

# ELEKTROTECHNIKA

A MAGYAR ELEKTROTECHNIKAI EGYESÜLET  
(A MŰSZAKI ÉS TERMÉSZETTUDOMÁNYI EGYESÜLETEK TAGJA) HIVATALOS KÖZLÖNYE

Официальный орган Венгерского Электротехнического Общества – Official Organ of the Hungarian Electrotechnical Association – Organe officiel de l'Association Électrotechnique Hongroise – Organo ufficiale dell'Associazione Elettrotecnica Ungherese – Offizielles Organ des Ungarischen Elektrotechnischen Vereines

Az egyesület címe: Budapest V., Kossuth tér 6–8. Telefon: 120-662.

## Generátormegszakítók visszaszökő feszültség igénybevételének számítása

DR. MIHÁLKOVICS TIBOR, Budapest\*

DK 621.316.52.015.3.001.24:621.313.12:621.31

A fogyasztók szünetmentes energiaellátása az erőművek – és így azok háziüzemének – magas fokú rendelkezésre állását követeli meg. A folyamatos háziüzemi ellátást nemcsak a normális üzemi, hanem az üzemzavari körülmények között is fenn kell tartani. Ez a követelmény a modern nagy teljesítményű erőművek generátora és főtranszformátora között, a fázisonként tokozott sínhidban elhelyezett generátormegszakító beépítésével elégíthető ki. A segédüzemi energiaellátás problémáival, a lehetséges alapkapcsolásokkal [1] foglalkozik részletesen.

A beépített generátormegszakító biztosítja az üzembiztos és rugalmas háziüzemi ellátást, tervezésekor azonban figyelembe kell venni, hogy a szokásos középfeszültségű megszakítókhoz képest speciális körülmények között üzemel, ezek a következők:

a fázisonként tokozott sínhez való illeszthetőség [2], [3];

$I_n = 7 \dots 50$  kA névleges áram [2], [3], [8], [11], [16];

$I = 60 \dots 250$  kA megszakító képesség [3], [4], [6], [15], [16];

a nagy egyenáramú komponenssel rendelkező fázisban a zárlati áramnak több perióduson keresztül nincs áram-nullaátmenete [7], [9], [12], [13];

a megszakítási helyen fellépő, az IEC Publication 56–2 előírásait messze meghaladó visszaszökő feszültség meredekség ( $2 \dots 6$  kV/ $\mu$ s) [4], [5], [13], [14], [17].

Jelen tanulmány célja számítási módszer kidolgozása a generátormegszakítók beépítési helyén fellépő

visszaszökő feszültség (továbbiakban VSF) meghatározására. A számítási módszer igazolására a Paks Atomerőmű Vállalat (továbbiakban P.A.V.) 220 MW-os gépeihez beépített generátormegszakítók VSF-jét áraminjektáló módszerrel történő mérésrel is meghatároztuk.

A kérdés aktualitását bizonyítja, hogy a generátormegszakítók problémaköre az 1982. évi CIGRÉ-n a 13-as Bizottság (Switching Equipment) kiemelt témája, a beérkezett 14 dolgozat közül 4 evvel a témakörrel foglalkozik.

### 1. A visszaszökő feszültség (VSF) meghatározásának jelentősége

Ismert tény, hogy a megszakítás sikeres volta a megszakított zárlati áramon és az üzemi frekvenciájú visszatérő feszültségen kívül függ a megszakítás után fellépő kapcsolási túlfeszültségtől, a VSF-től is. A VSF kiegyenlítő tranziens, ami az egyik stationer állapotból (a zárlat állapotából) a másik stationer állapotba (a megszakítást követő állapotba) vezet át, hiszen az üzemi frekvenciájú feszültség nem növekedhet nulla értékről ugrásszerűen közel maximális értékre, mivel a hálózati elemek kapacitásainak energiája sem nőhet ugrásszerűen.

A megszakítók típusvizsgálata a próbaállomásokon előírt, a megszakító által nem befolyásolt, ún. független VSF-paraméterek mellett történik. Hogy az adott hálózati ponton a megszakító beépíthető-e vagy sem, a megszakítóra garantált VSF-paraméterek és a szóban forgó hálózati pont független VSF-paramétereinek összehasonlításával dönthető el. Ezért kell ismerni az adott hálózati pont független VSF-paramétereit, ez képezi további vizsgálataink tárgyát.

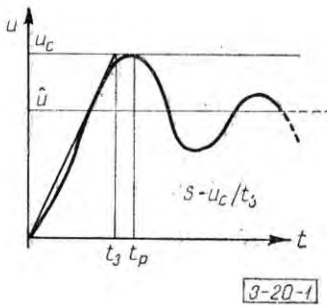
\* Dr. MIHÁLKOVICS TIBOR okl. villamosmérnök, a műszaki tudományok kandidátusa, a Villamosenergiaipari Kutató Intézet tud. osztályvezetője (Budapest, V. Zrínyi u. 1.)

## 2. A számítások alapját képező feltételek

1. Mérések és elméleti megfontolások mutatják, hogy a háromfázisú rövidzárlat először megszakító fázisa adja a legnagyobb VSF-meredekséget és a legnagyobb üzemi periódusú visszatérő feszültséget, ami a fázisfeszültség 1,5-szerese. Ezért a továbbiakban ezt az esetet vizsgáljuk.

2. Számításainkban veszteségmentes hálózatokat tekintünk, tehát a csillapítást nem vesszük figyelembe, a hálózati elemeket csak induktivitásaikkal és kapacitásaikkal képezzük le. Ez a feltétel a számításokat jelentősen egyszerűsíti, az eredményeink használhatóságát azonban számottevően nem rontja. A megszakító szempontjából csak az első vagy második csúcsig – általában a maximális amplitúdó időpontjáig – döntő jelentőségű a rezgés lefolyása, ezen időtartományban azonban a csillapodás elég kismérvű.

3. A vizsgálatok és az irodalom azt igazolják, hogy generátormegszakítók VSF szempontjából kritikus paramétere a VSF meredeksége. Az IEC előírásaival összhangban határozzuk meg a VSF meredekségét, mint a VSF-görbéhez húzott érintő meredekségét az 1. ábra szerint:



1. ábra. VSF meredeksége

$$S = U_c / t_3 = 2\sqrt{2} U_v \gamma f / 0,85 \quad (1)$$

$$t_3 = 0,85 t_p$$

$$t_p = 1/2f$$

ahol  $f$  a VSF frekvenciája;

$$\gamma = U_c / \hat{U}_v = U_c / \sqrt{2} U_v,$$

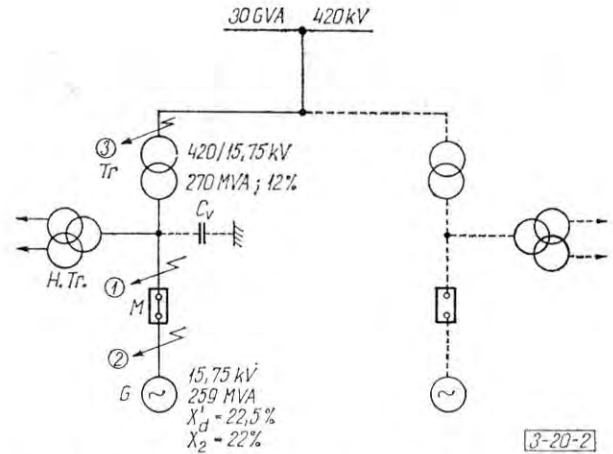
ahol  $U_v$  a visszatérő feszültség effektív értéke.

