

# Hálózatok visszaszökő feszültségének számítása

## II. rész. Kábelek hatása a visszaszökő feszültségre

MIHÁLKOVICS TIBOR, Budapest\*

DK 621.316.015.34.001.24:621.315.2

Előző cikkünkben [1] bemutattuk a gyűjtősín egyik távvezetékén keletkező szigetelt háromfázisú és földelt egyfázisú kapcsolárat és kistávolságú zárlat megszakítása esetén fellépő visszaszökő feszültség (továbbiakban VSF) számítási módszerét. Megadtuk a számítás menetét addig az időpontig, amíg a visszavert hullámok a vizsgált megszakító kontaktusaira visszaérkeznek, továbbá a visszavert hullámok számítási módját, végül a többszörös visszaverődések esetére egyszerűsített számítási módszereket mutattunk be a vizsgálható időtartomány kiterjesztése érdekében.

A jelen cikkben a vizsgált zárlatos gyűjtősínre és a közeli szomszédos gyűjtősínekre becsatlakozó kábelek VSF-re gyakorolt hatását vizsgáljuk meg. A nagyfeszültségű kábeles energiaátvitel fejlődése ad ezen vizsgálatoknak aktualitást.

Számításainkban a szigetelt háromfázisú kapcsolárat először megszakító fázisán fellépő VSF-t határozzuk meg, de ezen eredmények alapján az [1]-ben ismertetett módon meghatározható a kistávolságú zárlat és az egyfázisú földrövidzárlat megszakításakor fellépő VSF is.

### 1. A zárlatos gyűjtősínre becsatlakozó kábelek VSF-re gyakorolt hatása

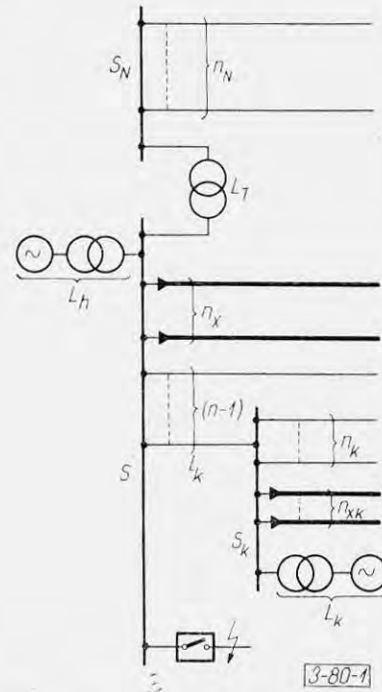
Határozzuk meg az 1. ábra szerinti hálózat s gyűjtősínjének egyik távvezetékén leágazásában keletkező háromfázisú zárlat először megszakító fázisán fellépő VSF-t a zárlatos s gyűjtősínre becsatlakozó  $n_x$  számú,  $z_{xe1} = z_{x1}/n_x$  eredő pozitív sorrendű hullámellenállású kábel esetén.

Megjegyezzük, hogy a fontosabb jelöléseket a cikk végén foglaljuk össze. A Függelékben megadjuk az [1] 2.1. pontjában az 1. ábra hálózatához hasonló hálózatra levezetett VSF egyenleteit. Az 1. ábra hálózata abban tér el az [1] 2.1. pontjában bemutatott hálózattól, hogy az  $(n-1)$  ép távvezetékkel további  $n_x$  kábel van párhuzamosan kapcsolva, tehát az s gyűjtősínre becsatlakozó eredő pozitív sorrendű hullámellenállás értéke nem  $z_{e1} = z_1/(n-1)$ ,

hanem  $z'_{e1} = \frac{z_1}{n-1} * \frac{z_{x1}}{n_x}$ . A „\*” szimbólummal a párhuzamos kapcsolást jelöltük.

Így az első visszavert hullám s gyűjtősínre való megérkezéseig a Függelékben megadott (F1), (F2) és (F3) egyenletekkel lehet a VSF-t kiszámolni, de az egyenletekben szereplő  $z_{e1}$  helyébe mindenhol  $z'_{e1} = z_{e1} * z_{xe1}$  eredő pozitív sorrendű hullámellenállás kerül.

\* MIHÁLKOVICS TIBOR okl. villamosmérnök, a Villamosenergiaipari Kutató Intézet tudományos munkatársa (Budapest V., Zrinyi u. 1.).



1. ábra. Hálózat a számítási módszer bemutatásához

Az üzemben levő hazai 120 kV-os kábelek hosszegységre eső pozitív sorrendű induktivitása (0,51 mH/km) és kapacitása (0,3  $\mu$ F/km) ismeretében a hullámellenállásra és hullámterjedési sebességre az (1) és (2) adódik.

$$z_{x1} = 41,2 \text{ ohm} \approx 0,11 z_1 \quad (1)$$

$$v_{x1} = 0,08 \text{ km}/\mu\text{s} \approx 0,27 v_1, \quad (2)$$

ahol  $z_1 = 375 \text{ ohm}$  (lásd [1] számítási példáit).

Tehát a 120 kV-os kábel pozitív sorrendű hullámellenállása kb. tizede, a pozitív sorrendű hullám terjedési sebessége a kábelben kb. negyede a távvezeték pozitív sorrendű mennyiségeinek. A zárlatos gyűjtősínre kapcsolódó kábel lecsökkenti az eredő hullámellenállást és így a VSF-görbe kezdeti szakaszának meredekségét, tehát a megszakító VSF igénybevételét.

