

A középfeszültségű, zárlatkorlátozó fojtótekerces leágazásokban fellépő visszazökő feszültség

MIHÁLKOVICS TIBOR, Budapest*

DK 621.318.42.027.5:621.3.064.31

Azok között a tényezők között, amelyek a zárlati áram megszakításának sikerességét jelentősen befolyásolják — a megszakítandó zárlati áramon és az üzemi frekvenciájú feszültségen kívül — fontos szerepe van a megszakítás alkalmával a megszakító pólus sarkain fellépő tranziens kapcsolási túlfeszültségnek, a visszazökő feszültségnek (továbbiakban V. S. F.) is. Ezért szükséges a hálózat adott pontján, a hálózati paraméterek által meghatározott V. S. F. jellemzők ismerete.

Jelen munkában a középfeszültségű hálózatokon fellépő zárlatok megszakításának olyan esetével foglalkozunk, amikor a megszakító nem közvetlenül a megszakító után fellépő zárlatot, tehát gyűjtőszárlatot szakít meg, hanem a megszakító és a zárlati hely között zárlatkorlátozó fojtótekerces van. Fenti eset vizsgálatát az indokolja, hogy bár a zárlatkorlátozó fojtótekerces beépítése csökkenti a zárlati áramot, de a fojtótekerces nagy frekvenciájú ($f = 60 \dots 200$ kHz) önrezgése miatt nagy meredekségű V. S. F. lép fel a zárlatot lekapcsoló megszakító sarkain. Így a zárlatkorlátozó fojtótekerces a zárlati áram jelentős csökkentése ellenére a megszakító sikertelen működését okozhatja.

A tanulmány második részében a Csepeli Erőmű 11 kV-os hálózatán megvalósított egyszerű és gazdaságos módszert ismertetünk a megszakító sarkain fellépő nagyfrekvenciás V. S. F. igénybevétel csökkentésére.

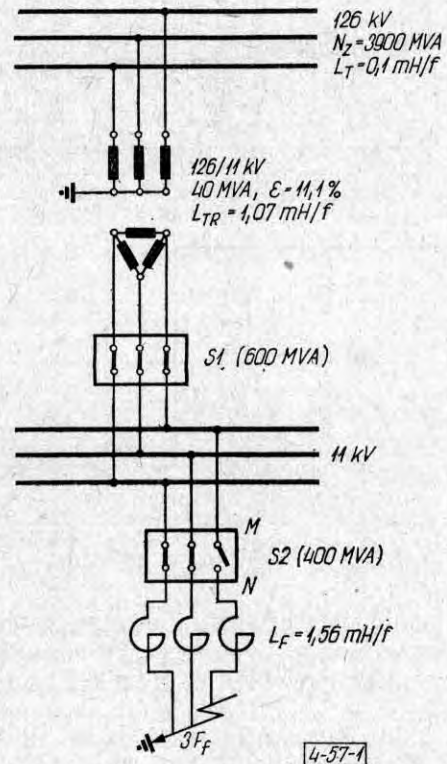
1. A zárlatkorlátozó fojtótekerces után keletkező zárlat megszakításakor fellépő V.S.F. számítása

Az alábbiakban a Csepeli Erőmű 11 kV-os hálózatára végezzük el a számításokat. Az általános eset tárgyalása mellett ez lehetőséget ad a mérési és számítási eredmények összehasonlítására egy konkrét hálózat esetében.

A méréseknél és számításoknál a háromfázisú földelt rövidzárlat megszakítási viszonyait tárgyaljuk, ugyanis a fázisok közötti és a földtől való kis távolság miatt a középfeszültségű kapcsolóterekben ezen zárlat fellépésének a valószínűsége a legnagyobb. A háromfázisú földelt rövidzárlatot először megszakító pólus sarkain fellépő V. S. F.-t határozzuk meg, mivel ez az eset nagy üzemi frekvenciájú visszatérő feszültséget és nagy V. S. F. meredekséget eredményez.

