

Söntfojtók áramának megszakítási viszonyai az MVM Rt. és az ELMŰ Rt. hálózatán



Dr. Miháلكovics Tibor, Dr. Papp Gusztáv, Szilágyi Ferenc

Bevezetés

Az MVM Rt. a nagyfeszültségű hálózat kapacitív meddőteljesítményét a 400/132/18 kV-os transzformátorok 75 MVA teljesítményű 18 kV-os kapcsaihoz csatlakozó 50 MVAR teljesítményű vasmagos söntfojtók — az újabb telepítések esetén (Győri Alállomás III. sz. 250 MVA teljesítményű transzformátora) 70 MVAR teljesítményű légmagos söntfojtók — bekapcsolásával kompenzálja. A felmerülő problémák megoldására az ELMŰ Rt. a 220/126/10,5 kV-os, 160 MVA teljesítményű transzformátorok 50 MVA teljesítményű 10,5 kV-os tercier tekereseihez csatlakoztatható söntfojtókat használhat.

Az OVIT Rt. mint az MVM Rt. megbízott üzemeltetője megkezdte az MGU-20/600 típusú, kisolajterű, korszerűtlen, hosszú — 60...80 ms — ívidejű, a nagyszámú visszagyújtás miatt esetenként 45...50 kV-os nagy túlfeszültség mellett megszakító (lásd [8] mérési eredményeit) készülékek cseréjét. A megfelelő korszerű vákuum- vagy SF₆ gázoltású megszakítók kiválasztása azonban a nagy jóságú tényezőjű kompenzáló söntfojtók gyakori kapcsolása, a nagy névleges áram, a megszakításkor fellépő nagy visszazökő feszültség meredekség és az esetleges áramlevágást követő túlfeszültségek miatt a különleges megszakítási körülmények elemzését és ennek alapján megfelelő áramköri elrendezés kialakítását teszi szükségessé. Jelen cikk aktualitását adja az is, hogy hosszú évtizedes vajúdas után a 17A Műszaki Bizottság megjelentette az IEC 1233: A nagyfeszültségű váltakozó áramú megszakítók — induktív terhelések kapcsolása c. szabványt [1].

A következőkben elsősorban [1] irodalomra támaszkodva tárgyaljuk az alapvető fizikai jelenségeket és a Győri Alállomáson beépített [5] és az ELMŰ Rt. állomásain beépítendő [6] kompenzáló söntfojtók esetére végezzük el a számításokat.

1. Zárlati viszonyok a transzformátor 18 kV-os oldalán

A 250/250/75 MVA-es, 400/132/18 kV-os transzformátor 18 kV-os oldala szigetelt csillagponttal üzemel. A mértékadó 3F zárlati áramot a háromtekereselésű transzformátorok csillag egyenértékű helyettesítő kapcsolása alapján határoztuk meg.

Dr. Miháلكovics Tibor: okl. villamosmérnök, a műszaki tud. kandidátusa, az ELMŰ Rt. Vizsgálóállomás vezetője
 Dr. Papp Gusztáv: okl. villamosmérnök, az MVM Rt. HFO szakértője
 Szilágyi Ferenc: okl. villamosmérnök, az ETV ERŐTERV Rt. HBRI szakértője
 Szakmai lektor: Dr. Bán Gábor

A csillagponti szabályozás eredményeként a feszültségek a következők:

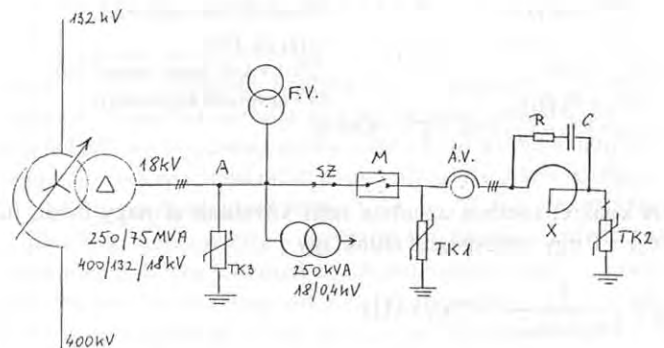
$$\text{szekunder oldal} \begin{cases} 132 \text{ kV} - 11,3\% \\ 132 \text{ kV} \\ 132 \text{ kV} + 10,2\% \end{cases} \quad \text{tercier oldal} \begin{cases} 18 \text{ kV} + 5,55\% \\ 18 \text{ kV} \\ 18 \text{ kV} - 5\% \end{cases}$$

A szélső, ill. középső megcsapolásokra megadott rövidzárlási feszültségek, valamint a mögöttes impedanciák ismeretében elvégzett számítások alapján a legnagyobb zárlati áram a 18 kV – 5%-hoz tartozó fokozatállásban 34 kA-re adódott.

2. Megszakító igénybevétele

2.1. Üzemi áram megszakításakor fellépő visszazökő feszültség (VSF)

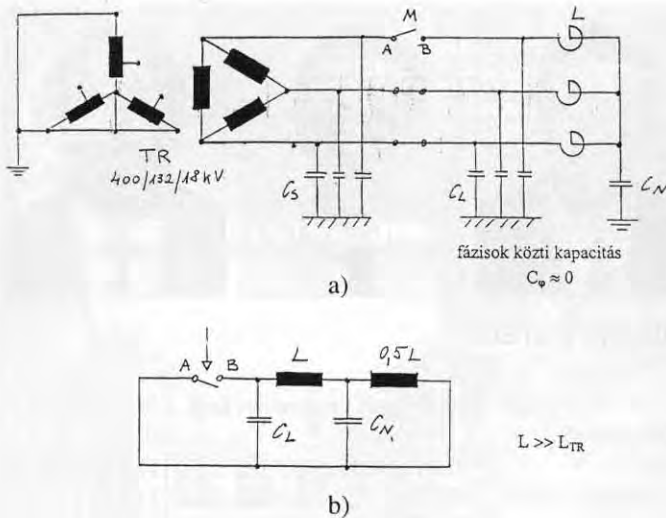
A Győri Alállomás 250 MVA-es, III sz. 400/132/18 kV-os transzformátorának 18 kV-os kapcsaihoz csatlakozó $I = 2500 \text{ A}$ névleges áramú, $X = 4,57 \text{ ohm/f}$ impedanciájú, tehát 18 kV-on ténylegesen $Q = 70,9 \text{ MVAR}$ teljesítményű kompenzáló söntfojtó áramkörét az 1. ábra mutatja. Mint nehezebb esetet, az először megszakító pólus esetét vizsgáljuk.



1. ábra. Győri Alállomás 18 kV-os kompenzáló fojtótekerésének kapcsolása

Tekintettel arra, hogy az $I_z \approx 34 \text{ kA}$ zárlati áramnak megfelelő $X_s \approx 0,306 \text{ ohm/f}$ tápoldali impedancia elhanyagolható a kompenzáló fojtótekeres $X = 4,57 \text{ ohm/f}$ impedanciája mellett, az először megszakító pólus VSF-e a 2. ábrából számítható. A fojtótekeres önkapacitását a gyárban mért $f = 52 \text{ kHz}$ önrezgésből számoltuk. A számításoknál figyelembe vettük a megszakító és fojtótekeres közötti áramköri elemek (áramváltó, szakaszoló, vezeték) földkapacitásait is. A légmagos tekercek egymás melletti elhelyezése miatt a fázisok közti kapacitás kicsiny, azt elhanyagoljuk, $C\varphi \approx 0$.