A kábel VSF-re gyakorolt hatását a legszemléletesebben a zárlatos gyűjtősínre csatlakozó kábel esetén és a kábel nélküli esetben fellépő kezdeti meredekségek viszonya mutatja meg:

$$\frac{m_x}{m} = \frac{1,5 I_{mx} \omega z'_{e1}}{1,5 I_m \omega z_{e1}} = \frac{I_{mx} z'_{e1}}{I_m z_{e1}} \quad (3)$$

A (3)-t a Függelék (F4) egyenlete alapján írtuk fel. Ha a kábel fogyasztói kábel, azaz nem táplál rá a zárlatra, akkor  $I_{mx}/I_m = 1$ . Így van ez a zárlatra

rátápláló kábelek esetében is, ha azok kiterjedt rendszer gyűjtősinjére csatlakoznak, ekkor  $I_{mx}/I_m \approx 1$ , tehát a VSF kezdeti meredeksége  $z'_{e1}/z_{e1}$  arányában – általában jelentős mértékben – lecsökken.

Az 1. táblázatban a kezdeti meredekségek viszonyát tüntettük fel a zártatos gyűjtősinre csatlakozó távvezetékek és kábelek számának függvényében, feltételezve, hogy  $I_{mx}/I_m = 1$ .

1. táblázat

A kábeles becsatlakozású és a kábel nélküli esetben fellépő kezdeti meredekségek viszonya

$n_x$	1				2			
	1	2	4	6	1	2	4	6
$n-1$	1	0,18	0,3	0,4	0,05	0,1	0,18	0,25
$m_x/m$	0,1	0,18	0,3	0,4	0,05	0,1	0,18	0,25

A zártatos s gyűjtősinre becsatlakozó legrövidebb távvezeték (legyen ez  $l_k$  hosszú) végéről  $t_k = 2 l_k/v_1$ , a legrövidebb kábel (legyen ez  $l_q$  hosszú) végéről  $t_q = 2 l_q/v_{x1}$  idő múlva érkezik meg a visszavert hullám. A VSF-t a  $t_{kq} = \min. (t_k, t_q)$  ideig tudjuk az (F1) egyenlet alapján számolni.

Az 1. ábra hálózatán túlmenően a gyakorlatban előforduló fontosabb hálózatokra az [1] Függelékében összefoglalt számítási eredmények alkalmasak a kábeles becsatlakozású állomások VSF-ének  $t_{kq}$  ideig való számítására is, ha az egyenletekben szereplő  $z_{e1}$  helyébe mindenhol a  $z'_{e1} = z_{e1} * z_{x1}$  eredő hullámenállás kerül.

Az [1] 2.1. pontjában részletesen leírt módszerrel a megszakítóra az adott megszakítási teljesítményen a szabványokban garantált és a fenti módon  $t_{kq}$  ideig számolt VSF összehasonlító elemzéséből dönthető el, hogy szükséges-e a számítás kiterjesztése a  $t > t_{kq}$  időtartományra. Ha szükséges a számítás időtartományának megnövelése, akkor az [1] 2.2. pontjában leírt módszerrel meghatározzuk a visszavert hullámokat.

A visszavert hullámok számításánál értelem-szerűen alkalmazhatók az [1] 2.2. pontjában levezetett eredmények annak figyelembevételével, hogy az egyenletekben  $z_{e1}$  helyébe  $z'_{e1} = z_{e1} * \frac{z_{x1}}{n_x}$ ;  $z_{k1}$  helyébe  $z'_{k1} = z_{k1} * \frac{z_{x1}}{n_{xk}}$  kerül.

Ha kábelen haladó visszavert hullámot határozunk meg (azaz az s és  $s_k$  gyűjtősineket kábel köti össze), akkor  $z_{e1} = z_1/\epsilon$  helyébe  $z'_{e1} = z_{x1}/\epsilon$  kerül.

A kábelek VSF igénybevételét csökkentő hatásának bemutatására egy gyakorlati esetet ismertünk. A Dunamenti Hőerőmű megszakítóinak 1980-as üzemállapotra történt vizsgálata azt mutatta, hogy a 126 kV-on beépített 6000 MVA-es megszakítóknak a szabványban előírt  $m_{sz} = 1$  kV/ $\mu$ s kezdeti meredekségnél szigorúbb  $m = 1,15$  kV/ $\mu$ s kezdeti meredekség mellett kell megszakítaniok

a 100%-os névleges megszakítási teljesítményt, tehát a megszakítók üzeme nem biztonságos. Az  $m = 1,15$  kV/ $\mu$ s meredekség az (F4) egyenletből az alábbi paraméterek alapján számítható:

$$n-1 = 6$$

$$I_m = \sqrt{2} I = 39 \text{ kA}$$

$$z_1 = 375 \text{ ohm}$$

Ha azonban a Chinoin 40 MW-os fogyasztó jövőben kiépítendő kábelét (a két kábel közül egy állandóan bekapcsolt kábelt feltételezünk) a környező alállomások közül a Dunamenti Hőerőmű 126 kV-os gyűjtősinjére kapcsolják rá, akkor a megszakításkor fellépő VSF kezdeti meredeksége az 1. táblázat szerint  $m_x = 0,4$   $m = 0,46$  kV/ $\mu$ s értékre csökken. Tehát a kb. 13 km hosszú kábel 30 megszakító működését teszi üzembiztossá.

## 2. A VSF számítása a zártatos gyűjtősinre becsatlakozó rövid kábel esetén

Az [1] 2.3. pontjában bemutattuk, hogy ha a zártatos s gyűjtősinre olyan rövid távvezetékek csatlakoznak, hogy a visszavert hullámokat is figyelembe kell venni, vagy esetleg többszörös visszaverődésekkel kell számolni, akkor célszerű egyszerűsített számítási módszereket alkalmazni. Bemutattuk, hogyan és milyen feltételek mellett lehet a távvezeték inductívitasával helyettesíteni, illetve inductívitasát is elhanyagolni. Fenti eljárás természetesen alkalmazható a kábeles becsatlakozású gyűjtősinnek rövid távvezetékei esetében is.

Ha azonban a vizsgált s gyűjtősinre olyan rövid ( $l_q \leq 2-3$  km) kábel csatlakozik (lásd 2. ábra), hogy azon többszörös visszaverődésekkel kell számolni, akkor a kábelt koncentrált kapacitásával helyettesítjük, a kábel inductívitasát pedig elhanyagoljuk. Így az s és  $s_k$  gyűjtősinen levő impedanciák párhuzamosan kapcsolódnak.