A vizsgált hálózatot az 1. ábra mutatja. A zárlat alatt az S2 jelű 400 MVA-es megszakítónál levő feszültség csúcserőrtéke:

* MIHÁLKOVICS TIBOR okl. villamosmérnök, a Villamosenergiaipari Kutató Intézet tudományos osztályvezetője (Budapest XV., Cservenka M. u. 99—101.)



1. ábra.

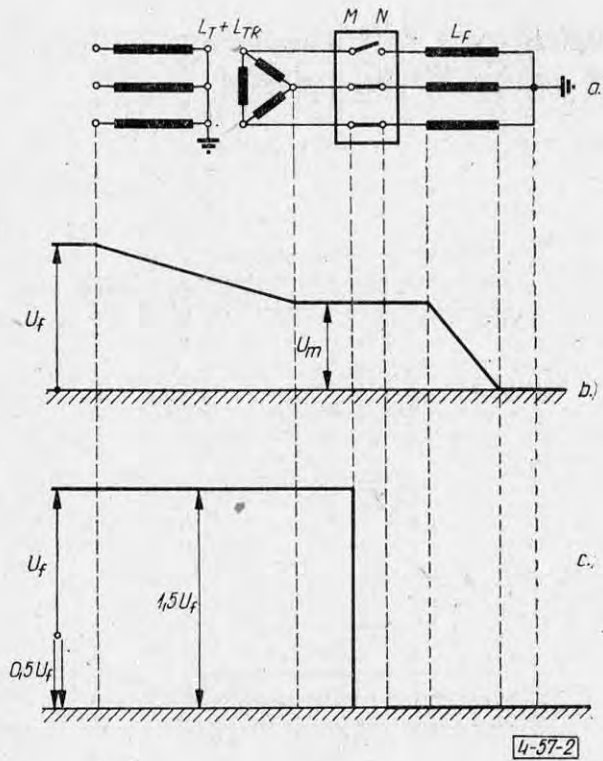
$$U_m = \frac{L_F}{L_F + L_{TR} + L_T} U_f,$$

ahol:

- L_F — a zárlatkorlátozó fojtótekerces induktivitása;
- L_{TR} — a transzformátor zárlati induktivitása;
- L_T — a 126 kV-os gyűjtősin 11 kV-os szintre számított zárlati induktivitása;
- U_f — a 11 kV-os hálózat fázisfeszültségének csúcserőrtéke.

U_m feszültség uralkodik az először megszakító pólus sarkain az áram megszakításának pillanatában (2. b. ábra), feltételezve, hogy az áram nullaátmenetének pillanatában a feszültségnek maximális értéke van, tehát az áram és feszültség közötti fázisszög 90° . Zárlati áramkörökben ez a feltétel igen jó közelítéssel teljesül.

A megszakítás után az N pont feszültsége nulla lesz, az M ponton pedig az üzemi frekvenciájú feszültség csúcserőrtéke $1,5 U_f$ értéket vesz fel (2.c. ábra). Az 1,5-es szorzó azért lép fel, mert a tápoldali rendszer elméleti csillagpontja nulláról $0,5 U_f$ feszültségre ugrik. A 2b. ábrán jelzett állapotból a 2c.



2. ábra.

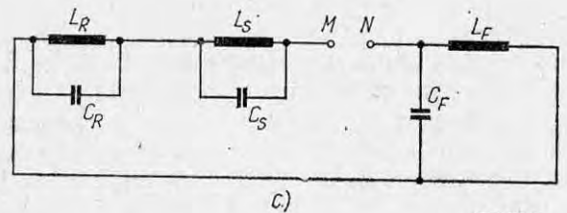
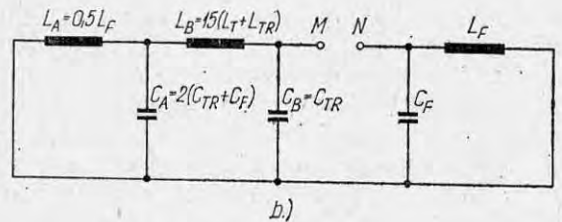
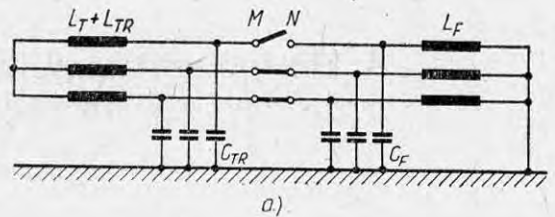
ábrán bemutatott állapotba az átmenet nem történhet ugrásszerűen, így a megszakító mindkét oldalán tranziensek lépnek fel. Mind a két tranziens feszültség arról az U_m értékről indul, amely a megszakító kontaktusain a megszakítás előtt uralkodott. A megszakításkor fellépő V. S. F. az M és N ponton jelentkező tranziens feszültségek különbsége.

