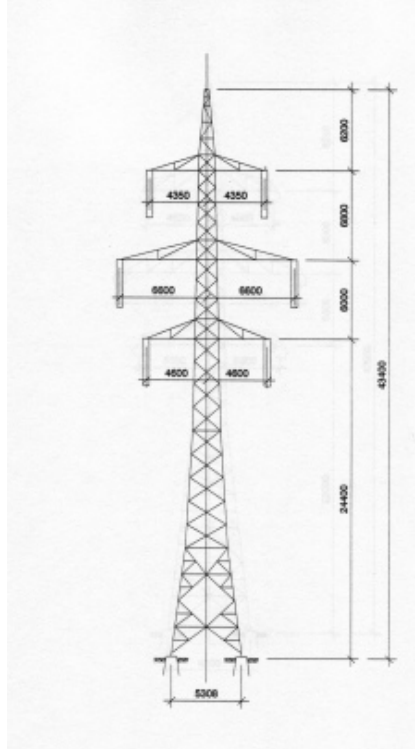
Ahhoz, hogy egy konkrét esetben meg lehessen állapítani a korlátozó hatását, két lehetőség kínálkozik:

1. A konkrét konfiguráció (oszlopkép, a rendszerek névleges feszültsége és a beépített korlátozó karakterisztikája) ismeretében el kell végezni az ebben a fejezetben bemutatott szimulációt.
2. A 7. fejezet szerinti oszloptípusokból és az ott lévő diagramokból kiindulva, felhasználva a bemutatásra kerülő 24. egyenletet (lásd. a 72. oldalon), meghatározható az a maximális feszültség érték, amely - korlátozó nélkül – kialakul a kikapcsolt vezetőkön. Ennek és a korlátozó karakterisztikájának ismeretében meghatározható, hogy okoz-e a kiválasztott korlátozó érdemi változást az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív lefolyásában, valamint képes-e a potenciálnövekedést lényeges mértékben (20-40%-al) csökkenteni.

Amennyiben nem avatkozik be a korlátozó, akkor megnő annak az esélye, hogy az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív elhúzódik egészen a visszakapcsolási holtidő végéig, a visszakapcsolást sikertelenségét okozva a korábbiakban leírtak szerint.

## 7. A kikapcsolt vezetõn kialakuló potenciál meghatározása algebrai módszerrel

Többrendszerû távvezetékeknél jelentõsen lecsökkent távolságba kerülnek egymástól a rendszerek, amely - a külön oszlopsoros vezetéshez képest - megnöveli közöttük a villamos csatolást. Azonos névleges feszültségû rendszereknél általában nem probléma, hogy melyik rendszer üzembiztonságát - ezen belül sikeres zárlathárítását - befolyásolja jobban a közös oszlopsoron való futás, mivel a villamos paraméterek, szigetelõhosszak, fázistávolságok megegyeznek egymással. Ha a 7-1. ábra kétrendszerû oszlopát tekintjük, láthatjuk, hogy bármelyik rendszeren történik kikapcsolás, a feltételek a két rendszer esetében teljesen megegyeznek.



7-1. ábra – 2\*220 kV-os, Soroksár típusú tartóoszlop

Eltérõ névleges feszültségû rendszereknél (pl. az eddig bemutatott 400/120 kV-os és 750/120 kV-os) azonban a kisebb feszültségû rendszer kisebb szigetelõhosszakkal, átütési távolságokkal rendelkezik, ezért a megnövekedett csatolás miatt a holtidõben lebegõ-potenciálú pontnak tekinthetõ kikapcsolt fázisvezetõkõn megjelenõ  $U_{csatolt}$  feszültségek a kikapcsolt rendszer névleges feszültségéhez viszonyítva nagyobbak, mintha ugyanez a nagyobb feszültségû rendszeren jött volna létre (lásd. 4-1. ábra). Ez egy potenciális „veszély” tényezõ abban a tekintetben, hogy a zárlathárítás sikeres lesz-e vagy sem, ugyanis minél nagyobb az  $U_{csatolt}$ , annál nagyobb a valószínûsége, hogy a primer ív kialakása után kialakuló szekunder ív idõben hosszan elnyúló lesz és képes létrejönni az önfenntartó, holtidõt meghaladó idejû szekunder ív.

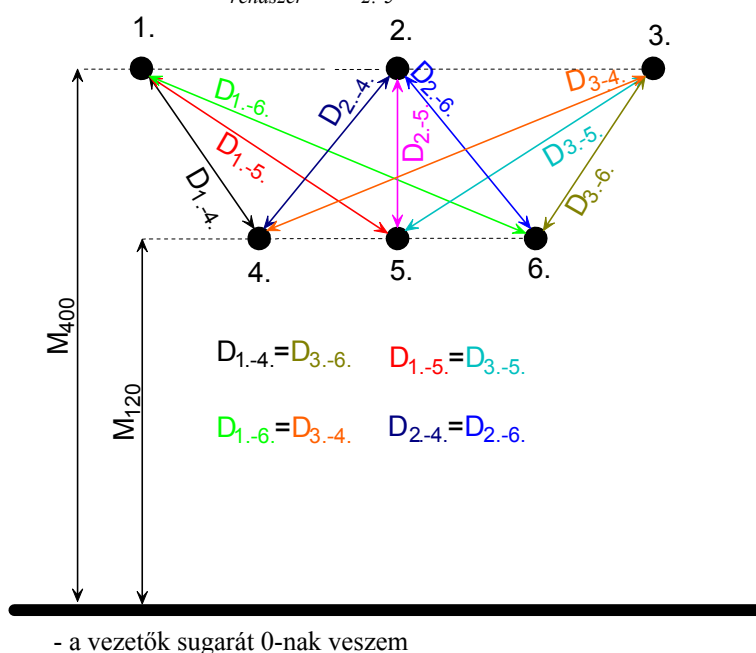
Adott oszlopképek és névleges feszültség kombinációk esetén, ha ismert az  $U_{csatolt}$ , akkor ezt mint a távvezeték üzembiztonságát befolyásoló tényezõt a tervezésekor figyelembe lehet venni. Ha valamely szimmetrikus, háromfázisú feszültségrendszer fázisfeszültségeinek pillanatértékeit összeadjuk, akkor azok minden idõpillanatban 0-át adnak. Ennek megfelelõen, ha a fázisfeszültséget tartalmazó vezetõket egy henger palástján egymástól  $120^\circ$ -ra helyezzük el, akkor egy, a henger középvonalában (pl. mérési céllal) futó - rögzítetlen potenciálú - vezetõben a feszültség minden idõpillanatban nulla lesz, mivel a csatolással átkerülõ feszültségek kioltják egymást. Ha ezt a vezetõt elmozdítjuk innen, akkor aszimmetrikussá válik a rendszer, így a vezetõben nem lesz nulla a feszültség. Minél közelebb kerül ez a vezetõ az egyik fázisvezetõhöz,

annál dominánsabb lesz annak a fázisnak a hatása, míg a másik kettőé csökken. Ez a csatolási törvényszerűség határozza meg a többrendszerű oszlopokon is a lebegő-pont földhöz képesti potenciálját, azaz minél szimmetrikusabb a nagyobb feszültségű rendszer elhelyezkedéséhez képest a mindenkor kikapcsolt fázisvezető helyzete, annál kisebb az  $U_{csatolt}$  értéke.

A következőkben ismertetni fogom - néhány oszloptípusra - a szimulációs eljárással meghatározott  $U_{csatolt}$  értékét az oszlopgeometria függvényében, utána pedig összevetem a különböző elrendezéseket. Az oszlopokon előforduló távolságok tekintetében két fogalmat használok:

- $D_{fázis}$ : az adott rendszer fázisvezetői közötti távolság, egy síkban fekvő vagy egyenlő oldalú háromszög elrendezésű vezetőknél.
- $D_{rendszer}$ : a két rendszer fázisvezetőinek síkjai közötti, vagy egyenlő oldalú háromszög esetén az alsó két vezető által alkotott sík és a másik rendszer fázisvezetőinek síkja közötti távolság.

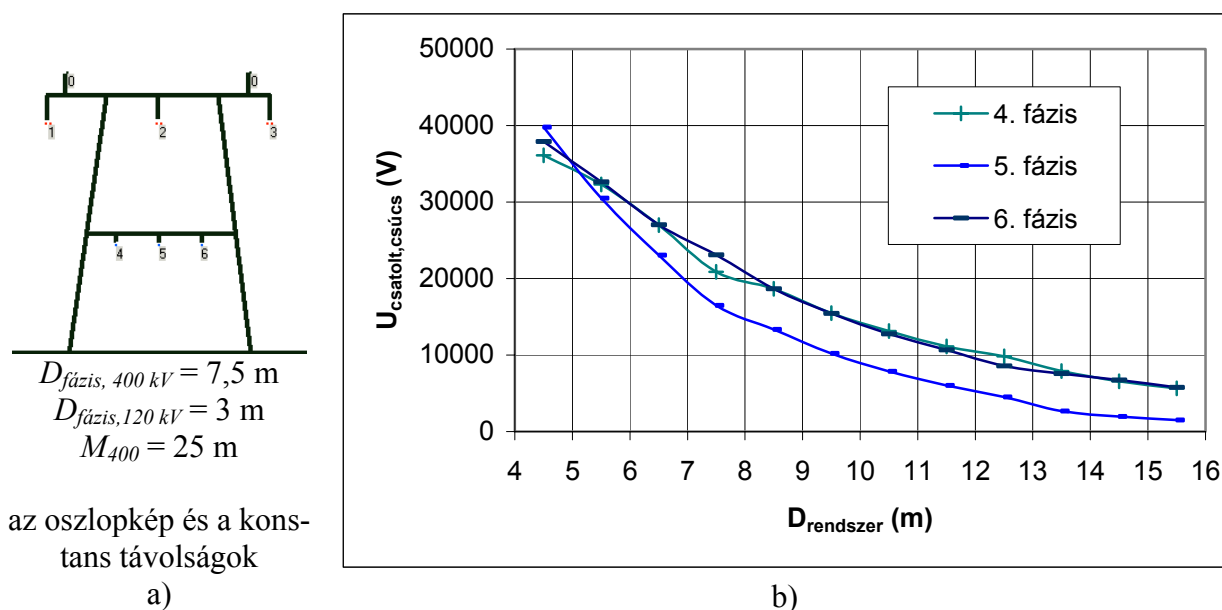
Tekintsük a 7-2. ábra által mutatott elvi elrendezésű 400/120 kV-os (1, 2, 3/4, 5, 6. fázis) oszlopot, ahol a fázisvezetők közötti, valamint a rendszerek síkjai és a föld közötti távolságok vannak feltüntetve. Ebben az esetben  $D_{rendszer} = D_{2.-5.}$



**7-2. ábra – A 400/120 kV-os oszlopelrendezés fázisvezetőihez tartozó távolságok**

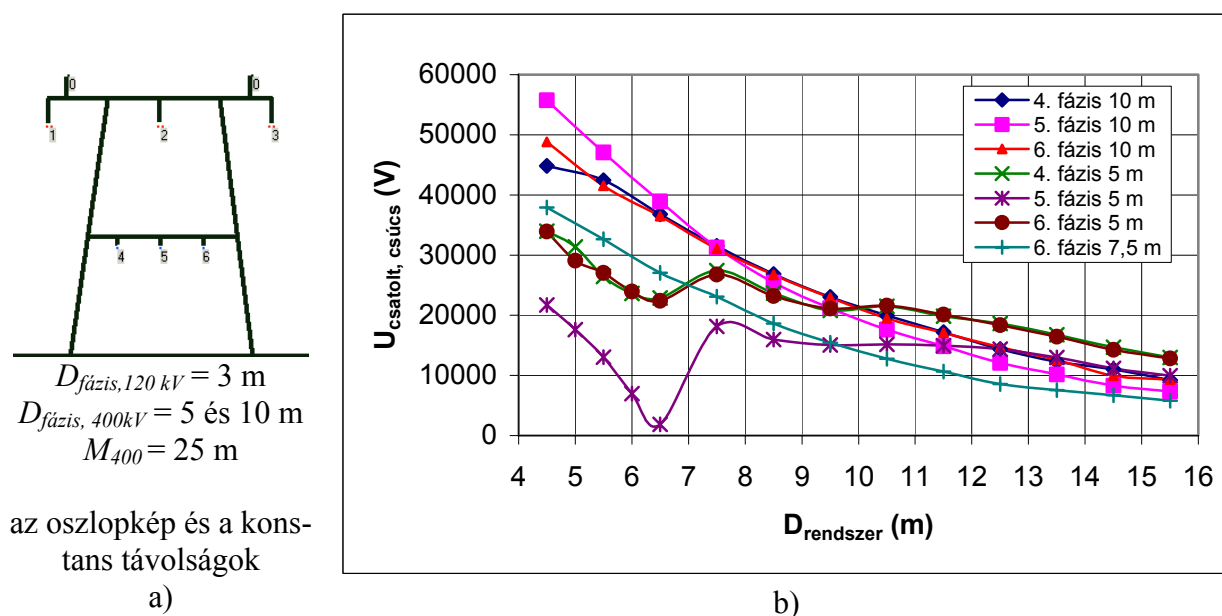
A távolságok arányától függ, hogy a 400 kV-os vezető feszültségének mekkora része jelenik meg a kikapcsolt 120 kV-os vezetőn. Ezek a „részfeszültségek” összeadódnak, így határozva meg a csatolt feszültség pillanatértékét.

Vizsgáljunk meg egy olyan oszlopkialakítást, ahol  $D_{fázis, 400\text{ kV}} = 7,5\text{ m}$ ,  $D_{fázis, 120\text{ kV}} = 3\text{ m}$ ,  $M_{400} = 25\text{ m}$  és a  $D_{rendszer}$ -t olyan módon változtatjuk, hogy a 120 kV-os rendszer fázisvezetőinek síkját függőleges irányban mozgattuk ( $D_{rendszer} = 4,5 \div 15,5\text{ m}$ ).



7-3. ábra – Szimmetrikus elrendezésű 400/120 kV-os oszlop

Látható, hogy ennél az elrendezésnél a feszültségek értéke a  $D_{rendszer}$  növekedésével exponenciálshoz közelítő görbe szerint csökken. Összehasonlítás végett nézzük a 7-4. ábra eredményeit, amelyek elvi elrendezése ugyanilyen, csak a  $D_{fazis, 400\text{ kV}}$ -ot itt 5 és 10 m-re veszem fel.

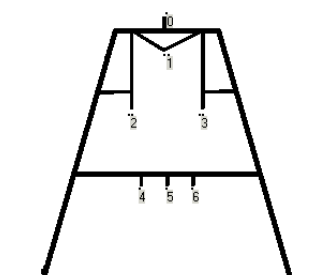


7-4. ábra - Szimmetrikus elrendezésű 400/120 kV-os oszlop

Tekintsük először a  $D_{fazis, 400\text{ kV}} = 10\text{ m}$  esetét. Ekkor az  $U_{csatolt, csucs}$  értéke a 7,5 m-es elrendezéshez képest mindhárom vezetében nagyobb lesz.. Egymáshoz viszonyítva viszont szinte azonos az értékük, azaz ekkora  $D_{fazis, 400\text{ kV}}$  távolságnál már szinte szimmetrikusnak tekinthető a 400 kV-os vezeték elrendezése a 120 kV-os vezetékhez viszonyítva.

Ha a  $D_{fazis, 400\text{ kV}} = 5\text{ m}$ -es kialakítást vizsgáljuk, azt tapasztaljuk, hogy  $D_{rendszer} \geq 7,5\text{ m}$ -nél az  $U_{csatolt, csucs}$  -ok közötti eltérés lecsökken, ami szintén azzal magyarázható, hogy ennél a rendszertávolságnál az 5 m-es 400 kV-os fázistávolság már nem tud számottevő aszimmetriát okozni.

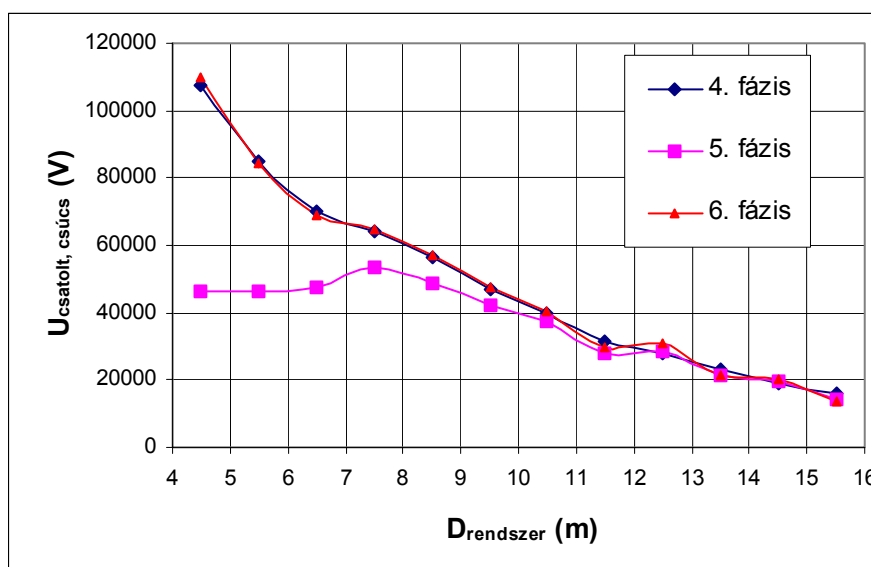
A következőkben tekintsük egy szintén 400/120 kV-os oszlopot, azzal a módosítással, hogy a nagyobb feszültségű rendszer  $\Delta$  elrendezésű és a  $D_{fazis, 400\text{ kV}} = 8\text{ m}$  (lásd. 7-5. ábra).



$D_{\text{fázis, 400 kV}} = 8 \text{ m}$   
 $D_{\text{fázis, 120 kV}} = 3 \text{ m}$   
 $M_{400} = 25 \text{ m}$

az oszlopkép és a konstans távolságok

a)



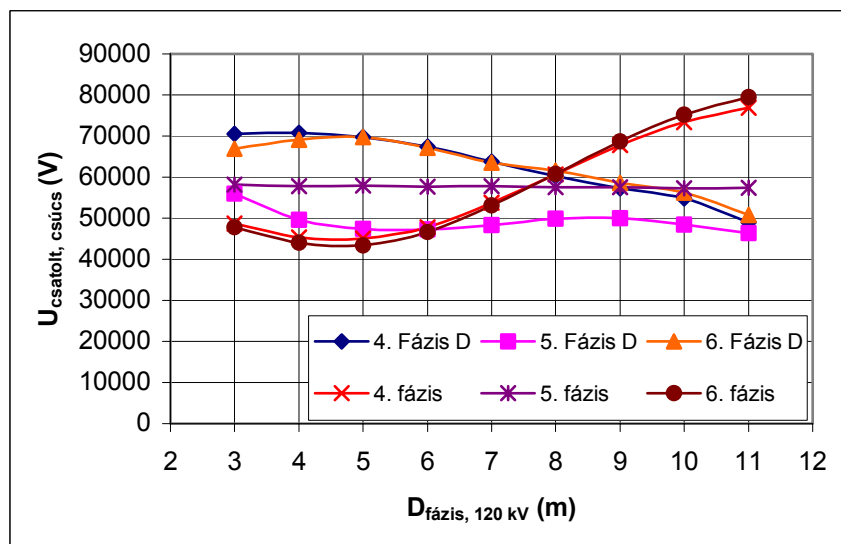
b)

7-5. ábra – 400 kV-on  $\Delta$  elrendezésű oszlop

Összevetve az eddig tárgyalt két oszlopképet:

Ugyanakkora  $D_{\text{rendszer}}$ -nél a  $\Delta$  elrendezésű 400 kV-nál (lásd. 7-5. ábra) jelentősen nagyobb az  $U_{\text{csatolt csúcs}}$  értéke, mint a síkba rendezett 400 kV-nál; pl. a  $\Delta$ -nál a két szélső (4. és 6.) fázisban  $D_{\text{rendszer}} = 4,5 \text{ m}$ -nél 105 kV, a síkba rendezettnél a maximum 56 kV. A  $\Delta$  elrendezés esetén (lásd. 7-5. ábra) a  $D_{\text{rendszer}}$  növekedésével hiába csökken folyamatosan az  $U_{\text{csatolt, csúcs}}$  értéke, mindig nagyobb marad a vízszintes 400 kV-os elrendezésnél (lásd. 7-3. ábra és 7-4. ábra).

Hasonlítsuk össze a vízszintes és a  $\Delta$  400 kV-os elrendezésű eseteket akkor, ha a  $D_{\text{rendszer}} = 4 \text{ m}$ , a 120 kV-os rendszer  $D_{\text{fázis}}$ -át pedig változtatjuk.



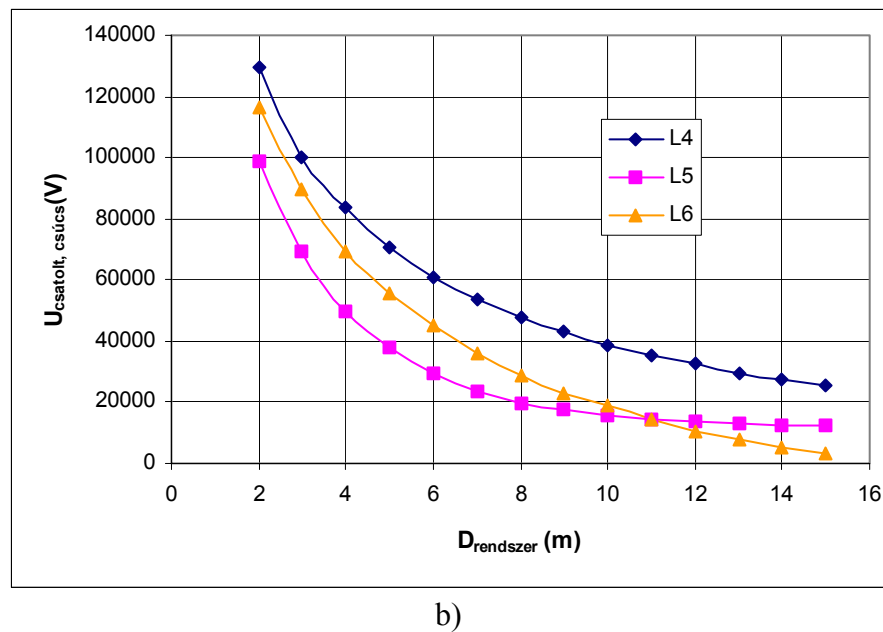
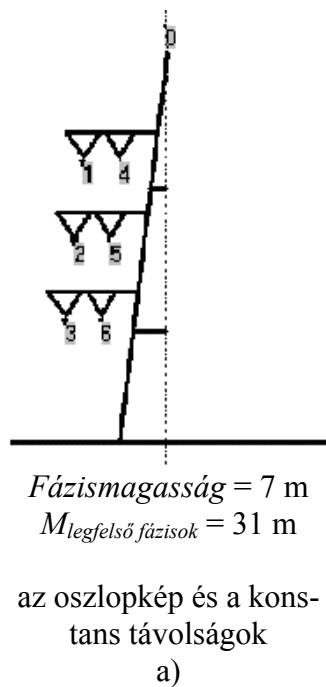
-  $D_{\text{fázis D 400 kV}} = 8 \text{ m}$ ,  $D_{\text{fázis, 400 kV}} = 10 \text{ m}$ ,  $D_{\text{rendszer}} = 4 \text{ m}$ ,  $M_{400} = 25 \text{ m}$

7-6. ábra – A  $\Delta$  és a vízszintes elrendezésű 400 kV-os oszlop

Mindkét elrendezésnél a szélső fázisok (4. fázis - 6. fázis és 4. fázis D - 6. fázis D) potenciáljának alakulása páronként megegyezik. A középső fázison (5.) megjelenő csatolt feszültség értéke a vízszintes elrendezésnél (-) közel állandó, a  $\Delta$ -nál (-) viszont változik. A legnagyobb po-

tenciálváltozás 36 kV, ami a vízszintes 400 kV-os elrendezésnél a két szélső fázisban jelenik meg (4. fázis és 6. fázis).