A számítási eredmények közlése előtt felhívjuk a figyelmet arra, hogy a  $t \leq t_q = 2 l_q/v_{x1}$  időtartományban a 1. pontban tárgyalt pontos formulákkal célszerű a VSF kezdeti szakaszát számolni és csak a  $t > t_q$  időtartományban alkalmazzuk a helyettesítő áramkör egyenleteit.

A  $t > t_q$  időtartományban az s és  $s_k$  gyűjtősinnek párhuzamosan kapcsolódnak, így az s gyűjtősinre kapcsolódó eredő pozitív sorrendű inductívitas:  $L_{hk1} = L_{h1} * L_{k1}$ ; az eredő pozitív sorrendű hullámenállás:

$$z_{ek1} = \frac{z_1}{n-1+n_k} * \frac{z_{x1}}{n_x-1+n_{xk}} ;$$

a rövid kábel pozitív sorrendű kapacitása:  $C_{q1}$ . A 2. ábra szerinti hálózat VSF-ének időfüggvényét a (4) illetve (7) egyenlet adja az  $l_q$  hosszúságú kábel koncentrált kapacitással való helyettesítése esetén:

$$U(t) = \frac{1,5 I_m \omega}{D} \left[ \frac{-B}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} + \frac{\alpha_1 A + B}{\alpha_1 (\alpha_1 - \alpha_2) (\alpha_1 - \alpha_3)} \exp(\alpha_1 t) + \frac{\alpha_2 A + B}{\alpha_2 (\alpha_2 - \alpha_1) (\alpha_2 - \alpha_3)} \exp(\alpha_2 t) + \frac{\alpha_3 A + B}{\alpha_3 (\alpha_3 - \alpha_1) (\alpha_3 - \alpha_2)} \exp(\alpha_3 t) \right] \quad (4)$$

ahol 
$$p^3 D + p^2 E + pF + G = D(p - \alpha_1)(p - \alpha_2)(p - \alpha_3) \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= L_{hk1} L_{T1} z_{ek1} \\ B &= L_{hk1} G \\ D &= A C_{q1} \\ E &= A/z_{ek1} + B C_{q1} \\ F &= L_{hk1} (z_{ek1} + z_{N1}) + L_{T1} z_{ek1} \\ G &= z_{ek1} z_{N1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Az (5) egyenletnek a gyakorlatban előforduló paraméterek mellett legtöbbször egy valós gyöke és egy konjugált komplex gyökpárja van. Ebben az esetben  $\alpha_2 = \beta + j\gamma$ ;  $\alpha_3 = \beta - j\gamma$  behelyettesítéssel a (4) egyenlet a következő alakra hozható:

$$U(t) = \frac{1,5 I_m \omega}{D} \left[ \frac{-B}{\alpha_1 (\beta^2 + \gamma^2)} + \frac{\alpha_1 A + B}{\alpha_1 [(\alpha_1 - \beta)^2 + \gamma^2]} \exp(\alpha_1 t) - \frac{A (\beta^2 + \gamma^2) + B (2\beta - \alpha_1)}{(\beta^2 + \gamma^2) [(\beta - \alpha_1)^2 + \gamma^2]} \exp(\beta t) \cos \gamma t + \frac{A (\beta^2 + \gamma^2) (\beta - \alpha_1) + B [\beta (\beta - \alpha_1) - \gamma^2]}{\gamma (\beta^2 + \gamma^2) [(\beta - \alpha_1)^2 + \gamma^2]} \exp(\beta t) \sin \gamma t \right] \quad (7)$$

A pontos formulával számolt VSF kezdeti meredeksége (F4) felhasználásával adódik:

$$m_q = 1,5 I_m \omega \left( \frac{z_1}{n-1} * \frac{z_{x1}}{n_x} \right)$$

A (7) differenciálásával azonban a helyettesítő áramkör kezdeti meredeksége:  $m_h = 0$  az s gyűjtősínre kapcsolt koncentrált kapacitás miatt. Ez is indokolja, hogy a  $0 \leq t \leq t_q$  időtartományban a VSF-t az 1. pontban tárgyalt pontos formulákkal számoljuk és csak a  $t > t_q = 2 l_q / v_{x1}$  időtartományban számoljuk a VSF-t a (7) egyenlettel. Ezen számítás felső időhatárát a következő visszavert hullám s gyűjtősínre való visszaérkezésének ideje szabja meg.

Megjegyezzük, hogy az [1] Függelék F/2 és F/5 pontjaiban tárgyalt hálózatoknál a zárlatos gyűjtősínre kapcsolt koncentrált kapacitás esetére történt a VSF kiszámítása. Ezek az eredmények alkalmasak a bemutatott hálózatok esetében a VSF időfüggvényének meghatározására, ha a rövid kábelt koncentrált kapacitásával helyettesítjük.

Ha az  $l_q \leq 2-3$  km rövid kábelen túlmenően további kábelek is csatlakoznak a zárlatos gyűjtősínre, akkor a  $t > t_q$  időtartományban az  $l_q$  hosszúságú kábel koncentrált kapacitását is elhanyagolhatjuk, így az 1. pontban tárgyalt egyszerű formulákra vezethetjük vissza a számítást. Ilyen esetben a rövid kábel kapacitásának elhanyagolásával elkövetett hiba általában nem jelentős, elsősorban a rövid kábellel párhuzamosan kapcsolódó kábelek számától függ.

### 3. A közeli szomszédos gyűjtősínre becsatlakozó kábelek befolyása a VSF-re

Vizsgáljuk meg az 1. ábra hálózata alapján, hogyan befolyásolja a VSF-t az  $s_k$  közeli szomszédos gyűjtősínre becsatlakozó  $n_{xk}$  számú kábel, ha a zárlatos s gyűjtősínre nem kapcsolódik kábel, tehát  $n_x = 0$ .