A tranziensek frekvenciáinak és amplitúdóinak meghatározásához tekintjük a 3. ábrát. A transzformátor-tekercesek elosztott kapacitásainak megfelelő egyenértékű koncentrált kapacitást C_{TR} -vel, a fojtótekerces elosztott földkapacitásainak megfelelő pedig C_F -vel jelöltük.

A hálózatról primer (126 kV) és szekunder (11 kV) oldalon egyaránt leválasztott transzformátor szekunder oldalról történő injektálás méréséből meghatározható a transzformátor önrezgése. A mérés végrehajtásánál a primer kapcsokat rövidre zárjuk és földeljük (tehát végtelen teljesítményű 126 kV-os hálózatot feltételezünk), a szekunder oldalon két fázist földelünk. A diórával egyenirányított áram félhullámok injektálása a harmadik fázis és a föld közé történik, tehát a szekunder oldali háromfázisú földelt rövidzárlatot először megszakító pólus sarkain fellépő V.S.F.-et oszcillográfáljuk. A rezgés frekvenciájának ismeretében C_{TR} értéke a Thomson-formulából számítható.

$$C_{TR} = \frac{1}{4\pi^2 f_{TR}^2 1,5 L_{TR}}$$

A 40 MVA-es transzformátor önrezgése a szekunder oldalról mérve: $f_{TR} = 57$ kHz. A képlettel $C_{TR} = 4,9$ nF értékűre adódik.



3. ábra.

A fojtótekerces egyik fázisának injektálás méréséből meghatározható a fojtótekerces frekvenciája és így C_F értéke.

$$C_F = \frac{1}{4\pi^2 f_F^2 L_F}$$

A Csepeli Erőmű 1,56 mH/fázis értékű fojtójának önrezgése $f_F = 180$ kHz. A képlettel $C_F = 500$ pF adódik.

Ha a transzformátor, illetve a fojtótekerces V. S. F. mérésének elvégzésére nincs módunk (pl. nem lehet a hálózatot feszültségmentesíteni), a C_{TR} , illetve C_F egyenértékű koncentrált kapacitások számítása a transzformátor tekercesek elosztott földkapacitásának és kölcsönös kapacitásának, illetve a fojtótekerces elosztott földkapacitásának ismeretében az [1; 2; 3] irodalmak alapján történhet. Természetesen a transzformátor (fojtótekerces) elosztott kapacitásait helyettesítő egyenértékű koncentrált kapacitáshoz hozzá kell adni a transzformátor (fojtótekerces) és a vizsgált megszakító között levő gyűjtősin, áramváltó, feszültségváltó, stb. koncentrálnak tekinthető kapacitásait [4].