### 3. A generátormegszakító megszakítási áramai

A P.A.V. 220 MW-os blokkjainál fellépő zárlati áramok kiszámításánál 420 kV-on 30 GVA zárlati teljesítményű gyűjtősínt feltételeztünk, valamint elhanyagoltuk a háziüzemi transzformátoron keresztül történő rátáplálást.

#### 3.1 Generátormegszakító és főtranszformátor közötti háromfázisú rövidzárlat

Ha a háromfázisú rövidzárlat a 2. ábra 1 pontjában lép fel, akkor a generátormegszakító által megszakí-



2. ábra. A 220 MW-os blokkhoz beépített generátormegszakító megszakítási áramai

tandó zárlati áram a generátor transziens zárlati árama:

$$I_g = \frac{U}{\sqrt{3} X'_d} = 42,2 \text{ kA.}$$

#### 3.2 Generátormegszakító és generátor közötti háromfázisú rövidzárlat

Ha a háromfázisú rövidzárlat a 2. ábra 2. pontjában lép fel, akkor a generátormegszakító által megszakítandó áram a Tr jelű főtranszformátoron átfolyó zárlati áram:

$$I_{Tr} = \frac{U}{\sqrt{3} (X_{Tr} + X_{táp} + X_{sin})} = 74,9 \text{ kA.}$$

$$X_{sin} \approx 3 \text{ m}\Omega/\text{fázis.}$$

#### 3.3 Főtranszformátor nagyfeszültségű oldalán fellépő háromfázisú rövidzárlat

Ha a háromfázisú rövidzárlat a 2. ábra 3. pontjában lép fel, akkor a generátormegszakító által megszakítandó „külső” zárlati árama:

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3} (X'_d + X_{Tr} + X_{sin})} = 27,7 \text{ kA.}$$

### 4. Generátor és transzformátor kapacitásainak és induktivitásainak értéke, a „nagyfrekvenciás” induktívitas fogalma

A továbbiakban röviden érintjük csak a VSF számításához szükséges alapfogalmakat és különböző számítási módszereket, az idegen nyelvű irodalmak mellett [20], [21], [22] utalunk a VSF számítási módszereivel részletesen foglalkozó [19] magyar nyelvű tanulmányra.

#### 4.1 Generátor

A generátorokban a tekercsek közti kölcsönös induktív kapcsolat a hornyokban való elhelyezkedés miatt lényegesen kisebb, mint transzformátoroknál

és a menetszám is kicsiny. A különböző hornyokban elhelyezkedő tekercsrészek közti kapacitív kapcsolat elhanyagolható. Tehát a generátoroknál indokolt, hogy csak öninduktivitást és földhöz való kapacitást tételezzünk fel, azaz a generátortekercset, mint távvezeték tekinthetjük [19], [20].

A „nagyfrekvenciás” inductivitáson a szóban forgó hálózati elem — jelen esetben generátor — önfrekvenciája alatti frekvenciákon mért inductivitását értjük. Ez az inductivitas elég széles frekvenciasávban, a VSF-tartományban csak kis mértékben változik.

Mérése a következőképpen történhet. A generátor tekercsének sarkára változtatható  $C_k$  külső kondenzátort helyezve áraminjektáló vagy rezonancia-módszerrel meghatározzuk a rezgés frekvenciáját. Ha  $C_k \gg C$  (ahol  $C$  a generátor tekercsének földkapacitása), akkor a (2) egyenletből meghatározható a generátor nagyfrekvenciás inductivitása és annak frekvenciától való függése:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_g^* C_k}} \quad (2)$$

A nagyfrekvenciás inductivitas kapcsolatban van a szubtransziens inductivitással [19]. Mérések bizonyítják, hogy a rotorkör hatása, a rotor helyzete elhanyagolható a nagyfrekvenciás inductivitásra. A nagyfrekvenciás fluxus csaknem teljesen a sztátorban, nem mágneses anyagokban záródik [20], [19].

A P.A.V. TVV 221 típusú 220 MW-os generátorának mért földkapacitása:

$$C = 336,6 \text{ nF/fázis.}$$

A vizsgált gép nagyfrekvenciás inductivitasának ( $L_g^*$ ) a telítetlen szubtransziens inductivitasához ( $L_d'' = L_2$ ) való viszonyát az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat

A vizsgált gép  $L_g^*/L_d''$  viszonya

$f$ [kHz]	10...20	5	3
$L_g^*/L_d''$	0,59	0,65	0,68

Számos gépen történt mérés szerint [19], [20]:

$$L_g^* = 0,45 \dots 0,85 L_d''.$$

Ha a vizsgált generátorra mérések nem állnak rendelkezésre, célszerű a generátor nagyfrekvenciás inductivitasaként a szubtransziens inductivitasuk 65–70%-ával számolni középértékben, tehát

$$L_g^* = 0,65 \dots 0,7 L_d''.$$

4.2 Transzformátor

A transzformátorok esetében a távvezetékeknek megfelelő helyettesítés nem ad kielégítő eredményt a primer és szekunder tekercsek közti kölcsönhatás miatt.

Ha nincs a transzformátor és a megszakító között számottevő kapacitású elem (pl. kábel), a rezgésekben döntő szerepe van a transzformátor 1...7 nF/fázis értékű kapacitásainak: a kis- és nagyfeszültségű tekercs földkapacitásának ( $C$  és  $C_{No}$ ) és a tekercsek közti kapacitásnak ( $C_{kN}$ ). Az 5.3 pontban tárgyaljuk, hogy a kapacitások a VSF szempontjából milyen értékkel veendők figyelembe, hogyan kell ezeket a nagy-, illetve kisfeszültségű tekercs sarkaira kihelyezni.

A P.A.V. DHM 270 000/400 típusú, 270 MVA-es géptranszformátorának mért kapacitásai:

$$C_{ko} = 6,93 \text{ nF/fázis,}$$

$$C_{No} = 2,58 \text{ nF/fázis,}$$

$$C_{kN} = 2,68 \text{ nF/fázis.}$$

A géptranszformátor nagyfrekvenciás inductivitasának ( $L_{Tr}^*$ ) az üzemi frekvenciás rövidzárási inductivitasához ( $L_{Tr}$ ) való viszonya a 2. táblázatban látható.

2. táblázat

A géptranszformátor  $L_{Tr}^*/L_{Tr}$  viszonya

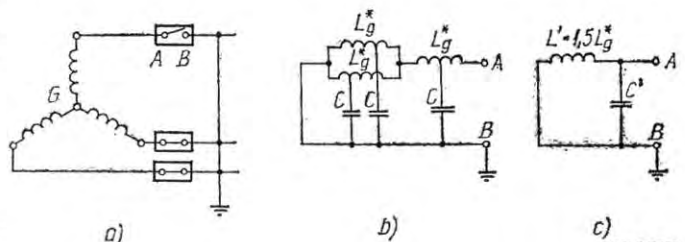
$f$ [kHz]	24	12
$L_{Tr}^*/L_{Tr}$	0,74	0,78

A transzformátorok nagyfrekvenciás inductivitas viszonylag erősebben változik a frekvencia függvényében, mint a generátoroknál [19]. Ha a vizsgált transzformátorra mérések nem állnak rendelkezésre, a transzformátor nagyfrekvenciás inductivitasaként  $L_{Trk}^* = 0,8 L_{Tr}$  értékkel számolhatunk középértékben.