A 2a ábra átalakításával a 2b ábra adódik. Az áramkör két frekvenciás, az eredő VSF [3] alapján pontosan is számítható.



2. ábra. Helyettesítő áramkör a VSF számításához
a) fázisok közötti kapacitás $C_{\varphi} \approx 0$; b) $L \gg L_{TR}$

A [2] 3.2.3 pontjában bemutatott Bewley-féle helyettesítéssel:

TERHELÉSI OLDAL:

- $C_N = 3 \cdot 0,5 C_f = 1,929 \text{ nF}$;
- $C_{AV} = 400 \text{ pF/f}$ (áramváltó kapacitása, l. [2] 10. Tábl.);
- $C_{SZ} = 100 \text{ pF/f}$ (szakaszoló kapacitása, l. [1] B2. Tábl.);
- $C_V = 70 \text{ pF/f}$ (7 m vezeték kapacitása);
- $C_r^* = 0,5 C_f = 1/4 \Pi^2 f^2 L = 643 \text{ pF}$ (ahol $f = 52 \text{ kHz}$,
 $L = 14,55 \text{ mH}$);
- $C_L = 0,5 C_f + C_{AV} + C_{SZ} + C_V = 1,213 \text{ nF}$

TÁPOLDAL:

- $C_{TR} = 7,2 \text{ nF/f}$ (l. [2] 7. Tábl.);
- $C_{FV} = 400 \text{ pF/f}$ (feszültségváltó kapacitása,
l. [2] 10. Tábl.);
- $C_{tr} = 1 \text{ nF/f}$ (250 kVA-es transz. kapacitása);
- $C'_v = 85 \text{ pF/f}$ (8,5 m vezeték kapacitása);
- $C_S = C_{TR} + C_{FV} + C_{tr} + C'_v = 8,68 \text{ nF}$

A konkrét esetben azonban nem követünk el nagy hibát, ha $C_N = 0$ egyszerűsítéssel élünk, így

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,5LC_L}} = 30,95 \text{ kHz}$$

A VSF meredeksége:

$$m = \frac{U_C}{t_3} = \frac{\gamma 1,5U \sqrt{2/3}}{0,85/2f} = \frac{41,9 \text{ kV}}{13,7 \mu\text{s}} = 3,06 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

(A kis ellenállású fojtó — $\cos\varphi \approx 0,004$ — esetén $\gamma \approx 1,9$)

Az U_c és t_3 értékek meglepően jól egyeznek [1] 2. táblázatának 2. sorában adott 17,5 kV-os névleges feszültségű megszakító vizsgálatánál beállítandó paraméterekkel.

A beépítendő megszakító típusát, ill. gyártóját versenyeztetéssel határozták meg, a szakértői értekezlet az előzetesen megajánlott 4 típusból az LTB D1 72,5 kV-os névleges feszültségű, szabadterei típust választotta a következő indokok alapján: — a hasonló típusú, de 145 kV névleges feszültségű SF6 gázoltású, rugóerőtárolós hajtású megszakítókból az OVIT

Rt. már kb. 50 egységet épített be, így ezekkel megfelelő üzemi tapasztalata van;

- Az $I_n = 3150 \text{ A}$ névleges áramú készülék választását a hosszabb — a névleges áramon garantált 5000 kapcsolás — villamos élettartam indokolja. Ez közel 10 éves karbantartásmentes üzemet tesz lehetővé.

A 72,5 kV-os megszakító 10%-os kapocszárlati próbájánál — tehát $I = 4 \text{ kA}$ megszakítása esetén — az előírt VSF meredeksége [4] alapján $m = 3,7 \text{ kV}/\mu\text{s}$ (a 24 kV-os megszakítónál csak $m' = 2,32 \text{ kV}/\mu\text{s}$), tehát az előírt típusvizsgálatait sikerrel teljesítő megszakító működése — ha az esetleges áramlevágást követő VSF amplitúdó-, így meredekségnövekedéstől eltekintünk — biztonságos.

Az ELMŰ Rt. hálózatán, a 160 MVA-es transzformátor 10,5 kV-os kapcsain elhelyezhető $X_E \approx 2,213 \text{ ohm/f}$ impedanciájú légmagos söntfojtóra elvégzett számítások szerint [6]:

$$I_{ZE} \approx 30,2 \text{ kA}; X_{SE} \approx 0,201 \text{ ohm/f}; f_E = 46,7 \text{ kHz};$$

$$m_E = 2,54 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

A beépítendő 12 kV/40 kA-es megszakító 10%-os kapocszárlati próbájánál — tehát 4 kA megszakítása esetén — az előírt VSF meredeksége [4] alapján $m = 1,7 \text{ kV}/\mu\text{s}$, tehát nem garantált a $m_E > m$ melletti biztonságos megszakítás, még ha az esetleges áramlevágás okozta VSF amplitúdó-, így meredekségnövekedéstől is tekintünk. A terhelésoldali VSF meredekségének csökkentése a söntfojtóval párhuzamosan kapcsolt kondenzátorral érhető el, ez egyben hatásosan csökkenti az áramlevágáskor keletkező túlfeszültséget is (l. 3. fejezet).

2.2. A megszakító zárlati megszakítóképessége

A győri 250 MVA-es transzformátor 18 kV-os oldalán beépített 72,5 kV-os típus névleges megszakítóképessége $I_n = 40 \text{ kA}$, tehát alkalmas az $I_Z \approx 34 \text{ kA}$ zárlati áram megszakítására. Mivel a transzformátor önkapacitása $C_{TR} \approx 7,2 \text{ nF/f}$ (lásd [2] 7. táblázatában) és a járulékos áramköri elemekkel (háziüzemi trf., feszültségváltó, sínezés) számolt eredő „egyenértékű” kapacitás $C_S \approx 8,68 \text{ nF/f}$ (lásd 2. ábrát), az először megszakító pólus VSF frekvenciája:

$$f_{TR} = 1/2 \pi \sqrt{1,5L_S 2C_S/3} \approx 55 \text{ kHz}, \text{ így a VSF meredeksége}$$

$$m_{TR} \approx 4,3 \text{ kV}/\mu\text{s}.$$

Az $I_n = 40 \text{ kA}$ kapocszárlati vizsgálat esetén előírt szabványos $m' = 2 \text{ kV}/\mu\text{s}$ VSF meredekség nem garantálja a megszakító üzembiztos zárlati lekapcsolását. A megszakítón elvégzett 30 kA-es, 75%-os kistávolságú zárlati megszakítóképesség esetén azonban a szabványos, fűrészfém alakú VSF első csúcának amplitúdója $u_T = 27 \text{ kV}$, meredeksége $m_{L75} = 6,5 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Mivel a 18 kV-os áramkörben, a 34 kA zárlati áram megszakításakor várható $U_{CS} = 1,5 \cdot 1,5 \cdot 18 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3} = 33 \text{ kV}$ VSF amplitúdónál nagyobb amplitúdójú VSF-el történt a beépített megszakító próbaállomási vizsgálata, ez üzembiztos lekapcsolást garantál.