A 3. ábrának megfelelően a rezgőkörök egyszerűen számíthatók. A fojtóoldali N ponton fellépő rezgés frekvenciája és amplitúdója:

$$f_N = 1/2\pi\sqrt{L_F C_F}$$

$$A_N = U_m = U_f L_F / (L_F + L_T + L_{TR})$$

A transzformátor oldali M ponton fellépő rezgés kétfrekvenciás. Az M ponttól balra levő ún. AB kör átalakítható a 3c. ábra szerinti RS körré [1; 2],

amelyben a rezgések egymástól függetlenül alakulnak ki. Az átalakítás egyenleteit az alábbiakban foglaljuk össze:

$$\begin{aligned}
 f_A &= 1/2\pi\sqrt{L_A C_A} & f_B &= 1/2\pi\sqrt{L_B C_B} \\
 \alpha &= f_B/f_A & \beta &= L_A/L_B \\
 a &= 0,5(1 + \beta + \alpha^2) & b &= \sqrt{a^2 - \alpha^2} \\
 f_M &= \sqrt{f_A f_B} & k &= [(a+b)/(a-b)]^{0,25} \\
 f_R &= f_M/k & f_s &= k f_M \\
 A_R &= L_R/(L_R + L_S) = (a+b-\alpha^2)(a+b)/2b(1+\beta) \\
 A_S &= L_S/(L_R + L_S) = 1 - A_R.
 \end{aligned}$$

Az AB kör RS körré való átalakítása előre számított görbékkel egyszerűen végrehajtható [1; 2].

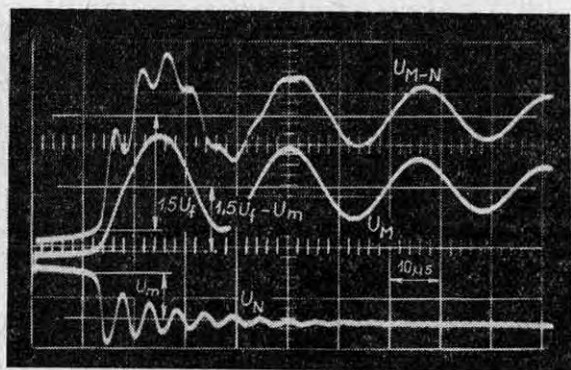
Az 1. ábra hálózatára elvégzett számítás eredménye a következő:

$$\begin{aligned}
 f_N &= 180 \text{ kHz} & A_N &= 0,57 U_f \\
 f_R &= 39,1 \text{ kHz} & A_R &= 0,82 U_f \\
 f_S &= 76,5 \text{ kHz} & A_S &= 0,11 U_f.
 \end{aligned}$$

Tehát az M ponttól balra levő tápoldali kör lényegében egyfrekvenciás ($f_R = 39,1$ kHz), ugyanis az $f_S \approx 2 f_R$ frekvenciájú második rezgés amplitúdója kicsi.

Az 1. ábra hálózatán a zárlatkorlátozó fojtótekeres után fellépő földelt háromfázisú zárlatot lekapcsoló leágazási megszakító (S_2 jelű) először megszakító pólusán megjelenő V. S. F. meghatározására végzett injektálás mérés oscillogramját a 4. ábra mutatja. Az alsó sugár a megszakító pólus fojtóoldali N pontján fellépő U_N tranzienst feszültséget, a középső sugár az M pontján fellépő U_M tranzienst feszültséget, a felső sugár a megszakító pólus kontaktusai között fellépő U_{M-N} V. S. F.-t mutatja. U_{M-N} az U_M és U_N tranzienst feszültségek különbsége.

Megjegyezzük, hogy a mérés végrehajtásánál a transzformátor 126 kV-os oldalán földelt rövidzárát helyeztünk el, tehát az $N_z = 3900$ MVA zárlati teljesítményű gyűjtősinnek megfelelő induktivitást a mérésből kirekesztettük. Mivel $L_T \ll L_{TR}$ és $L_T \ll L_F$, a rezgések amplitúdójában és frekvenciájában ez nem okoz számottevő eltérést.



4-57-4

4. ábra.

A számított és mért eredmények amplitúdó és frekvencia tekintetében jó egyezést mutatnak.