5. A P.A.V. gépmegszakítóinak VSF igénybevétele

5.1 Generátor által táplált háromfázisú földelt rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-e

Ha a rövidzárlat a gépmegszakító és a főtranszformátor közötti szakaszon, tehát a 2. ábra 1 pontján lép fel, a megszakító VSF-ét a generátor inductivitas és kapacitása szabja meg. A [19] 3.1 pontja részletesen tárgyalja a generátor elosztott kapacitásának a generátortekercs sarkára kihelyezett egyenértékű koncentrált kapacitással való helyettesítésének há-



3. ábra. Generátor által táplált, háromfázisú földelt rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-ének számítása



rom módszerét, az egyenlő admittanciák, az egyenlő energiák és az önrezgések egyenlőségének módszerét. Erre támaszkodva oldjuk meg a kitűzött feladatot.

### 5.1.1. Megoldás az egyenlő admittanciák módszerével

Az először megszakító pólus kontaktusai, tehát a 3. ábra A–B pontjai felől nézve úgy tekinthetjük, hogy az  $L$ ,  $C$  paraméterű vezeték le van zárva egy olyan  $L/2$ ,  $2C$  paraméterű vezetékkel, ami a végén rövidre zárt. (Az egyenletek jobb áttekinthetősége érdekében  $L_g^*$  helyett  $L$ -t írunk.) A bemenő impedancia:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{j \sqrt{\frac{L}{C}} \operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC}) + j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC})}{\sqrt{\frac{L}{C}} + j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC}) j \operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC})}, \quad (3)$$

$$Y = \frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{1 - \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2(\omega \sqrt{LC})}{\frac{3}{2} j \operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC})}. \quad (4)$$

A (4) egyenletet megfelelőbb alakra átírva:

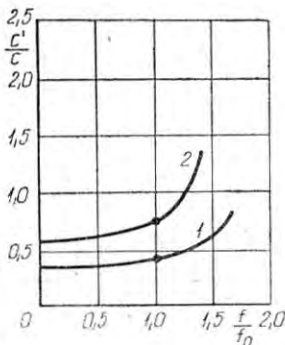
$$Y = \frac{\omega \sqrt{LC} \operatorname{ctg}(\omega \sqrt{LC}) - \frac{1}{2} \omega \sqrt{LC} \operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC})}{\frac{3}{2} j \omega L}. \quad (5)$$

A helyettesítő kör admittanciája:

$$Y' = \frac{1 - \omega^2 L' C'}{j \omega L'}. \quad (6)$$

Egyenértékű a kapcsolás akkor, ha a 3a. és 3c. ábra admittanciái az A–B pontokból nézve egyenlők. Az admittanciákat egyenlővé téve és figyelembe véve azt, hogy  $L' = 1,5 L$ , a helyettesítő kapacitásra a (7) egyenletet kapjuk:

$$C' = \frac{2}{3} C \frac{1 - \omega \sqrt{LC} \operatorname{ctg}(\omega \sqrt{LC}) + \frac{1}{2} \omega \sqrt{LC} \operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC})}{\omega^2 LC} \quad (7)$$



3-20-4

4. ábra.  $c'/c$  értéke a frekvencia függvényében

[ (7) és (23) egyenletek ábrázolása ] (A lépték:  $53,2 \mu\text{s}/\text{osztás}$ )

A  $C'/C$  értéket a frekvencia függvényében a 4. ábra 2 görbéje mutatja.

A bennünket érdeklő önfrekvencián:

$$C' = 0,731 C \quad (8)$$

Ez egyébként egyszerűen adódik abból a feltételből is, hogy a generátor önrezgései ott vannak, ahol  $Y = 0$ .

A (4) egyenletből láthatóan ez ott teljesül, ahol

$$\operatorname{tg}(\omega \sqrt{LC}) = \sqrt{2}. \quad (9)$$

Az első önrezgés körfrekvenciája:

$$\omega_0 = \frac{0,9553}{\sqrt{LC}}. \quad (10)$$

A 3c. ábra önrezgése:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{1,5 LC'}}. \quad (11)$$

A körfrekvenciákat egyenlővé téve ugyancsak (8) adódik.

Figyelembe véve, hogy  $L_g^*/L_d'' = 0,59$  és  $C' = 0,731 C$ , a 3FN zárlatot először megszakító pólus VSF-frekvenciája:

$$f'_{g3FN} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L' C'}} = 13,16 \text{ kHz}, \quad (12)$$

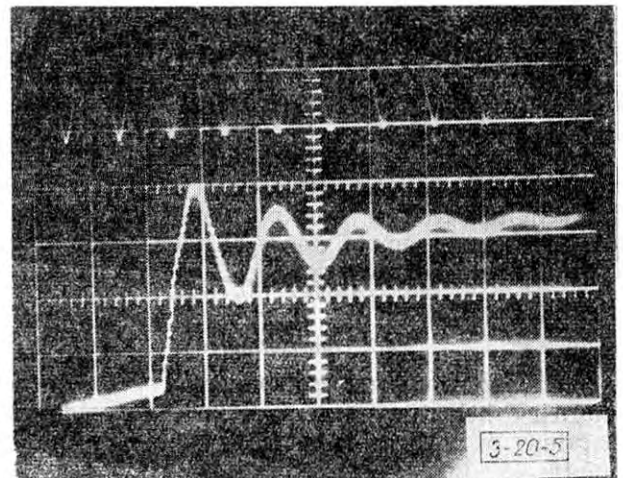
$$L' = 1,5 L_g^* = 1,5 \cdot 0,59 L_d'' = 0,594 \text{ mH},$$

$$C' = 0,731 C = 246,1 \text{ nF}.$$

Az 5. ábra az áraminjektáló módszerrel mért VSF oscillogramját mutatja. A VSF paraméterei:

$$f_{g3FN} = 13,4 \text{ kHz}; \quad \gamma = 1,45,$$

$$U_c = \gamma \hat{U}_v = 1,45 \cdot 1,5 \frac{15,75 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 27,97 \text{ kV}.$$



5. ábra. Generátor által táplált, háromfázisú földelt rövidzárlatot először megszakító fázis mért VSF-e.

A  $k = 1,5$  tényező a háromfázisú zárlatot először megszakító pólus tényezője („first pole to clear factor”).

A VSF meredeksége:

$$S = U_c/t_3 = U_c \cdot 2f/0,85 = 0,89 \text{ kV}/\mu\text{s}.$$

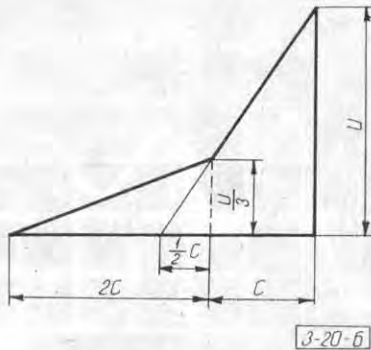
A mért VSF-frekvencia jól egyezik a (12) egyenlettel számolt értékkel. Az  $S$  meredekség számításához még a csúcstényező ismeretére van szükség, a mérések alapján [4] ennek értéke

$$\gamma = 1,4 \dots 1,6.$$

5.1.2. Megoldás az egyenlő energiák módszerével

Veszteségmentes esetben a vizsgált hálózat és a helyettesítő kör egyenértékű, ha egyenlő kapcsoló feszültség esetén a feszültség csúcserőértékénél az elektrosztatikus energiák, az áram csúcserőértékénél pedig a mágneses energiák egyenlők a két áramkörben.