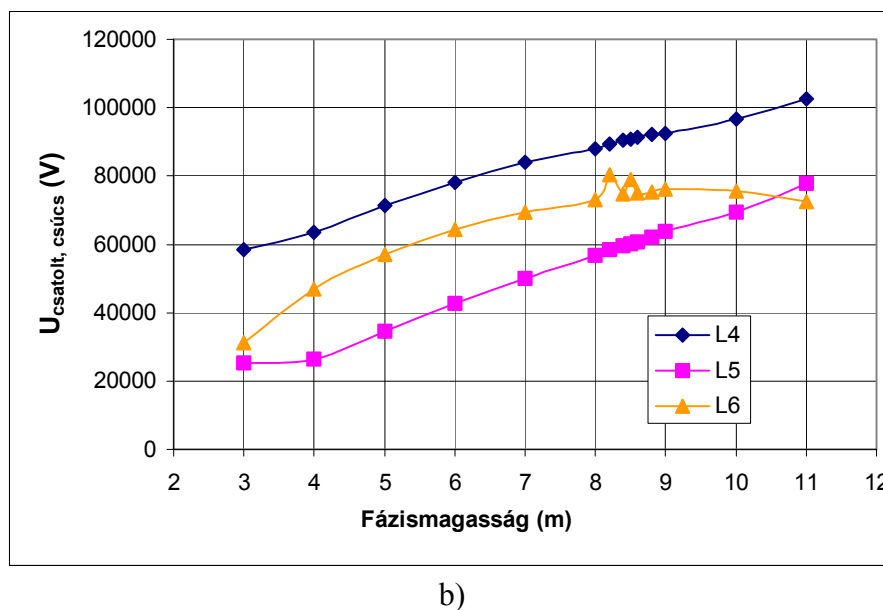
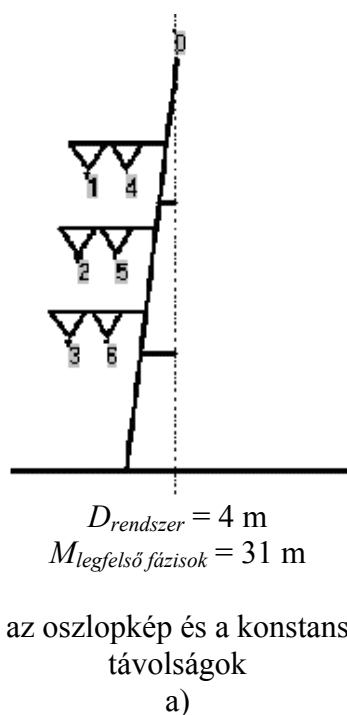
Vizsgáljuk meg harmadikként egy olyan elrendezést, amely Ausztriában már üzemben is van: meglévő 4\*220 kV-os oszlopokat 2\*380 és 2\*110 kV-os elrendezésre alakították át [25]. Az oszlopképnek csak az egyik felével foglalkozunk, (lásd 7-7. ábra) két oknál fogva: egyrészt a szimulációs program legfeljebb 3 db 3 fázisú rendszert tud kezelni egy LCC modellben ([15]), másrészt a túlsó oldal hatásától – a távolságarányok miatt - gyakorlatilag el lehet tekinteni. Mivel az azonos rendszerhez tartozó fázisok egymás felett helyezkednek el (az 1-2-3 jelűek a 380 kV-os, a 4-5-6 jelű vezetők a 110 kV-os rendszerhez tartoznak) és - az oszlopkialakításból adódóan – a fázisok közötti távolság mindegyik rendszerben azonos, a  $D_{fázis}$  helyett egységesen (az egymáshoz képesti) *fázismagasság* elnevezést használom. A  $D_{rendszer}$  az egy síkban lévő eltérő névleges feszültségű fázisvezetők távolságát jelenti, ami szintén azonos mindhárom fázisnál.



7-7. ábra – A 380/110 kV-os rendszer

A rendszerek közötti távolság függvényében végezve el a számításokat, mindhárom kikapcsolt fázis feszültsége folyamatosan csökkenő jelleget mutat. A legnagyobb feszültség a legfelső fázisban lép fel, mivel az  $U_{csatolt}$  értékét a mindhárom fázisnál azonos  $C_{osztó}$  és a 4. fázisnál legkisebb  $C_0$  értékének aránya határozza meg (lásd a 4-1. ábra b) részét).

Folytassuk a vizsgálatot ugyanezen az oszlopon azzal az eltéréssel, hogy most a fázismagasságot változtatjuk, mégpedig oly módon, hogy a felső fázisok földhöz viszonyított magassága változatlan marad,  $D_{rendszer} = 4\ m$  mellett. Az így kapott görbéket a 7-8. ábra mutatja.



7-8. ábra - A 380/110 kV-os rendszer

Itt is a 4. fázis feszültsége a legnagyobb, értéke 104÷58 kV közötti intervallumban, közel egyenletesen változik. A másik két fázisnál hasonlóan az előző ábrához kisebb *fázismagasság-nál* a 6-os jelű vezetők nagyobb a feszültség értéke; 10,5 métert meghaladó fázismagasságnál ez megfordul.

A vizsgált elrendezések összehasonlítása

A görbékben látható, hogy az oszlopkialakítások függvényében jelentős eltérések adódnak az  $U_{csatolt, csúcs}$  értékében. A 400/120 kV-os és a 380/110 kV-os oszlopok esetén a  $D_{fázis} = fázismagasság$ -ok változtatása során bekövetkező  $\Delta U_{csatolt, csúcs}$ -ok összevetésekor az adódik, hogy utóbinál a változás: 50÷55 kV (lásd. 7-8. ábra b) része), az előbbinél a maximum 36 kV (lásd. 7-6. ábra b) része). Ha ugyanakkora  $D_{rendszer}$ -nél hasonlítom össze az  $U_{csatolt, csúcs}$ -okat, akkor a legnagyobb a 400 kV-os  $\Delta$  elrendezésűnél (lásd. 7-5. ábra b) része), ennél kisebb a 2\*380/2\*110 kV-os oszlopképnél (lásd. 7-7. ábra b) része), a legkisebb a vízszintes 400 kV-os rendszerhez tartozónál (lásd. 7-4. ábra b) része).

Minél kisebb az  $U_{csatolt}$ , annál kisebb az esély, hogy azonos szigetelési szilárdságnál (kvázi azonos névleges feszültségű rendszereknél) átütés jöhessen létre a primer ív után visszamaradt ionfelhőben, tehát a sikeres zárathárítás valószínűsége az  $U_{csatolt}$ -tal fordítottan változik. Ebből a szempontból az ideális elrendezés a jelen fejezet elején elmondottak alapján az lenne, ha a 120 kV-os rendszert be lehetne helyezni a 400 kV-os fázisvezetők által alkotott háromszög súlypontjába, minél közelebb egymáshoz. Ez azonban szerelhetőség és karbantartás szempontjából nem túl előnyös, a kivitelezhetősége, megkonstruálása is igen nehéz.

A tárgyalt elrendezések közül - a szekunder ív előfordulási valószínűségét minimalizálandó - üzembiztonsági és karbantarthatósági szempontból is a vízszintes elrendezésű 400/120 kV-os oszlopkonfiguráció a legmegfelelőbb.

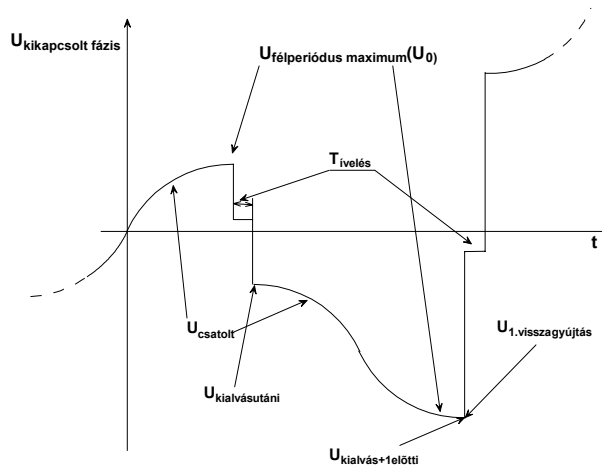
Miután ismerjük a kapacitív csatolással a lebegő-potenciálú vezetőre átkerülő feszültség nagyságát, a következő lépés annak a meghatározása, hogy mekkora a vezetéken kialakuló legnagyobb potenciál. Ennek ismeretében állapítható meg, hogy a túlfeszültségkorlátozó be fog-e avatkozni, és ha igen, akkor milyen mértékben.

A 4.2.1. fejezetben leírtak alapján, ha  $U_0$  potenciálon következnek be a visszagyújtás, akkor az ív kialakása után a lebegő-pont potenciálja a következő lesz:

$$U_{kialvásutáni} = U_0 * \frac{a-1}{a+1}$$

### 21. egyenlet

ahogy azt a 7-9. ábra is mutatja. Az  $U_0$  és – a 21. egyenlet alapján - az  $U_{kialvásutáni}$  feszültség értéke akkor lesz maximális, ha a visszagyújtás az 50 Hz-es feszültség maximumában (lásd. 7-9. ábra  $U_{félperiodus\ maximum}$ ) következik be. Miután kialakult az ív, a kapacitív csatolással átkerülő 50 Hz-es feszültség szuperponálódik az  $U_{kialvásutáni}$ -ra. Ha a következő visszagyújtás pontosan egy félperiódus múlva lép fel (lásd. 7-9. ábra  $U_{félperiodus\ maximum}$ ), akkor úgyszintén a lehetséges legnagyobb feszültségnél történik a következő visszagyújtás.



7-9. ábra – A félperiódusok maximális potenciáljánál bekövetkező visszagyújtások esetén kialakuló növekedés

A 7-9. ábra által mutatott esetben a két visszagyújtás között a lebegő-pont potenciálja a 0-hoz képest  $-2 * U_{csatolt\ csúcs}$ -tal csökken, képlettel megfogalmazva:

$$U_{kialvás+1előtti} = U_0 * \frac{\frac{R_{ív} - 1}{Z_{táv.}}}{\frac{R_{ív} + 1}{Z_{táv.}}} - 2 * U_{csatolt, csúcs}$$

### 22. egyenlet

A következő visszagyújtás a 22. egyenlettel meghatározott  $U_{kialvás+1előtti} = U_0$  potenciálról fog indulni, így a következő  $U_{kialvás+2előtti}$  értéket az alábbiak szerint kapjuk:

$$U_{kialvás+2előtti} = U_0 * \frac{\frac{R_{ív} - 1}{Z_{táv.}}}{\frac{R_{ív} + 1}{Z_{táv.}}} + 2 * U_{csatolt, csúcs}$$

### 23. egyenlet.

A 22. egyenletet és a 23. egyenletet összevonva kapjuk:

$$U_{x.visszagujtas} = U_0 * \frac{\frac{R_{iv} - 1}{Z_{tav.}}}{\frac{R_{iv} + 1}{Z_{tav.}}} \begin{cases} + 2 * U_{csatolt,csucs} \longleftrightarrow ha \longrightarrow U_0 < 0 \\ - 2 * U_{csatolt,csucs} \longleftrightarrow ha \longrightarrow U_0 \geq 0 \end{cases}$$

ahol:

- $U_{x.visszagujtas}$  = az x. visszagyújtás után fél periódussal a lebegő pont potenciálja

### 24. egyenlet.

A leírtaknak megfelelően a feszültség értéke akkor fog a leggyorsabban növekedni, ha minden félperiódusban a maximális feszültségnél következik be a visszagyújtás. Ez az a potenciálnövekedés, amely az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulása és fennmaradása szempontjából a legkedvezőbb, azonban a sikeres zárathárítást legnagyobb mértékben veszélyezteti.

A 24. egyenletet felhasználva kiszámítható a kikapcsolt fázisvezetők kialakuló potenciál visszagyújtásonkénti értéke, de ami ennél lényegesebb, meghatározható a potenciálmáximo nagysága. Az első lépésben az  $U_0 = U_{csatolt, csucs}$ , ebből kiindulva és behelyettesítve a 7-4. ábra  $D_{fázis, 400kV} = 10$  m, 6. görbéjének  $D_{rendszer} = 7,5$  m-hez tartozó munkapontját, ahol  $U_{csatolt,csucs}$  értéke 31 kV, a következőket kapjuk:

$$U_{1.visszagujtas} = U_0 * \frac{\frac{R_{iv} - 1}{Z_{tav.}}}{\frac{R_{iv} + 1}{Z_{tav.}}} - 2 * U_{csatolt,csucs} = 31kV * \frac{\frac{100\Omega}{566\Omega} - 1}{\frac{100\Omega}{566\Omega} + 1} - 2 * 31kV = -83,7kV$$

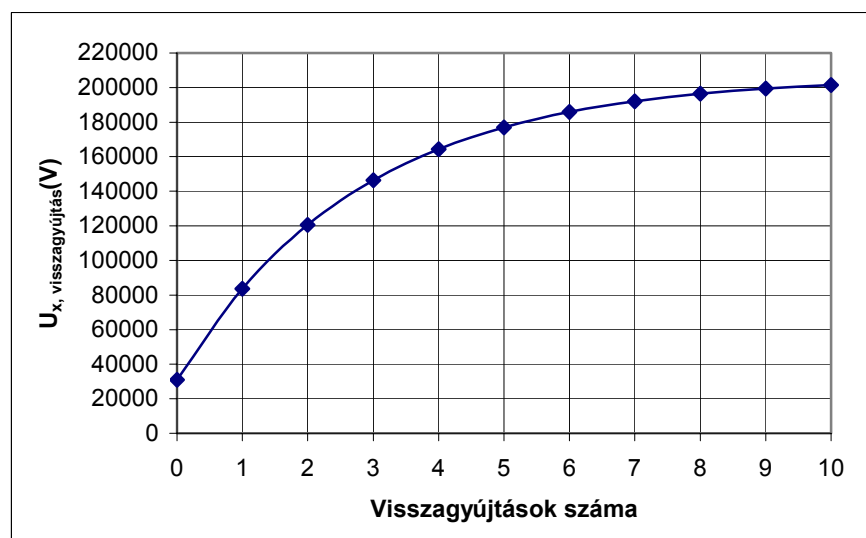
ahol:

- $Z_{tav.}$ : a 120 kV-os rendszer 6. fázisának  $Z_{11}$  hullámimpedanciája [16],
- $R_{iv}$ : a szekunder ívet helyettesítő hatásos ellenállás.

Amennyiben ezt az összefüggést az egymás utáni visszagyújtásoknál alkalmazzuk és az egyes lépéseknél az aktuális  $U_0$ -nak az előzőnél kiszámolt  $U_{x.visszagujtas}$  feszültséget tekintjük, akkor megkapjuk a visszagyújtások számának függvényében a lebegő-pont potenciáljának alakulását (lásd. következő ábra a) részét).

	(V)
$U_0$	31000,00
$U_{1.visszagujtas}$	-83690,69
$U_{2.visszagujtas}$	120558,35
$U_{3.visszagujtas}$	-146354,64
$U_{4.visszagujtas}$	164404,30
$U_{5.visszagujtas}$	-177033,64
$U_{6.visszagujtas}$	185870,38
$U_{7.visszagujtas}$	-192053,45
$U_{8.visszagujtas}$	196379,74
$U_{9.visszagujtas}$	-199406,85
$U_{10.visszagujtas}$	201524,91

a)



b) abszolút érték

7-10. ábra – A 24. egyenlettel számolt potenciálnövekedés

Az abszolút értékekből (7-10. ábra *b*) része) jól látható, hogy folyamatosan csökkenő meredekségű függvényről van szó. A 10. visszagyújtásnál eléri az  $U_0$  6,5x-ét, ahol az állandósuló értéke jó egyezést mutat a 4-5. ábra szerinti  $a = \frac{R_{iv}}{Z_{táv.}} \approx 0,176$ -hoz tartozó görbével. A szimulációim és számításaim során használt szekunder ív ellenállást ( $R_{iv} = 100 \Omega$ ) valós hálózati mérések eredményeinek feldolgozásából [30], valamint korábbi mérések szimulációs leképzése során szerzett tapasztalatokból határoztam meg. A fenti 24. képlet néhány - a valóságban - lényeges tényezőt nem tud tekintetbe venni:

- A távvezeték skin hatással is megnövelt értékű soros ellenállásának hullámtorzító hatását, aminek következtében a zárlat helyéről kiinduló, majd oda visszaérkező hullámok amplitúdója csökken.
- Ameddig ég a szekunder ív, változik az 50 Hz-es feszültség értéke, bár ez a kisebb névleges feszültségű (120 kV) vezetékhozzák esetén nem jelentős. A maximális 120 kV-os vezetékhozzák ui. Magyarországon 20÷30 km, ahol is  $T_{bef.} = 67\div 100 \mu s < 0,01 * T_{félperiódus}$ . Ennyi idő alatt az 50 Hz-es feszültség változása nem éri el a 2 %-ot.
- A szekunder ív fizikai és villamos paramétereinek erősen sztochasztikus változását.

A felsoroltak alapján a következő kijelentést lehet tenni a bemutatott számítással kapcsolatban:

- A 24. egyenlettel elvégzett számítássorozattal - felülről közelítően - meg lehet határozni a kikapcsolt fázisvezetőn *az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* következtében kialakuló potenciál maximális értékét.

Mivel a szekunder ív (mint minden ívjelenség) igen jelentős bizonytalanságot hordoz magában, ezért pontos számítási eredményt adni a potenciál alakulására, általánosan használható és a valósághoz közeli leképzést biztosító szekunder ív modell nélkül nem lehetséges.

Ezért az eredményre a következő állítás igaz: a kiszámított értéket a tényleges távvezetőken kialakuló feszültség igen nagy valószínűséggel nem haladja meg. A kapott érték arra ad választ, hogy az adott vezetékre felszerelt (tervezett) túlfeszültség korlátozók tudják-e uralni a potenciálnövekedést (nem alakul-e ki a védelmi szintjüket meghaladó potenciál), sőt egyáltalán be fognak-e avatkozni a potenciálnövekedés menetébe (pl. 6-3. ábra). Amennyiben nem, akkor nagyobb eséllyel alakul ki a *holtidőt meghaladó idejű szekunder ívelés*, megnövekedett valószínűséggel okozva sikertelen visszagyújtást.

Az  $U_{csatolt,csúcs}$  értékének alakulása az oszlopkép függvényében valamint a fejezetben bemutatott potenciálnövekedés – az automatikus visszakapcsolás sikerességének szempontjából - nem elhanyagolható érveket jelentenek az oszlopképek kialakításánál. Ugyanakkor számos más, a gyakorlatban döntő tényező is befolyásolja az oszlopkonfigurációt, így alapvetően a gazdaságosság, a kivitelezhetőség, a karbantarthatóság, az üzembiztosság, beleértve a vezetékek zárlat során való dinamikus viselkedését, a rendszerek egymástól független szerelhetőségét, cseréjét, felülvizsgálatának kivitelezhetőségét. Szintén lényeges és a gazdaságossághoz kapcsolódik, hogy hány rendszert lehet az adott oszlopon elhelyezni. Ebből a szempontból az „osztrák” 2\*380/2\*110 kV-os (lásd. 7-7. ábra) a legjobb, mivel négy rendszert tud hordozni, míg a többi csak hármat.

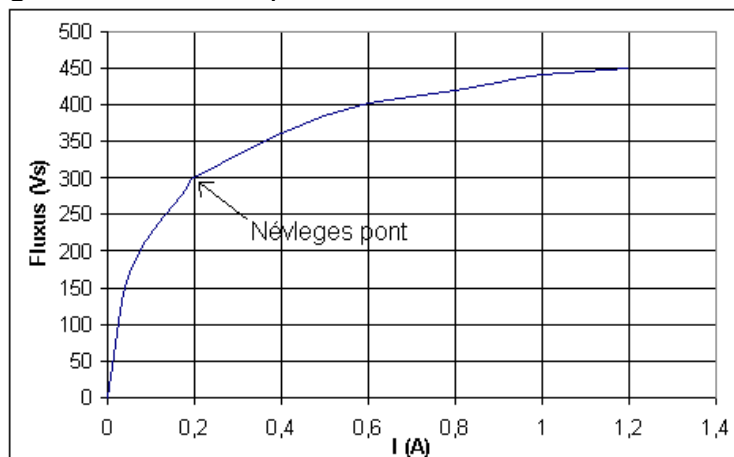
A jelen fejezetben oszlopképekre jellemző görbéket ismerttettem, amelyek segítségével meghatározható a háromsarkúan kikapcsolt rendszerek fázisvezetőin megjelenő  $U_{csatolt,csúcs}$  feszültség nagysága. Ezt alapul véve a megadott összefüggésekkel meghatározható az a feszültség érték, amelyet a valós oszlopokon kialakuló, földhöz képesti potenciál igen nagy valószínűséggel nem fog meghaladni. A kapott értéket a túlfeszültség korlátozók kiválasztásánál lehet felhasználni.

## 8. Az induktív feszültségváltó hatása

A túlfeszültség korlátozó mellett a távvezeték kikapcsolásakor – az elhelyezéséből következően - nem lecsatolódo áramkörü elem a feszültségváltó. (lásd. 6-1. ábra).

A távvezetéken a kikapcsolás után jelentős mennyiségű töltés halmozódik fel, mivel a lebegő-potenciálú pontként viselkedő fázisvezetők és a föld fegyverzeteket képeznek, amelyek között a levegő a dielektrikum. A [38] szerint az induktív feszültségváltók képesek ezeket a töltéseket kisütni, s ezáltal csökkenteni a HVA során fellépő visszakapcsolási túlfeszültséget. A feszültségváltók az alább vizsgált esetben is jelen vannak a kikapcsolt fázis(ok)n, így - az előzőek alapján - az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívet is befolyásolni fogják. Az induktív feszültségváltó jellemzőinek (teljesítmény, hiszterézis görbe, hatásos ellenállás) függvényében az adott távvezetéken változhat a kisütő hatás. Egyrendszerű vezeték esetében a [38]-ban leírt mértékű kisütő hatás csak HVA-nál érvényesül, ugyanis EVA-nál a közel lévő másik két fázis folyamatosan pótolja a feszültségváltó által levezetett töltéseket. Többrendszerű távvezetékek esetén ez olyan mértékű, hogy hiába van kikapcsolva a kisebb feszültségű rendszer mindhárom fázisa, a nagyobb feszültségű rendszer pótolja a kisütött töltéseket, az egyrendszerű távvezetéki EVA-hoz hasonlóan.