A  $t_k = 2 l_k / v_1$  ideig az (F1) egyenlet – jelöljük ezt  $U(t)_{F1}$ -vel – adja a VSF időbeli lefolyását, a VSF kezdeti meredeksége pedig az (F4) alapján határozható meg. A szomszédos  $s_k$  gyűjtősínen levő kábelek VSF-t csökkentő hatása csak a  $t > t_k$  időtartományban jelentkezik, a kábelek tehát annál inkább mérséklik a megszakító VSF igénybevételét, mennél hamarabb jelentkezik hatásuk az s zárlatos gyűjtősínen, azaz mennél kisebb  $l_k$ .

A szomszédos  $s_k$  gyűjtősínre csatlakozó kábelek tehát csak kis  $l_k$  hosszúság, azaz közeli  $s_k$  gyűjtősín esetében hatásosak, ilyen esetben azonban – amint azt a [1] 2.3. pontjában részletesen bemutattuk – a  $t > t_k$  időtartományban a k. távvezeték indukтивitását és kapacitását elhanyagoljuk, tehát az s és  $s_k$  gyűjtősínen levő impedanciák párhuzamosan kapcsolódnak. Így a  $t > t_k$  időtartományban is az (F1) egyenletre vezettük vissza a megoldást, de a módosított egyenletben – jelöljük ezt  $U(t)_{F1m}$ -vel –  $z_{e1}$  helyébe  $z'_{e1} = \frac{z_1}{n-2+n_k} * \frac{z_{x1}}{n_{xk}}$ ,  $L_{h1}$  helyébe  $L_{hk1} = L_{h1} * L_{k1}$  kerül.

Mivel a VSF időfüggvényében nem lehet szakadás a  $t = t_k$  helyen, ezért a módosított egyenlet időfüggvényéhez a  $t > t_k$  időtartományban az eredeti és a módosított egyenlet  $t = t_k$  időpillanatban felvett függvényértékeinek különbségét hozzá kell adni. Tehát

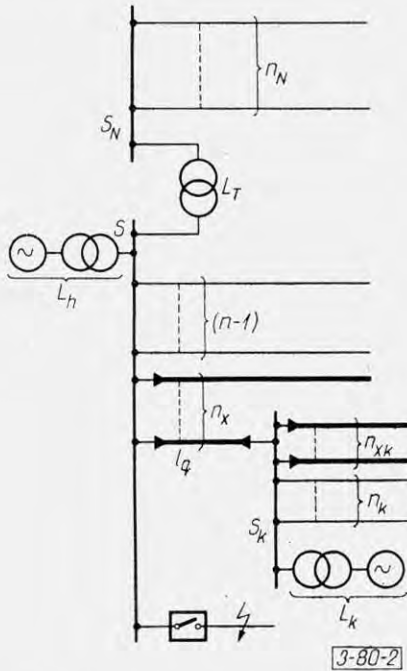
$$U_{VSF}(t) = \begin{cases} U(t)_{F1} & \text{ha } t \leq t_k \\ U(t)_{F1m} + U(t)_{F1}|_{t=t_k} - U(t)_{F1m}|_{t=t_k} & \text{ha } t \geq t_k \end{cases} \quad (8)$$

A VSF meredeksége a  $t = t_k$  időpillanatban a kábel hatására lecsökken, jól szemlélteti ezt a (9) egyenlet:

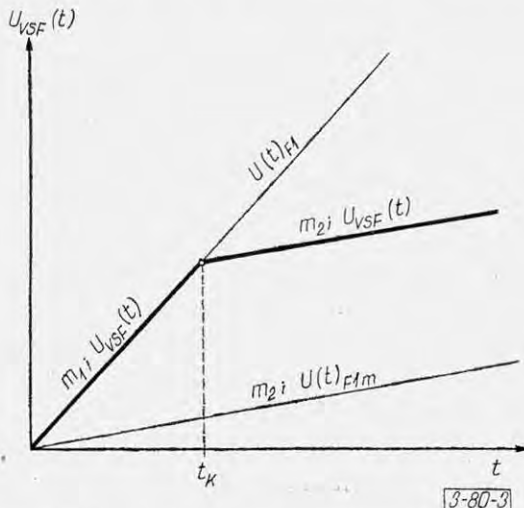
$$\frac{m|_{t=t_k+0}}{m|_{t=t_k-0}} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{z_1}{n-2+n_k} * \frac{z_{x1}}{n_{xk}} \quad (9)$$

$$\frac{z_1}{n-1}$$

A (9) felírásánál és a 3. ábra felrajzolásánál feltételeztük, hogy az  $U(t)_{F1}$  és  $U(t)_{F1m}$  időfüggvényekben levő exponenciális tagok időállandója  $T \gg t_k$ , tehát az időfüggvényeket kezdeti érintőjükkal he-



2. ábra. Hálózat a zárlatos gyűjtősínre csatlakozó rövid kábel esetén alkalmazott számítási módszer bemutatásához



3. ábra. A VSF görbe alakja a közeli szomszédos  $s_k$  gyűjtősínre becsatlakozó kábel esetén. A kábel hatására a  $t_k$  időpillanatban a VSF meredeksége  $m_2/m_1$  arányban lecsökken

lyettesítettük. Megjegyezzük, hogy a (8) a következő visszavert hullám gyűjtősínre való megérkezéseig írja le helyesen a VSF-t.

#### 4. Szomszédos, más feszültségszintű gyűjtősínre becsatlakozó kábel befolyása a VSF-re

Vizsgáljuk meg az 1. ábra alapján, hogyan befolyásolja az  $s$  gyűjtősín egyik leágazásában keletkező zárlat megszakításakor fellépő VSF-t a más feszültségszintű  $s_N$  gyűjtősínre becsatlakozó  $n_{xN}$  számú kábel,  $n_x = 0$  esetén.