A módszer alkalmazható tetszés szerinti frekvenciánál, egyszerűség kedvéért azonban kis ( $f \ll f_0$ ) frekvenciák esetére mutatjuk be a számítást. Kis frekvenciák esetében a tekercs elosztott kapacitásain átfolyó áram elhanyagolható az induktivitás áramához képest, tehát a tekercs mentén a feszültség lineárisan változik. Ha  $L' = 1,5 L_g^*$ , akkor a mágneses energiák a valóságos és a helyettesítő áramkörben egyenlők.



3-20-6

6. ábra. A 3b. ábra szerinti valóságos kör elektrosztatikus energiájának számítása

A 3b. ábra szerinti valóságos kör elektrosztatikus energiája a 6. ábra alapján számítható.

$$W_1 = \frac{1}{2} \int_0^{2C} u^2 dc = \frac{U^2}{72 C^2} \int_0^{2C} c^2 dc = U^2 C/27,$$

$$\frac{u}{U/3} = \frac{c}{2C}$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \int_{1/2 C}^{3/2 C} u^2 dc = \frac{2}{9} \frac{U^2}{C^2} \int_{1/2 C}^{3/2 C} c^2 dc = 13 U^2 C/54,$$

$$\frac{u}{U} = \frac{c}{3C/2},$$

$$W = W_1 + W_2 = 5 U^2 C/18. \quad (13)$$

A helyettesítő kör elektrosztatikus energiája:

$$W' = U^2 C'/2 \quad (14)$$

A (13) és (14) egyenletet egyenlővé téve  $C'$  értékére (15) adódik.

$$C' = 5 C/9 \quad (15)$$

Az energiamódszer ugyanazt az eredményt adja, mint az admittanciamódszer  $\omega \ll \omega_0$  esetében (4. ábra).

A (15) egyenlet felhasználásával a generátor által táplált 3FN zárlatot megszakító pólus VSF frekvenciája:

$$f'_{g3FN} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L' C'}} = 15,1 \text{ kHz}, \quad (16)$$

ahol

$$L' = 1,5 L_g^* = 0,594 \text{ mH},$$

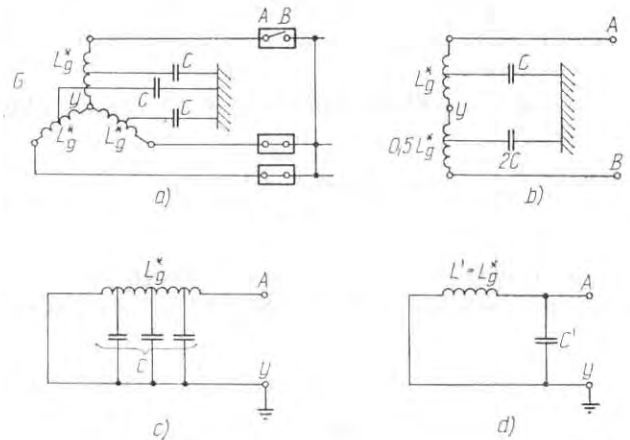
$$C' = 5 C/9 = 187 \text{ nF}.$$

Az energiamódszer az  $\omega \ll \omega_0$  tartományban ad jó eredményt, ez a magyarázata annak, hogy a (16) egyenlettel számolt önfrekvencia 12,5%-kal nagyobb a mért VSF frekvenciájánál.

5.2 Generátor által táplált szigetelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-e

5.2.1 Megoldás az egyenlő energiák módszerével

A viszonyokat a 7. ábra mutatja. Mivel most a tekercsek egy pontja sem földelt, nulla potenciálú pontot kell keresni. A tekercs egy részének kapacitásain a föld felé folyó áramoknak a tekercs más részeinek kapacitásain kell visszafolyniuk.



3-20-7

7. ábra. Generátor által táplált, szigetelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-ének számítása

A nulla potenciálú pont tehát ott van, amire nézve az induktivitások aránya megegyezik a kapacitások arányának reciprokával. Jelen esetben könnyen belátható, hogy az  $y$  csillagpont a nulla potenciálú pont. Ekkor viszont a VSF frekvenciájának meghatározása szempontjából a kapcsolást a 6c. ábra szerinti egy generátor fázisra vezettük vissza.

A valóságos kör elektrosztatikus energiája:

$$W = \frac{1}{2} \int_0^C u^2 dc = \frac{U^2}{2C^2} \int_0^C c^2 dc = U^2 C/6 \quad (17)$$

$$u/U = c/C.$$

A helyettesítő kör energiája:

$$W' = U^2 C'/2. \quad (18)$$

Az elektrosztatikus energiák egyenlőségéből adódik:

$$C' = C/3. \quad (19)$$

A generátor által táplált szigetelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító pólus VSF-frekvenciája:

$$f'_{g3F} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C'}} = 23,9 \text{ kHz} \quad (20)$$

ahol

$$L' = L_g^* = 0,396 \text{ mH}$$

$$C' = C/3 = 112,2 \text{ nF}$$

### 5.2.2 Megoldás az egyenlő admittanciák módszerével

Az 5.2.1 szakaszban elmondottak alapján a 7c. ábra egy generátor fázisát rövidre zárt távvezeték-ként kezelve az admittanciára (21) adódik:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{\omega\sqrt{LC} \operatorname{ctg}(\omega\sqrt{LC})}{j\omega L} \quad (21)$$

Ha a helyettesítő kapcsolás admittanciáját (21)-gyel egyenlővé tesszük (22) adódik:

$$\frac{\omega\sqrt{LC} \operatorname{ctg}(\omega\sqrt{LC})}{j\omega L} = \frac{1 - \omega^2 LC'}{j\omega L} \quad (22)$$

A (22) egyenletből meghatározható az egyenértékű  $C'$  értéke ( $L = L'$ ):

$$C' = \frac{1 - \omega\sqrt{LC} \operatorname{ctg}(\omega\sqrt{LC})}{\omega^2 LC} C. \quad (23)$$

A  $C'/C$  értéket a frekvencia függvényében a 4. ábra 1. görbéje mutatja. A bennünket érdeklő önfrekvencián

$$C' = 0,405 C \quad (24)$$

Kis ( $f \ll f_0$ ) frekvenciákon az energiamódszerrel nyert  $C' = C/3$  érték adódik.