A középfeszültségű hálózatokon a leágazási fojtótekeresek után fellépő zárlatok megszakításakor a leágazási megszakítóknál igen szigorú V. S. F. paraméterek léphetnek fel. A megszakító pólus tápoldali pontján $f_T = 20 \dots 70$ kHz, a fojtóoldali pontján $f_F = 60 \dots 200$ kHz frekvenciájú rezgésekkel számolhatunk. Ezen rezgések által okozott V. S. F. igénybevétel jelentősen meghaladhatja a megszakítókra előírt értéket. Az 1. táblázatban foglaltuk össze a hazai 10, 20 és 35 kV-os névleges feszültségű megszakítókhöz közel álló 12, 24 és 36 kV-os névleges feszültségű megszakítókra a 100, 60 és 30%-os névleges zárlati teljesítmény megszakításakor az IEC szabványok [5; 6] által előírt V. S. F. meredekségeket (a V. S. F. csúcserőértékének és a csúcsig eltelt időnek a hányadosát). Középfeszültségű hálózatokon az $f_F = 60 \dots 200$ kHz V. S. F. frekvenciájú fojtóoldali tranzienst által okozott F. meredekség: $m = 2 \dots 10$ kV/ μ s, tehát jelentősen meghaladja a szabványban előírt értéket.

1. táblázat

Az IEC Publication 56-2 és 56-4 által előírt V. S. F. meredekségek kV/ μ s-ban.

U_n \ N_z	100 %	60 %	30 %
12 kV	0,345	0,86	1,72
24 kV	0,47	1,16	2,34
36 kV	0,57	1,42	2,85

Az 1. ábra szerinti hálózatban a zárlatkorlátozó fojtótekeres után fellépő háromfázisú zárlat teljesítménye $N \approx 140$ MVA, tehát a 400 MVA-es megszakító kb. 35%-os névleges zárlati teljesítményt szakít meg. A kezdeti szakaszon mért V. S. F. meredekség (lásd 4. ábra U_{M-N} görbét) $m \approx 4,1$ kV/ μ s. A meredeke felütás amplitúdója is jelentős, a V. S. F. csúcserőértékének kb. 57%-a. Ez az oka annak, hogy az Erőmű PTK 401-10/1000 típusú légnemű megszakítói a zárlatkorlátozó fojtótekeres után fellépő zárlatokat nem tudták üzembiztosan tisztázni.

Tapasztalataink alapján hasonló probléma több hálózati ponton is előfordult, különösen azokon a helyeken, ahol légnemű megszakítók vannak beépítve. Ennek oka az, hogy a légnemű megszakítók a kisajterű megszakítóknál érzékenyebbek a V. S. F. meredekeire; a kisajterű megszakítók pl. 60 és 30%-os névleges zárlati teljesítmény mellett nagyobb V. S. F. meredekegek esetében üzembiztosabban működnek, mint az ugyanolyan névleges teljesítményű légnemű megszakítók.

2. Módszer a V.S.F. igénybevétel csökkentésére

A szigorú V. S. F. paraméterek mellett üzemelő megszakítók igénybevételének csökkentésére a leggyorsabb kondenzátorokat beépíteni. A konden-

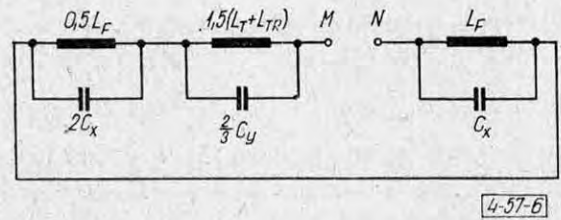
zatorokat a leágazási megszakító mindkét oldalán el kell helyezni, így lehet a tápoldali és a fojtóoldali rezgések által okozott nagy V. S. F. igénybevételt csökkenteni. A hazai és nemzetközi gyakorlatban a kondenzátorokat az 5. ábra G és H pontjaiban csillag, földelt csillag vagy delta kapcsolásban szokták elhelyezni. A beépítendő kondenzátorok kapacitását a hálózat induktivitásai, a kondenzátorok kapcsolási módja és a megszakító üzembiztos működéséhez szükséges V. S. F. paraméterek szabják meg, értéke egyszerűen számítható.