A VSF-t a  $0 \leq t \leq t_k$  időtartományban az (F1) adja meg annak figyelembevételével, hogy a (F1), (F2) és (F3) egyenletekben a  $z_{N1}$  helyébe

$$z'_{N1} = \frac{z_1}{n_N a^2} * \frac{z_{xN1}}{n_{xN} a^2}$$

kerül.

Mérések és számítások alapján megállapíthatjuk, hogy a szomszédos, más feszültségszintű gyűjtősínre becsatlakozó kábel kiterjedt zárlatos gyűjtősín esetén nem befolyásolja számottevően a VSF-t. Ezt szemléletesen bizonyítja az is, hogy a VSF kezdeti meredeksége – amint azt az (F4) mutatja – nem függ  $z_{N1}$ -től, tehát az  $L_{T1}$  induktivitású transzformátort lezáró eredő hullámellenállástól.

Az 1. ábra hálózatán túlmenően a [1] Függelékben összefoglalt hálózatok egyenletei alkalmasak a VSF számítására más feszültségszintű gyűjtősínre becsatlakozó kábel esetében is, ha  $z_{N1}$  és  $z_{B1}$  meghatározásánál a távvezetékekkel párhuzamosan kapcsolódó kábeleket is figyelembe vesszük.

#### 5. Mérési és számítási eredmények összehasonlítása, példák

A kábel VSF-re gyakorolt hatását néhány számítási példán mutatjuk be és a számítási eredményeket összehasonlítjuk a VEIKI VSF modelljén mért eredményekkel. A vizsgált hálózatot a 4. ábra mutatja. A távvezetékek adatai egységesen:

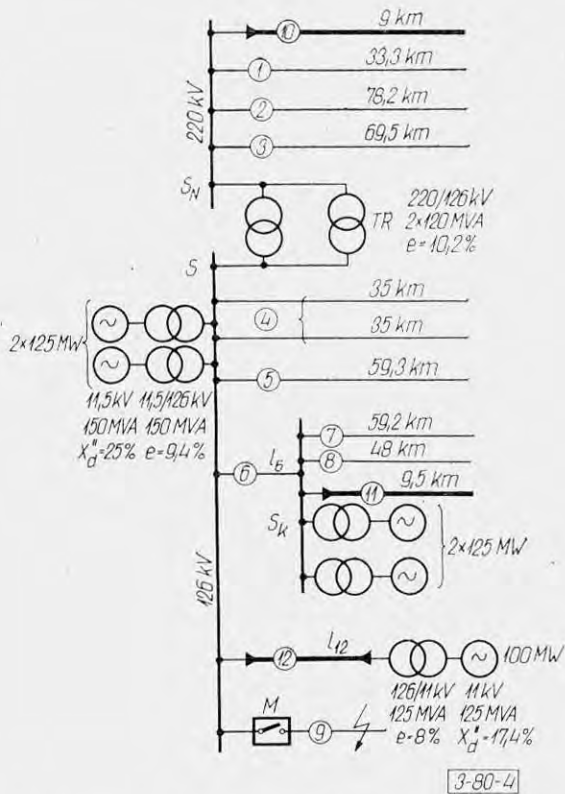
- $C_1 = 8,9 \text{ nF/km/fázis}$
- $L_1 = 1,25 \text{ mH/km/fázis}$
- $z_1 = 375 \text{ ohm/fázis}$

A 11. és 12. számú 126 kV-os kábel adatai:

- $C_{x1} = 0,3 \text{ } \mu\text{F/km/fázis}$
- $L_{x1} = 0,51 \text{ mH/km/fázis}$
- $z_{x1} = 41,2 \text{ ohm/fázis}$
- $v_{x1} = 0,08 \text{ km/}\mu\text{s}$

A 10. számú 220 kV-os kábel adatai 126 kV-ra redukálva:

- $C'_{x1} = 0,61 \text{ } \mu\text{F/km/fázis}$
- $L'_{x1} = 0,213 \text{ mH/km/fázis}$
- $z'_{x1} = 18,7 \text{ ohm/fázis}$



4. ábra. Hálózat, amelynek VSF-ét példákban határozzuk meg

Az egyes távvezetékek és kábelek hosszát a 4. ábrán adtuk meg. Példáinkban a 6. számú távvezeték és a 12. számú kábel hossza, valamint a hálózati konfiguráció változik. Az impedanciákat a transzformátorok 126 kV-os oldalára számítjuk át. A két 220/126 kV-os, egyenként 120 MVA-es névleges teljesítményű transzformátor eredő inductivitása  $L_{T1} = 21,4$  mH/f. Mind az  $s$ , mind az  $s_k$  gyűjtősínhez 2 db, egyenként 125 MW-os generátor-transzformátor blokkból álló erőmű csatlakozik. Ezek inductivitása  $L_{h1} = L_{k1} = 58$  mH/fázis. A 12. számú kábel végén levő erőmű inductivitása  $L_{12} = 103$  mH/fázis.

5.1. Példa

Vizsgáljuk meg a 4. ábra 126 kV-os gyűjtősínjének 9. számú leágazásában keletkező szigetelt háromfázisú kapcsolárat először megszakító fázisán fellépő VSF-t, ha  $l_6 = 31,6$  km; a 10., 11. és 12. számú kábelek nem csatlakoznak az  $s_N, s_k$  illetve  $s$  gyűjtősínhez.

A zárlati áram:  $I_m = \sqrt{2} I = 34,4$  kA.

A VSF-t a  $0 \leq t \leq t_0 = 2 l_6 / v_1 = 211 \mu s$  időtartományban az (F1) alapján a (10) adja meg.