A (24) egyszerűen adódik abból is, hogy a generátorfázis önrezgései ott vannak, ahol  $Y = 0$ , tehát ahol

$$\operatorname{ctg}(\omega\sqrt{LC}) = 0. \quad (25)$$

Ennek megoldása

$$\omega\sqrt{LC} = \pi/2; 3\pi/2; 5\pi/2 \dots$$

A gyökök és így az önrezgések száma végtelen. Ezen önrezgések amplitúdóinak aránya  $1:3^2:5^2 \dots$ ,

tehát elegendő csak az alapharmonikussal számolni. Az első önrezgés körfrekvenciája:

$$\omega_0 = \pi/2\sqrt{LC},$$

$$f_0 = 1/4\sqrt{LC}.$$

Ha a 7c. és 7d. ábra körfrekvenciáit egyenlővé tesszük és megoldjuk, a (24) egyenlet adódik.

$$\omega_0 = \pi/2\sqrt{LC} = 1/\sqrt{LC'} = \omega'_0,$$

$$C' = 4C/\pi^2 = 0,405 C$$

A generátor által táplált szigetelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító pólus VSF-frekvenciája:

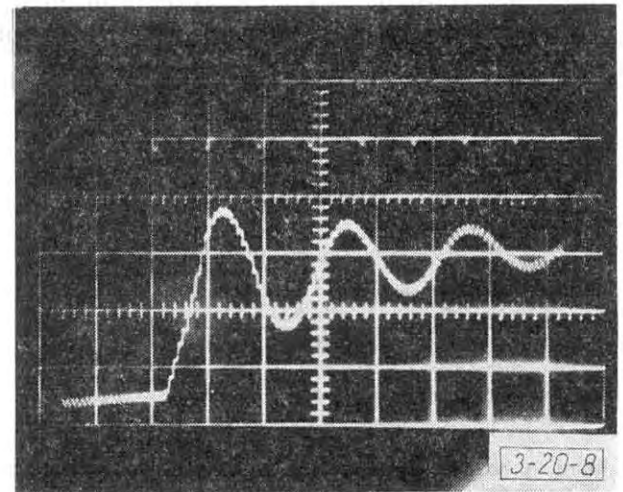
$$f'_{g3F} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C'}} = 21,7 \text{ kHz} \quad (26)$$

ahol

$$L' = L_g^* = 0,396 \text{ mH}$$

$$C' = 0,405 C = 136,3 \text{ nF}.$$

A 8. ábra mutatja a mért VSF oszcillogramját. A VSF paraméterei:



8. ábra. Generátor által táplált, szigetelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis mért VSF-e.

(A lépték: 21,8  $\mu\text{s}$ /osztás)

$$f_{g3F} = 21,6 \text{ kHz}$$

$$\gamma = 1,43$$

$$U_c = \gamma \hat{U}_v = 1,43 \cdot 1,5 \frac{15,75\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 27,58 \text{ kV}.$$

A VSF meredeksége:

$$S = U_c \cdot 2f/0,85 = 1,4 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Az admittanciámódszerrel számolt VSF-frekvencia jól egyezik a mért VSF frekvenciával. Az energiamódszerrel számolt érték mért értéktől való nagyobb – jelen esetben 10,6%-os – eltérést az 5.1.2 szakaszban indokoltuk.

**5.3. Főtranszformátor által táplált földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-e**

3. táblázat

A transzformátorokra levezetett egyenértékű helyettesítő kapacitások számítását WANGER és BROWN [21] munkája alapján [19] 3.3.1 szakasza foglalja össze.

A gyakorlatban azonban elterjedten használják a Bewley-féle egyszerűsített helyettesítő kapcsolást. Ahogy BEWLEY [23] mérésekkel is bizonyította, kis hibát okoz, ha a *főjtő és transzformátor tekercseinek helyettesítő kapacitásaiként a tekercs végeire koncentrált fél-fél tekercskapacitást használjuk*. A továbbiakban mi is ezt a módszert alkalmazzuk. A VSF-méréseknél és számításoknál a főtranszformátor 420 kV-os oldalán végtelen zárlati teljesítményt feltételezünk.

Ha a rövidzárlat a gépmegszakító és a generátor közötti szakaszon, tehát a 2. ábra 2. pontján lép fel, a viszonyokat a 9. ábra mutatja.

Jelölések:

$C_{ko}$  kisfeszültségű tekercs fázisonkénti földkapacitása;

$C_{kN}$  kis- és nagyfeszültségű tekercsek közötti fázisonkénti kapacitás;

$\Sigma C$  a megszakító és transzformátor közötti szakaszra csatlakozó, koncentrálnak tekinthető fázisonkénti kapacitások;

$$\Sigma C = C_M + C_S + C_{AV} + C_{FV} + C_{HTr} + C_{TL}$$

$C_M$  megszakító földkapacitása;

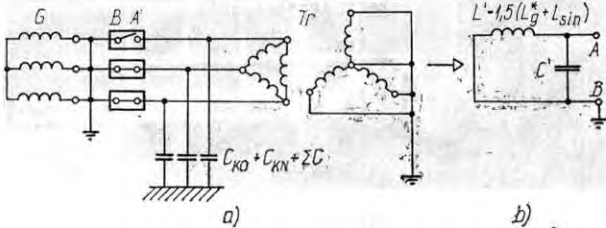
$C_S$  tokozott sín földkapacitása;

$C_{AV}$  áramváltó földkapacitása;

$C_{FV}$  feszültségváltó földkapacitása;

$C_{HTr}$  háziüzemű transzformátor mértékadó kapacitása;

$C_{TL}$  túlfeszültség levezető földkapacitása.



3-20-9

9. ábra. Főtranszformátor által táplált, földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-ének számítása

A szóban forgó kapacitások nagyságrendi érzékeltetésére közöljük [24] 3. táblázatát.

A beépített 9500 A-es, fázisonként tokozott sín számolt földkapacitása  $C'_s = 59 \text{ pF/m}$ .

$\Sigma C$  mért értéke:

$$\Sigma C = 7,97 \text{ nF/fázis}$$

A főtranszformátorról táplált 3FN zárlatot először megszakító fázis VSF-ét (27) adja.

$$f'_{Tr3FN} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C'}} = 62,2 \text{ kHz}, \quad (27)$$

**Hálózati elemek kapacitásai**

Aramváltók 120 kV; 600/5 A(olaj) 35 kV; 400/5 A 10 kV; 300/5 A	Földkapacitás 172 pF/fázis 135 pF/fázis 123 pF/fázis
Feszültségváltók 120 000/√3/100/√3 V(olaj) 35 000/100 V 20 000/100 V	Földkapacitás 650 pF/fázis 400 pF/fázis 340 pF/fázis
Átvezetők 120 kV 35 kV	Földkapacitás 150 pF/fázis 66 pF/fázis
Megszakító (olajzegény) 120 kV; 2700 MVA	Földkapacitás 70 pF/fázis
Gyűjtősín	Positív sorrendű kapacitás 10 – 18 pF/méter

$$L' = 1,5 (L_{Tr} + L_{sin}) = 1,5(0,68 L_{Tr} + L_{sin}) = 0,372 \text{ mH}$$

$$C' = C_{ko} + C_{kN} + \Sigma C = 17,58 \text{ nF}$$

Megjegyezzük, hogy az  $L'_{Tr} = 0,68 L_{Tr}$  értéket a mért értékek (lásd a 4.2 pontban) önfrekvenciára extrapolálásával vettük fel.

A mért VSF oszcillogramját a 10. ábra mutatja. A VSF paraméterei:

$$f_{Tr3FN} = 59,3 \text{ kHz}$$

$$\gamma = 1,41$$

$$U = \gamma \hat{U}_v = 1,41 \cdot 1,5 \frac{15,75 \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 27,2 \text{ kV}$$

A VSF meredeksége:

$$S = U_c \cdot 2f/0,85 = 3,8 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

A mért és a (27) egyenlettel számított VSF-ek egyezése kielégítő.