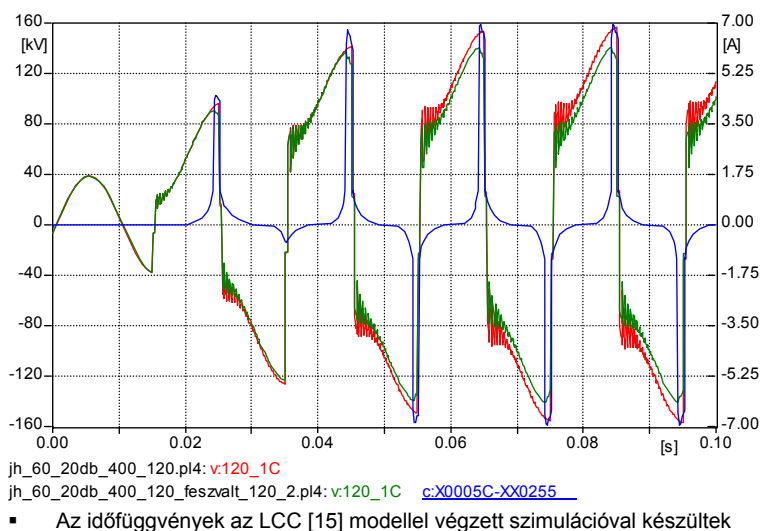
Ennek megfelelően a korábbiakban vizsgált 400/120 kV-os távvezetékre csatlakoztatva a 8-1. ábra szerinti karakterisztikával bíró feszültségváltót, a lebegő-pont maximális potenciálja lecsökken a feszültségváltó nélkülihez képest.



8-1. ábra – Egy 110 kV-os induktív feszültségváltó fluxus/áram karakterisztikája [38]

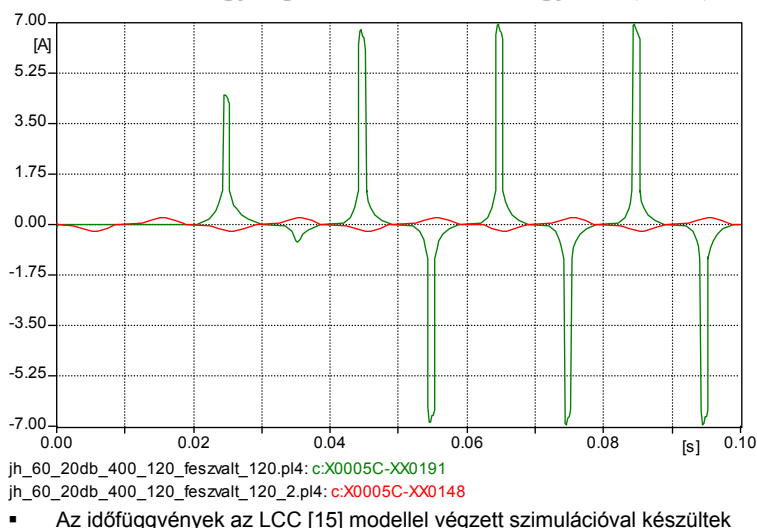
A csökkenés mértéke a feszültségváltó karakterisztikájától és a primer körének ohmos ellenállásától függ, utóbbit a [39] alapján 20 kΩ-ra választottam. A szimulációval kapott eredményt a 8-2. ábra mutatja, ahol a maximális potenciál értéke ~10 %-al (16 kV) kisebb lett az induktív feszültségváltós esetben. Ez az érték az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* kialakulását csak mennyiségi szempontból befolyásolja.

Az ábráról kiolvasható, hogy a feszültségváltó jóval a névleges munkapontja feletti áramot ( $I_{névleges, csúcs} \approx 0,2 \text{ A}$ ) vesz fel a hálózathoz, ami a megnövekedett - nem tisztán 50 Hz-es feszültség - miatt a munkapontnak a nagyobb áramok irányába (lásd. 8-1. ábra) való eltolódásával magyarázható.



**8-2. ábra – A lebegő-pont potenciálja inaktív feszültségváltóval és nélkül, valamint a feszültségváltó árama**

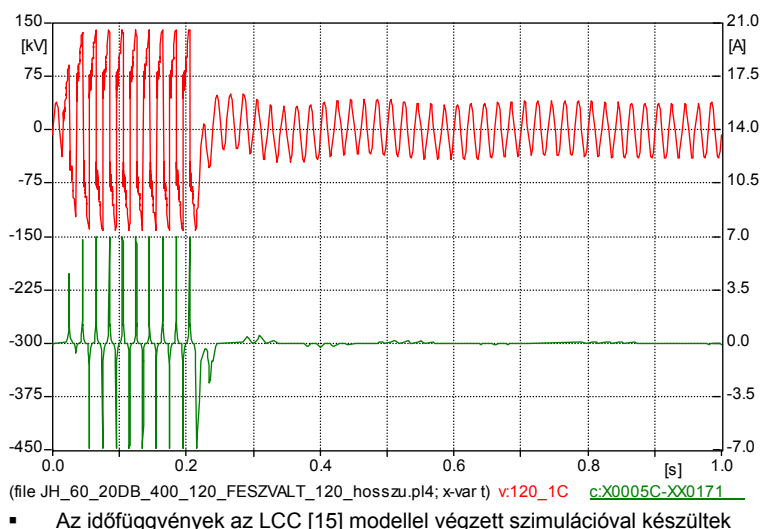
A 8-3. ábra alapján a névleges feszültséggel gerjesztett feszültségváltó áramával szemben a jelenség alatt fellépő áramcsúcsok nagysága szembetűnően nagyobb (~35x).



**8-3. ábra – A feszültségváltó árama névleges és a megemelkedett, nem tisztán 50 Hz-es feszültség esetén**

Más karakterisztikájú feszültségváltót helyezve az áramkörbe megváltozik a kisütő hatás és így a potenciálcsökkenés is.

A feszültségváltó kisütő hatása [38] karakteresen akkor jelentkezik, amikor a visszagyújtások megszűnnek. Tekintsük a 8-4. ábra által mutatott lebegő-pont potenciált és a feszültségváltó áramát. Látható, hogy amint megszűnnek a visszagyújtások és így az állandó potenciálettolások is a feszültségváltó „kisüti” a fázisvezetőt. A potenciál értéke lecsökken, de nem nullára, mivel az  $U_{csatolt}$  feszültség rajta marad a fázisvezetőn. Ez a feszültség minden olyan esetben jelen van a kikapcsolt, lebegő-pontot fázisvezetőn, amikor a nagyobb feszültségű rendszer - legalább az egyik végén - be van kapcsolva. A kisütés után egy ~5 Hz-es, 0,8 s alatt csillapodó feszültséglengetés is fellép, ami a kikapcsolt fázisvezető földkapacitása és a feszültségváltó induktivitása által alkotott soros rezgőkör sajátja. A frekvenciáját és csillapodását (aperiodikus/periodikus) a soros rezgőkör reaktanciák és a feszültségváltó hatásos ellenállása határozza meg. Minél nagyobb ez az ellenállás a kis frekvenciás lengés annál gyorsabban csillapodik.

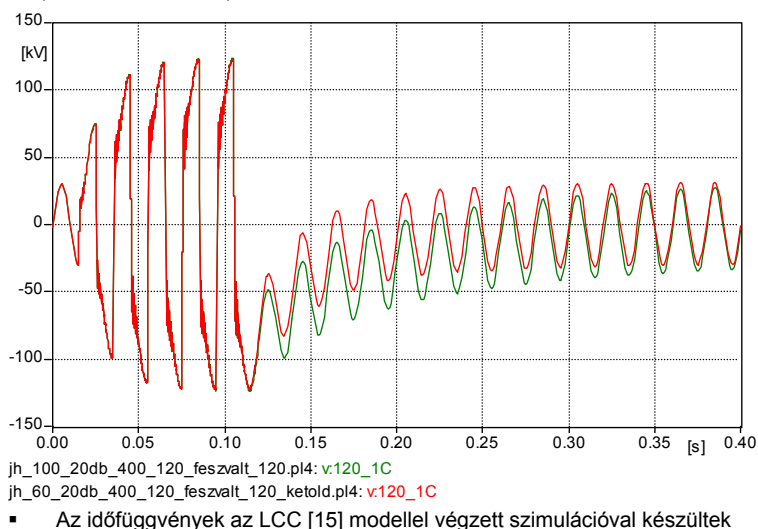


▪ Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

**8-4. ábra – Az induktív feszültségváltó „kisüti” a vezetékét a lebegő-pont potenciálja, a feszültségváltó árama**

Ha nincs, vagy nem induktív feszültségváltó van a vezetéken, akkor a „kisütés” nem jön létre. Ekkor a lebegő-pont potenciálja az utolsó visszagyújtás által meghatározott feszültségeltolás körül, az  $U_{csatolt}$  periodicitását követve fog lengeni.

Ha a távvezeték mindkét végén van feszültségváltó, akkor a potenciálmáximo az egy oldali feszültségváltós esethez képest nem változik, a „kisütés” során azonban gyorsabban fog csökkenni. A vizsgált 400/120 kV-os távvezetéknel ez a különbség nem jelentős, kb. 10 ms-al hamarabb játszódik le. (lásd. 8-5. ábra).



▪ Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

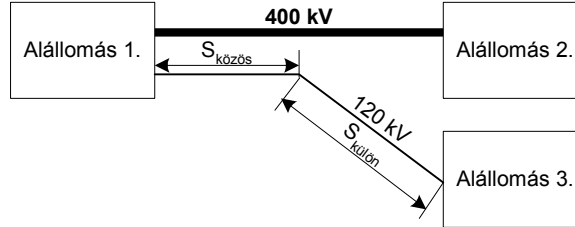
**8-5. ábra – A vezetéknek mind a két oldalán elhelyezett feszültségváltóval gyorsabban sül ki a fázisvezető, mintha csak az egyik oldalon lenne**

Ebben a fejezetben bemutattam, hogy az induktív feszültségváltók:

- A két rendszer névleges feszültsége közötti különbségtől, a feszültségváltó karakterisztikáktól, a DC ellenállásoktól és az oszlopkonfigurációtól függően csökkentik a kikapcsolt fázisvezető maximális potenciálját, ezáltal növelik a sikeres visszakapcsolás valószínűségét.
- A visszagyújtások megszűntével „kisüti a távvezeték”, csak az  $U_{csatolt}$  feszültség marad vissza.

## IV. TÉZIS

Többrendszerű, eltérő névleges feszültségű távvezetéseken alkalmaznak olyan megoldásokat, hogy a háromfázisú rendszereket egy távolságon, egy oszlopsoron vezetik (a továbbiakban:  $S_{közös}$ ), majd ezután külön oszlopsorokra – esetlegesen más nyomvonalat követve – helyezik fel őket. A továbbiakban nevezzük a kisebb feszültségű rendszernek azt a hosszát  $S_{külön}$ -nek, amikor a nagyobb feszültségűtől külön oszlopsoron történik a vezetése (tekintsük az ábrát).



A 9.1. és 9.2. fejezetekben az I. tézis szerinti eszkaláció során kialakuló feszültség- és energiaviszonyokat vizsgálom. Ezekből megállapítható, hogy a sikeres zárlathárítás valószínűsége meghatározóan függ az

$$A_{DM} = \frac{S_{külön}}{S_{közös}}$$

aránytól.

Az I. tézis szerinti kísérlet eredményeire, irodalmi adatokra és szimulációs eredményekre építve a következő állítás tehető. Ha az

$$U_{névleges\ nagyobb\ feszültségű} = 400\text{ kV}, U_{névleges\ kisebb\ feszültségű} = 120\text{ kV}, S_{közös} = 60\text{ km}\text{ és}$$

$$\text{az } A_{DM} > 1$$

*feltétel teljesül, akkor az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulásának veszélye várhatóan megszűnik, és ezzel a zárlathárítás sikertelenségének valószínűsége jelentősen lecsökken (lásd. 9-25. ábra és 9-26. ábra).*

Amennyiben az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív visszagyújtásainak energiáját a következő -  $\Pi_{Ex} = \frac{E_{xs}}{E_{xvégén}}$  és  $\Pi_S = \frac{s}{S_{teljes}}$  hasonlósági invariánsokból álló - összefüggésben ábrázoljuk

$$\frac{E_{xs}}{E_{xvégén}} = f\left(\frac{s}{S_{teljes}}\right)$$

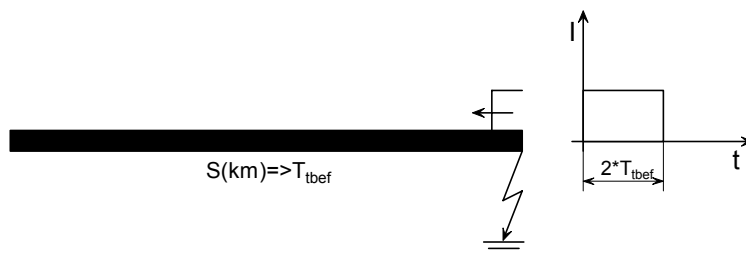
ahol:

- $E_{xs}$  = x-ik visszagyújtás energiája a kisebb névleges feszültségű vezeték végétől  $s$  távolságra,
- $E_{xvégén}$  = az x-ik visszagyújtás energiája a kisebb névleges feszültségű vezeték egyik végén,
- $S_{teljes} = S_{közös} + S_{külön}$

akkor a kapott görbéknek az oszlopgeometriától, a kisebb névleges feszültségű rendszer hosszától és az  $A_{DM}$ -től való függése elhanyagolható (lásd. 9-12. ábra, 9-13. ábra, 9-21. ábra és 9-22. ábra görbéit).

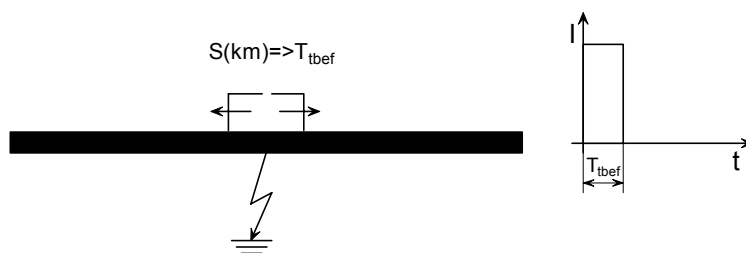
## 9. Visszagújtási energiák és -feszültségek a távvezetéken

Szigetelés gyengülés, ill. leromlás és ebből következően szigetelő átívelések, zárlatok - különböző okokra visszavezethetően (pl. fa dől a vezetékre, villámcsapás, visszacsapás, stb.) - a távvezetékek mentén tetszőleges helyen felléphetnek, így a 4. fejezetben bemutatott szekunder ív a kisebb feszültségű rendszeren ugyancsak tetszőleges helyen alakulhat ki. A zárlat helye a visszagyújtások során keletkező áramimpulzusokat és ezen keresztül a visszagyújtás energiátartalmát meghatározóan befolyásolja. A magyarázat az alábbiakban foglalható össze ([16, 40]). Ideális távvezetéken, ha az egyik végén történik visszagyújtás, akkor csak egy hullám indul meg a vezetéken és  $2 * T_{tbef}$  idő alatt érkezik vissza, meghatározva ezzel a visszagyújtás helyén az áramimpulzus szélességét és amplitúdóját (lásd. 9-1. ábra).



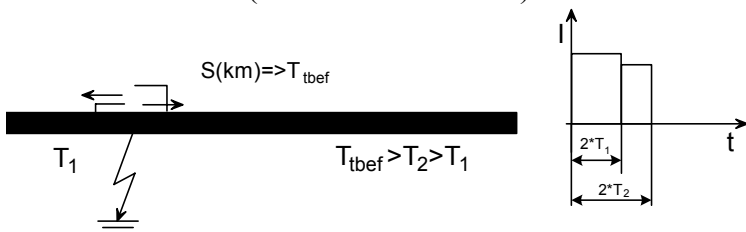
9-1. ábra – Az áramimpulzus hossza vezetékvégi zárlat esetén

Amennyiben a vezeték közepén jön létre a zárlat, akkor két egymással ellentétes irányú hullám indul el, majd érkezik vissza  $T_{tbef}$  idő alatt, ahogyan azt a 9-2. ábra mutatja. A hullám áramának amplitúdója kétszerese lesz a vezetékvégi áramának, az energiátartalma azonban nem változik meg.



9-2. ábra – Az áramimpulzus hossza a vezeték közepén létrejövő zárlat esetén

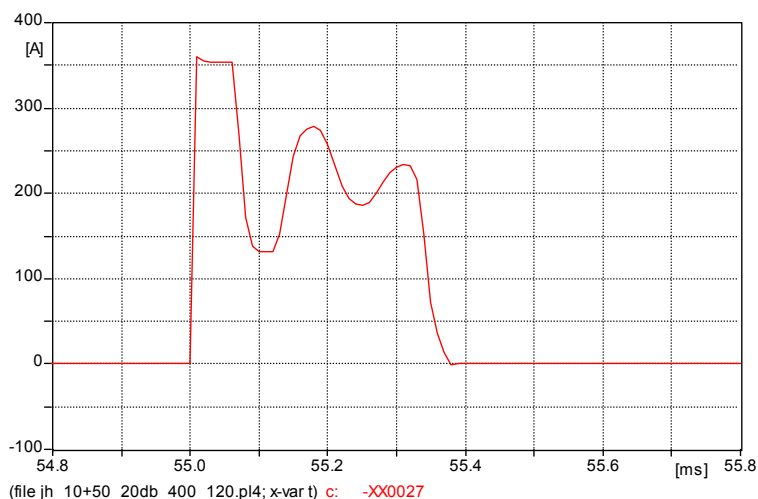
Ez a két eset szolgáltatja az áramimpulzusok időtartamának szélső értékeit. Amennyiben nem ezen a két (a vezeték mindkét végétől számolva három) helyen alakul ki a zárlat, akkor az impulzus szélessége e két érték között lesz (lásd. következő ábra).



9-3. ábra – Az áramimpulzus alakulása a vezeték tetszőleges helyén kialakuló zárlat esetén

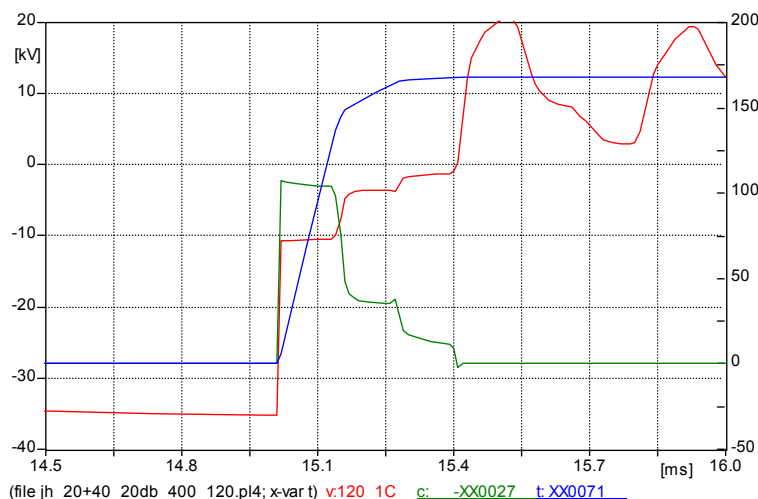
A közelebbi vezetékvég felé induló hullám fog előbb visszaérni ( $2 * T_1$ ), ekkor lecsökken az áramimpulzus amplitúdója, majd a távolabbi vezetékvégtől visszaverődő - hosszabb befutási idejű - hullám ér vissza és bekövetkezik az áram-nullaátmenet ( $2 * T_2$ ). Ekkor a visszagyújtás energiája annak függvényében változik, hogy hol keletkezett a zárlat és ettől függően miképpen alakul a visszagyújtás árama az időben [40].

Tekintsük a következő ábrát, amelyen egy nem ideális, 60 km-es vezeték egyik végétől 1/6 távolságra következik be a visszagyűjtás.



**9-4. ábra – Az áramimpulzus időfüggvénye a távvezeték végétől 1/6 távolságra kialakuló zárlat esetén**

A közelebbi vezetékvégtől a hullám  $2 * \frac{1}{6} * T_{bef.60km} = \frac{1}{3} * T_{bef.60km}$  idő alatt tér vissza, a másik végről pedig  $2 * \frac{5}{6} * T_{bef.60km} = \frac{5}{3} * T_{bef.60km}$  idő alatt. Az ábrából látható, hogy a kisebb periódusidejű hullám ötszörösen verődik vissza addig, ameddig a másik végről visszaér a hullám, a vezeték soros veszteségeinek következtében folyamatosan csökkenő amplitúdóval. Az egyik vezetékvégtől 1/3 távolságra létrejövő zárlatnál átalakul az **áramimpulzus** alakja; míg a közelebbi vezetékvégről kétszer verődik vissza a hullám addig a másiktól csak egyszer (lásd. 9-5. ábra).



**9-5. ábra – A távvezeték végétől 1/3 távolságra kialakuló zárlatnál a feszültség (bal oldali skála), az áram és az energia (jobb oldali skála)**

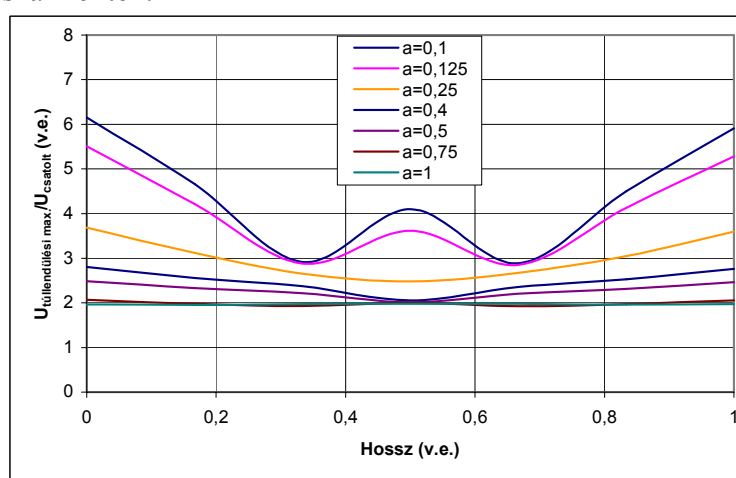
A szekunder ív modellezésével számos irodalom foglalkozik: Ezek többféle modellt tárgyalnak [43, 44, 45], eddig azonban olyan nem készült, amely a szekunder ív termikus és villamos jellemzőinek változását valósághűen leírva, mind a folytonos, mind az intermittens ívelési szakaszok leképzésére általánosan alkalmazható lenne. A szekunder ívellenállás változásának hatását pontosabban definiáló eredményekhez csak olyan gyakorlati kísérletekkel lehet eljutni, amelyeknél minden lényeges jellemző precízen regisztrálható lesz (ilyenek lehetnek pl. az 5. és a 11. fejezetben bemutatott kísérletek).

Az elmondottak miatt munkám során - a már említett - 100 Ω-os hatásos ellenállással számoltam.

Mi a következménye ennek a konstans ellenállásos ívleképzésnek?

Kiindulva az 1. egyenlet ÷ 3. egyenletekből, látható, hogy az ív ellenállása az  $a = \frac{R_{ív}}{Z_{táv.}}$  össze-

függésen keresztül befolyásolja az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívnél a potenciálváltozást. A 9-6. ábra az  $a = 0,1 \div 1$  tartományban ábrázolja a maximális potenciál alakulását a vezeték hossza mentén.