A leágazási megszakító tápoldalán beépítendő kondenzátort célszerű a G pontban, tehát a transzformátor és a gyűjtősín betáplálási megszakítója között elhelyezni a következők alapján. Ha a transzformátor középfeszültségű oldalán gyűjtősínzárlat lép fel, a betáplálási megszakítónak kell a sínzárlatot lekapcsolni a transzformátor szigorú V. S. F. paraméterei mellett [4]. A vizsgált hálózati ponton, a 11 kV-os gyűjtősínen keletkező $N \approx 330$ MVA-es háromfázisú földelt zárlatot lekapcsoló S1 jelű megszakító először megszakító pólusának kontaktusain $f_{TR} = 57$ kHz frekvenciájú V. S. F. lép fel. Ennek csökkentésére a G pontban kell megfelelő értékű kondenzátort elhelyezni, ez a kondenzátor azonban hatásosan csökkenti a leágazási fojtótekerces után fellépő zárlat lekapcsolásakor az S2 jelű leágazási megszakító M tápoldali

pontján megjelenő U_M tranziens feszültség frekvenciáját is.

A leágazási megszakító fojtóoldali N pontján fellépő tranziens feszültség frekvenciájának csökkentésére új, egyszerű és gazdaságos módszert alkalmaztunk. A kondenzátorokat, amint az 5. ábra mutatja, nem csillagba (vagy deltába) kapcsoltuk a H pontban, hanem a leágazási fojtótekerceset fázisonként egy-egy C_x kondenzátorral hidaltuk át. A C_x kondenzátorok mindenféle zárlat (3Ff, 3F, 2Ff, 2F) esetén hatásosan csökkentik a fojtóoldali tranziens feszültség frekvenciáját, így a leágazási megszakító V. S. F. igénybevételét.

Az 5. ábra hálózatát a leágazási megszakító először megszakító pólusára felrajzolva a 6. ábra adódik. Az ábrában a $C_F \ll C_x$ és $C_{TR} \ll C_y$ kapacitásokat elhanyagoltuk.



6. ábra.

A fojtóoldali U'_N tranziens feszültség frekvenciája és amplitúdója:

$$f'_N = 1/2\pi \sqrt{L_F C_x},$$

$$A'_N = U_m = U_f L_F / (L_F + L_T + L_{TR}).$$

A tápoldali U'_M tranziens feszültség kétfrekvenciás, az egyes rezgések frekvenciái és amplitúdói a következők:

$$f'_R = f'_N,$$

$$A'_R = 0,5 A'_N,$$

$$f'_S = 1/2\pi \sqrt{(L_T + L_{TR}) C_y},$$

$$A'_S = 1,5 U_f (L_T + L_{TR}) / (L_{TR} + L_T + L_F).$$

Az elvégzett számítás eredménye a következő az 5. ábra adataival:

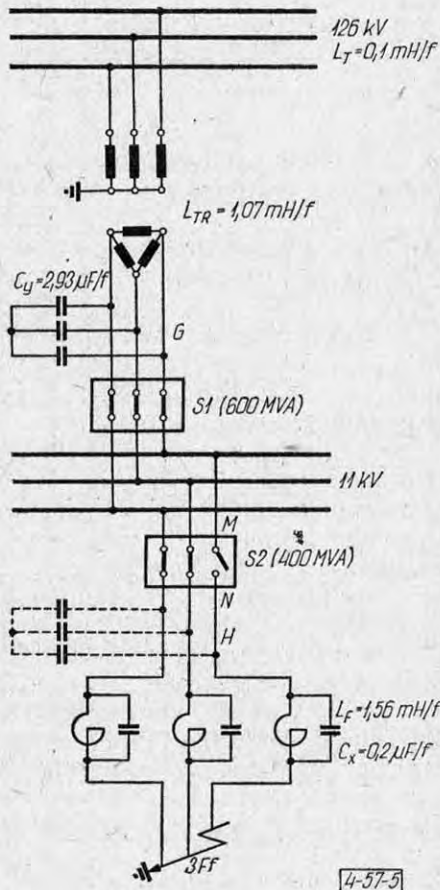
$$f'_N = 9,0 \text{ kHz} \quad A'_N = 0,57 U_f$$