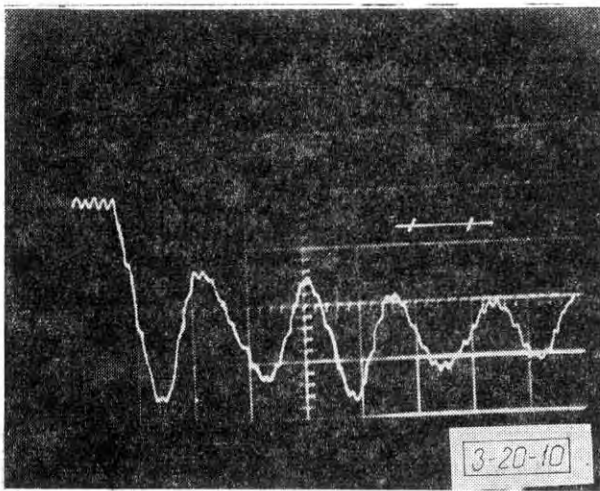
Megjegyezzük, hogy a szimmetrikus összetevők módszerében [19] a transzformátor helyettesítő kapacitásaiként a Bewley-féle kapacitásokat alkalmazva ugyancsak a (27) egyenlethez jutunk.

**5.4 Főtranszformátor által táplált szigetelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-e**

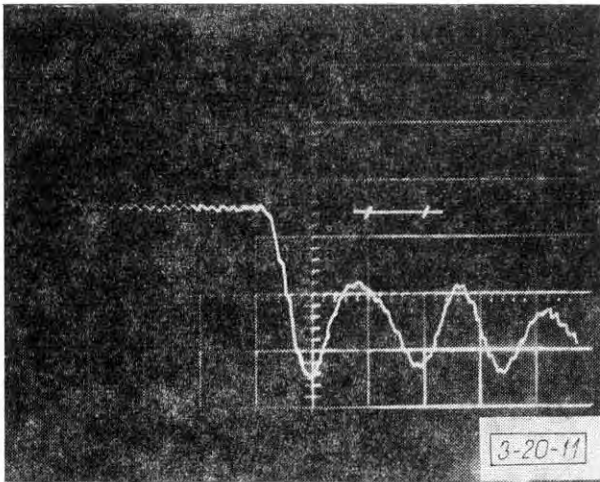
Ha a szigetelt háromfázisú rövidzárlat a gépmegszakító és a generátor közötti szakaszon, tehát a 2. ábra 2. pontjában lép fel, a VSF  $f \approx 60 \text{ kHz}$  frekvenciájú önrezgéseinek szempontjából a hibahely a generátor földkapacitásain keresztül gyakorlatilag földeltnak tekinthető, tehát az először megszakító fázis VSF-ére lényegében az 5.3 pontban elmondottak érvényesek.

Ezt a megfontolást a mért VSF-ek 11. ábrán és 10. ábrán látható felvételeinek összehasonlítása is bizonyítja. Érdekes, hogy a [4] 4.2.2 szakaszában szerzők a generátor földkapacitásainak a hibahelyet földelő hatását nem veszik figyelembe és helytelenül számolnak.





10. ábra. Főtranszformátor által táplált, földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis mért VSF-e. (A lépték 11  $\mu$ s/osztás)



11. ábra. Főtranszformátor által táplált, szigetelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis mért VSF-e. (A lépték: 11  $\mu$ s/osztás)

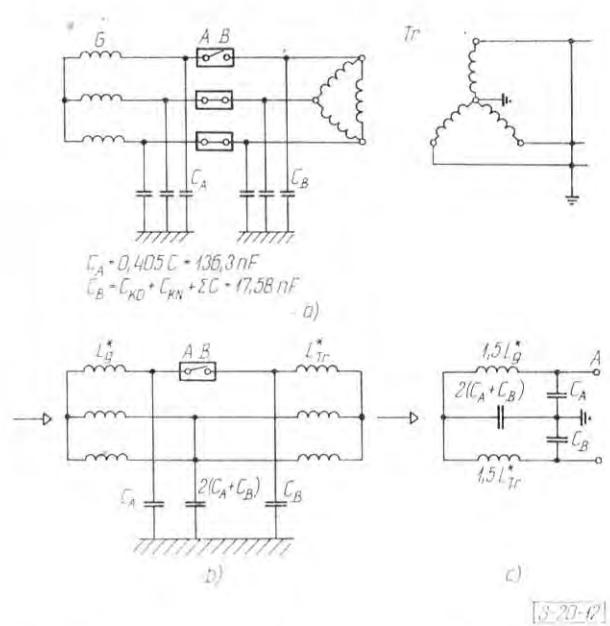
**5.5 A főtranszformátor nagyfeszültségű oldalán fellépő „külső” földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-e**

Ha a háromfázisú rövidzárlat a főtranszformátor nagyfeszültségű oldalán, tehát a 2. ábra 3. pontjában lép fel a viszonyokat a 12. ábra mutatja.

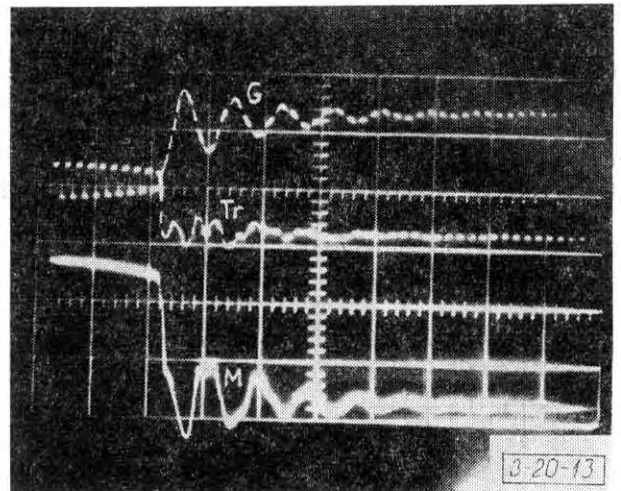
Az összevonással kapott 12c. ábra áramköre kétfrekvenciás. Jó közelítéssel igaz az, hogy a  $2(C_A + C_B)$  kondenzátor a két rezgést szétválasztja, a generátor, – illetve főtranszformátor induktivitásának megfelelő rezgések mintegy egymástól függetlennek tekinthetők.

$$f'_g = \frac{1}{2\pi \sqrt{1,5 L_g^* \frac{C_A \cdot 2(C_A + C_B)}{C_A + 2(C_A + C_B)}}},$$

$$f'_{Tr} = \frac{1}{2\pi \sqrt{1,5 L_{Tr}^* \frac{C_B \cdot 2(C_A + C_B)}{C_B + 2(C_A + C_B)}}}. \quad (28)$$



12. ábra. Főtranszformátor nagyfeszültségű oldalán fellépő, „külső” földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-ének számítása



13. ábra. „Külső” földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis mért VSF-e. G – generátor oldali rezgés; Tr – transzformátor oldali rezgés; M – megszakító sarkán megjelenő eredő rezgés. (A lépték: 53,8  $\mu$ s/osztás)