Tekintettel arra, hogy a megszakító fojtó felőli oldalán fellépő zárlat igen kis valószínűségű, ezért a szakértők a konkrét beépítési helyen ennek a nagyfeszültségű oldalon való lekapcsolását határozták el, így a választott megszakító — bár

járlékos kondenzátor beépítése nélkül is képes rá — zárlati áramot nem szakít meg.

AZ ELMŰ Rt. hálózatán a 160 MVA-es transzformátor 10,5 kV-os kapcsain a zárlati áram $I_{ZE} \approx 30,2$ kA, ehhez $I_n = 40$ kA névleges megszakítóképeségű készüléket választunk. Az elvégzett számítás eredményei [6] alapján:

$$C_{TRE} \approx 4,43 \text{ nF/f}; C_{SE} \approx 5,91 \text{ nF/f}; f_{TRE} = 81,8 \text{ kHz}; m_{TRE} = 3,71 \text{ kV}/\mu\text{s}.$$

Mivel a 12 kV-os megszakító típusvizsgálata $I = 40$ kA esetén (100%) $m_{100} = 0,34 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $I = 24$ kA esetén (60%) $m_{60} = 0,85 \text{ kV}/\mu\text{s}$ VSF meredekség mellett történik, a megszakító működése nem biztonságos, így a 2. és 11. ábra A pontjában VSF szabályozó kondenzátor beépítése szükséges. Az ELMŰ Rt.-nél használt 22 kV névleges feszültségű, $C_1 = 250 \text{ nF/f}$ kapacitású kondenzátor beépítésével a VSF frekvenciája és meredeksége erősen lecsökken, így a megszakító működése üzembiztosá válik:

$$f'_{TRE} = 12,43 \text{ kHz} \quad m'_{TRE} = 0,564 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

A 100% és 60%-os névleges megszakítóképeség vizsgálathoz tartozó szabványos VSF meredekségek lineáris interpolációjával az $I_{ZE} = 30,2$ kA zárlati áramhoz tartozó „szabványos” meredekség $m = 0,652 \text{ kV}/\mu\text{s} > m_{TRE}$.

2.3. Induktív terhelési áram megszakítási viszonyainak elemzése

2.3.1. Bevezetés, nemzetközi helyzet

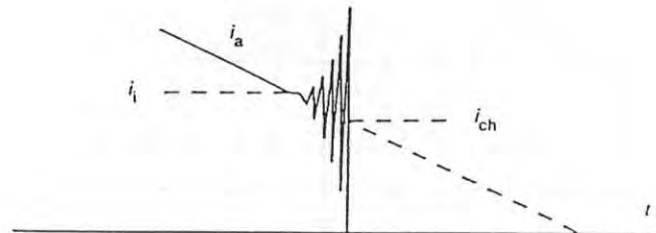
Az induktív terhelési áramok (transzformátor mágnesező árama, nagyfeszültségű motorok áramai, söntfojtók áramai) megszakítása bonyolult jelenség: a vizsgált megszakítón és a lekapcsolt induktivitáson, annak földelési módján kívül a konkrét geometriai kialakítás (bekötő vezeték induktivitása, kapacitása; járulékos elemek: áramváltók, szakaszolók, feszültségváltók stb. kapacitásai) is befolyásolja a megszakítási jelenségeket. Ez a magyarázata annak, hogy bár a megszakítók vizsgálatait részletesen előíró IEC 56 szabvány évtizedek óta létezik, sőt annak 4. — a műszaki és mérés-technikai fejlődésnek megfelelően továbbfejlesztett — kiadása is már 9 éves [4], az induktív terhelési áramok megszakítási vizsgálatait összefoglaló szabványelőírást [1] csak 1994-ben adták ki. Végül ez magyarázza azt is, hogy általában azok a gyártó cégek sem rendelkeznek induktív terhelés megszakítási vizsgálati eredményekkel, amelyek a kapcsolási-, kistávolságú zárlati-, fázisopozíciós- és kapacitív áramú megszakítóképeség IEC szerinti vizsgálatait elvégezték, vagy ha vannak is ilyen vizsgálatok, azok egy konkrét beépítési esetre nehezen adaptálhatók.

Mivel egy részletes vizsgálat költsége meghaladja a beépítendő megszakító árát, a jelenségek fizikájának ismeretében célszerű járulékos áramköri elemek beépítésével olyan körülményeket teremteni, amely az esetleges áramlevágás okozta túlfeszültségeket lecsökkenti és lehetővé teszi az általában hiányzó induktív terhelési megszakítási vizsgálatok helyett a mindig rendelkezésre álló 10%-os kapcsolási vizsgálatok jegyzőkönyveinek használatát (ezt a 3. fejezetben tárgyaljuk részletesen).

2.3.2. Áramlevágás jelensége, túlfeszültségek számítása

A következőkben elsősorban az [1] irodalomra támaszkodva összefoglaljuk az alapvető fizikai jelenségeket, és a Győri Alállomás és egy ELMŰ Rt. állomás paramétereivel élvezzük a számításokat.

Az induktív terhelési áram megszakítása általában nem okoz nehézséget a megszakító számára, gyakran előfordul azonban a nullához közeledő áram természetes nullaátmenet előtti megszakítása, ezt a jelenséget *áramlevágásnak* nevezzük (current chopping). Az erőteljes ívoltás hatására az ív az áram nullaátmenete közelében labilissá válik, ez a terhelési áramra szuperponálódó negatív csillapodású áramlengés formájában jelentkezik. A rezgés amplitúdója gyorsan nő, amelynek eredményeként az üzemi frekvenciájú áram természetes nullaátmenete előtt az áram nullára csökken, itt a megszakító rendszerint megszakít. A rezgés frekvenciája olyan nagy, hogy az áramlevágást gyakorlati szempontból pillanatszerűnek tekinthetjük. A jelenséget a 3. ábra teszi szemléletessé.



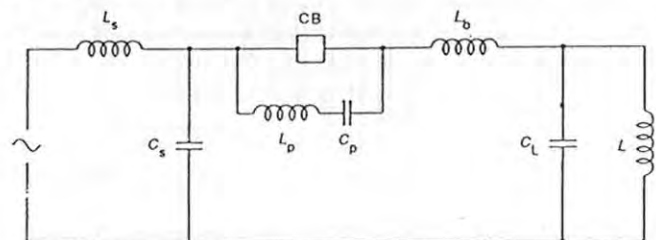
Természetes áram nullaátmenet

3. ábra. Áramlevágáshoz vezető negatív csillapítású rezgés i_a megszakítón átfolyó áram; i_i instabilitási áram; i_{ch} levágott áram értéke

Az ív áram megszűnésekor az áramkör induktivitásaiban tárolt $i_{ch}^2 L/2$ mágneses energia $U^2 C/2$ kapacitív energiává alakul át, amelynek során a viszonylag nagy induktivitás és a fojtótekerics (pontosabban a megszakító fojtó felőli oldalán lévő áramkör) kis kapacitása miatt nagy túlfeszültség keletkezhet.