**9-6. ábra – A maximális potenciál változása a vezeték hossza mentén, különböző  $a = \frac{R_{ív}}{Z_{táv.}}$  értékeknél, viszonylagos egységekben ábrázolva**

Az ábrából látható, hogy minél inkább közelít az ívellenállás értéke a hullámimpedanciához, annál kisebb lesz a potenciálnövekedés mértéke. Mivel az első visszagyújtások során az ívellenállás nagysága megközelíti - esetlegesen meghaladja a hullámimpedanciát -, így az  $a \geq 1$ . A sorozatos visszagyújtások hatására megnövekvő ionozottságú („bemelegedő”) ív ellenállása lecsökken ( $\leq 100 \Omega$ ), így az  $a = \frac{\leq 100 \Omega}{400 \div 600 \Omega} \leq 0,25$  lesz. Ez azt jelenti, hogy valós ív esetében az

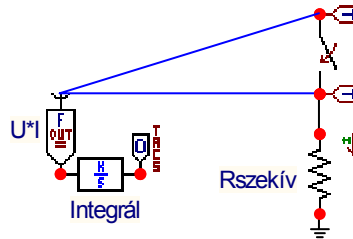
első visszagyújtások során a – valószínűleg - nagyobb „a” érték következtében (lásd. 9-6. ábra  $a = 1$ ) a szimulációval kapott meredekségnél (pl. 9-9. ábra) lassabban és kevésbé növekszik meg a lebegő-pont potenciálja. Ha az ív a sorozatos visszagyújtások hatására „bemelegszik”, akkor a potenciálemelkedés a meredekebben növekvő és nagyobb abszolút értéket jelentő szakaszba kerül (lásd. 9-6. ábra  $a \leq 0,25$ ). Mivel a szimuláció során a folyamat kezdetétől lecsökkenő ívellenállással (100 Ω) számoltam, így – a zárathárítás sikeressége szempontjából hátrányosabb - gyorsabb potenciálemelkedés irányába tolódott el a folyamat. Azaz a 100 Ω-os helyettesítés a biztonság irányába térítette el a vizsgálatot.

A lebegő-pont feszültségének félperiódusonkénti maximumai a visszagyújtások számának függvényében egy monoton csökkenő meredekségű burkológörbével írhatók le (lásd. 4-7. ábra). A konstans ellenállásos ívleképzés miatt mind a visszagyújtások ívfeszültsége (lásd. 1. egyen-

Különböző névleges feszültségű rendszerek elektromágneses kölcsönhatása többrendszerű távvezetéseken

let), mind az ív árama is ezt a jelleget fogja követni. A visszagyújtás energiatartalmát az ív áramának és feszültségének időbeli lefolyása határozza meg, így az ív energiájának burkológörbéje is ezt a görbealakot fogja követni.

A szimuláció során az ív energiájának meghatározására a következő ábra szerinti integráló tagot használtam.

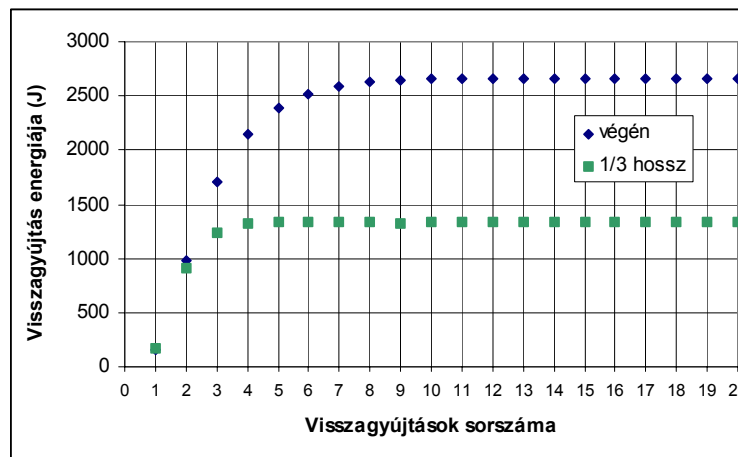


- Az áramkör az ATP-ben [15] készült

**9-7. ábra – A szimuláció során az ív energiáját számoló integrátor**

A  $T$ -vel jelölt elemek mérik az ív ( $R_{szekív}$ ) feszültségét és áramát, az  $U*I$  tag a szorzást, az *Integrál* elem az összegzést végzi, a szimulációnál megválasztott  $\Delta t$  lépésközzel.

Ezek alapján tekintsük (lásd. 9-8. ábra) egy 60 km hosszú, LCC-vel modellezett – a 4-6. ábra *b*) része által mutatott oszlopképű – 400/120 kV-os távvezeték **egyik végén** létrejövő zárlatnál a visszagyújtások energiájának alakulását. Az első visszagyújtás után erőteljesen nő az energia értéke, a 9. már 2600 J lesz, ezt követően gyakorlatilag változatlan marad.



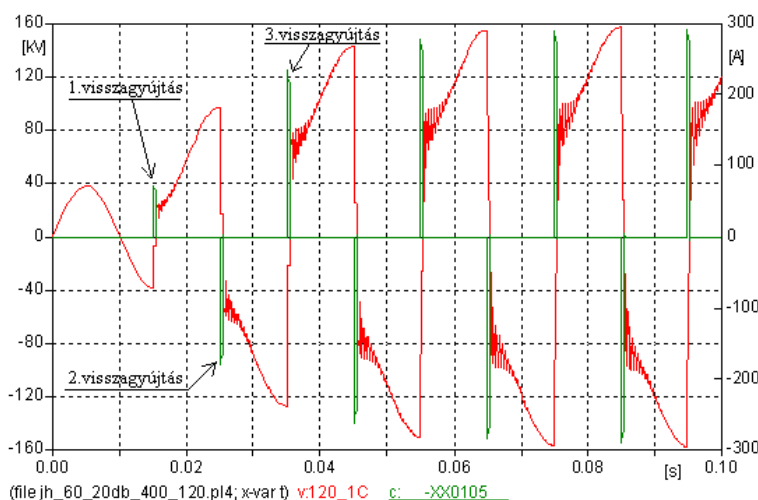
- az értékek 400/120 kV-os, 60 km hosszú vezetékre vonatkoznak

**9-8. ábra – A visszagyújtások integrátorral (9-7. ábra) számított energiája a vezeték **végén** és az egyik végtől **1/3 távolságra** létrejövő szekunder ív esetén**

Amennyiben ugyanez a zárlat a vezeték egyik végétől **1/3 hossznyira** jön létre, akkor a 3. visszagyújtástól kezdve jelentősen kisebb lesz az energia értéke, és a maximuma is csak a fele lesz a vezetékvégeinek (lásd. 9-8. ábra).

A folyamat legkritikusabb pontja az első és a második visszagyújtás, ugyanis, ha az első visszagyújtás energiatartalma nem kellő mértékű, akkor nem marad elegendő mennyiségű ionizált gáz ahhoz, hogy a megnövekvő potenciál a második visszagyújtást létrehozza. Ha az első és a második visszagyújtás bekövetkezik, akkor a további visszagyújtások energiái már jelentősen nagyobbak lesznek (lásd. 9-8. ábra); létrejön – a 4.2.1. fejezetben leírt módon alakuló - elsősorban a széltől függő önerősítő folyamat és nagy valószínűséggel megemelkedik a lebegő-pont potenciálja.

Vizsgáljuk meg részletesebben a visszagyújtások energiájának alakulását. Sorszámozásuk szisztémáját a 9-9. ábra mutatja.



9-9. ábra – A visszagyújtások sorszámozása

Először azt az esetet elemezzük, amikor a kisebb névleges feszültségű rendszer a teljes hosszán közös oszlopsorra van felszerelve a nagyobb névleges feszültségűvel.

## 9.1 Közös oszlopsoron futó rendszerek

A fejezet első részében elemzem a visszagyújtások energiájának alakulását a vezeték hossza mentén, majd áttérek a

$$\frac{E_{xs}}{E_{xvégén}} = f\left(\frac{s}{S_{teljes}}\right)$$

ahol:

- $E_{xs}$  =  $x$ -ik visszagyújtás energiája a kisebb névleges feszültségű vezeték végétől  $s$  távolságra,
- $E_{xvégén}$  = az  $x$ -ik visszagyújtás energiája a kisebb névleges feszültségű vezeték egyik végén,
- $S_{teljes} = S_{közös} + S_{külön}$

### 25. egyenlettel

leírt függvény (lásd. IV. tézis) szerinti - viszonylagos egységeket tartalmazó – összehasonlításra. Itt a hasonlósági invariánsok a

$$\Pi_{Ex} = \frac{E_{x,s}}{E_{xvégén}} \text{ és a } \Pi_s = \frac{s}{S_{teljes}}.$$

Vezessük be az

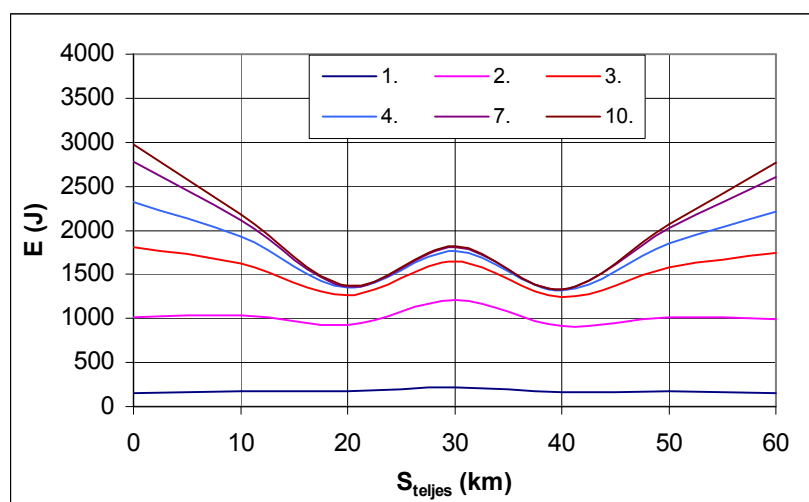
$$A_{Ex} = \frac{E_{x \text{ max vezetékmentén}}}{E_{x \text{ min vezetékmentén}}} * 100$$

ahol:

- $E_{x \text{ max vezetékmentén}}$  = az  $x$ . visszagyújtások közül a legnagyobb energiájú a vezeték hossza mentén,
- $E_{x \text{ min vezetékmentén}}$  = az  $x$ . visszagyújtások közül a legkisebb energiájú a vezeték hossza mentén.

arányt, amely az adott vezeték konfigurációhoz tartozóan az  $x$ -ik visszagyújtás energiaváltozásának mérőszáma a kisebb névleges feszültségű vezeték teljes hossza mentén.

Az energiák abszolút értékének alakulását a 9-10. ábra mutatja, a korábbiakban már vizsgált 60 km hosszú, 400/120 kV-os konfigurációnál, a vezeték hossza mentén létrejövő zárlatok esetén. Ha az 1. visszagyújtások energiáit nézzük, látható, hogy ezek abszolút értéke a legkisebb; a hozzájuk tartozó  $A_{E1}$  értéke 144 %. A 2. visszagyújtás energiája 5-6 szorosa az 1-nek (900÷1200 J), ebből is látszik, hogy ha a 2. visszagyújtás ki tud alakulni, akkor annak energiátartalma már elegendő ahhoz, hogy létre jöjjön az önerősítő folyamat és az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív. Ugyanezen vezetéknél (lásd. 9-10. ábra) az  $A_{E3}$  nagysága 145 %.



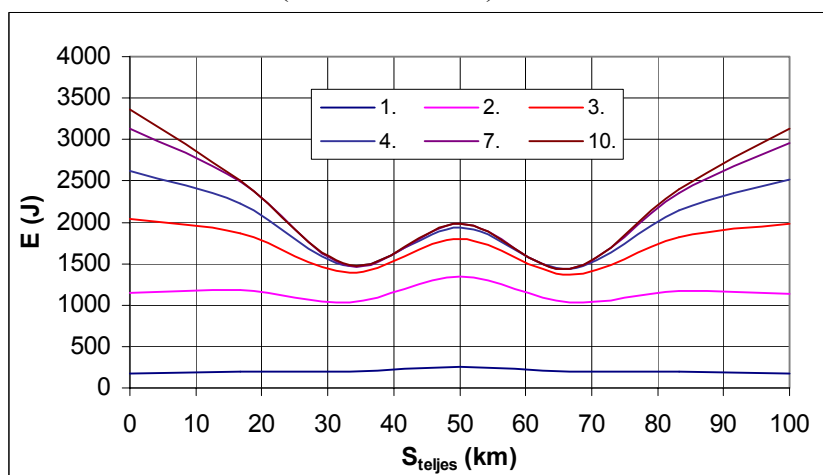
**9-10. ábra – Az adott sorszámú (9-9. ábra) visszagyújtások energiájának változása a 400/120 kV-os, 60 km hosszú vezetéknél a zárlat helyének függvényében**

Maximális értékét a 10. visszagyújtások során éri el ( $A_{E10} = 224 \%$ ), aminek a következő a magyarázata:

A zárlat helyének függvényében - a különböző befutási idők miatt - már az 1. visszagyújtásnál is eltérés mutatkozik az ív kialakása utáni potenciáleltolásban. Ezért a következő visszagyújtásokkor más-más lesz az  $U_0$  és az  $U = U_0 * \frac{a}{1+a}$  ívfeszültség is. A folyamat önmagától kumulálódó,

így tudnak kialakulni a jelentős – akár 2,2-szeres – ívenergia eltérések is a távvezeték mentén. Az energiák – ezáltal a különbségek - növekedése egészen addig folytatódik, amíg be nem áll az egyensúlyi helyzet az ív által levezetett és a visszagyújtásokkal átkerülő töltésmennyiségek között.

Tekintsünk egy hasonló görbesereget ugyanennél az oszloprendezésnél, azzal az eltéréssel, hogy a távvezeték hossza itt 100 km (lásd. 9-11. ábra).



**9-11. ábra - Az adott sorszámú (9-9. ábra) visszagyújtások energiájának változása a 400/120 kV-os, 100 km hosszú vezetéknél a zárlat helyének függvényében**

A görbék alakja hasonlít a 60 km-es vezetékéhez: szimmetrikus a vezeték közepére, ahol is kiemelkedik, innen a végek felé indulva visszaesik, majd újból emelkedik az értéke. A legkisebb energia szintén az 1. visszagyújtás során van, ahol az  $A_{E1} = 144 \%$ ; a legnagyobb energia a 10. visszagyújtás után alakul ki, itt az  $A_{E10} = 234 \%$ . Amplitúdó szempontjából a 100 km-es vezeték visszagyújtásainak energiái jelentősen nagyobbak, mint a 60 km-es vezetéké, ami azzal magyarázható, hogy a hosszabb vezetéken a hullámok befutási ideje nagyobb, így az impulzusok talp-

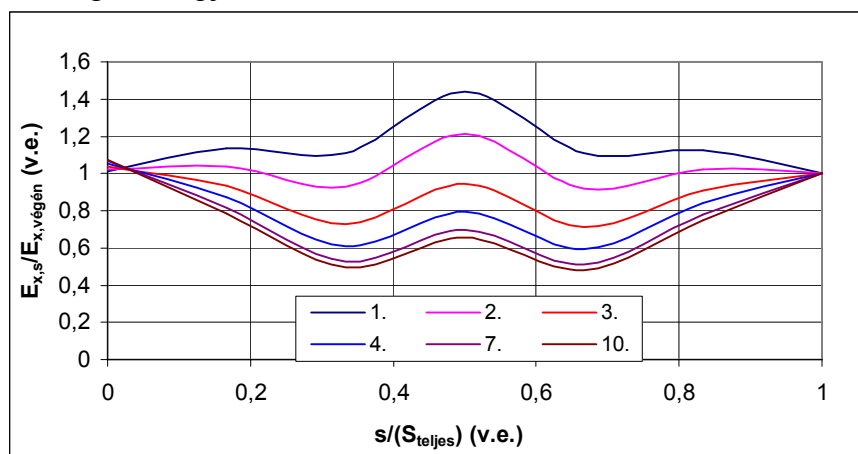
pontja is szélesebb. Ha összevetjük a legnagyobb és a legkisebb energia értékeket különböző vezetékhozzok esetén, akkor a következő táblázatot kapjuk.

	$E_{\text{legnagyobb}} \text{ (J)}$	$E_{\text{legkisebb}} \text{ (J)}$
20 km	2196,00	33,93
60 km	2978,89	152,10
100 km	3361,98	177,14
Eltérés (%)	153,10	522,06

### 3. táblázat – Az energiák értéke a 20, a 60 és a 100 km hosszú, 400/120 kV-os távvezetéseknél

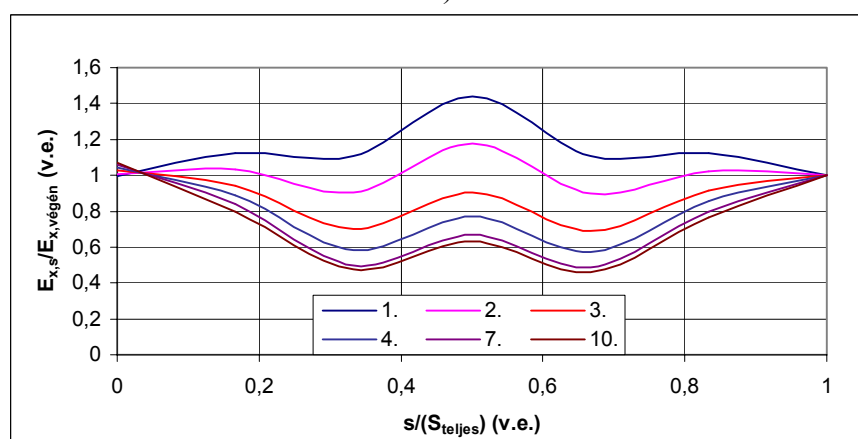
A legnagyobb és a legkisebb energia értékek a vezeték végén kialakuló visszagyújtásokhoz tartoznak, a legkisebb az 1-nél, a legnagyobb pedig a 10-nél. Az eltérések igen pregnánsak, jelentősen nagyobb az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* kialakulásának az esélye a 100 km-es vezeték esetében, mint a 20 km-esnél, mivel az előbbi 1. visszagyújtási energiája több mint 5-szöröse az utóbbinak.

Amennyiben ábrázoljuk a IV. tételben ismertetett (lásd. 25. egyenlet) függvénynek megfelelően az  $S_{\text{teljes}} = S_{\text{közös}} = 60 \text{ km}$  és  $100 \text{ km}$ ,  $S_{\text{külön}} = 0 \text{ km}$ -es 400/120 kV-os vezeték konfigurációkat a következő görbeseregeket kapjuk.



- $S_{\text{teljes}} = S_{\text{közös}} = 60 \text{ km}$ ,  $S_{\text{külön}} = 0 \text{ km}$  az eredetit lásd. 9-10. ábra
- 1..10: a visszagyújtások sorszáma (lásd. 9-9. ábra)

a)



- $S_{\text{teljes}} = S_{\text{közös}} = 100 \text{ km}$ ,  $S_{\text{külön}} = 0 \text{ km}$ , az eredetit lásd. 9-11. ábra
- 1..10: a visszagyújtások sorszáma (lásd. 9-9. ábra)

b)

### 9-12. ábra – Közösen futó 400/120 kV-os vezetéseken a visszagyújtások energiája

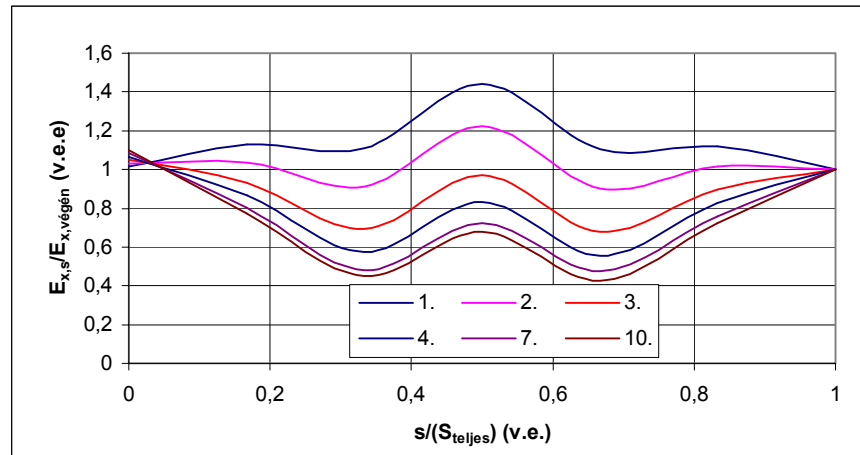
#### a IV. tételben ismertetett függvényvel ábrázolva

Az abszcissza az adott vezeték hosszára ( $S_{\text{teljes}}$ ), az ordináta pedig a saját vezeték adott sorszámu visszagyújtásának energiájára ( $E_{x,s}^{\text{végén}}$ ) van normálva. Ennek következtében a 9-12. ábra

Különböző névleges feszültségű rendszerek elektromágneses kölcsönhatása többrendszerű távvezetéseken

görbén az  $x$ -ik visszagyújtások energiáinak egymáshoz képesti aránya jelenik meg, a vezeték relatív hosszának függvényében. Ha összevetjük a két különböző hosszúságú vezetékhez tartozó azonos sorszámú visszagyújtásokhoz tartozó görbéket, jól látható, hogy csak elhanyagolható mértékben térnek el egymástól (pl a 3. visszagyújtás 0,5 v.e. hosszértéknél). A differenciát az eltérő hosszokból adódó különböző mértékű modális hullámterjedés és a szimuláció során használt LCC modell [15] – 4.2.2. fejezetben már említett – korlátja okozza.

Ha ugyanezt a görbesereget felvesszük a 6-4. ábra *a*) része által mutatott 750/120 kV-os,  $S_{teljes} = S_{közös} = 60$  km-es vezetéken, akkor a 9-13. ábra görbeseregét kapjuk eredményül, amely szintén csak elhanyagolható különbségeket mutat a 9-12. ábra által mutatottakhoz képest.



- $S_{teljes} = S_{közös} = 60$  km,  $S_{külön} = 0$  km,
- 1..10: a visszagyújtások sorszáma (lásd. 9-9. ábra)

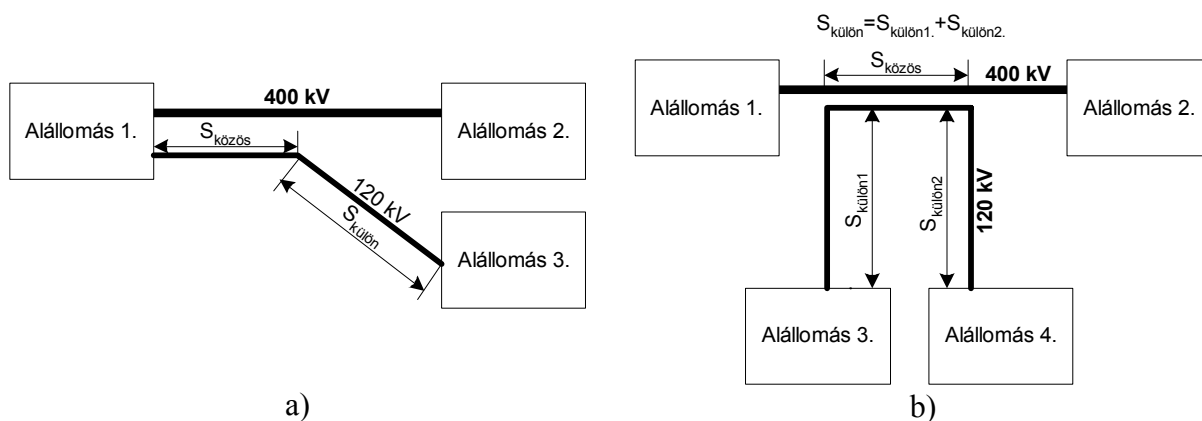
**9-13. ábra - Közösen futó 750/120 kV-os vezetéseken a visszagyújtások energiája a IV. tézisben ismertetett függvénnyel ábrázolva**

A görbék közötti egyezésnek a magyarázata a következő.