Az egyes rezgések amplitúdója a tranziens reaktanciákkal ( $1,5X'_d$ ;  $1,5X_{Tr}$ ) arányos:

$$A_g = X'_d / (X'_d + X_{Tr}),$$

$$A_{Tr} = X_{Tr} / (X'_d + X_{Tr}) = 1 - A_g \quad (29)$$

A kétfrekvenciás VSF számított kezdeti meredeksége:

$$S' = 2\sqrt{2} \frac{1,5}{0,85} I_k (X'_d \gamma_g f'_g + X_{Tr} \gamma_{Tr} f'_{Tr}) \quad (30)$$



A paramétereket behelyettesítve:

$$\begin{aligned} f'_g &= 21,2 \text{ kHz} \\ f'_{Tr} &= 63,9 \text{ kHz} \\ S' &= 2,24 \text{ kV}/\mu\text{s} \\ \gamma_g &= \gamma_{Tr} = 1,4 \\ I_k &= 27,7 \text{ kA (1.3. pont)} \end{aligned}$$

A „külső” 3 FN zárlatot először megszakító fázis mért VSF-t a 13. ábra mutatja. A sugársorrend a következő:

- generátor oldali rezgés (G);
- transzformátor oldali rezgés (Tr);
- megszakító pólusain megjelenő eredő rezgés (M).

A mért VSF paramétereit:

$$\begin{aligned} f_g &= 21,3 \text{ kHz} \\ f_{Tr} &= 60 \text{ kHz} \\ S &= 1,94 \text{ kV}/\mu\text{s} \end{aligned}$$

A mért és a (28), (29), (30) egyenletekkel számolt VSF paraméterek egyezése kielégítő.

**5.6 A névleges terhelési áram megszakításakor fellépő VSF**

A terhelési áram megszakításakor fellépő VSF a megszakító generátor felőli és transzformátor felőli pontjain fellépő feszültségtranziensek különbsége. A feszültségtranziensek amplitúdóját a névleges terhelési áram által okozott üzemi frekvenciás feszültségesések, tehát a terhelési áram és a megfelelő impedanciák szorzata szabja meg.

Jó közelítéssel feltételezhetjük, hogy a hálózat hatása a VSF kezdeti szakaszára elhanyagolható. Ez azt jelenti, hogy az először megszakító fázis VSF-jének számítására az 5.5 pont eredményei alkalmazhatók, figyelembe véve azt, hogy az  $I_k$  zárlati árammal szemben az  $I_N$  névleges áram által megszabott üzemi frekvenciás  $U_g = I_N X'_d$  és  $U_{Tr} = I_N X_{Tr}$  feszültségesések kerülnek az  $S'$  meredekség képletébe.

$$\begin{aligned} S'' &= 2\sqrt{2} \frac{1,5}{0,85} I_N (X'_d \gamma_g f'_g + X_{Tr} \gamma_{Tr} f'_{Tr}), \\ S'' &= S' \frac{I_N}{I_k} = 0,77 \text{ kV}/\mu\text{s}. \end{aligned} \quad (31)$$

**5.7 A VSF alakulása a főtranszformátor kifesztültségű oldalán elhelyezett védőkondenzátor esetén**

Ha a blokk főtranszformátorának kifesztültségű oldalán megszakítót építettek be, akkor a generátormegszakító nyitott állapotában a transzformátor kifesztültségű oldalán veszélyes túlfeszültségek keletkezhetnek [18]. A nagyfeszültségű tekercset érő légköri túlfeszültségek elsősorban kapacitív csatolás útján adódnak át, tehát a kifesztültségű tekercs igénybevételének csökkentésére a  $C_{KN}/C_{KN} + C_{ko} + \Sigma C$  viszonyt kell lecsökkenteni  $C_V$  védőkondenzátor 2. ábra szerinti beépítésével.  $C_V$  szokásos értéke  $0,1 \dots 0,3 \mu\text{F}/\text{fázis}$  [2], [3], [4], [5].

A fázis és föld közé kapcsolt  $C_V$  védőkondenzátor a főtranszformátor szekunder oldalán megjelenő túlfeszültség csökkentésén és a nullponteltolódás kiküszöbölésén [4], [5] túlmenően a gépmegszakító VSF igénybevételét is kedvezően befolyásolja [2], [3], [4], [5].

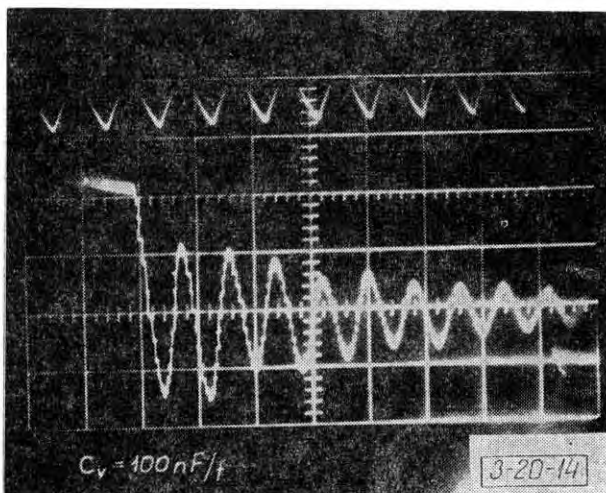
**5.7.1 Főtranszformátor által táplált földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-e  $C_V$  védőkondenzátor esetén**

A VSF számítása az 5.3 pontban megadott (27) egyenlettel történhet, figyelembe véve, hogy

$$\begin{aligned} C' &= C_{ko} + C_{KN} + \Sigma C + C_V. \\ C_V &= 100 \text{ nF}/\text{fázis esetén:} \\ f'_{Tr3FN-C_V} &= 23,1 \text{ kHz.} \\ 1,5 L_{Tr}^* &= 1,5 \cdot 0,74 L_{Tr}. \end{aligned}$$

A mért VSF-t a 14. ábra oszcillogramja mutatja

$$f_{Tr3FN-C_V} = 23,6 \text{ kHz.}$$



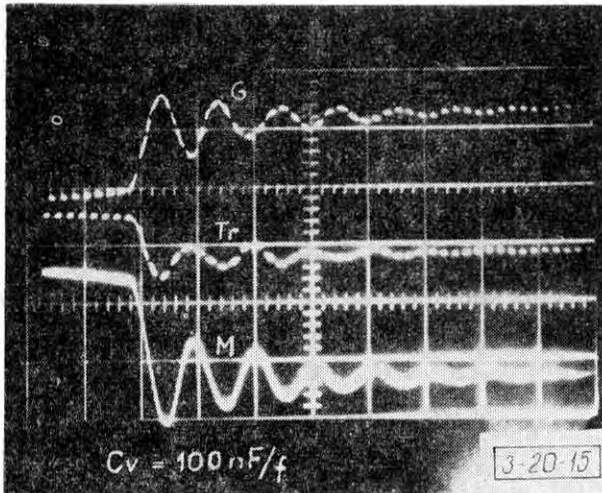
14. ábra. Főtranszformátor által táplált, földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis mért VSF-e  $C_V = 100 \text{ nF}/\text{f}$  védőkondenzátor esetén. (A lépték: 54,2  $\mu\text{s}/\text{osztás}$ )

A számított és mért értékek jól egyeznek. Látható, hogy  $C_V = 100 \text{ nF}/\text{fázis}$  védőkondenzátor a VSF frekvenciáját, így meredekségét 40%-ra csökkenti.