Az i_{ch} levágott áram értékét az egyfázisú áramkörben lefolytatott megszakítási vizsgálatokból meghatározható, az adott megszakítóra jellemző λ „áramlevágási szám” („chopping number”), és a megszakítóval párhuzamos C_1 „egyenértékű” kapacitás határozza meg az (1) egyenlet szerint (1. [1] E Függelékét):

$$i_{ch} = \lambda \sqrt{C_1} \tag{1}$$



4. ábra. Egyenértékű egyfázisú áramkör L_s tápoldali induktivitás; C_s egyenértékű tápoldali kapacitás; C_p megszakító kapacitása; L_{b1}, L_{b2} bekötések induktivitása; L söntfojtó induktivitása; C_L terhelési oldal egyenértékű kapacitása; CB megszakító

A 4. ábra egyfázisú áramkörében

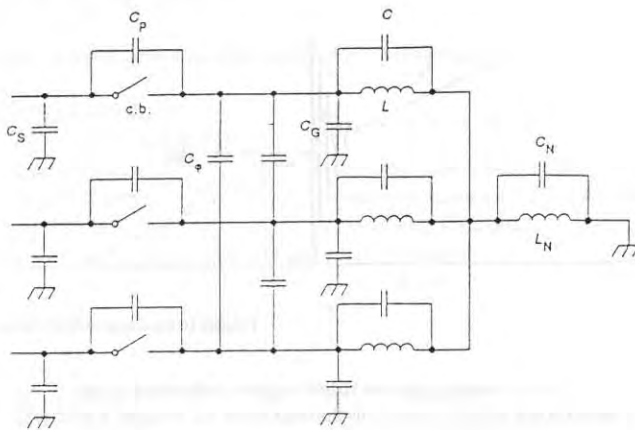
$$C_t = C_p + \frac{C_s \cdot C_L}{C_s + C_L} \quad (1a)$$

$C_p \approx 30...70$ pF (a vizsgált megszakítónak nincs vezérlő kondenzátora), így elhanyagoljuk.

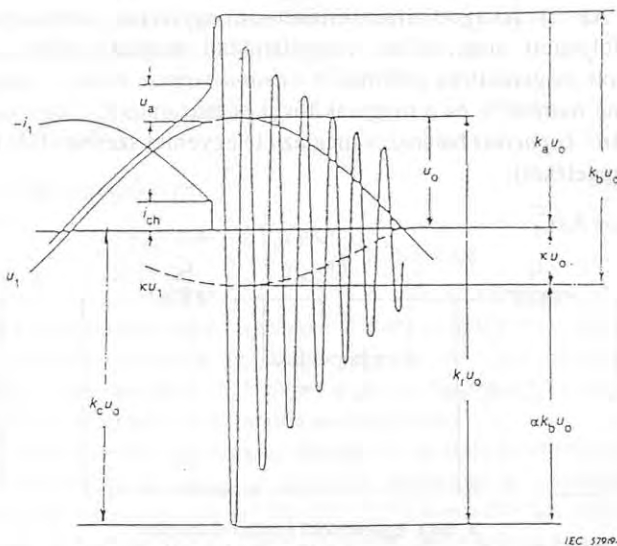
A megszakítóra (de a vákuummegszakítókra nem) jellemző, a kapacitástól független λ áramlevágási számot — főleg közép feszültségű megszakítók esetén — a gyártók többsége nem tudja megadni, ilyen esetben az [1] alapján összefoglalt következő értékek használhatók:

- olajszegény megszakítók $7...10 \cdot 10^4 \text{ AF}^{-1/2}$
- légmegszakítók $15...25 \cdot 10^4 \text{ AF}^{-1/2}$
- SF₆ megszakítók $4...17 \cdot 10^4 \text{ AF}^{-1/2}$

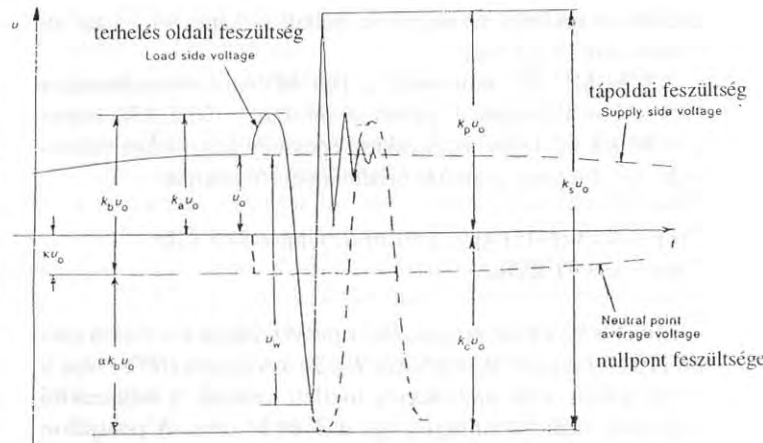
Megoldás lehet az is, hogy a levágott áram értékéből indulunk ki. Az irodalom puffer típusú, SF₆ gázoltású megszakítók esetén rendszerint $i_{ch} = 5...10$ A, egyes esetekben 20 A levágott áramról számol be.



5. ábra. Söntfójtók áramköre
 $L \gg L_s; C_\varphi = C_\varphi + C/3$



6. ábra. Először megszakító pólus VSF-e szigetelt csillagpontú rendszerben



7. ábra. Tranzien feszültségek a megszakító visszagyújtásakor

A K_a, K_b, K_c, K_r, K_p és K_s túlfeszültség-tényezőket a fázisfeszültség U_0 csúcsertékeire vonatkoztatott relatív egységben adjuk meg. A különböző tényezők jelentését az 5., 6. és 7. ábrák teszik szemléletessé [1], ezeknél a valóságos viszonyoknak megfelelő $L \gg L_s$ feltételezéssel éltünk.

Mivel a Győri Alállomás 18 kV-os feszültségű hálózat, és az ELMŰ Rt. állomásait tápláló 160 MVA-es transzformátorok 10,5 kV-os oldala nem földelt csillagpontú, az először megszakító pólus nagyobb igénybevételt jelentő esetére végezzük el a számításokat, figyelembe véve a nullpont megszakításkor fellépő KU_0 eltolódását, ahol

$$K = L_N / (L + 2L_N) = 0,5.$$

Esetünkben ugyanis nincs csillagponti fojtó, tehát $L_N = \infty$.

Az [1] C5 egyenletével meghatározható a KU_0 feszültséggel eltolódott nullpont körül VSF frekvenciával lengő fojtóoldali feszültség relatív amplitúdója:

$$K_b = \sqrt{\left(1 + K + \frac{U_a}{U_0}\right)^2 + \frac{i_{ch}^2 L(1+K)}{U_0^2 C_L}}, \quad (2)$$

ahol $C_L = C_G + 2C_\varphi$ (1. a 2. és 5. ábrákon);
 C_G a söntfójtó és a megszakítóig terjedő bekötésre csatlakozó elemek eredő egyenértékű földkapacitása;
 C_φ fázisok közötti kapacitás (rendszerint elhanyagolható);
 C_s a megszakító táploldali áramkörének eredő egyenértékű földkapacitása (1. a 2. és 5. ábrákon);
 $U_a = 4$ kV ívfeszültség a megszakítás előtt. Ennek értékét SF₆ gázoltású puffer típusú megszakítók $I = 4$ kA-es megszakítási oszcillogramjaiból értékeltük ki.