$$f'_R = 9,0 \text{ kHz} \quad A'_R = 0,285 U_f$$

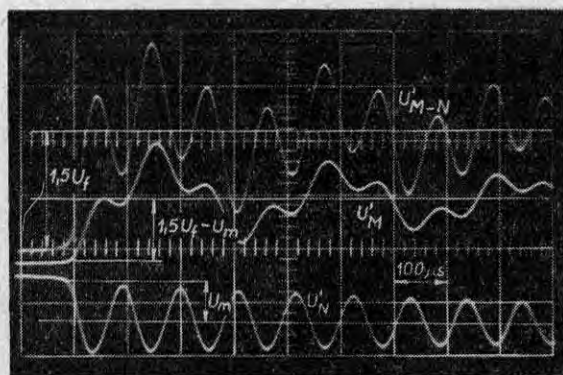
$$f'_S = 2,73 \text{ kHz} \quad A'_S = 0,645 U_f$$

A Csepeli Erőmű hálózatán beépített kondenzátorok esetében a leágazási megszakító először nyitó pólusán fellépő V. S. F.-et injektálós méréssel is meghatároztuk, az oscillogramot a 7. ábrán mutatjuk be. Az alsó és középső sugár a fojtóoldali N ponton fellépő U'_N és a tápoldali M ponton fellépő U'_M tranziens feszültségeket mutatja, a felső sugár a megszakító kontaktusai között megjelenő U'_{M-N} V. S. F.-et adja meg. A számított eredmények a mért eredményekkel mind frekvencia, mind amplitúdó tekintetében jól egyeznek.

Látható, hogy a fojtóoldali és tápoldali rezgések frekvenciája egyaránt erősen lecsökkent, így a le-

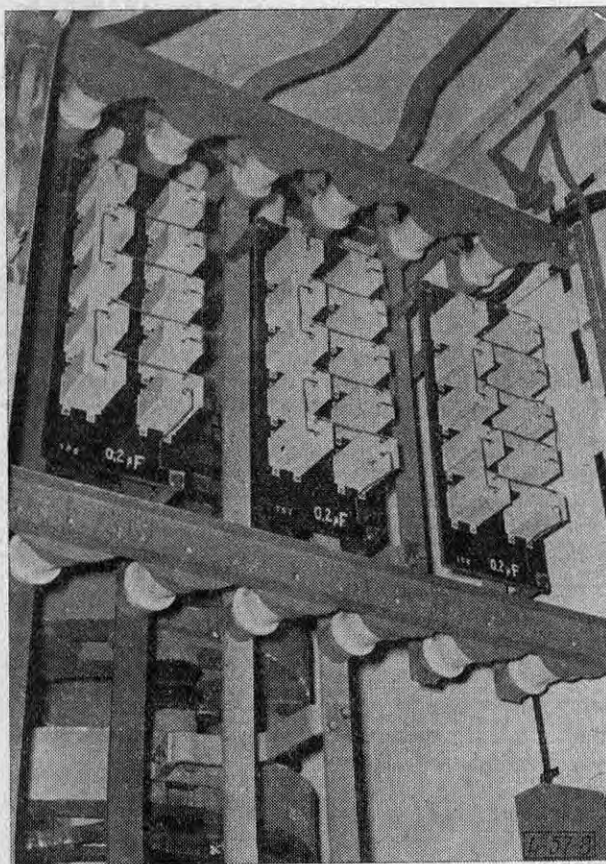


5. ábra.



4-57-7

7. ábra.



8. ábra.

ágazási légnyomásos megszakítók üzeme biztonságossá vált. Ezt igazolták a Csepeli Erőműben és a VEIKI VBF Zárlati Próbáállomásán elvégzett zárlati vizsgálatok [7], valamint az a tény is, hogy a kondenzátorok beépítése óta fellépett zárlatokat a megszakítók sikeresen kapcsolták le.