Az abszcissa normálása miatt a vezeték hosszát - ennek megfelelően a befutási időt is - viszonylagos egységben kapjuk, így a vezeték tényleges hosszától függetlenül tudjuk az áramimpulzusok és a visszagyújtások időbeli alakulását figyelembe venni (lásd. a 78. oldalon az időfüggvényeket). Az ordináta normálása az oszlopképtől függetleníti az  $U_{csatolt}$ -at és – a 81. oldalon leírtak következtében – a visszagyújtások energiáját; csak az adott visszagyújtás burkológörbéjének hullámossága (9-10. ábra és 9-11. ábra esetében az  $A_{Ex}$ ) jelenik meg az  $x$ -ik visszagyújtáshoz tartozó normált görbében (lásd. 9-12. ábra). A 9-12. ábra és 9-13. ábra görbéi között fennálló egyezés bizonyítja, hogy az oszlopképtől és a vezeték hosszától függetlenül ugyanaz a folyamat játszódik le a visszagyújtások során, azaz a IV. tézis második állítása - az  $S_{külön} = 0$  km esetben - bizonyítást nyert. A másik lehetőséget ( $S_{külön} \neq 0$ ) a következő alfejezetben tárgyalom.

## **9.2 Közös/külön oszlopsoron futó rendszerek**

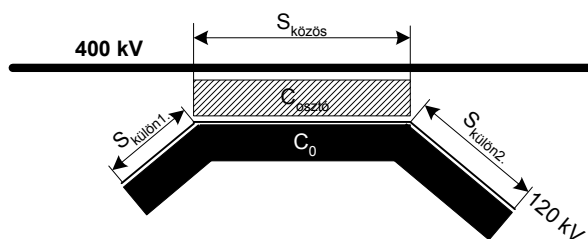
A villamosenergia-rendszerben létező különböző névleges feszültségekre alapvetően azért van szükség, mert a fogyasztók és az erőművek közötti eltérő távolságok áthidalása eltérő névleges feszültségű rendszerekkel gazdaságos. A nagyobb névleges feszültségűt a nagyobb távolságokra történő energiaszállításra használják, a kisebb névleges feszültségű lokálisabb célokra épül ki. Ha ezeket a rendszereket egy oszlopsorra helyezük, törvényszerű, hogy egy távolság megéléte után a két rendszer külön válik, eltérő nyomvonalon fut tovább, vagy a kisebb feszültségű becsatlakozik egy állomásba, míg a nagyobb feszültségű egy távolabbiban ér véget. Előfordulhat olyan eset is, hogy a két rendszer csak egy rövid szakaszon (pl. néhány oszlopközön egy folyón való átfeszítésnél) van egy oszlopra felszerelve. Tekintsünk erre két példát a következő ábrán.



9-14. ábra – Példa a közös/külön oszlopsoron futó rendszerekre

**$S_{külön}$  és  $S_{közös}$  értelmezése**

A 9-14. ábra a) része a külön való, a b) része a folyón átívelő esetet illusztrálja, utóbbinál az  $S_{külön} = S_{külön1} + S_{külön2}$  egyenlet érvényes. A továbbiakban azt a típusú vezetéket, amelynél  $S_{külön} \neq 0$  közös/külön típusú vezetéknek nevezem. A következőkben bemutatom, hogy az  $S_{közös}$  és az  $S_{külön}$  egymáshoz való aránya igen fontos tényező a visszagyújtások energiájának alakulásában. Induljunk ki a - 4-1. ábra b) részén látható - többrendszerű távvezetékek egyszerűsített helyettesítő kapcsolásából. A  $C_{osztó}$  értékét az határozza meg, hogy milyen vezetékhozzon van egymáshoz képest a két rendszer lecsökkent távolságra - egy oszlopsoron - (lásd. 9-15. ábra satírozott rész,  $S_{közös}$ ). A  $C_0$ -at viszont a kikapcsolt fázisvezető(k) teljes hossza (lásd. 9-15. ábra **kitöltött** rész,  $S_{teljes} = S_{közös} + S_{külön1} + S_{külön2}$ ) definiálja.



9-15. ábra –  $C_{osztó}$  és  $C_0$  alakulása eltérő nyomvonalaknál

A két vezeték egy kapacitív osztót alkot, amely osztóban a felső tag fegyverzeteinek nagyságát az  $S_{közös}$ , az alsó tagét pedig az  $S_{teljes}$  határozza meg. A következő egyenlet mindig igaz:

$$S_{C_0, fegyverzet} \geq S_{C_{osztó}, fegyverzet}$$

mivel

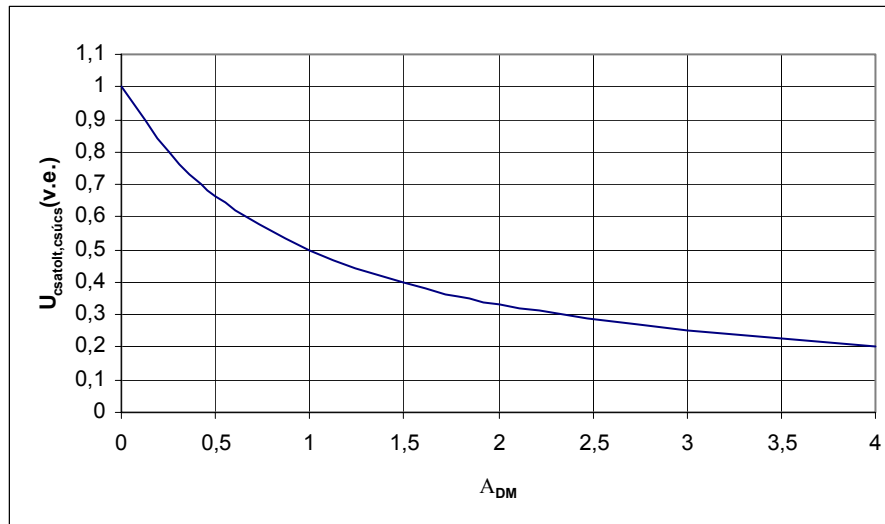
$$S_{C_0, fegyverzet} = S_{teljes} = S_{közös} + \sum S_{külön} \text{ és } S_{C_{osztó}, fegyverzet} = S_{közös}$$

**26. egyenlet**

ahol

- $S$  a hosszakat jelöli.

Ha ábrázoljuk az  $U_{csatolt, csúcs}$  értékének változását az  $A_{DM} = \frac{S_{külön}}{S_{közös}}$  arány függvényében a 9-16. ábra szerinti görbét kapjuk.



9-16. ábra – Az  $U_{csatolt,csucs}$  változása az  $A_{DM} = \frac{S_{külön}}{S_{közös}}$  függvényében

A görbe az

$$U_{csatolt,csucs} (v.e.) = U_{csatolt,csucs0} \frac{S_{közös}}{S_{teljes}}$$

ahol

- $U_{csatolt,csucs0}$  az  $A_{DM} = 0$  esetén a kapacitív csatolással átkerülő feszültség értéke,

### 27. egyenlettel

írható le. Az abszcissza 0 értékénél helyezkedik el az előző fejezetben bemutatott eset; ha  $A_{DM} = 1$ , akkor az  $U_{csatolt,csucs}$  a felére csökken.

Mint ahogyan az előző fejezetben említettem, az első és a második visszagyújtás bekövetkezése a döntő, amennyiben ezek kialakulnak, az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* nagy valószínűséggel létrejön. A szekunder ív ellenállását adottnak véve, az első visszagyújtás során az  $U_{csatolt,csucs}$  értéke határozza meg az ívelés ideje alatt a feszültség (lásd. 1. egyenlet) és az áram értékét, és ezeken keresztül a visszagyújtás energiáját, mivel

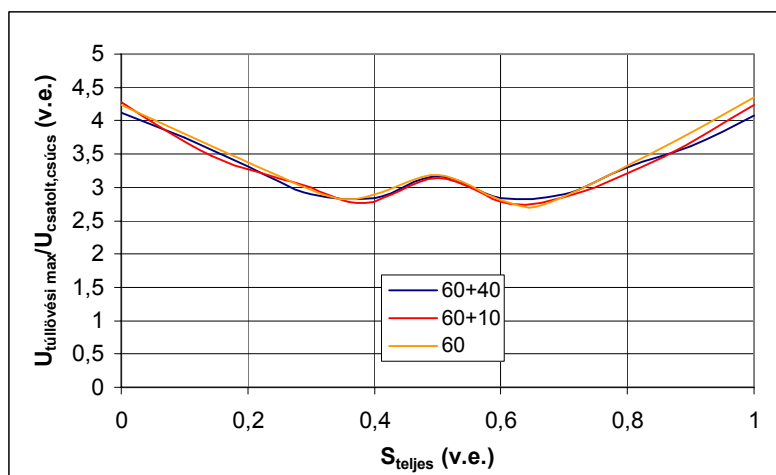
$$E_{visszagyújtás} = \int_{T_{ívelés}} U_{szekunderív} * I_{szekunderív} dt .$$

Azaz, hogy mekkora hőt képes az első visszagyújtás a primer ív kialakása után az ionfelhővel közölni és milyen ionozottságú marad az ívcsatorna az első visszagyújtás megszűnése után,

alapvetően az  $U_{csatolt,csucs}$  függvénye. Ha az  $S_{külön}$  nő, csökken az  $U_{csatolt,csucs}$ , az  $\frac{S_{külön}}{S_{közös}}$  arány egy

bizonyos értéke alatt az első visszagyújtás kialakulásának a valószínűsége elenyésző lesz.

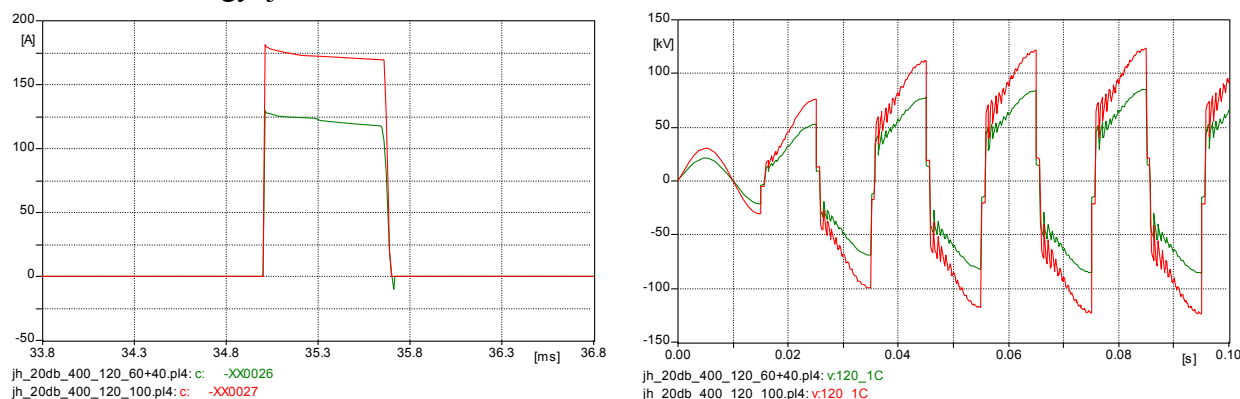
A 9-5. ábra alapján látható, hogy a **visszagyújtások feszültségét** és így a kialakás során kialakuló potenciáletlások mértékét – az **áramimpulzuson** keresztül - befolyásolja a zárlat helye a távvezetéken. Ez megjelenik az  $U_{tüllövési max.}$ -ban is, amelynek  $U_{csatolt,csucs}$ -ra normált értékét – közösen futó vezetékek esetében - a 9-17. ábra **60 jelű görbéje** mutatja, a normált vezetékhozz függvényében.



9-17. ábra – A túllövési feszültség értékének változása a vezeték hossza mentén, csak közösen (60 km,  $S_{külön} = 0$ ) és külön is futó ( $S_{külön} = 40$  és  $10$  km) vezetékreszek esetén

A vezeték hossza mentén a változás mértéke 1,6 v.e. Mivel a feszültség értékétől függ a visszagyújtás energiataralma, ezért a görbe alakja - az aránybeli eltérésektől eltekintve - hasonló a visszagyújtások energiataralmának változásához (lásd. 9-10. ábra).

Abban az esetben, ha a kikapcsolt rendszernek külön futó szakasza is van, akkor az is beleszámít a vezeték teljes hosszába, azaz a befutási időt az  $S_{teljes} = S_{közös} + S_{külön}$  határozza meg. Az áramimpulzus talppontjának szélessége megegyezik az ugyanakkora teljes hosszúságú, de végig a nagyobb feszültségű rendszerrel együttfutó vezetékével. Erre mutat példát a 9-18. ábra a) része, ahol az  $S_{közös1} = 100$  km és az  $S_{közös2} + S_{külön} = 60 + 40 = 100$  km-es vezetékek végein alakítottunk ki visszagyújtásokat.



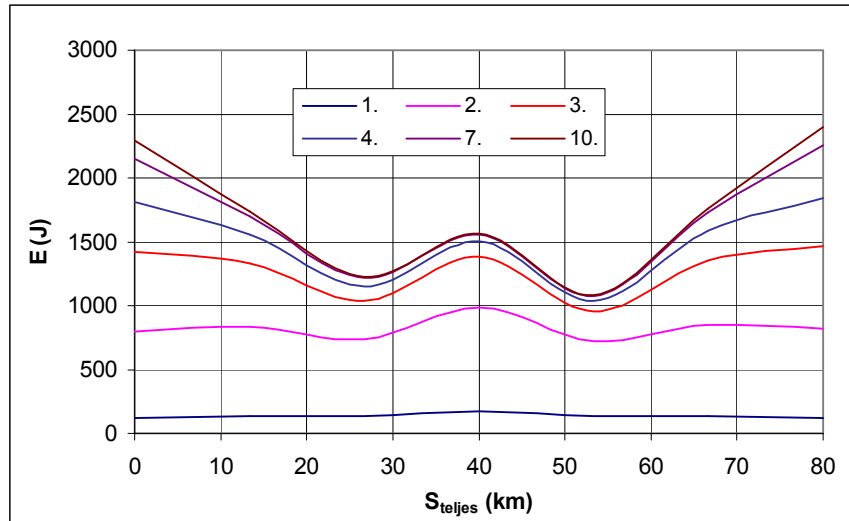
a) Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

9-18. ábra –  $S_{közös1} = 100$  km és  $S_{közös2} + S_{külön} = 60 + 40 = 100$  km –es vezetékek áramimpulzusai és feszültségnövekedései

Az áramimpulzusok amplitúdójában és a feszültségek alakulásában (lásd. 9-18. ábra b) része) mutatkozó eltérést - az e fejezet elején említett -  $C_{osztó}/C_0$  arány különbsége okozza. Ugyanis, ha kisebb a visszagyújtás létrejöttékor a feszültség, akkor az áramimpulzus amplitúdója is kisebb lesz. Ha megvizsgáljuk különböző  $S_{külön}$ -nel a 60 km-es együttfutást,  $A_{DM}$ -től függő abszolút értékbeli eltéréseket tapasztalunk, viszonylagos egységű skálára vetítve azonban azonos alakúak lesznek a görbék (lásd. 9-17. ábra). A görbékben látható kisebb mértékű eltérésnek két oka van: egyrészt a korábban már említett szimulációs korlát, másrészt az, hogy a közös szakasz végén kis mértékben megváltozó hullámimpedancia egy diszkontinuitási pontot jelent a vezetékben, így részleges visszaverődést okoz. Utóbbi nem jelentős ( $I, U, E_{visszaverődő} < 2...3 \% * I, U, E_{teljes}$ ), de észrevehető az áramimpulzusban. A nem kikapcsolt vezeték teljes hossza ( $S_{teljes}$  nagyobb feszültségű

$g_{\dot{u}} = S_{közös} + X$  km) nem befolyásolja a visszagyújtási folyamatot, mivel a vezeték a hullámok visszaverődése szempontjából lezárt végként viselkedik [16].

Tekintsük most az  $S_{külön} \neq 0$  esetén a visszagyújtási energiákat. Ebben az esetben is a lecsökkent  $U_{csatolt}$  értéke a meghatározó, így alapvetően attól függ a visszagyújtások energiája, hogy mekkora az  $A_{DM}$  értéke. A 9-19. ábra egy  $S_{közös} + S_{külön} = 60 + 20$  km-es vezeték esetén mutatja a visszagyújtások energiájának alakulását a vezeték hossza mentén.



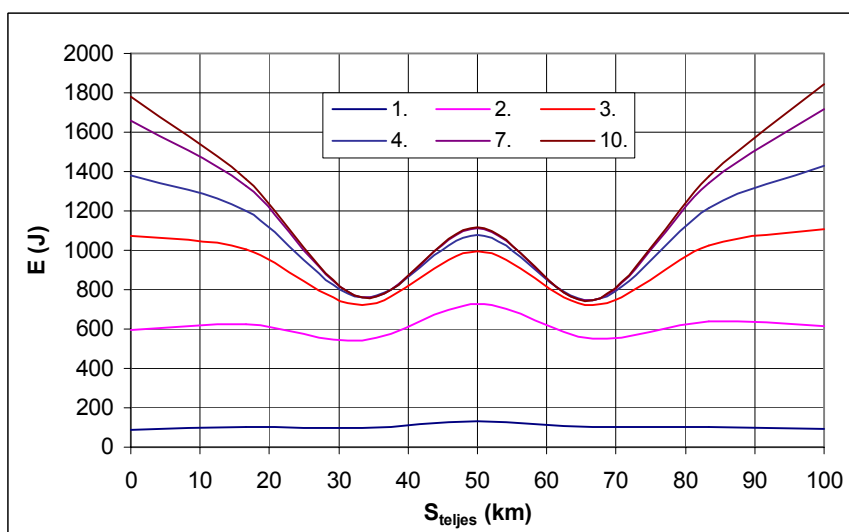
▪ 1..10: a visszagyújtások sorszámja (lásd. 9-9. ábra)

**9-19. ábra –  $S_{közös} + S_{külön} = 60 + 20$  km-es ( $A_{DM} = 1/3$ ) vezetéken a visszagyújtások energiái**

Látható, hogy ugyan úgy, mint a csak közös szakasszal rendelkező vezetékek esetén, ekkor is jelentős az  $A_{EX}$  értéke, a 10. visszagyújtásnál  $A_{E10} = \sim 220\%$ . Ennél a konfigurációnál az  $A_{DM} = 1/3$ ; ha a maximális energia értékét összevetjük az  $A_{DM} = 0$ -val (lásd. 9-10. ábra) akkor a

$$\frac{E_{\max A_{DM} = \frac{1}{3}}}{E_{\max A_{DM} = 0}} = \frac{2400J}{2980J} = 0,8\text{-at}$$

kapjuk. Az  $A_{DM} = 2/3$ -nál (lásd. 9-20. ábra) ugyanez az arány 0,61-et ad, aminek az oka az, hogy ahogyan nő az  $S_{külön}$ , úgy csökken az  $U_{csatolt, csúcs}$  és így a visszagyújtások energiája is.



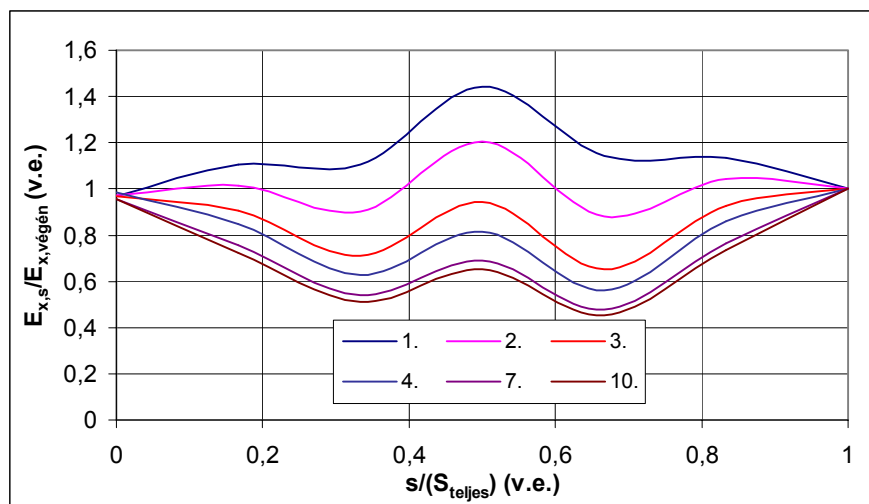
▪ 1..10: a visszagyújtások sorszámja (lásd. 9-9. ábra)

**9-20. ábra –  $S_{közös} + S_{külön} = 60 + 40$  km-es ( $A_{DM} = 2/3$ ) vezetéken a visszagyújtások energiái**

Megfigyelhető, hogy a 60, 100, 60 + 20 és 60 + 40 km-es vezetékek esetén a visszagyújtások energiáinak burkológörbéi egymáshoz hasonlóak: a 3. visszagyújtástól kezdve a kikapcsolt ve-

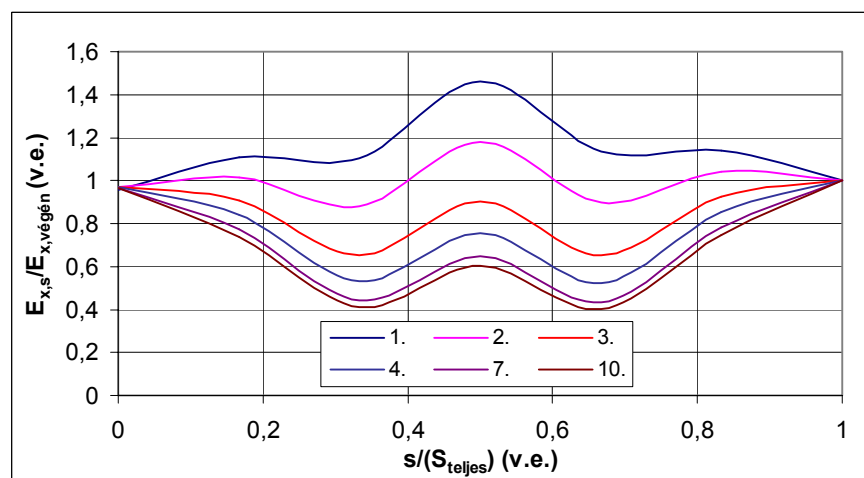
zeték végein a legnagyobb az energia értéke, az  $S_{teljes}$  fele előtt van a minimum, a közepén egy lokális maximum, valamint mindegyik görbe szimmetrikus az  $S_{teljes}$  felezőpontjára. A görbék között - az  $S_{külön}$ -tól függően - a visszagyújtások energiájának abszolút értékében van eltérés.

Amennyiben ábrázoljuk a IV. tézisben ismertetett (lásd. 25. egyenlet) függvénynek megfelelően az előző két  $S_{külön} \neq 0$  km-es esetet, a következő görbeseregeket kapjuk.