A gyártó az áramlevágási számra a következő összefüggést adta meg:

$$\lambda = (500 \cdot t_{iv} + 3) \cdot 10^4 \text{ [AF}^{-1/2}\text{]}, \text{ ahol } \{t_{iv} \text{ s-ban}\}$$

A helyszíni ellenőrző mérések alkalmával csak két — 2a ábra szerinti, tehát — járulékos kondenzátor nélküli megszakításra került sor, az először megszakító pólusok mért ívidői 7 ms és 8 ms voltak [7]. Az igen kis számú kapcsolás miatt valószínű az ennél nagyobb ívidők fellépése. A 2. ábra kapacitásaival 8 ms ívidőre az (1) képlettel $i_{ch} = 2,3$ A adódik. Az $i_{ch} = 2,3$ A; 5 A;

10 A és 20 A levágott áramok értékére elvégzett számításokat az 1. táblázatban foglaltuk össze. A nagyobb áramokra végzett számítást az indokolja, hogy a 18 kV-os feszültség szinten elképzelhető olcsóbb 24 kV-os megszakítók beépítése is, ezekre pedig nem biztos, hogy a gyártó meg tudja adni λ értékét. Másrészt ez lehetővé teszi a járulékos kondenzátor beépítésével elért túlfeszültség-csökkenés igazolását.

1. táblázat.

Az i_{ch} áram levágása esetén fellépő túlfeszültségek

Sor-szám	i_{ch} , A	2,3	5	10	20	5	10	20
1.	K_b	1,89	2,28	3,39	6,04	2,42	3,96	7,41
	U_0K_b , kV	27,8	33,5	49,8	88,8	20,8	34,0	63,5
2.	K_a	1,39	1,78	2,89	5,54	1,92	3,46	6,91
	U_0K_a , kV	20,4	26,2	42,5	81,4	16,5	29,7	59,2
3.	K_c	2,39	2,78	3,89	6,54	2,92	4,46	7,91
	U_0K_c , kV	35,1	40,9	57,2	96,1	25,0	38,2	67,8
4.	K_r	3,39	3,78	4,89	7,54	3,92	5,46	8,91
	U_0K_r , kV	49,8	55,6	71,9	110,8	33,6	46,8	76,4
5.	K_p	2,07	2,2	2,55	3,38	2,96	3,73	5,45
	U_0K_p , kV	30,4	32,3	37,5	49,7	25,4	32,0	46,7
6.	K_s	4,46	4,98	6,44	9,92	5,88	8,19	13,36
	U_0K_s , kV	65,6	73,2	94,7	145,8	50,4	70,2	114,5
A söntfojtók adatai		Győri 18 kV söntfojtó $U_a = 4$ kV $U_0 = \sqrt{2} \cdot 18 / \sqrt{3}$ kV $C_L = 1,213$ nF; $C_S = 8,68$ nF $\alpha = 1$; $\beta = 0,5$			ELMŰ 10,5 kV söntfojtó $U_a = 1$ kV $U_{0E} = \sqrt{2} \cdot 10,5 / \sqrt{3}$ kV $C_{LE} = 1,1$ nF; $C_{SE}^* = C_{SE} + C_1 = 256$ nF $\alpha = 1$; $\beta = 0,5$			

A négyzetgyök alatti kifejezés második — esetenként nagyobb — tagja a már említett áramlevágásból eredő mágneses energia kapacitív energiává való átalakulásakor keletkező túlfeszültség relatív amplitúdóját jellemzi.

A 6. ábrából láthatóan a megszakító fojtóoldal B pontján lévő rezgés földhöz képest első amplitúdója (suppression peak — „elfojtási” csúcs):

$$K_a = K_b - K = K_b - 0,5 \tag{3}$$

A VSF-csúcs földhöz képest mért amplitúdója:

$$K_c = \alpha \cdot K_b + K \tag{4a}$$

Figyelembe véve, hogy a kis ellenállású ($R/X \approx 0,004$) fojtók rezgésének csillapodása kicsiny, $\alpha \approx 1$, $K = 0,5$ értéket behelyettesítve:

$$K_c = K_b + 0,5 = K_a + 1 \tag{4b}$$

K_b , K_a és K_c értékeit az 1. táblázat tartalmazza. Látható, hogy a 10 A levágott áram esetén fellépő, még elfogadható U_0K_a és U_0K_c túlfeszültségek értéke már 20 A esetén megengedhetetlenül nagy.

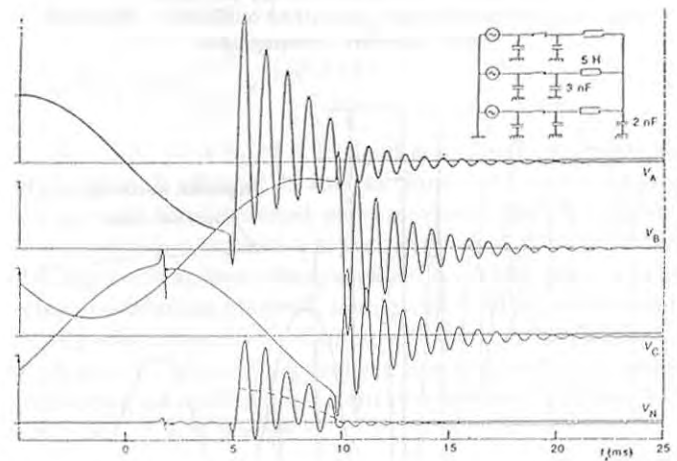
A megszakító nyitott érintkezői között megjelenő feszültség csúcsértéke K_r , ennek számított értékeit az 1. táblázat 4. sora mutatja:

$$K_r = K_c + 1 = K_b + 1,5 \tag{5}$$

Az ELMŰ Rt. hálózatára elvégzett számítások eredményeit [6] alapján az 1. táblázat jobboldali fele mutatja. Mivel a beépítendő 40 kA-es megszakító az $I_{ZE} = 30,2$ kA zárlati áramot a nagy $m_{TRE} = 3,71$ kV/ μ s VSF meredekség miatt csak a meredekséget csökkentő, a 160 MVA-es transzformátorra értelemszerűen vonatkozó 2. vagy 11. ábra A pontjában elhelyezett $C_1 = 250$ nF/f értékű kondenzátor esetén tudja biztosan megszakítani, a számításoknál a következő értékeket használtuk:

$$U_{0E} = 8,57$$
 kV; $U_a = 1$ kV; $C_{LE} = 1,1$ nF;
 $C_{SE}^* = C_{SE} + C_1 \approx 256$ nF

Egy földetlen csillagpontú kompenzáló fojtótekercs kikapcsolásakor fellépő fázisfeszültségeket és a csillagpont feszültségét [1] alapján a 8. ábrán mutatjuk be.



8. ábra. Fázisfeszültségek és a csillagponti feszültség alakulása szigetelt csillagpontú söntfojtók esetén

2.3.3. Túlfeszültségek számítása a megszakító visszagyújtása esetén

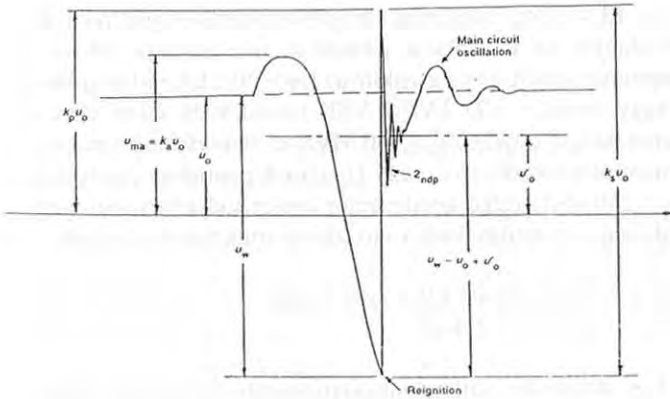
Egy megszakító visszagyújtása — különleges eljárások, így a vezérelt kikapcsolás alkalmazása nélkül — gyakorlatilag elkerülhetetlen, törvényszerű jelenség. Ennek oka az, hogy ha a KI-impulzust követően az érintkezők szétválása az áram nullaátmenete előtt 1...3 ms-mal következik be, az áram nullaátmenete után nagy meredekséggel visszatér, nagy amplitúdójú VSF-et (l. 1. táblázat 4. sorát) a kis érintkezőtávolság ($d \approx 3$ ms \cdot 5 m/s = 15 mm; 3 ms ívidő esetén) nem állja, visszagyújtás következik be.