**5.7.2 A főtranszformátor nagyfeszültségű oldalán fellépő „külső” földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis VSF-e  $C_V$  védőkondenzátor esetén**

A  $C_V$  védőkondenzátor – elsősorban a gépmegszakító transzformátor felőli pontján fellépő feszültségtranziens-frekvenciájának csökkentése révén – csökkenti a „külső” háromfázisú rövidzárlatot (és a névleges terhelési áramot) először megszakító fázis VSF-meredekségét is.

A főtranszformátor nagyfeszültségű oldalán fellépő „külső” földelt háromfázisú zárlat megszakításakor mért VSF-t  $C_V = 100 \text{ nF}/\text{fázis}$  esetén a 15. ábra mutatja. A VSF mért meredeksége  $S'_{C_V} = 1,15 \text{ kV}/\mu\text{s}$ .



15. ábra. „Külső” földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázis mért VSF-e  $C_V = 100 \text{ nF/f}$  védőkondenzátor esetén. (A lépték:  $53,8 \mu\text{s/osztás}$ )

## 6. Az eredmények értékelése

A 2. ábra hálózatán bemutatott három zárlati hely közül a 2. pontban keletkező – tehát a főtranszformátor által táplált „belső” – földelt háromfázisú rövidzárlatot először megszakító fázison egyidejűleg lép fel a maximális megszakítási áram és a maximális VSF-frekvencia, illetve VSF-meredekség. A P. A. V. 220 MW-os blokkjaira mért értékek:

$$I_{Tr} = 74,9 \text{ kA}$$

$$f_{Tr} = 59,3 \text{ kHz}$$

$$S_{Tr} = 3,8 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Hogy a gépmegszakító  $I_{Tr}$  zárlati áram megszakításakor üzembiztosan működik-e vagy sem, a megszakító beépítési helyén mért – illetve számolt VSF-paraméterek és az  $I_{Tr}$  zárlati áramon a gépmegszakítókra a gyártó által garantált VSF-paraméterek összehasonlításából dönthető el.

A gépmegszakító VSF-igénybevétele  $C_V$  védőkondenzátor beépítésével lényegesen csökkenthető, 100 nF/fázis értékű védőkondenzátor a VSF-meredekségét 40%-ra csökkenti.

A tanulmányban bemutatott számítási módszerek – elsősorban a maximális VSF igénybevétel (27) képlettel való meghatározása – lehetőséget adnak a VSF elegendően pontos számítására a P. A. V. beépítési körülményeitől eltérő körülmények esetén is.

## IRODALOM

- [1] ZIMMERMANN, H.: Grundsaltungen der Eigenbedarfs-Versorgung. ETZ-A Bd. 96(1975) H. 2, 62–68.
- [2] RUOSS, E. – VADÁSZI, J.: Special requirements for generator circuit-breakers in large power plants. CIGRE, 1982. Session, Paris, 13–10.
- [3] BURCKHARD, P. – VADÁSZI, E. – SEIDEL, M.: Generatorschalter Typ DR für extrem hohe Betriebs- und Kurz-

schluss-ströme. Brown Boveri Mitteilungen (1975). 131–138.

- [4] BRAUN, A. – HUBER, H. – SUITER, H.: Determination of transient recovery voltages occurring across generator circuit-breakers in large modern power stations. CIGRE, 1976. Session, Paris, 13–03.
- [5] VADÁSZI, E.: Beanspruchung und Prüfung der Generatorschalter vom Typ DR bei Lastausschaltung. Brown Boveri Mitteilungen (1981) 316–325.
- [6] BURCKHARDT, P. – SCHWEIGER, K. – SKROBALA, L.: BBC-Generatorschaltgeräte in Pumpspeicherkraftwerken. Brown Boveri Mitteilungen (1979) 336–342.
- [7] EIDINGER, A.: Schaltgeräte in Generatorableitungen. ETZ-A. (1975) H. 2, 101–104.
- [8] VADÁSZI, J. – GENG, P.: Some design aspects of generator circuit-breakers for rated currents up to 50 000 A. IEEE. Trans. PAS (1980) May/June 1210–1218.
- [9] CANAY, M. – KLEIN, H.: Asymmetrische Kurzschlussströme von Generatoren unter Berücksichtigung des Lichtbogens beim Abschalten. Brown Boveri Mitteilungen (1974) 199–206.
- [10] THURIES, E. – JEANJEAN, R. – VAN DOAN, P.: Technical-economical response of the generator circuit-breaker to future generation ratings. IEEE Trans. PAS (1980) Sept/Oct. 1970–1974.
- [11] GENG, P. – SCHWEIGER, K.: Generatorschalter Typ DR für Nennströme bis 50 kA. Brown Boveri Mitteilungen (1980) 257–263.
- [12] GRABER, W. – GYSEL, T.: Das Ausschalten von Kurzschlussströmen mit ausbleibenden Nulldurchgängen durch Hochspannungsschalter. Brown Boveri Mitteilungen (1980) 237–243.
- [13] DE LIMA, J. A. – SANTAGOSTINI, G. – CORRADI, E.: Short-circuits near large synchronous machines – evaluation of the short-circuit currents and general circuit-breaker stresses during its interruption. CIGRE, 1982. Paris, 13–01.
- [14] GERT, R. – VALASEK, J.: Stresses imposed on medium voltage generator circuit-breakers and on breakers connected to the tertiary windings of large power transformers by the transient recovery voltage occurring in service. CIGRE, 1982. Paris, 13–05.
- [15] THRIES, E. – MALLEZ, B. – VAN DOAN, P. – JEANJEAN, R.: Compressed air, the solution for generator breaker problems. IEEE Trans. PAS (1976) Nov./Dec. 1901–1910.
- [16] MORII, K. – MATSUMURA, S.: SF<sub>6</sub> gas circuit-breaker, new solution for generator main circuit switching. IEEE Trans. PAS (1979) May/June, 759–769.
- [17] PACE, R. A.: Generator circuit-breaker considerations at the McGuire and Catawba nuclear Stations. IEEE PES Winter Meeting, New York (1976) A-76 020–8.
- [18] BAYALA, E.: Surge transfer through transformers. Protection of generators. CIGRE 1962. Paris, 414.
- [19] MIHÁLKOVICS T.: A hálózati független visszaszökő feszültség számítási módszerei. Budapest, VEIKI, HV-12, 1968.
- [20] HAMMARLUND, P.: Transient recovery voltage subsequent to short-circuit interruption. Book, Stockholm, 1946.
- [21] WANGER, W. – BROWN, J. K.: Die Berechnung des Schwingungsverlaufs der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschluss-Abschaltungen. Brown Boveri Mitteilungen (1937) 283–302.
- [22] SLAMECKA, E. – WATERSCHKE, W.: Schaltvorgänge in Hoch- und Niederspannungsnetzen. Book, Siemens Ag. 1972.
- [23] BEWLEY: Equivalent circuits of transformers and reactors to switching surges. Trans. AIEE 58 (1939).
- [24] MIHÁLKOVICS T.: Transzformátorok zárlatainak megszakításakor fellépő visszaszökő feszültség meghatározása. Elektrotechnika (1971) 161–167.

Érkezett: 1983. I.