- $S_{teljes} = S_{közös} + S_{külön} = 60 \text{ km} + 20 \text{ km}$  az eredetit lásd. 9-19. ábra
- 1..10: a visszagyújtások sorszáma (lásd. 9-9. ábra)

a)



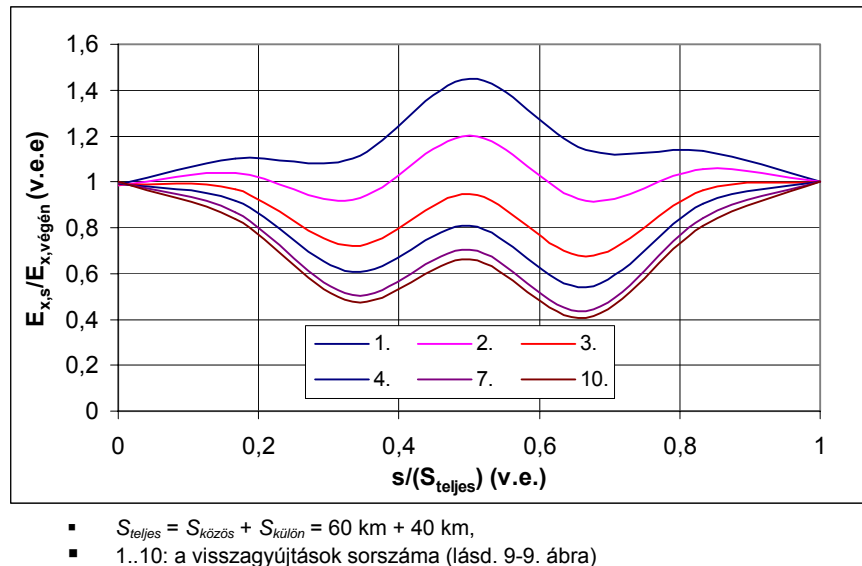
- $S_{teljes} = S_{közös} + S_{külön} = 60 \text{ km} + 40 \text{ km}$  az eredetit lásd. 9-20. ábra
- 1..10: a visszagyújtások sorszáma (lásd. 9-9. ábra)

b)

**9-21. ábra – Közös/külön típusú 400/120 kV-os vezetéken a visszagyújtások energiája**

**a IV. tézisben ismertetett függvényvel ábrázolva**

Ha ugyanezt a görbesereget felvesszük a 6-4. ábra a) része által mutatott 750/120 kV-os vezeték  $S_{közös} = 60 \text{ km} + S_{külön} = 40 \text{ km}$ -es konfigurációra, akkor a 9-22. ábra görbeseregét nyerjük eredményül, amely szinte teljes egyezést mutat a 9-21. ábra által mutatott 400/120 kV-os vezetékkel. A különbségeket az előző esethez hasonlóan az eltérő hosszából adódó különböző mértékű modális hullámterjedés és a szimuláció során használt LCC modell [15] – 4.2.2. fejezetben már említett – korlátja okozza.

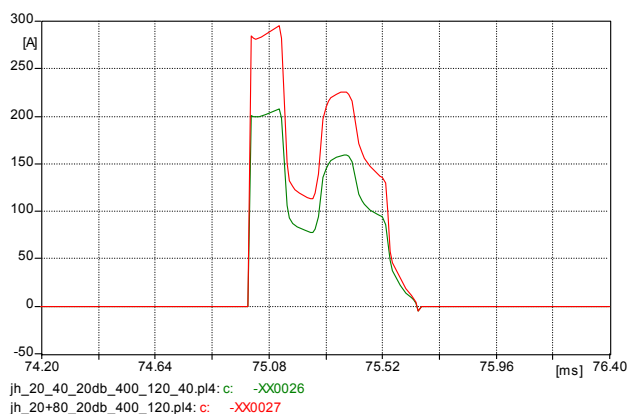


**9-22. ábra – Közös/külön típusú 750/120 kV-os vezetéken a visszagyújtások energiája a IV. tézisben ismertetett függvénnyel ábrázolva**

A 9-12. ábra, a 9-13. ábra (lásd. 84. oldal), a 9-21. ábra és a 9-22. ábra görbeseregei egymáshoz képest elhanyagolható mértékű különbségekkel rendelkeznek. Ez azért van, mert az  $S_{külön}$  értékétől és az oszlopképtől függetlenül ugyanazok a tranzien folyamatok zajlanak le a visszagyújtások során mindegyik kisebb névleges feszültségű rendszeren. Azaz, a visszagyújtás energiájának alakulása a vezeték hossza mentén független attól, hogy a kisebb névleges feszültségű rendszer mekkora részén fut közös oszlopsoron a nagyobb névleges feszültségűvel. Ennek az aránynak ( $A_{DM}$ ) a változása csak elhanyagolható különbséget okoz a görbékben (pl. a 9-21. ábra *a*) és *b*) részén a 7. és a 10. visszagyújtásokhoz tartozó görbék eltérnek az  $s = 0,1 \div 0,4$  v.e. intervallumban).

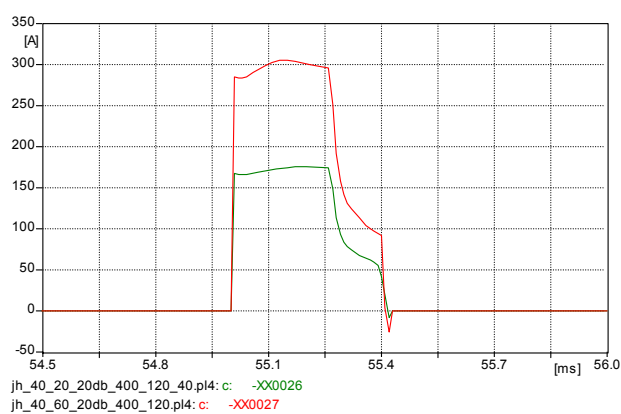
Az előbb elmondottak alapján a IV. tézis azon állítása bizonyítást nyert, miszerint a megadott függvénnyel (lásd. 25. egyenlet) ábrázolva a visszagyújtások energiáit, a kapott görbéknek az oszlopgeometriától, a kisebb névleges feszültségű rendszer hosszától és az  $A_{DM}$ -től való függése elhanyagolható.

A kikapcsolt távvezetéken - az  $A_{DM}$  értékétől függetlenül – a visszagyújtások előtt egyenletesen helyezkednek el a töltések. A nem kikapcsolt távvezetéknek a teljes hossza és a külön futó szakaszának a kikapcsolt rendszerrel közös szakasza előtti és utáni hossz-megoszlása (lásd. 9-14. ábra *b*) része) nem befolyásolja a töltéseloszlást. A visszagyújtások során a töltésátrendeződést a kikapcsolt vezeték teljes hossza és a visszagyújtások vezetéken elfoglalt helye határozzák meg; az, hogy mely részén kapja a töltésutánpótlást a nagyobb feszültségű rendszertől, csak elhanyagolható mértékű hatással bír. Ezzel magyarázható az, hogy ha a kikapcsolt rendszer hossza azonos, de eltérő az  $A_{DM}$ , akkor a vezetékvégtől azonos távolságra lévő visszagyújtásoknál az áramimpulzus alakja hasonló lesz, s csak amplitúdóbeli eltérés van (lásd. 9-23. ábra *a*) része).



20 km-re a vezetékvégtől

a)



40 km-re a vezetékvégtől

b)

- Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

**9-23. ábra –  $S_{teljes} = 100$  km vezetéken az  $A_{DM} = 0$  és az  $A_{DM} = 2/3$  esetekben,**

**20/40 km-re a vezetékvégtől a visszagyújtások áramimpulzusának alakulása**

Minden egyes visszaverődés ugyanakkor történik (időben) mind a két vezetéken, a közelebbi vezetékvegről négyszer, míg a távolabbiról egyszer verődik vissza az áramhullám az ív kialvásáig.

Az amplitúdók arányára - a 9-16. ábra alapján - az  $I_{A_{DM}=\frac{2}{3}} = I_{A_{DM}=0} * \frac{3}{5}$  igaz. Ha ugyanezt a veze-

tékhossz arányt tekintjük, de a zárlat 40 km-re történik az egyik végtől, a 9-23. ábra b) része által mutatott áramimpulzus alakokat kapjuk. Ebben az esetben is hasonló az áramimpulzusok időbeli lefolyása, az amplitúdók között 3/5-os arány van, a távolabbi végről  $3 * T_{bef. közelebbi\ vég}$  idő alatt ér vissza a hullám. Az áramimpulzusok időbeli lefolyását a zárlat helye határozza meg a vezetéken, így ha a vezeték hossza és a zárlat helye nem változik, akkor visszagyújtások energiájának alakulása is azonos lesz; az amplitúdóban mutatkozó mennyiségi eltérést az  $U_{csatolt, csúcs}$  értékének változása okozza. Ez magyarázza a 9-11. ábra és a 9-20. ábra adott sorszámú visszagyújtásaihoz tartozó görbék közötti hasonlóságot.

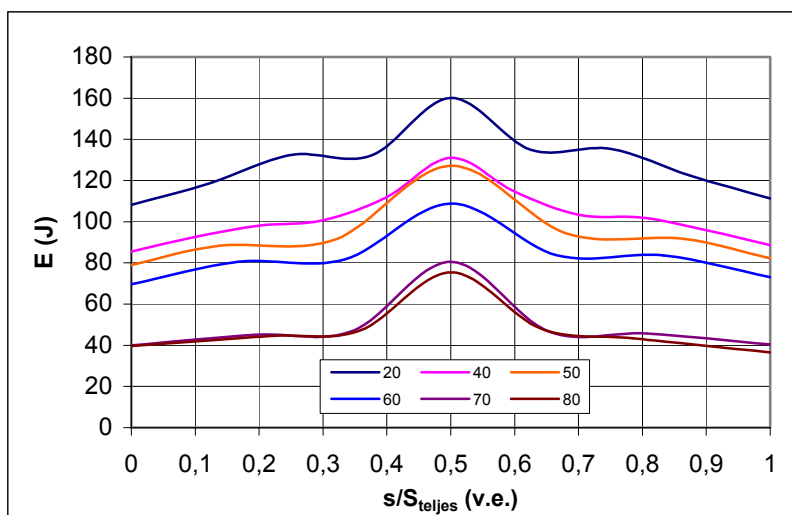
Mint korábban említettem a legkritikusabb pontja a vizsgált ívjelenségnek az, hogy az első és a második visszagyújtás ki tud-e alakulni. Ehhez elsődlegesen az  $U_{csatolt}$ -nak át kell ütnie a visszamaradt ionfelhőt és az első visszagyújtás energiataralmának elegendőnek kell lennie ahhoz, hogy a második ki tudjon alakulni, ami után a folyamat nagy valószínűséggel önfenntartó lesz. Az, hogy az első visszagyújtás energiájának mekkorának kell lennie, alapvetően az átütendő távolságtól és az ívcatorna ionozottságától függ. Az előbbit egyrészt a kikapcsolt vezeték szigetelési szintje, másrészt az utóbbi is befolyásolja, mivel az ionfelhő térbeli elhelyezkedésétől függően nem biztos, hogy a szigetelő zsinórtávolságát kell a potenciálkülönbségnek átütni, hanem inkább a részívekből összeálló hosszt. Ezeknek a részíveknek az elhelyezkedése pedig nem feltétlenül párhuzamos a szigetelő hossz tengelyével, hanem annak függvényében változik, hogy az ionozott gázfelhő éppen merre mozog. Erre a mozgásra mutat példát a 9-24. ábra, amely a [41] szerinti üzembe helyezési mérésekkor mesterségesen létrehozott szekunder ívről készült felvétel egyik képkockáját mutatja. A teljes videót a CD mellékleten található *400\_kV\_szekunder\_ív\_2\_lassított.wmv* fájl tartalmazza. Az ionozottságot elsősorban a zárlat során kialakuló primer ív, valamint a környezeti paraméterek (szél, külső hőmérséklet stb.) határozzák meg, amiből következően a jelenség kialakulása előre nem kiszámítható, sztochasztikusan változó körülményektől is függ.



**9-24. ábra – A 2\*400 kV-os Hévíz-Tumbri távvezetéken 2004. május 25-én elvégzett kísérlet során keletkező szekunder ív [41]**

A 4.3.1. fejezet végén említettem, hogy az I. tézis igazolására szolgáló kísérlet során nem tudtam az ív áramát regisztrálni, így az ív energiáját sem lehetett meghatározni. A kísérlet szimulációs leképezése során azt az eredményt kaptam, hogy az első visszagyújtás során az energiatartalom  $\sim 50$  J. Mivel olyan elemei, ill. jellemzői is voltak a kísérleti áramkörnek, amelyeket nem lehetett belevenni a szimulációs áramkörbe (pl: a csillapítások), így a kísérlet során ennél nagyobb nem lehetett az első visszagyújtás energiatartalma. Ez az energia képes volt a kísérletnél a 10-20 cm-es légrétegig ionozni, hogy egy félperiódus múlva a második visszagyújtás is be tudott következni, majd utána kialakult az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív*. Az átütéshez szükséges energia [43] és [44] szerint nem nő egyenes arányban a távolsággal, így az ívhúzó érintkezők távolságának növekedésével nem nő lineárisan az átütéshez és az ív fennmaradáshoz szükséges feszültség és energia. Ha azonban azt is tekintetbe vesszük, hogy a hálózaton bekövetkező zárlatnál a primer ív a kísérletinél jóval erőteljesebben ionozott csatornát hagy hátra, akkor a jelenség a nagyobb ívhúzó érintkező távolság ellenére kialakulhat. Arra, hogy ténylegesen mekkora ez a feszültség és energia érték - például az általam vizsgált 120 kV-os rendszer ívhúzó érintkező távolsága esetén – olyan kísérlettel lehet választ kapni, amelynek során a primer ívvel létrehozott és a kialakása után visszamaradt ionfelhő 50 Hz-es feszültséggel szembeni (ilyen az  $U_{csatolt}$ ) átütési szilárdságát, és az utána kialakuló *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívet* vizsgáljuk. Ezzel pontosan választ lehetne kapni arra, amelyre a 4.3. fejezetben bemutatott kísérlet során a korlátozott lehetőségek miatt nem volt mód. A tényleges határérték ismeretének hiányában egy normál 120 kV-os szigetelő esetében az első visszagyújtás minimális energiaértékét 100 J-ra becsülöm, ami konkrét mérési eredmények esetén módosulhat.

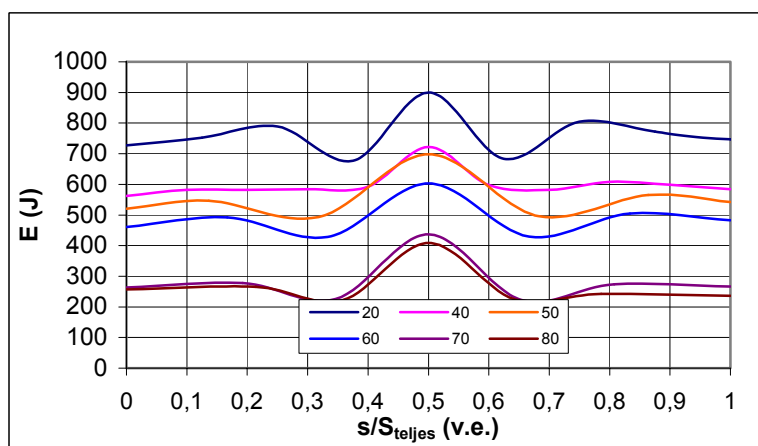
Ezek tükrében tekintsük a korábban tárgyalt 400/120 kV-os vezeték,  $S_{közös} = 60$  km és változó  $S_{külön}$  értékekkel. Az első visszagyújtások energiáinak alakulását a 9-25. ábra mutatja.



- Minimális energia az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulásához:  $E_{min1.visszagyújtás} = 100 \text{ J}$

**9-25. ábra – Az első visszagyújtások energiájának alakulása a 400/120 kV-os vezetéken, az  $S_{közös} + S_{külön} = 60 + 20 \div 80$  km-es esetekben ( $A_{DM} = \frac{1}{3} \div \frac{4}{3}$ )**

Látható, hogy amikor a különfutó hossz jelentősen kisebb, mint a közös ( $S_{külön} \leq 20$  km) akkor az első visszagyújtás energiataralmának értéke sehol sem esik 100 J alá. Amennyiben az  $A_{DM}$  közeledik az 1 felé ( $S_{külön} \geq 50$  km), akkor viszont csak a vezeték közepén marad meg a 100 J-os küszöb fölött a görbe. Tehát a 400/120 kV-os,  $S_{közös} = 60$  km-es vezeték esetén, ha  $A_{DM} \geq 1$ , akkor a kikapcsolt 120 kV-os rendszeren az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulásának a valószínűsége gyakorlatilag 0. Ha viszont eléri vagy meghaladja a küszöbértéket az  $E_{1.visszagyújtás}$ , akkor nagy valószínűséggel kialakul a második is. Ezt arra alapozom, hogy a 9-26. ábra és a 9-25. ábra azonos  $S_{külön}$ -höz tartozó görbéinek összevetésével kimutatható, hogy a második és az első visszagyújtások energiáinak abszolút értékei között ~6-szoros az arány. A IV. tézis első állítását ezek a megállapítások támasztják alá.



$$\frac{E_{s.2.visszagyújtás}}{E_{s.1.visszagyújtás}} \approx 6$$

ahol:

- s = futópont a vezeték hossza mentén
- az első visszagyújtást lásd. 9-25. ábra
- Minimális energia az önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív kialakulásához:  $E_{min1.visszagyújtás} = 100 \text{ J}$

**9-26. ábra – A második visszagyújtások energiájának alakulása a 400/120 kV-os vezetéken, az  $S_{közös} + S_{külön} = 60 + 20 \div 80$  km-es esetekben ( $A_{DM} = \frac{1}{3} \div \frac{4}{3}$ )**

Ha a 9-25. ábra által mutatott első visszagyújtások energiáját vizsgáljuk, akkor belátható, hogy a visszagyújtás esélye a vezeték közepén a legnagyobb, a végek felé pedig csökken. Ahogyan növekszik az  $S_{külön}$  értéke, az  $A_{E1}$  is követi, 145 %-ról 200 %-ra. A 9-26. ábra görbéiből kiolvasható, hogy az  $A_{E2}$  is ezen intervallumban mozog (135 %-tól 200%-ig megy); a görbék alakja kezd hasonlítani a későbbi (pl. 9-20. ábra) visszagyújtások által megrajzoltakra. Lényeges kü-

lönbség még, hogy a minimum értékek is eltolódnak a vezeték végeiről a  $0,3\pm 0,35$  v.e. és  $0,65\pm 0,7$  v.e. intervallumokba.

Mit jelent a közös/külön arány ( $A_{DM}$ ) változása a gyakorlati megvalósítás során?

Ha tekintjük azt, hogy két eltérő feszültségintű vezeték - pl. folyón való átfeszítéshez - egy oszlopköz távolságig közös oszloprendszerre kerül, akkor az  $S_{külön} \gg S_{közös} \Rightarrow A_{DM} \gg 1$ , így a vizsgált jelenség nem fog kialakulni. Ha viszont egy 400/120 kV-os alállomásból kiindulva egy 400 kV-os és egy 120 kV-os rendszer jelentősebb hosszon együtt fut (pl: gazdaságtalan lenne két párhuzamosan futó rendszert külön oszlopra szerelni) és a 120 kV-os rendszer nem sokkal az elágazásuk után befut egy 120/20 kV-os alállomásba, akkor kialakulhat a 120 kV-os rendszeren az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív*, mivel  $S_{külön} < S_{közös} \Rightarrow A_{DM} < 1$ .

Az egy oszlopra való felhelyezés azonban felvet egy olyan kérdést is, miszerint az oszlopkonstrukció kialakítása során figyelembe kell venni a rendszerek eltérő túlfeszültségvédelmi stratégiáját. A közös oszlopokat a nagyobb feszültségű rendszerrel megkövetelt magasságokhoz kell igazítani, ami a kisebb névleges feszültségű rendszer esetében megnöveli a védővezetőbe vagy az oszlopba csapó villám által okozott visszacsapásnak, illetve a közvetlen villámcsapásnak a valószínűségét. Ugyanaz a visszacsapási feszültség, amely a nagyobb feszültségű rendszeren még nem, a kisebb feszültségűn viszont okozhat zárlatot, mivel az utóbbi szigetelési szintje jelentősen kisebb (pl: 120 kV-on az ívhúzó érintkezők távolsága ~1 m, 400 kV-on pedig ~4 m).

A kisebb feszültségű rendszerrel a külön oszlopsoron vezetéshez képest figyelembe kell venni, hogy:

- megnövekedhet a villámcsapási gyakoriság, ezért
- megnövelt szigetelési szinttel kell a rendszert kivitelezni.

A kisebb feszültségű rendszer esetében nemcsak a szigetelési szint, hanem a beépített túlfeszültségkorlátozók megválasztásakor is számolni kell a megnövekedett visszacsapási gyakoriság okozta plusz igénybevétellel, illetve össze kell hangolni a nagyobb feszültségű rendszer túlfeszültségvédelmével. Ugyanis a 120 kV-os rendszereken szinte minden esetben elhelyeznek a vezetékvégeken túlfeszültség korlátozót anélkül, hogy összetettebb előzetes számításokat vagy számítógépi szimulációt végeznének. Ennek az a magyarázata, hogy a 120 kV-os korlátozók bekerülési költsége egy vezeték létesítéséhez képest, vagy egy alállomás rekonstrukciója során a védett berendezések árához viszonyítva nem okoz jelentős többletköltséget. Ezzel szemben 400 kV-on - a nagyobb névleges feszültség miatt - III-as osztályú korlátozókra van szükség, nagyobb pogácsamérettel („több anyag kell bele”), így a bekerülési költségük is jelentősen nagyobb, mint a 120 kV-os korlátozóké. Ezért 400 kV-on minden esetben előzetes számításokat szoktak végezni a korlátozók elhelyezésére és méretezésére. A feltett kérdésre válaszoltak alapján a közös/külön rendszerű 120 kV-os vezetéknel előzetes méretezés szükséges mind a szigetelési szintek, mind a túlfeszültség korlátozók tekintetében. Azesetben, ha az  $S_{közös}$  csak egy vagy két oszlopköz jelent és az  $S_{külön}$  értéke pedig több 10 km-es hossz, akkor az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívvel* gyakorlatilag nem kell számolni, de a túlfeszültségvédelmi probléma továbbra is fennáll. Ugyanis a kisebb feszültségű rendszeren a visszacsapás következtében kialakuló átütés létrejöttéhez az is elegendő, hogy a rendszerek közötti lecsökkent távolság egy oszlopon jelen legyen, mivel ha a közös oszlopon lévő szigetelők létrejön a visszacsapás hatására az átütés, akkor a villámenergia már átkerül a kisebb feszültségű rendszerre is.

A 9. fejezetben bemutatam a kisebb névleges feszültségű rendszer hosszának és a két rendszer közös oszlopsorú hosszának (lásd. 9-14. ábra) az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív*re gyakorolt hatását, valamint elemeztem az eltérő névleges feszültségű rendszerek túlfeszültségvédelmi stratégiájának különbözőségeiből adódó problémákat.

## 10. Ívszimulációs módszerek összehasonlítása

Az 5.1. fejezet elején említettem, hogy a szekunder ív korrekt leképezését adó modell jelenleg még nem áll rendelkezésre. Szimulációs számításaim során az ívet egy konstans ellenállással helyettesítettem, amelynek a leképezésre gyakorolt hatását a 81÷81. oldalakon elemzem. A továbbiakban ezt **konstans leképezésnek** nevezem.