Visszagyújtás alkalmával a C_L és C_S kondenzátorok feszültsége a 4. ábra $L_b = L_{b1} + L_{b2}$ inuktivitásán keresztül kiegyenlítődik, a visszagyújtás rezgésének, az ún. „második paralell” rezgésnek (second paralell oscillation) a frekvenciája:

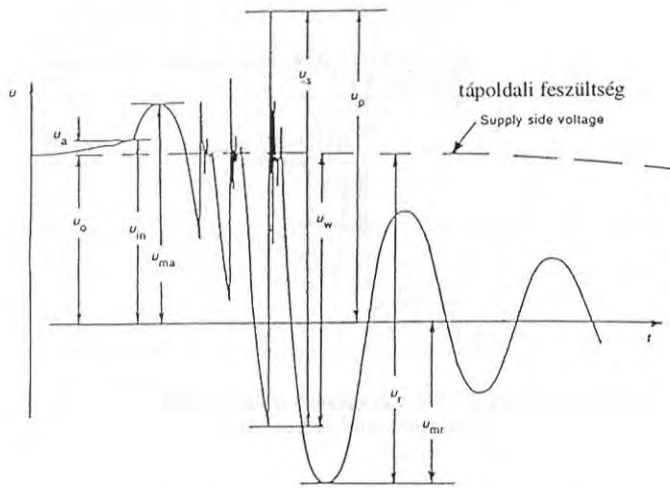
$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_L + C_S}{L_b \cdot C_L \cdot C_S}} \tag{6}$$

Ennek frekvenciája 15 m — fojtó és transzformátor közti — távolságot feltételezve ($L_b \approx 15$ μ H): 1,26 MHz.

A visszagyújtást követő viszonyokat, a második paralell rezgést egyfázisú áramkörben a 9. ábra mutatja, a 10. ábra többszörös visszagyújtás esetére mutat jellemző oszcillogra-



9. ábra. Tranziens feszültségek alakulása egyfázisú áramkörben U_w feszültségértéknél történő visszagyújtás esetén
 2_{ndp} — második parallel rezgés; main circuit oscillation — főáramkörü rezgés; reignition — visszagyújtás



10. ábra. Többszörös visszagyújtás egyfázisú áramkörben

mot. Mint látható — az egyre növekvő érintkezők közti távolságnak megfelelően — a 3. visszagyújtás után válik csak a megszakítás sikeressé.

Először az egyfázisú (a nagyfeszültségű földelt csillagpontú hálózatra közvetlenül csatlakozó kompenzáló fojtótekerces csillagpontja földelt, így ezek egyfázisú áramkörben vizsgálható) áramkörben lejátszódó viszonyokat elemezzük, majd az eredményeket extrapoláljuk a bennünket érdeklő szigetelt csillagpontú fojtók esetére.

A 4. és 9. ábra jelöléseivel a megszakító U_w feszültségénél bekövetkező visszagyújtás esetén a C_L és C_S közti töltésáramlás eredményeként kialakuló $U'_0 < U_0$ feszültség a második parallel rezgések tengelye:

$$U'_0 = U_0 - \frac{C_L}{C_L + C_S} U_w \quad (7)$$

A földhöz képest mért túlfeszültség:

$$K_p' = 1 + \frac{U_w}{U_0} \frac{\beta C_S - C_L}{C_S + C_L} \quad (8a)$$

ahol $\beta \approx 0,5$ a második parallel rezgés csillapítási tényezője. A viszonylag erős csillapodás a nagy frekvencián (rendszerint 100...1000 kHz) fellépő erős szkinhatással magyarázható.

A legnagyobb feszültség akkor adódik, ha a visszagyújtás a VSF csúcsában, tehát $U_w = U_0(K_a + 1)$ értéknél következik be, ekkor

$$K_p = (1 + K_a)(1 + \beta) \frac{C_S}{C_S + C_L} - K_a \quad (8b)$$

A visszagyújtáskor keletkező transziens feszültség csúcstól-csúcsig mért értéke a 9. ábra alapján:

$$K_s = (1 + \beta)(1 + K_a) \frac{C_S}{C_S + C_L} \quad (9)$$

A (7), (8a), (8b) egyenletek levezetését az [5] 1. Függeléke tartalmazza, erre támaszkodva vezettük le a szigetelt csillagpontú fojtók esetére érvényes képleteket:

$$U'_0 = U_0 - \frac{C_L}{C_L + C_S} U_w \quad (10)$$

A földhöz képest mért túlfeszültség:

$$K_p' = 1 + \frac{U_w}{U_0} \frac{\beta C_S - C_L}{C_S + C_L} \quad (11a)$$

A legnagyobb feszültség akkor adódik, amikor a megszakító visszagyújtása a VSF csúcsánál, tehát $U_w = U_0 (1 + K_c)$ értéknél következik be, ekkor

$$K_p = (1 + \beta)(1 + K_c) \frac{C_S}{C_S + C_L} - K_c \quad (11b)$$

A visszagyújtáskor keletkező transziens feszültség csúcstól-csúcsig mért értéke:

$$K_s = (1 + \beta)(1 + K_c) \frac{C_S}{C_S + C_L} = K_p + K_c \quad (12)$$

A Győri Alállomás és az ELMŰ Rt. hálózati eseteire a (11b) és (12) képlettel számolt értékeket az 1. táblázat 5. és 6. sorában foglaltuk össze.

A megszakító visszagyújtásakor bekövetkező feszültséglejtés az állomás kialakításától függő meredek homlokú transziens okoz (a homlokidő 0,1...1 μ s nagyságrendű), amely az egyenlőtlen feszültségmegoszlás miatt a fojtótekerces első meleteire (és a soros áramkörben lévő egyéb elemekre) veszélyes lehet.

A nagyértékű védendő berendezések (transzformátor, kompenzáló fojtótekerces) sarkain, annak közvetlen közelében elhelyezett korszerű fém-oxid-korlátozókkal a túlfeszültségek okozta igénybevételek lényegesen csökkenthetők. Ezt a 4. fejezetben tárgyaljuk részletesen.

A rövid ívidejű, SF₆ gázoltású és vákuummegszakítók esetében a megszakítás után az érintkezők közötti villamos szilárdság gyorsan növekszik, így csak az először megszakító pólus visszagyújtásával kell számolni, a két utóbbi fázisnál visszagyújtás gyakorlatilag nem fordul elő, így ezt az esetet nem vizsgáltuk.