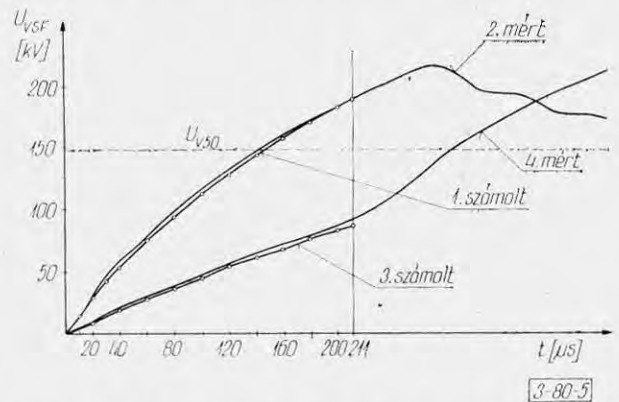
$$U(t) = 130,7 [7,19 - 5,98 \exp(-412t) - 1,21 \exp(-7490t)] \text{ kV.} \tag{10}$$

A (10)-be  $t$  másodpercben helyettesítendő.

A VSF kezdeti meredeksége:

$$m = \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{t=0} = 1,51 \text{ kV}/\mu s. \tag{11}$$

A (10) alapján számolt és a VSF kismintán mért görbéket az 5. ábra 1. és 2. görbéi mutatják.



5. ábra. Az 5.1. példában számolt és mért VSF görbék 1. A számított VSF görbe, ha az  $s$  gyűjtősínre nem csatlakozik kábel; 2. A mért VSF görbe, ha az  $s$  gyűjtősínre nem csatlakozik kábel; 3. A számított VSF görbe, ha az  $s$  gyűjtősínre csatlakozik a 12. számú kábel; 4. A mért VSF görbe, ha az  $s$  gyűjtősínre csatlakozik a 12. számú kábel

Az  $s$  gyűjtősínre csatlakozó kábel VSF igénybevételt csökkentő hatásának vizsgálatához határozzuk meg a VSF-t abban az esetben, ha az  $s$  gyűjtősínre csatlakozik a 12. számú,  $l_{12} = 9,5$  km hosszú kábel. A fenti hálózat egyébként változatlan, tehát  $l_6 = 31,6$  km, a 10. és 11. számú kábelek ki vannak kapcsolva.

A megnövekedett zárlati áram:  $I_{mx} = \sqrt{2} I_x = 37,4$  kA.

Az  $s$  gyűjtősínre csatlakozó 12. számú kábel esetében a szigetelt háromfázisú kapcsolárat először megszakító fázisán fellépő VSF-t a  $0 \leq t \leq t_0 = 211 \mu s$  időtartományban a (12) adja.

$$U_x(t) = 141,9 [7,2 - 6,7 \exp(-272t) - 0,5 \exp(-3470t)] \text{ kV.} \tag{12}$$

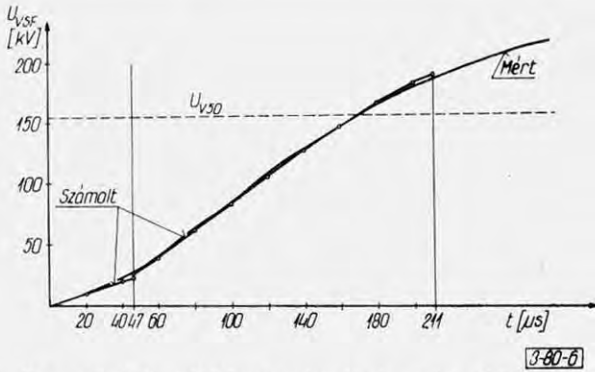
A VSF kezdeti meredeksége:

$$m_x = \left. \frac{dU_x(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0,505 \text{ kV}/\mu s. \tag{13}$$

A (12) alapján számolt és a kismintán mért VSF-t az 5. ábra 3. és 4. görbéi mutatják. Látható, hogy a kábel hatására – a zárlati áram növekedése ellenére – a megszakító VSF igénybevétele erősen csökken. A számolt és mért VSF görbék jól egyeznek.

5.2. Példa

Határozzuk meg a 4. ábra 126 kV-os gyűjtősínjének 9. számú leágazásában keletkező szigetelt háromfázisú kapcsolárat először megszakító fázisán fellépő VSF-t a gyűjtősínre csatlakozó rövid



6. ábra. Az 5.2. példában számolt és mért VSF görbék. A számításban a  $t \geq 47 \mu s$  időtartományban a 12. számú rövid kábelt koncentrált kapacitásával helyettesítettük

kábel esetén. A 10. és 11. számú kábelek nem csatlakoznak az  $s_N$ , illetve  $s_k$  gyűjtősínhez, továbbá  $l_{12} = 1,88 \text{ km}$  és  $l_6 = 31,6 \text{ km}$ . A zárlati áram:  $I_m = \sqrt{2} I = 37,4 \text{ kA}$ .

Az első visszaverődésig a pontos egyenletekkel számolunk, így a  $0 \leq t \leq t_{12} = 2 l_{12}/v_{x1} = 47 \mu s$  időtartományban – minthogy a 12. számú kábel hosszának változása nem befolyásolta a zárlati áramot – a VSF-t és annak kezdeti meredekségét az 5.1. példánál már levezetett (12) és (13) adja.

A  $47 \mu s = t_{12} \leq t \leq t_6 = 211 \mu s$  időtartományban – a 2. pontban elmondottaknak megfelelően – a 12. kábelt helyettesítsük a koncentrált pozitív sorrendű kapacitásával ( $C_{q1} = 564 \text{ nF/fázis}$ ). A (7) alapján a VSF időfüggvényére a (14) adódik.

$$U(t) = 42 [15,58 - 11,64 \exp(-590t) - 3,94 (\cos 7270t) \exp(-10130t) - 6,4 (\sin 7270t) \exp(-10130t)] \text{ kV.} \quad (14)$$

A (12) és (14) egyenletek alapján számolt VSF görbéket a VSF kismintán mért görbével együtt a 6. ábra mutatja. Látható, hogy a  $t = 47 \mu s$  időpontban elég jól egyeznek a (12) és (14) alapján számolt VSF pillanatértékei, másrészt jól egyezik a számolt és mért VSF görbék alakja is.