Egy másik leképzési lehetőség kínálkozik, ha - nagy számú mérési eredmény alapján [53] - az 50 Hz-es ív feszültség-gradiensének állandóságából indulunk ki, a következő táblázat szerint:

kA-es nagyságrendű íváram esetén	15÷20 V/cm
A, 10 A-es nagyságrendű íváram esetén	30÷40 V/cm

### 4. táblázat – Az ív feszültség-gradiensének alakulása az íváram függvényében [53]

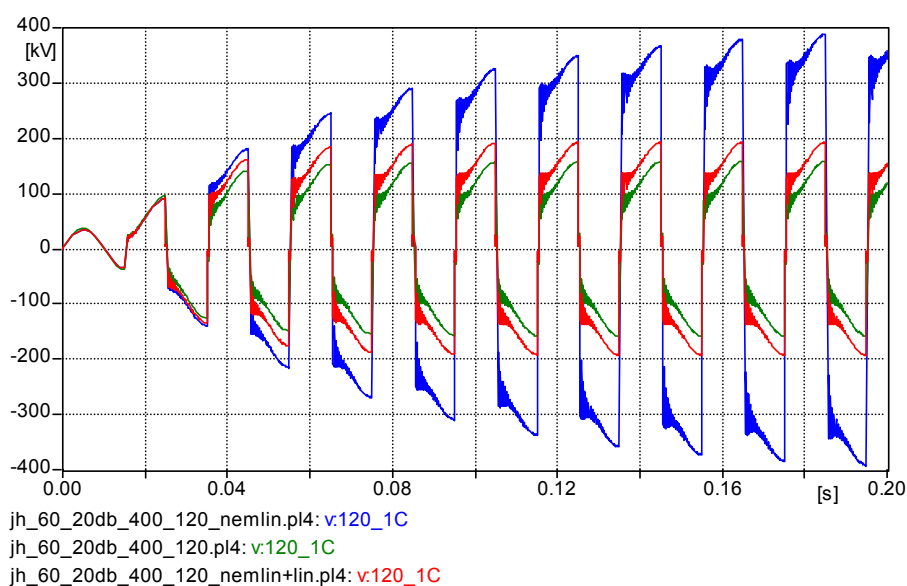
Ez esetben olyan, a továbbiakban **gradiens leképezésnek** aposztrófált közelítést használunk, amelynél az ív feszültsége állandó, az ellenállása viszont változik az áram, és ebből következően az ívenergia és -hőtartalom függvényében.

A [28]-ban leírtakra támaszkodva vélhető, hogy a disszertációban vizsgált szekunder ív csatornája is együtt mozog a széllal. A Magyarországon mérhető átlagos szélesebesség értékek alapján ( $v_{szél} = 1\div 2$  m/s [54]) a vizsgált 100÷120 milliszekundumos időintervallum alatt (lásd 4-7. ábra) az ív nyúlása 10÷24 cm-re tehető. Ez 120 kV-os normál szigetelő esetén kialakuló átlagos ívhossznál (~150 cm) csak elhanyagolható mértékű (6÷16 %) hosszváltozást okoz; így az ív hossza állandónak tekinthető. A fentiekből következően az ívfeszültségre a vizsgált időintervallumban az alábbi érték adódik:

$$U_{ív} = 35 \frac{V}{cm} * 150cm = 5250V$$

### 28. egyenlet

A **gradiens leképezésnek** megfelelően módosítva a 4-6. ábra által mutatott áramkört, a következő időfüggvényt kapjuk a vezeték végén létrejövő visszagyújtások hatására kialakuló potenciálnövekedésre.

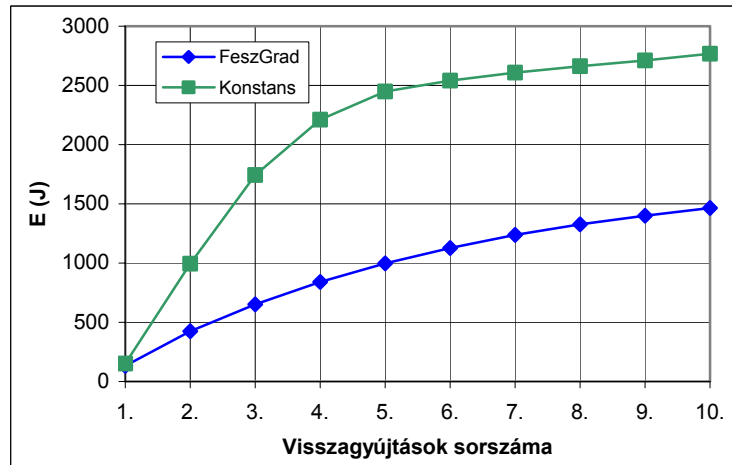


▪ Az időfüggvények az LCC [15] modellel végzett szimulációval készültek

**10-1. ábra – A konstans ellenállással, a 35 V/cm ívfeszültség-gradienssel és a kettő kombinációjával való leképezés esetén a feszültségnövekedések**

Ha összevetjük a **konstans** és a **gradiens** leképzéssel kapott eredményeket, akkor látható, hogy **utóbbi** nagyobb értékű és gyorsabb potenciálnövekedést okoz. Ennek oka az, hogy a konstans ívfeszültség miatt a visszagyújtások során az ív ellenállása 80 Ω-ról lecsökken 10 Ω-ra, ezt a tendenciát az  $a = \frac{R_{ív}}{Z_{táv}}$  is követi: 0,14-ről 0,02-re esik vissza. Ez a 4-5. ábra görbéi közötti -

csökkenő „a” irányába történő - mozgás értelmében a potenciálnövekedés felgyorsulását eredményezi; a visszagyújtások áramimpulzusainak értéke viszont megnő. Ha meghatározzuk a visszagyújtásokhoz tartozó energiákat, akkor a **konstans** módszerrel kapottakhoz képest nagyobb áramcsúcsok ellenére - a csökkenő ívellenállás következtében - kisebb értékeket kapunk (lásd. 10-2. ábra).



10-2. ábra – A visszagyújtások energiájának alakulása a **konstans ellenállásos** és a **feszültség-gradienses** leképzés esetén

A két módszerrel kapott energiák páronkénti aránya ( $\frac{E_{konstans \times visszagyújtás}}{E_{gradiens \times visszagyújtás}}$ ) a 1,15÷2,67 közötti in-

tervallumban mozog. Ha csak az energiák szempontjából tekintjük a két leképzést, akkor kijelenthető, hogy a **konstans** módszer a nagyobb kialakulási valószínűség irányába torzítja a jelenség leképzését a **gradiens**hez képest.

Ezzel szemben a potenciálnövekedéseket tekintve fordított a helyzet, ugyanis a **gradiens** módszer esetében a lebegő-pont potenciáljának gyorsabban és nagyobb értékre való megnövekedése azt irányozza elő, hogy a visszagyújtás megnövekedett valószínűséggel jön létre. A **gradiens** leképzés esetén a potenciálemelkedés közel kétszer olyan meredek, a 9. visszagyújtás után fél periódussal eléri a 330 kV-ot; maximális értéke a kikapcsolt fázisvezetőn  $\sim 400kV \approx 12 * U_{csatolt,max}$  (lásd. 10-1. ábra). Ekkora feszültség a távvezeteki ZnO túlfeszültség

korlátozóik miatt nem alakulhat ki, a ZnO ugyanis  $\sim 180$  kV-nál korlátozza a feszültséget (lásd. 6-2. ábra karakterisztikáját és a 6. fejezetben leírtakat). Abban az esetben, ha nincs korlátozó a távvezetéken az áramimpulzusok amplitúdója – az adott esetben - elérheti a  $\sim 860$  A-t is. Ekkora ív áramok és lebegő-ponti feszültségek kialakulása azonban egy valós távvezetéken aligha várható, az ív inkább - nagy valószínűséggel - átfeljődik állandósult, 50 Hz-es szekunder ívvé.

A gradiens módszer eredményei alapján egy másik lehetséges folyamat az, hogy a kisebb energiátartalmú visszagyújtások miatt az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* nem tud kialakulni, így az „ívelés” csak átütésekből fog állni, a tényleges ívkifejlődés elmarad.

A szimuláció lehetőséget nyújt a két ívleképzés kombinációjára is, amikor is az első néhány visszagyújtás során a gradiens, majd - a nem reális feszültség és áramamplitúdó értékek elkerüléséhez – a konstans leképzésnek megfelelő modellel helyettesítjük az ívet; ekkor a 10-1. ábra

**kombinációs** feszültségnövekedési görbét kapjuk. A reális és pontos szekunder ív karakterisztika ismeretének hiányában a két módszer közötti átmeneti munkapont korrekt meghatározása nem lehetséges, így ez is csak közelítés.

Értékelve a módszereket, a következő megállapítások tehetők:

- Az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* félperiódusonkénti egy-egy, max. 670  $\mu$ s szélességű ( $S_{teljes\ max} = 100$  km) impulzus íve és az 50 Hz-es ív egymástól minőségileg különböző jelenségek.
- Mind a kétféle (a kombinált módszerrel együtt három) ívleképzés csak közelítés, amelyek az automatikus visszakapcsolás holtidejében kialakuló valós ívjelenséget pontatlanul közelítik meg. Mind a két módszer tartalmaz olyan jellemzőket, amelyek előnyt jelenthetnek.
- A **gradiens** módszer nem - a disszertációban tárgyalt - eszkalációs folyamatot leképző jelenségek során fellépő ívek esetén nyújthat megfelelő eredményt, gondolva itt az előző oldalon kapott túlzó nagyságú áram- és feszültség értékekre.
- A **konstans leképzés** általános szekunder ív vizsgálatok során elfogadott és széles körben használt. Figyelembe véve, hogy a **gradiens** módszer alapvetően az 50 Hz-es jelenségekre jellemző, a disszertációm részleteinek kidolgozásánál az ATP-EMTP vizsgálatoknál is általánosan elfogadott **konstans leképzést** használtam.
- A módszerekkel kapott eredmények közötti eltérés is abba az irányba mutat, hogy az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* korrekt feltérképezéséhez elengedhetetlen a valóságot igen jól közelítő kísérleti áramkörben (lásd. 5. és 11. fejezeteket), vagy többrendszerű, eltérő névleges feszültségű távvezetékeken mérések végzése, pontos regisztrációs lehetőségek mellett.

## 11. Irányzatok többrendszerű távvezetékek tervezéséhez

A 9. fejezetben leírtak szerint az első és a második visszagyújtás kialakulása meghatározó az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* létrejöttének szempontjából. Ez a következőket jelenti: a primer ív által visszahagyott ionfelhőben lévő kisebb és nagyobb vezetőképességű részekből összeálló csatorna visszagyújtásához szükséges feszültséget meghaladja-e az ép fázisokról csatolással átkerülő feszültség értéke ( $U_{csatolt}$ ), valamint az első visszagyújtás energiatartalma kellően tudja ionozni az ívcsatornát ahhoz, hogy a következő is kialakuljon. Az ehhez szükséges minimális energiaérték meghatározása csak kísérleti úton lehetséges, mivel - ahogyan már korábban is említettem - a valóságot igen jó közelítéssel (környezeti paraméterek, termikus és villamos visszagyújtás figyelembe vétele) leképező, általánosan használható ívmoddell jelenleg nem áll rendelkezésre.

Az első visszagyújtáshoz szükséges feszültséget elsősorban az befolyásolja, hogy a primer ív kialakulása után az ionfelhőben lévő vezetőképességű részek rekombinálódása milyen gyorsasággal történik, azaz a villamos szilárdság milyen sebességgel és mekkora értékre növekszik meg. Ezt elsősorban az ívtalpponti érintkezők távolsága, valamint a szél sebessége és iránya befolyásolja. A [30, 40] bemutatnak olyan mérési regisztrátumokat, amelyekből következtetni lehet arra, hogy ez a növekedés mekkora mértékű és sebességű, azonban a méréseket 400÷750 kV-os szigetelőméretekre végezték. Az általam vizsgált esetben viszont ez 120 kV-os szigetelőméretnél lenne szükséges. Az eredmények arányosítással való átszámítása nem korrekt megoldás, csak részletekbe menő modellezéssel lehetne ezt megtenni, amit [43, 44] is alátámaszt. A nem 50 Hz-es, hanem 300/3000  $\mu$ s-os kapcsolási hullámú feszültséggel szembeni villamos szilárdság kialakulását vizsgálták a [48, 49]-ben, szintén 386÷750 kV-os feszültség szinten és szigetelőméretekkel. A szigetelések villamos szilárdságának értéke annak is függvénye, hogy milyen időbeli lefolyású az adott villamos igénybevétel (egyenfeszültségű, ipari frekvenciájú, kapcsolási hullámú stb.), ezért ezek az eredmények sem használhatók fel a keresett feszültség meghatározására.

Az egyik lehetséges megoldást az ebben a fejezetben ismertetésre kerülő módszer szolgáltatja. Első lépésként el kell végezni a következő feltételeknek megfelelő kísérlet sorozatot:

- A nagyfeszültségű áramkör kellő számú II taggal modellezi a kikapcsolt fázisvezetőt.
- A szekunder ívet beállítható áramú és időtartamú (ezáltal változtatható hő- és energiatartalma) primer íves begyújtás előzi meg.
- Az ívtalpponti érintkezők távolsága állítható, de egy kísérlet alatt rögzített.
- A rendszerek közötti csatolás és ezáltal az átkerülő 50 Hz-es feszültség változtatható értékű.
- A szekunder íváram értékének maximuma (ezáltal hő és energiatartalma) beállítható.
- Megoldott a kellő pontosságú íváram, ívfeszültség regisztráció.
- A szélesség és -irány állítható és folyamatosan regisztrálható.
- Egy adott beállítás (ívhúzó érintkező távolság, szélesség,  $U_{csatolt}$ ) esetén több mérés is elvégezhető.
- Az ívfolyamat gyorsfilmfelvevővel rögzíthető.

A kísérleti áramkörhöz kiindulási alapot az 5-2. ábra által mutatott elrendezés ad, amelyet a primer ívhez ki kell egészíteni egy - kA-es nagyságrendű - nagy áramú körrel. Az ívképzés módjának különböznie kell az 5.6.1. fejezetben bemutatottól, két okból is: egyrészt az az elrendezés nem alkalmas nagy áramú ívek kialakításra és fenntartására, másrészt a hiteles ívképzés csak állandó ívtalpponti érintkező távolság esetén biztosított.

Ezzel lehetővé válik - primer íves begyújtással - az eltérő névleges feszültségű távvezetékek esetén kialakuló szekunder ív folyamatok széleskörű vizsgálata, beleértve a disszertációban tárgyalt *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívet* is, rögzített és megfelelően dokumentált körülmények között.

A kísérleti áramkörben a változtatható szekunder íváram maximumra és  $U_{csatolt}$ -ra azért van szükség, hogy  $x$  [m] ívtalpponti-érintkező távolságokra az első átütéshez szükséges minimális potenciálkülönbséget ( $U_{min,x}$ ) és a második visszagyújtás számára kellő ionozottságot biztosító első visszagyújtás energiaküszöbét ( $E_{min,x}$ ) pontosítani lehessen. Az utóbbi értéket becsültem meg a 9.2. fejezet végén.

A küszöbértékek ismeretében meg lehet tenni a további lépéseket, amelyek a következőket jelentik:

- A. Döntést igényel, hogy a vizsgált oszlopkonstrukciónál mekkora fázis- és rendszertávolság esetén elegendő az  $U_{csatolt}$  értéke a kritikus első visszagyújtás kialakulásához (lásd. 93. oldal), valamint a 9. fejezetben meghatározott energiák elegendők-e a vizsgált szekunder ív kialakulásához és fenntartásához. Abban az esetben, ha át tudja ütni a potenciálkülönbség a visszamaradt ionfelhőt, de az energia kisebb, mint  $E_{min,x}$  csak egy kis energiájú átütés következik be, de a szekunder ív nem alakul ki.
- B. Az  $U_{min,x}$  ismeretében a 7. fejezetben bemutatott görbék alapján meg lehet határozni azokat a minimális fázis- és rendszertávolságokat a vizsgált oszlopelrendezésekre, amelyeknél még nem alakul ki szekunder ív. Meg lehet határozni, hogy már felépített oszlopkonfigurációk (pl. 7-7. ábra a) része) esetén képes-e az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* kialakulni.
  - a. Amennyiben igen, akkor ezt két módon lehet megakadályozni:
    - az oszlopgeometria megváltoztatásával, vagy
    - a kisebb feszültségű rendszeren elvégzett fáziscserékkel.
  - b. Amennyiben nem, akkor méretcsökkentésre lehet javaslatot tenni az  $U_{min,x}$  és az  $E_{min,x}$  értékének figyelembevételével.
- C. Meg lehet állapítani azt, hogy mely oszlopkonfigurációnál nagy a valószínűsége a szekunder ív kialakulásának és így a sikertelen visszakapcsolásnak.
- D.  $E_{min,x}$  és  $U_{min,x}$  ismerete egy konkrét oszlopkonfigurációnál és  $S_{közös}$ -nél pontosítja az  $A_{DM}$ -nek azt az értékét, amelynél nagyobbat választva az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* kialakulásának valószínűsége gyakorlatilag 0, azaz az  $A_{DM}$  növelésével az  $U_{csatolt}$  értékét le lehet csökkenteni  $U_{min,x}$  alá. Egy konkrét távvezeték esetében, amelyiknél a kisebb feszültségű rendszer teljes hosszán a két rendszer egy oszlopsoron fut ( $S_{közös} = S_{kisebb}$  feszültségű teljes hossz és  $S_{külön} = 0$ ), kialakulhat a szekunder ív. Ha viszont a kisebb feszültségű rendszert az  $U_{min,x}$ ,  $E_{min,x}$  és  $A_{DM}$  értékek alapján megszabott hosszon külön oszlopsoron vezetjük, akkor a szekunder ív miatt bekövetkező sikertelen visszakapcsolások valószínűsége  $\sim 0$  lesz (lásd. 11-1. ábra).



11-1. ábra – Egy vezeték esetén  $A_{DM}$  értékének megváltoztatása

A jelen fejezetben felsorolt kritériumokat kielégítő kísérlet elvégzése nagy számú mérési eredmény összegyűjtését teszi lehetővé. Ezekből kiindulva és az e fejezetben bemutatott megállapításokra alapozva (A-D.) olyan vezeték kiesési időt csökkentő javaslatokat lehet tenni, amelyek a többrendszerű, eltérő névleges feszültségű távvezetékek tervezésekor felhasználhatók.

A mérési eredmények ezen felül kimondottan hasznosak lehetnek a szekunder ív pontos megismerésének és valóság-hű modellezésének szempontjából is. Ez utóbbival mód nyílik nemcsak az eltérő névleges feszültségű, hanem az azonos, igen nagy feszültségű (a kooperációs villamosenergia-rendszer alaphálózatát alkotó) távvezetéseknél is a holtidőt csökkentő és a visszakapcsolások sikerességét növelő eredmények elérésére.

## **12. A kutatási munka eredményeinek összegzése és a további lehetőségek**

A munkám során a többrendszerű, eltérő névleges feszültségű távvezetékek témakörével foglalkoztam, ezen belül elsősorban a szekunder ív alakulásával, így a disszertáció és a tézisek ehhez a tématerülethez kapcsolódnak.

A felállított tézisek közül az I. egy, a szakirodalom által eddig nem tárgyalt, új jelenséget ismertet, amelyet *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív*nek neveztem el. Ez a jelenség a többrendszerű, eltérő névleges feszültségű távvezetékek kisebb feszültségű rendszerének egy- és háromfázisú kikapcsolásánál alakul ki, megnyújtva a szekunder ív fennállási idejét, ezáltal a visszakapcsolás sikertelenségét okozva. A jelenség kialakulásának tényét egyszerűsített, nagyfeszültségű kísérleti áramkörben végzett mérésekkel igazoltam.

A *II. tézist* az alapján állítottam fel, hogy - felhasználva az elvégzett kísérlet során szerzett tapasztalatokat - részletekbe menően (áramköri elemek méretezési elvei, elrendezése, ívbegyűjtési módszerek, mérési kritériumok és megoldások, mért értékek regisztrálása) megterveztem egy repetícióra alkalmas olyan kísérleti áramkört, amely a valóságot jól közelítő módon képezi le az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* létrejöttére és lefolyására hatással lévő folyamatokat. A megtervezett kísérlet elvégzésével pontosabban - az általam elvégzett kísérlettel kapott eredményeknél többet mondóan - lehet választ kapni a felismerés szerinti szekunder ív sajátosságaira.

A *III. tézist* arra alapoztam, hogy a visszakapcsolási holtidőben a távvezetéken maradó áramköri elemek - nem meghatározóan -, de befolyásolják az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ívet*. A tézist igazoló fejezetekben részletesen vizsgálom ezen áramköri elemek hatását. Ide kapcsolódóan ismertetek egy olyan módszert, amellyel a kikapcsolt fázisvezetőkön a vizsgált ívjelenség hatására kialakuló potenciálemelkedés nagysága jó közelítéssel határozható meg.

A *IV. tézis* azon az eredményen alapszik, hogy számításaim szerint az általam vizsgált szekunder ív energiájának alakulása a vezetékhozra vetítve egy adott alakú görbesereggel fedhető le attól függetlenül, hogy az ívelésben érintett vezetéknek mekkora része az a szakasz, amelyen egy oszlopsorra van szerelve a megnövekedett csatolást okozó másik rendszerrel.

A 11. fejezetben olyan eljárást ismertetek, amellyel kapott eredmények alapján csökkenteni lehet a többrendszerű, eltérő névleges feszültségű távvezetékeken a kisebb feszültségű rendszerek kiesési idejét.

A tárgyalt témák csak egy szeletét képviselik a többrendszerű távvezetékekkel kapcsolatban felmerülő lehetséges kérdéseknek, számos más irányzat létezik.

A disszertációban alapvetően az általam vizsgált szekunder ívvel foglalkoztam, azonban megállapítható, hogy a „hagyományosan értelmezett” szekunder ív az eddig nem megszokott névleges feszültségű rendszereken (220 kV és alatta) - a többrendszerű távvezetékek következtében - megjelenve másképpen fog viselkedni. Ennek az az oka, hogy ezeken a rendszereken a vezetékhozak, szigetelőtávolságok kisebbek, így az ív sztochasztikus mozgása is másképpen alakul, mint a „megszokott” nagyobb távolságoknál.

Felmerül a kérdés, hogy ha különböző névleges feszültségű rendszereket helyezünk egy oszlopsorra, akkor az eltérő túlfeszültségvédelmi filozófiák találkozása miképpen fog kihatni a hibrid rendszer üzembiztonságára. Ilyen esetekben ui. a kisebb feszültségű rendszer az eddigieknél magasabb oszlopokra kerül fel, ezért feltehetően mind a visszacsapások, mind a közvetlenül becsapó villámok száma megnő, ami további túlfeszültségvédelmi kérdéseket vet fel. A 9. fejezet végén tettem egy kitekintést erre a területre is, a részletek behatóbb tanulmányozása azonban túlmutat e disszertáció keretein.

Az általam végzett vizsgálatoknál a kisebb feszültségű rendszer csillagpontja közvetlenül földelt, azonban nem minden 120 (110) kV-os rendszer ilyen. Másfajta pl. a németországi kom-

penzálásos csillagpontkezelés esetén az *önfenntartó, holtidőt meghaladó idejű szekunder ív* az általam vizsgálttól eltérően fog viselkedni.

A felsoroltakon kívül még számos olyan terület létezik, amelyet a többrendszerű, eltérő névleges feszültségű rendszerek alkalmazása során kialakuló sajátosságok érintenek. A disszertációm elsősorban elért eredményeim összegzésének szántam, de egyben gondolatébresztőnek és további kutatási lehetőségek kiindulási alapjának is. Ezt célozzák a jelen összegzésben felsorolt, általam nem vizsgált területekre való utalások.