Amint azt már az 2.3.3. pont elején említettük, a megszakító visszagyújtása csak vezérelt kikapcsolással kerülhető el. Ennél a megoldásnál automatika biztosítja, hogy az először megszakító pólus érintkezőinek elválása az áram nullaátmenete előtt olyan kellően nagy idővel (pl. $t_{IV} > 5$ ms) következzen be, amely már az áram megszakítása után az érintkezők között megfelelő nagy villamos szilárdságot ad. Hogy az utoljára megszakító pólusok ne váljanak először megszakítóvá, közös hajtású megszakítók esetében ezen két pólus mechanikus késleltetésére, „elékelésére” van szükség. A drága automatika árához járulnak a helyszíni beépítés költségei.

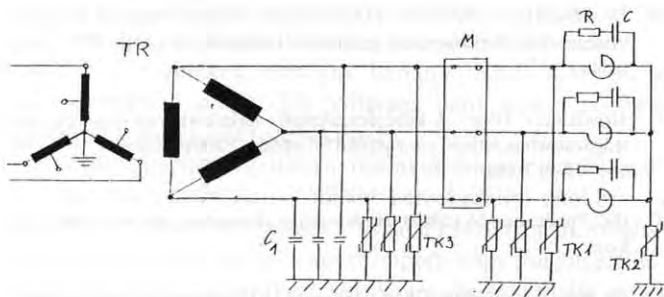
Végül meg kell említeni, hogy a vezérelt kikapcsolással csak a megszakító visszagyújtásából eredő, tehát az 1. táblázat 5. és 6. sorában szereplő túlfeszültségek csökkenthetők.

A 3. fejezetben olyan, a leírtaknál olcsóbb és hatásosabb módszert ismertetünk, amely a (2) egyenlettel leírt K_b csökkentése révén a többi (K_b -tól függő) túlfeszültség-tényezőt is csökkenti.

3. Megszakító igénybevétele a javasolt új áramkörben

A (2) képlet alapján a túlfeszültség csökkenthető a C_L kondenzátor növelésével. Ez a megoldás nagyfeszültségű (pl. 400 kV-os) hálózatokon nehezen realizálható, járulékos kondenzátor beépítése azonban középfeszültségű hálózaton gazdaságosan megoldható. A megszakító fojtó felőli oldalán elhelyezett kondenzátorok többféle kapcsolásban is (földelt csillag, fojtótekerccsekkel párhuzamosan) hatásosan csökkentik a túlfeszültségeket, több szempont együttes vizsgálata alapján [5] a fojtótekerccsekkel párhuzamosan párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok beépítését javasolta. A nagyobb üzembiztonság érdekében fázisonként 2 db 0,84 μ F kapacitású, 22 kV névleges feszültségű kondenzátor sorbakötésével $C = 0,42 \mu$ F/f egység került beépítésre (l. a 11. ábrán). A következőkben erre végezzük el a számításokat.

A kondenzátorok meredek hullámú bekapcsolási tranziene-



11. ábra. Söntfojtó áramköre, VSF szabályozása, túlfeszültségvédelmi rendszere

seinek csökkentése és a rezgések nagyobb csillapítása érdekében a kondenzátorokkal $R = 15$ ohm ellenállás van sorba kapcsolva. Ennek üzemi árama csak $\approx 1,4$ A.

Az ELMŰ Rt. 10,5 kV-os söntfojtóihoz azzal párhuzamosan kapcsolt, 1 db 22 kV névleges feszültségű, $C = 250$ nF kondenzátorból és azzal sorba kötött $R = 15$ ohm ellenállásból álló

csillapító ág beépítését javasoljuk. Erre végeztük el a számításokat.

3.1. Üzemi áram megszakításakor fellépő VSF

Figyelembe véve, hogy $C_L \ll C$ és $C_S \ll C$, a 2.1. pont alapján a VSF frekvenciája:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,5L \cdot 2C/3}} = 2,037 \text{ kHz}$$

A VSF meredeksége kb. 1/15-ére csökkent:

$$m = U_0/t_3 = 41,9 \text{ kV}/208,6 \mu\text{s} = 0,2 \text{ kV}/\mu\text{s}.$$

Az ELMŰ Rt. 10,5 kV-os söntfojtóinak kondenzátoros áthidalása esetén: $f_E = 3,79$ kHz; $m_E = 0,21$ kV/ μ s.

3.2. Túlfeszültségek számítása

A (2) egyenlet a következőképpen módosul

$$(C_L^* = C_L + 2C/3 \gg C_L):$$

$$K_b = \sqrt{\left(1 + K + \frac{U_a}{U_0}\right)^2 + \frac{i_{ch}L(1+K)}{U_0^2 C_L^*}} \quad (13)$$

$i_{ch} = 5$ A, 10 A és 20 A levágott áram esetén számított K_b értékeket a 2. táblázat 1. sora tartalmazza. Látható, hogy a kompenzáló fojtótekerccsel párhuzamosan kapcsolt C járulékos kondenzátor hatására a négyzetgyök alatti kifejezés második tagja lényegében elhanyagolható az első taghoz képest, tehát gyakorlatilag a normál, áramlevágás nélküli, de ívfeszültség figyelembevételével számított VSF esete adódik. Mivel K_a , K_c és K_r a (3), (4b) és (5) egyenletek által meghatározott módon alapvetően a K_b -tól függ, ezek értéke is erősen lecsökkent (l. 2. táblázat 2., 3. és 4. sorait).

2. táblázat.

Az i_{ch} áram levágása esetén fellépő túlfeszültségek a söntfojtóval párhuzamosan kapcsolt C kondenzátor esetén

Sorszám	i_{ch} , A	5	10	20	5	10	20
1.	K_b $U_0 K_b$, kV	1,77 26,0	1,78 26,2	1,81 26,6	1,62 13,9	1,64 14,1	1,72 14,7
2.	K_a $U_0 K_a$, kV	1,27 18,7	1,28 18,8	1,31 19,3	1,12 9,6	1,14 9,8	1,22 10,5
3.	K_c $U_0 K_c$, kV	2,27 33,4	2,28 33,5	2,31 34,0	2,12 18,2	2,14 18,2	2,22 19,0
4.	K_r $U_0 K_r$, kV	3,27 48,1	3,28 48,2	3,31 48,7	3,12 26,8	3,14 26,9	3,22 27,6
5.	K_p $U_0 K_p$, kV	-2,27 -33,4	-2,28 -33,5	-2,31 -34,0	0,71 6,10	0,70 6,00	0,70 6,00
6.	K_s $U_0 K_s$, kV	-0 -0	-0 -0	-0 -0	2,83 24,3	2,84 24,3	2,92 25,0
A söntfojtók adatai		Győri 18 kV söntfojtó $C = 420$ nF; $U_a = 4$ kV $U_0 = \sqrt{2 \cdot 18 / \sqrt{3}}$ kV $C_L^* = C_L + 2C/3 = 281$ nF; $C_S = 8,68$ nF $\alpha = 1$; $\beta = 0,5$			ELMŰ 10,5 kV söntfojtó $C = 250$ nF; $U_a = 1$ kV $U_{0E} = \sqrt{2 \cdot 10,5 / \sqrt{3}}$ kV $C_{LE}^* = C_{LE} + 2C/3 = 168$ nF; $C_{SE}^* = C_{SE} + C_1 = 256$ nF $\alpha = 1$; $\beta = 0,5$		

A megszakító legnagyobb feszültségen, tehát a VSF csúcspólus bekövetkező visszagyújtásának esetére vonatkozó (11b) és

(12) egyenletek továbbra is érvényesek azzal a változtatással, hogy C_L helyébe a $C^*_L \gg C_L$ kerül. Ha $C_S/(C_S + C^*_L) = 0$:

$$K_p \approx -K_C \quad (14)$$

$$K_S \approx 0 \quad (15)$$

A számított értékeket a 2. táblázat 5. és 6. sorai tartalmazzák. Összefoglalóan megállapítható, hogy a $C = 0,42 \mu\text{F}/f$ kondenzátor fojtótekerccsel párhuzamos elhelyezésével a VSF meredeksége erősen lecsökkent, így az üzembe helyezési mérések hat megszakítása [7] szerint az először megszakító pólus ívideje 3...4 ms-ra csökkent (villamos élettartam növekedése!); az esetleges áram levágásokor keletkező mágneses energia erősen lecsökkent amplitúdójú kapacitív energiává alakul át, a túlfeszültségek erősen lecsökkennek.