### 5.3. Példa

Vizsgáljuk meg a 4. ábra 126 kV-os gyűjtősínjének 9. számú leágazásában keletkező szigetelt háromfázisú kapocszárlat először megszakító fázisán fellépő VSF-t, ha a 10. és 12. számú kábelek nem csatlakoznak az  $s_N$  és  $s$  gyűjtősínhez, továbbá  $l_6 = 4,8 \text{ km}$ .

A zárlati áram:  $I_m = \sqrt{2} I = 41,9 \text{ kA}$ .

A  $0 \leq t \leq t_6 = 32 \mu s$  időtartományban a VSF-t a (15) adja.

$$U(t)_{15} = 159,2 [7,19 - 5,98 \exp(-412t) - 1,21 \exp(-7490t)] \text{ kV.} \quad (15)$$

A VSF kezdeti meredeksége:

$$m = \left. \frac{dU(t)_{15}}{dt} \right|_{t=0} = 1,84 \text{ kV}/\mu s. \quad (16)$$

Megjegyezzük, hogy a (15) a (10)-ből, a (16) pedig (11)-ből a zárlati áramok viszonyának megfelelő szorzással kapható.

A  $32 \mu s = t_6 \leq t \leq t_4 = 233 \mu s$  időtartományban – a 3. pontban elmondottaknak megfelelően – a 6. számú távvezetékét rövidrezártnak tekintjük, tehát az  $s$  és  $s_k$  gyűjtősínen levő impedanciák párhuzamosan kapcsolódnak. Az ilyen módon leegyszerűsített hálózat VSF-ét a (17) adja.

$$U(t)_{17} = 31,8 [18 - 15,51 \exp(-491t) - 2,49 \exp(-3580t)] \text{ kV.} \quad (17)$$

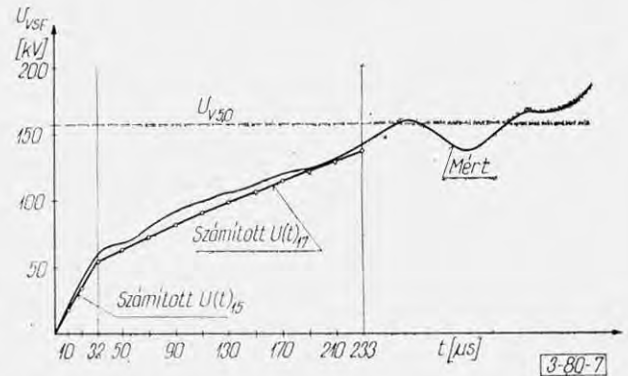
Figyelembevéve, hogy a  $32 \mu s \leq t \leq 233 \mu s$  időtartományban a (17) által leírt VSF görbét

$$\Delta U = U_{15}|_{t=32\mu s} - U_{17}|_{t=32\mu s} = 37,3 \text{ kV}$$

értékkel kell eltolni, a VSF időfüggvényét a (18) adja meg a  $0 \leq t \leq 233 \mu s$  időtartományban.

$$U(t) = \begin{cases} U(t)_{15} & \text{ha } t \leq t_6 = 32 \mu s \\ U(t)_{17} + 37,3 \text{ kV} & \text{ha } 32 \mu s \leq t \leq 233 \mu s \end{cases} \quad (18)$$

A (18) egyenlettel számolt és a kismintán mért VSF görbéket a 7. ábra mutatja.



7. ábra. Az 5.3. példában számolt és mért VSF görbék. A szomszédos  $s_k$  gyűjtősínre csatlakozó kábel csak a  $t \geq 32 \mu s$  időtartományban, tehát a visszavert hullám megérkezése után mérsékli a VSF meredekségét

### 5.4. Példa

Határozzuk meg a 4. ábra 126 kV-os gyűjtősínjének 9. számú leágazásában keletkező szigetelt háromfázisú kapocszárlat először megszakító fázisán fellépő VSF-t, ha a 11. és 12. számú kábelek nem csatlakoznak az  $s_k$  és  $s$  gyűjtősínhez, valamint  $l_6 = 31,6 \text{ km}$ . Tehát ebben a példában a 220 kV-os gyűjtősínre csatlakozó kábel VSF-re gyakorolt befolyását vizsgáljuk meg.

A zárlati áram:  $I_m = \sqrt{2} I = 34,4 \text{ kA}$ .

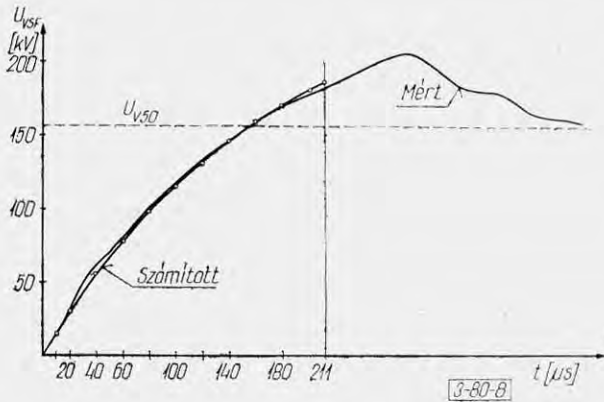
A  $0 \leq t \leq t_6 = 211 \mu s$  időtartományban a (19) adja meg a VSF-t.

$$U(t) = 130,7 [7,2 - 5,53 \exp(-150t) - 1,67 \exp(-6450t)] \text{ kV.} \quad (19)$$

A VSF kezdeti meredeksége:

$$m = \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{t=0} = 1,51 \text{ kV}/\mu\text{s}. \quad (20)$$

A (19) alapján számolt és a kismintán mért VSF görbéket a 8. ábra mutatja. A 8. ábra VSF görbét összehasonlítva az 5.1. példában kábel nélküli esetre kiszámított, illetve mért 5. ábra 1. és 2. görbéivel, látható, hogy a 220 kV-os gyűjtősínre csatlakozó kábel nem befolyásolja számottevően a 126 kV-os gyűjtősín egyik leágazásában fellépő VSF-et. Ezt bizonyítja az is, hogy a (11) és (20) egyenletekkel kiszámított kezdeti meredekségek megegyeznek.