### 13. Irodalomjegyzék

- [1] *Rashkes, V.S.*: "Generalization of the Operation Experiences, Connected with the Efficiency of Single-Phase Reclosing, Experimental Data about the Extinction Time of the Secondary Arc" *Elektricheskie Stancii* 1989. No.3 (oroszul)
- [2] *Haubrich, H.J. G. Hosemann*: "Single Phase Auto-Reclosing in EHV Systems", *CIGRE* 1974 31-03,
- [3] *Anjo, K. et al.*: "Study on Self-Extinction Mechanism of Arc in Long Air Gaps", *JIEE* Vol.88-4, No.955, 1968
- [4] *Scherer, H. N. et al.*: "Single Phase Switching Tests on 765 kV and 750 kV Transmission Lines", *IEEE PAS* 104 No 6, June 1985,
- [5] *Fukunishi, M. et al.*: "Laboratory Study on Dead Time of High Speed Reclosing of 500 kV Systems", *CIGRE* 31-03, 1970/V.
- [6] *A. Balossi, M. Malaguti, P. Ostano*: „Laboratory full-scale tests for the determination of the secondary arc extinction time in high speed reclosing”, *IEEE CESI* May 1966, pp: 366-382
- [7] *R.A. Hedin, F.E. Hammerquist, R.W. Alford*: „Long Line Effects on Single-Pole Operation of a 500 kV Transmission Line”, *IEEE PES* Winter Meeting & Tesla Symposium, New York, January 25-30, 1976, A 76 203-0
- [8] *G. Bán, Gy. Bánfai, L. Prikler*: „Automatic Reclosing of Compact and Uprated Transmission Lines”, Hungarian research Fund Contract No. T026054
- [9] *K.H. Milne*: „Single Pole Reclosing Tests on Long 275 kV Transmission Lines”, *AIEE* Summer General Meeting, Denver Colorado, June 17-22, 1962, pp: 658-661
- [10] *H.N. Scherer, N.N. Beljakov et al.*: „Single phase switching tests on 765 kV and 750 kV transmission lines”, *IEEE Transactions on Apparatus and Systems*, Vol PAS-104, No 6., June 1985
- [11] *E.W. Kimbark*: „Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole Switched EHV Lines by Shunt Reactors”, *IEEE Winter Power Meeting*, New York, March, 1964, pp: 285-290
- [12] *H. A. Petersen, N. V. Dravid*: „A Method for Reducing Dead Time for Single-Pole Reclosing in EHV Transmission”, *IEEE Winter Power Meeting*, New York, April, 1969, pp: 286-292
- [13] *B.R. Shperling, A. Fakheri, B.J. Ware*: „Compensation Scheme for Single-Pole Switching on Untransposed Transmission Lines”, *IEEE PAS* 097 pp. 1421-1429
- [14] *S.J. Balsler, J.R. Eaton, P.C. Krause*: „Single-Pole Switching - A Comparison of Computer Studies with Filed Test Results”, *IEEE PES* Summer Meeting, Vancouver, July 1973 pp: 100-108
- [15] Alternative Transient Program – Rule Book, Canadian/American EMTP Users Group, USA, 1997
- [16] *Dr. Bán Gábor*: Villamosenergiarendszerek elektromágneses tranziensei, könyv, *Műszaki Könyvkiadó*, Budapest, 1986
- [17] *Agrasar, M.; Uriondo, F.; Hernandez, J.R.; Alvarez, R.*: A useful methodology for analyzing distance relays performance during simple and inter-circuit faults in multi-circuit lines, *IEEE Trans and Power Delivery* Vol 12, No.1, 1997 October, pp: 1465-1471
- [18] *Elrefaie, H.B.; Megahed, A.I.*: Fault identification of double-circuit lines, *IEEE Developments Power System Protections* 2001, 17th International Conference, 9-21 April 2001, pp: 287-290
- [19] *Bo, Z.Q.; Dong, X.Z.; Counce, B.R.J.; Millar, R.*: Adaptive Noncommunication protection of double circuit line systems, *IEEE Trans and Power Delivery* Vol 18, Issue 1, 2003 January, pp: 43-49
- [20] *Jongepier, A.G. van der Sluis, L.*: Adaptive distance protection of a double-circuit line, *IEEE Trans and Power Delivery* Vol 8, Issue 2, 1993 April, pp: 651-659
- [21] *Aggarwal, R.K.; Xuan, Q.Y.; Dunn, R.W.; Johns, A.T.; Bennett, A.*: A novel fault classification technique for double-circuit lines based on a combined unsupervised/supervised neural network, *IEEE Trans and Power Delivery* Vol 14, No.4, 1999 October, pp: 1250-1256
- [22] *Aggarwal, R.K.; Song, Y.H.; Johns, A.T.*: Adaptive three-phase autoreclosure for double-circuit transmission systems using neural networks, *Advances in Power System Control, Operation and Management* 1993. APSCOM-93., 2nd International Conference on 7-10 Dec 1993

- [23] Jeong-Boo Kim; Dong-Il Lee; Koo-Yong Shin; Hee-Sung Ahn; Kwang-Ho Yang: Electromagnetic interference from a three phase double circuit 765-kV test line, *IEEE Trans and Power Delivery* Vol 14, No.1, 1999 January, pp: 266-271
- [24] Cecchetti, E.; Noferi, P.L.; Barbarito, M.; Clerici, A.; Paris, L.; Pelacchi, P.: Compact lines for urban areas: a new solution, *Electricity Distribution*, 1989, CIRED 1989, 10th International Conference on 8-12 May 1989, pp: 190-195
- [25] F. Kiessling, D. Hussels, C. Juerdens, J. Ruhnu: Upgrading High-Voltages Lines to Increase Their Capacity and Mitigate Environmental Impacts, *CIGRE Session 1998*, 22-208
- [26] C. Neumann, G. Balzer, M. Hudusch, K. Liebscher : Insulation coordination practice of German utilities, *CIGRE*, Session 1998, 33-102
- [27] Dr.-Ing. Rochus Gröber: Auswirkung des Fehlergeschehens bei unterschiedlicher Sternpunktbehandlung, *ETG-Fachbericht 24*, Sternpunktbehandlung in 10-110-kV-Netzen, 1988, Berlin, pp:20-36
- [28] Dr. Mihákovics Tibor: A szél hatása a nagyfeszültségű szigetelőláncok ívállósági vizsgálatánál, *Elektrotechnika*, 1976/1, oldal: 18-23
- [29] Dr. Bán, G: Single Phase Reclosing EHV Transmission Lines, *Hungarian-Korean Technical Cooperation Center Foundation*, 2001, Keszthely, Hungary, pp: 71-81, ISBN 963 008236 5
- [30] A Hévíz-Tumbri 400 kV-os távvezeték üzembehelyezési mérései, 1999 május
- [31] Vizi László: Üzemi frekvenciájú ívek kialakulása, *PhD értékezés* 1998
- [32] Akram M. Al-Rawi PhD, Moosa Al-Mazeedi, Ph.D: Computation of secondary arc current on double-circuit EHV line employing single-pole switching, *TENCON '89*. Fourth IEEE Region 10 International Conference, pp: 772-777
- [33] R.A.Hedin, F.E. Hammerquist, R.W. Alford: Long Line Effects on Single-Pole Operation of a 500 kV Transmission Line, *IEEE PES Winter Meeting*, New York, January 25-30, 1976
- [34] Szűcs Ervin: Hasonlóság és modell, *Műszaki Könyvkiadó*, Budapest, 1972
- [35] Dr. Bán Gábor: Hálózati hullámjelenségek és modellezésük, *Tankönyvkiadó*, Budapest, 1981
- [36] Dr. Bán Gábor, Prikler László, Dr. Mihákovics Tibor: Közép és nagyfeszültségű hálózatok túlfeszültségvédelme fémoxid túlfeszültséglevezetőkkel, *tanulmány*, Budapest, 1992. március
- [37] ABB EXLIM típusú ZnO-túlfeszültséglevezetői, *ismertető anyag*,
- [38] S. Csida, L.I. Kromer: An improved method for determining line discharge through potential transformers, *IEEE PAS-97*, 1978
- [39] Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete: Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata, Budapest, 2000
- [40] Dr. Bán Gábor: Igen nagy feszültségű hálózatok speciális, elektromágneses tranzienstényezői, *doktori értékezés*, 1980 szeptember
- [41] A Hévíz-Tumbri 400 kV-os távvezeték 2004. május 25-i üzembehelyezési mérései, 2004 május
- [42] MAVIR napi terhelési adatok 2004-ben, MAVIR éves fogyasztási adatok,
- [43] B. Hutzler, J. Gibert: Breakdown Characteristics of Air Insulators Exposed to Short Tailed Lightning Impulses, *IEEE, Vol*, pp: 158-163,
- [44] V.V. Terzija, H.-J. Koglin: New Approach to Arc Resistance Calculation, *IEEE PES Winter Meeting, 2001*, Columbus Vol: 2 pp: 781-787,
- [45] Prikler L., Kizilcay M., Bán G., Handl P.: Improved Secondary Arc Models Based on Identification of Rac Parameters from Staged Fault Test Circuit, *14th PSCC, Sevilla*, Session 24, Papr 3, pp: 1-7,
- [46] Országos Villamostávvezeték Részvénytársaság, Üzemviteli Igazgatóság, Villamos Relévédelmi Osztály, Zárlati statisztikák 400 és 220 kV-on 1999 és 2002 között, *készítette: Handl Péter*,
- [47] Szabó Szilárd: Nagyfeszültségű távvezetékek szekunder ívjelenségeinek vizsgálata számítógépes szimulációval, *diplomamunka*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosművek Tanszék, 2001. május,
- [48] Shperling, B.R., Fakhieri, A.J., Shih, C.H., Ware, B.J.: Analysis of Single Phase Switching Filed Tests on the AEP 765 kV Systems, *IEEE Transactions, Vol. PAS-100, No. 4, 1981*, pp. 1729-1735,
- [49] M. Fukunushi, H. Terasa: Study of Insulator Strings for Reducing Dead Time of High-Speed Reclosing, *JEEE Vol. 91, No.3*, 1971,
- [50] Dr. Tuschák Róbert: Szabályozástechnika, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műegyetemi Kiadó*, 1997, tankönyv

- [51] *Tina™ for Windows 6.01*, Trial Demo Version, DesignSoft, Inc.  
[52] Rogowski tekercs fellelhetősége: <http://www.rocoil.cwc.net/flexible.htm>  
[53] A.M. Zalesszkij: A villamos ív, *Műszaki Könyvkiadó Budapest*, 1968, könyv  
[54] Országos Meteorológiai Intézet, <http://www.met.hu/>

### **13.1 A disszertáció témájához kapcsolódó saját publikációk**

- [55] M. Danyek, P. Handl: Improving the Reliability of Experimental Data about Secondary Arc Duration; *17<sup>th</sup> Hungarian-Korean Joint Seminar, Extra High Voltage Technologies II. Hévíz, Oct 15, 2001. Proceedings of the Seventeenth Hungarian-Korean Seminar pp. 135-145*  
[56] M. Danyek, P. Handl, G. Bán: Experimental Investigation to Predict the Expectable Extinction Time of Secondary Arcing; *IEEE Postgraduate Power Conference in Budapest, Aug 11-14, 2002. Proceedings of the Postgraduate Power Conference (ISBN: 963420725-1) pp. 75-80*  
[57] M. Danyek: Secondary Arc in Multi-Circuit Lines; *IEEE Postgraduate Power Conference in Budapest, Aug 11-14, 2002. Proceedings of the Postgraduate Power Conference (ISBN: 963420725-1) pp. 57-62*  
[58] Danyek Miklós: Szekunder ív többrendszerű távvezetéseken, *Elektrotechnika 2004/97. évfolyam 12. szám 356-358. oldal*,  
[59] DANYEK, Miklós: Arcing Transients on Multi-Circuit Lines, *Periodica Politechnica Electrical Engineering*, megjelenésre elfogadva 2005. áprilisban

### **13.2 Egyéb saját publikációk**

- [60] Danyek Miklós: Transzformátor differenciálvédelmek funkcióvizsgálata, *BME VIK Végzős Konferencia 2000*  
[61] M. Danyek, P. Handl, Gy. Varjú: Measuring and mitigation of magnetic field, stressing protection devices in the environment of 10 kV reactor cells; *Cost Action 261 Workshop on "Protection in complex and distributed systems including railways", Budapest, 3-5 June 2002.*  
[62] Miklós DANYEK, Péter HANDL, Dávid RAISZ: Comparison of Simulation Tools ATP-EMTP and MATLAB-Simulink for Time Domain Power System Transient Studies; *EEUG Meeting 2002. Sopron, Hungary December 9 - 10, 2002, Proceedings of the European EMTP-ATP Conference Paper E - 4.*  
[63] Danyek Miklós, Handl Péter: A Matlab használata villamosenergia-rendszerbeli problémák megoldására (Power System Blockset); *MATLAB (4. rész) Elektronet, 2002/8. szám*  
[64] M. Danyek, F. Gazdag, P. Handl: Protection testing today; *13th International Conference on Power System Protection - PSP 2002. Bled, Slovenia September 25 - 27, 2002. Proceedings of the 13th International Conference on Power System Protection (961-6371-35-5) pp. 173-177*  
[65] M. Danyek, F. Gazdag, P. Handl: Measuring and mitigation of magnetic field, stressing protection devices in the environment of 10 kV reactor cells; *13th International Conference on Power System Protection - PSP 2002. Bled, Slovenia September 25 - 27, 2002. Proceedings of the 13th International Conference on Power System Protection (961-6371-35-5) pp. 211-216*

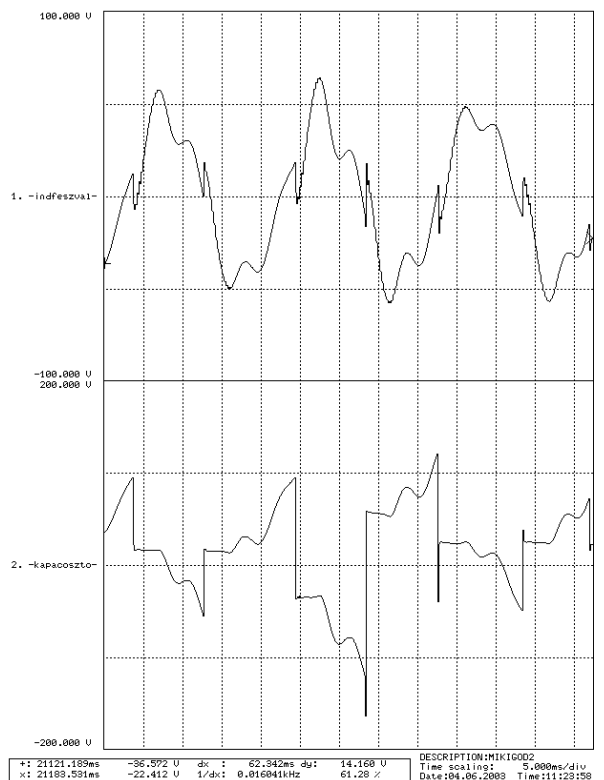
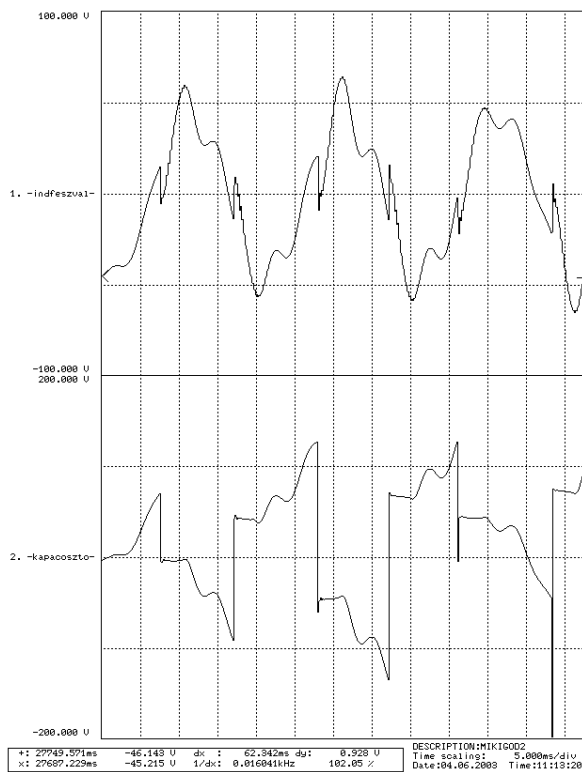
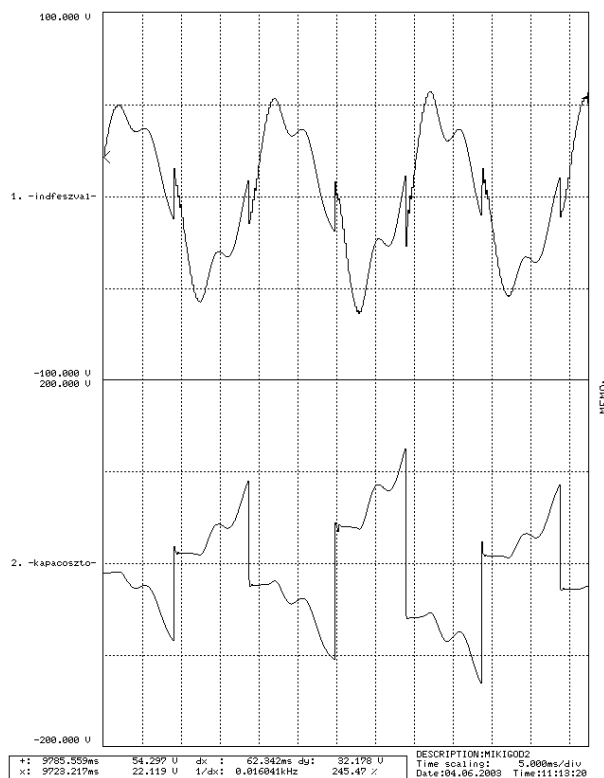
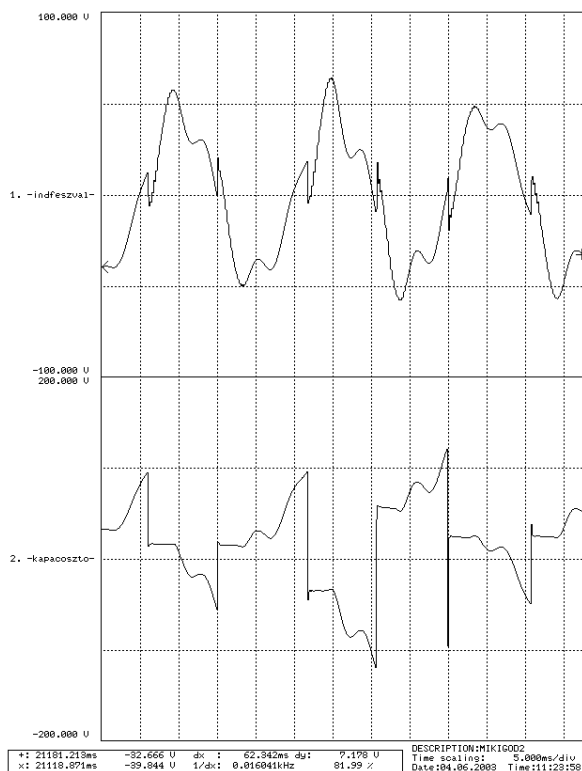
## **14. Melléklet**

1 db CD-ROM, amely a következő videófájlokat tartalmazza:

- *1.avi* = A Göd-i alállomásban első alkalommal elvégzett mérések ívfelvételei.
- *2.avi* = A Göd-i alállomásban második alkalommal elvégzett mérések ívfelvételei.
- *400\_kV\_szekunder\_iv\_1.avi* = A [30] során mért, önmagától nem kialvó szekunder ív.
- *400\_kV\_szekunder\_iv\_2\_lassított.wmv* = A [41] során mért szekunder ívek egyike.

# 15. Függelékek

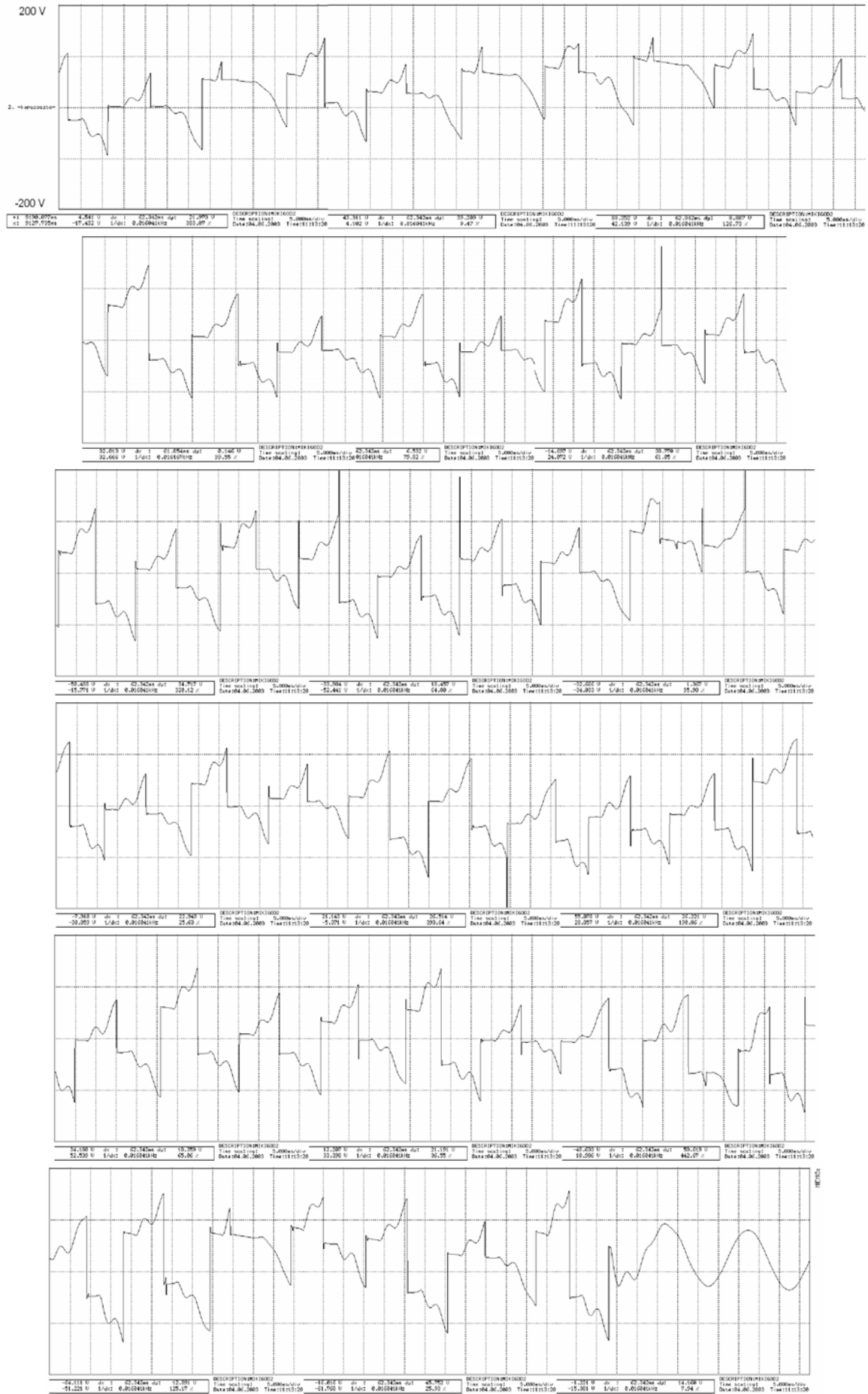
## 1.sz függelék



- indfeszval = az  $U_{ind}$  pont feszültsége a kísérleti áramkörben (lásd. 4-10. ábra, 26. oldal)
- kapacosztzo = az  $U_{Co}$  pont feszültsége a kísérleti áramkörben (lásd. 4-10. ábra, 26. oldal)

**Négy példa a megnövekvő lebegő-pont potenciálra a kísérlet során (kapacosztzo)**

## 2.sz. függelék



▪ Az iv utolsó egy másodperce látható a regisztrátrúrészleten

**A kapacitív osztó feszültsége (lásd. 4-10. ábra) a kísérlet során másodpercekig fennálló íveléskor**