Mivel az ELMŰ Rt. söntfojtóihoz beépítendő 12 kV/40 kA-es megszakítók üzembiztos zárlati lekapcsolásához a megszakító tápoldalán $C_1 = 250 \text{ nF}/f$ kondenzátor beépítése szükséges (l. 2.2. pontban), a számításokat a következő paraméterekkel végeztük el:

$$C^*_{LE} = C_{LE} + 2C/3 \approx 251 \text{ nF}; C^*_{SE} = C_{SE} + C_1 \approx 256 \text{ nF}$$

A számítások eredményét a 2. táblázat jobb oldala mutatja.

4. A túlfeszültségek korlátozása fém-oxid-korlátozókkal

A túlfeszültségek csökkentésének korszerű eszközei az alacsony megszólalási szintű, nagy energiaelnyelő-képességű fém-oxid (ZnO)-korlátozók.

4.1. A megszakító tápoldalán elhelyezendő TK3 jelű korlátozók

Tekintettel a tartós földzárlatos üzemre $U_R \approx 26 \text{ kV}$ névleges feszültségű, $U_{COV} = 21 \text{ kV}$ folyamatos üzemi feszültségű, 10 kA névleges (8/20) μs levezetőképességű, $> 2 \text{ kJ}/\text{kV}\cdot\text{Uc}$ névleges energiaelnyelő-képességű típus beépítését javasoljuk. A várható védelmi szintek:

10 kA — 8/20 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 70 \text{ kV}$; 500 A — 2000 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 52 \text{ kV}$
Az ELMŰ Rt. 10,5 kV-os söntfojtóihoz hasonló, de $U_R/U_{COV} = 15 \text{ kV}/12 \text{ kV}$ jellemzőjű, várhatóan

10 kA — 8/20 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 40 \text{ kV}$; 500 A — 2000 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 30 \text{ kV}$
védelmi szintű korlátozók beépítését javasoljuk.

4.2. Fojtóoldali túlfeszültségvédelem kialakítása

4.2.1. A túlfeszültségek csökkentése hatásosan megoldható a söntfojtók sarkain elhelyezett — a 4.1. pontban részletezett — további 3 db korlátozó felhasználásával. A TK1 jelű korlátozók kapcsolását a 11. ábra mutatja. Ez a védelem tulajdonképpen a C kondenzátor beépítésével kialakított védelmet egészíti ki.

4.2.2. Tekintettel a tartós földzárlatos üzemre, a söntfojtók csillagpontjában a TK2 jelű, $U_R/U_{COV} = 15 \text{ kV}/12 \text{ kV}$ jellemzőjű, várhatóan

10 kA — 8/20 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 40 \text{ kV}$; 500 A — 2000 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 30 \text{ kV}$
védelmi szintű korlátozó beépítését javasoljuk.

Az ELMŰ Rt. 10,5 kV-os söntfojtóinak csillagpontjában $U_R/U_{COV} = 12 \text{ kV}/9 \text{ kV}$ jellemzőjű, várhatóan 10 kA — 8/20 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 30 \text{ kV}$; 500 A — 2000 $\mu\text{s} \Rightarrow \approx 22 \text{ kV}$ védelmi szintű korlátozó elhelyezését javasoljuk.

5. Megszakítók kiválasztása

Az MVM Rt. Győri Alállomásán a 18 kV-os söntfojtókhoz 72,5 kV névleges feszültségű, 40 kA névleges megszakítóképeségű, 3150 A névleges áramú, SF₆ gázoltású, szabadtéri megszakító kerül beépítésre. A söntfojtóval párhuzamosan kondenzátor beépítése még ebben az esetben is indokolt, hiszen a túlfeszültségek csökkentése mellett a nagy kapcsolási szám miatt a villamos élettartam szempontjából nagy jelentősége van az átlagosan 5 ms ívidő csökkenésnek. A 72,5 kV névleges feszültség választását az indokolta, hogy 24 kV-os, ilyen nagy megszakítóképességű és névleges áramú, szabadtéri készüléket nem találtak a piacon.

A beltéri elhelyezés lehetővé teszi 24 kV/40 kA/3150 A megszakító, az SF₆ gázoltásúnál hosszabb villamos élettartam miatt esetleg 2500 A-es vákuummegszakító választását. A söntfojtóval párhuzamosan és a transzformátor sarkain szükséges a kondenzátorok beépítése. Külön felhívjuk a figyelmet arra, hogy jól kihasználható a vákuummegszakítók nagy mechanikus- (~40 000) és villamos élettartama (10 000...20 000 I_{NÉVL}).

A megszakítók beltéri elhelyezése esetén az ELMŰ Rt. 10,5 kV-os söntfojtóihoz 12 kV/40 kA/3150 A megszakítók beépítése szükséges. Ugyancsak indokolt a kondenzátorok elhelyezése.

Irodalom

- [1] High-voltage alternating current circuit-breakers — Inductive load switching. IEC 1233, (1994).
- [2] Dr. Mihákovics Tibor, Dr. Danyek Gyula: Nagyfeszültségű hálózatok visszazökő feszültségének számítása. Tanulmány, ELMŰ, 1991. szeptember.
- [3] Mihákovics Tibor: A közepfeszültségű, zárlatkorlátozó fojtótekerccsel leágazásokban fellépő visszazökő feszültség. Elektrotechnika, 1976. 8-9. sz., 313-317. old.
- [4] IEC Publication 56 (1987): High-voltage alternating current circuit-breakers.
- [5] Dr. Mihákovics Tibor: Győri Alállomás 18 kV-os söntfojtóinak üzembiztos kapcsolását biztosító áramkör kialakítása. Tanulmány. 1994. január.
- [6] Dr. Mihákovics Tibor: 160 MVA-es 220/126/10,5 kV-os transzformátor 10,5 kV-os tekercséhez kapcsolható söntfojtó speciális áramkörének kialakítása és kapcsolókészülékének kiválasztása. Tanulmány, ELMŰ Rt. 1994. szeptember.
- [7] Dr. Bán G., Dr. Bánfai Gy., Prikler L.: 70 MVAR-os légmagos fojtó üzembe helyezési mérései a Győri alállomásban. BME, 1994. szeptember.
- [8] Dr. Bán G., Dr. Bánfai Gy., Prikler L.: A litéri B jelű transzformátor 18 kV-os vasmagos fojtója ki- és bekapcsolásakor fellépő tranziens jellemzők regisztrálása és elemzése. BME, 1994. november.