8. ábra. Az 5.4. példában számolt és mért VSF görbék. A más feszültségszintű  $s_N$  gyűjtősínre becsatlakozó kábel az  $s$  gyűjtősínen fellépő VSF-t alig befolyásolja (összehasonlítás az 5. ábra 1. és 2. görbéivel)

**Függelék**

A [1] 2.1. pontja alapján az 1. ábra szerinti hálózaton keletkező szigetelt háromfázisú kapcsolárat először megszakító fázisán fellépő VSF időfüggvényét az első visszavert hullám  $s$  gyűjtősínre való visszaérkezéséig, tehát a  $0 \leq t \leq t_k = 2 l_k/v_1$  időtartományban  $n_x = 0$  esetén (F1) adja meg.

$$U(t) = \frac{1,5 I_m \omega}{C} \left[ \frac{B}{\alpha_1 \alpha_2} + \frac{\alpha_1 A + B}{\alpha_1 (\alpha_1 - \alpha_2)} \exp(\alpha_1 t) + \frac{\alpha_2 A + B}{\alpha_2 (\alpha_2 - \alpha_1)} \exp(\alpha_2 t) \right]. \quad (F 1)$$

Az  $\alpha_1, \alpha_2$  gyökök az (F2), a konstansok az (F3) egyenletből határozhatók meg.

$$p^2 C + pD + E = C(p - \alpha_1)(p - \alpha_2) \quad (F 2)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= L_{T1} L_{h1} z_{e1} \\ B &= L_{h1} z_{e1} z_{N1} \\ C &= L_{h1} L_{T1} \\ D &= (L_{h1} + L_{T1}) z_{e1} + L_{h1} z_{N1} \\ E &= z_{N1} z_{e1} \end{aligned} \right\} \quad (F 3)$$

A VSF kezdeti meredeksége:

$$m = \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{t=0} = 1,5 I_m \omega z_{e1} \quad (F 4)$$

$U(t)$ -t a hálózat operátoros impedanciája és a zárlati áram transzformáltja szorzatának, tehát a VSF Laplace-transzformáltjának visszatranszformálásával határoztuk meg.

**Jelölések**

A szövegben nem magyarázott és többször előforduló jelöléseket az alábbiakban foglaljuk össze:

- $t$  – idő (s)
- $\omega = 2\pi f$  – ahol  $f$  a hálózati frekvencia Hz-ben
- $U(t)$  – a VSF időfüggvénye
- $m = \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{t=0}$  – a VSF kezdeti meredeksége (kV/ $\mu$ s)
- $I_m$  – a zárlati áram csúcserőértéke (A)
- $I$  – a zárlati áram effektív értéke (A)
- $v_1$  – a pozitív sorrendű hullám terjedési sebessége távvezetéken (km/s)
- $v_{x1}$  – a pozitív sorrendű hullám terjedési sebessége kábelben (km/s)
- $l_k$  – a  $k$ . távvezeték hossza (km)
- $l_q$  – a  $q$ . kábel hossza (km)
- $a; b$  – a transzformátorok menetszám áttételei
- $n$  – az  $s$  gyűjtősínen levő távvezetékek száma, beleértve a zárlatos távvezetéket is
- $n_N$  – az  $s_N$  gyűjtősínre csatlakozó távvezetékek száma
- $n_k$  – az  $s_k$  gyűjtősínre csatlakozó távvezetékek száma, ebbe nem számít bele az  $s$  és  $s_k$  gyűjtősíneket összekötő  $e$  számú távvezeték
- $n_x$  – az  $s$  gyűjtősínre becsatlakozó kábelek száma
- $n_{xk}$  – az  $s_k$  gyűjtősínre becsatlakozó kábelek száma
- $n_{xN}$  – az  $s_N$  gyűjtősínre becsatlakozó kábelek száma
- $\epsilon$  – a vizsgált  $s$  gyűjtősínt az  $s_k$  gyűjtősínnel összekötő távvezetékek (kábelek) száma
- $z_1$  – a távvezetékek pozitív sorrendű hullámellenállása (ohm)
- $z_{x1}$  – a kábelek pozitív sorrendű hullámellenállása (ohm)
- $z_{xN1}$  – a más feszültségszintű  $s_N$  gyűjtősínre csatlakozó kábelek pozitív sorrendű hullámellenállása (ohm)
- $z_{\epsilon 1} = z_1/\epsilon$
- $z'_{\epsilon 1} = z_{x1}/\epsilon$
- $z_{e1} = z_1/(n-1)$
- $z_{e1} = z_{e1} * z_{xe1}$
- $z_{xe1} = z_{x1}/n_x$
- $z_{e1\epsilon} = \frac{z_1}{n-1+n_k} * \frac{z_{x1}}{n_x-1+n_{xk}}$
- $L_{h1}$  – az  $s$  gyűjtősínhez kapcsolódó helyi áramforrás zárlati induktivitásának pozitív sorrendű értéke (H)
- $L_{k1}$  – az  $s_k$  gyűjtősínhez kapcsolódó helyi áramforrás zárlati induktivitásának pozitív sorrendű értéke (H)
- $L_{T1}$  – a transzformátor zárlati induktivitásának pozitív sorrendű értéke (H)
- $L_{hk1} = L_{h1} * L_{k1}$
- $C_{q1}$  – a  $q$ . kábel pozitív sorrendű kapacitása (F)
- $z_{N1} = z_1/n_N a^2$
- $z_{k1} = z_1/n_k$

**IRODALOM**

[1] MIHÁLKOVICS T.: Hálózatok visszazökő feszültségének számítása. I. rész. Elektrotechnika 67 (1974) 267–274.