A zárlatkorlátozó fojtótekerccsel fázisonként párhuzamosan kapcsolt kondenzátor alkalmazása a megszakító V. S. F. igénybevételének csökkentésére a következő előnyökkel jár:

a) A fojtótekerccsel párhuzamosan kapcsolt kondenzátort üzemszerűen a fázisfeszültség néhány százalékát kitevő — a zárlatkorlátozó fojtótekerccsen a terhelési áram által okozott — feszültség veszi igénybe és csak a zárlat, illetve a kapcsolások idején lép fel a hálózat névleges feszültségének nagyságrendjébe eső feszültség.

Ez a tény tette lehetővé, hogy a kondenzátorláncot 10 db 2 μF, 2500 V_m típusú kondenzátor sorbakötésével alakítsuk ki, azaz C_x = 0,2 μF. Mivel a kondenzátor próbafeszültsége 5,5 kV_m a teljes láncra vonatkoztatott 55 kV_m megfelelő biztonságot nyújt. Zárlat alkalmával a kondenzátorlánc sarkain az induktivitások viszonyának megfelelően U_z = 3,6 kV feszültség lép fel.

A mintegy 60 fogyasztói leágazásba történt beépítés előtt minden egyes kondenzátorláncot 4,3 kV feszültségen 1,7 s-ig 4 alkalommal, 6,3 kV feszültségen 0,4 s-ig 2 alkalommal próbálták az Erőmű próbatermében. Az így kialakított kondenzátorlánc ára kb. 10...20%-a a csillagba vagy deltába kapcsolt kondenzátor árának.

b) Mivel a kondenzátorlánc kis súlyú és méretei is kedvezően alakíthatók ki, a szigetelőlapra szerelt lánc magára a fojtótekerccsre, illetve a fojtótekerccs áramvezető sínjeire építhető rá. Ez jelentős hely megtakarítást, így további költségcsökkenést eredményez. A 8. ábrán az Erőmű egyik leágazásában a fojtótekerccsre ráépített kondenzátorlánc fényképét mutatjuk be.

c) A fojtótekerccset áthidaló kondenzátorláncal elkerülhető az üzemviteli szempontból káros feszültségemelkedés, amely a kisterhelésű időszakban lépne fel a nagyszámú csillag vagy delta kapcsolású kondenzátor esetén.

Végül megjegyezzük, hogy a 2. pontban bemutatott megoldás a soros kondenzátorok számának

és kapacitásának megfelelő megválasztásával más feszültségszintre is alkalmazható.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton mondok köszönetet BÁN ERVIN kartársnak, a Csepeli Erőmű és Szolgáltató Üzemek műszaki igazgatójának a téma támogatásáért. Köszönettel tartozom HÉGER GYULA mérnöknek, az Erőmű vezetőjének azért a nélkülözhetetlen segítségért, amelyet a helyszíni méréseknél, valamint a V. S. F. szabályozó kondenzátorláncok kialakításánál és beépítésénél nyújtott.

IRODALOM

[1] MIHÁLKOVICS T.: A hálózati független visszazökő feszültség számítási módszerei. VEIKI, HV 12, Bp. 1968.
 [2] HAMMARLUND, P.: Transient Recovery Voltage. Stockholm, 1946.
 [3] WANGER, W. — BROWN, J. K.: Die Berechnung des Schwingungsverlaufs der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschluss-Abschaltungen. Brown Boveri Mitt. 1937. Nov. S. 283—302.
 [4] MIHÁLKOVICS T.: Transzformátorok zárlatainak megszakításakor fellépő visszazökő feszültség meghatározása. Elektrotechnika, 1971/6. szám, 161—167. old.
 [5] IEC Publication 56—2: High-voltage alternating-current circuit-breakers, Rating. 1971.
 [6] IEC Publication 56—4: High-voltage alternating-current circuit-breakers. Type tests and routine tests. 1972.
 [7] VEIKI 792/MZ sz. jegyzőkönyv (1970): PTK 401—10/1000 tip. megszakító vizsgálata.