

Hálózatok visszaszökő feszültségének számítása

I. rész

MIHÁLKOVICS TIBOR, Budapest*

DK 621.316.1.015.34.001.24

Ismert tény, hogy a megszakítási művelet sikeressége a megszakított zárlati áram és az üzemi frekvenciájú visszatérő feszültség mellett függ a megszakító beépítési helyén mérhető visszaszökő feszültség (továbbiakban VSF) paramétereitől is. A megszakító konstruktőrök és üzemeltetők számára alapvető jelentősége van a VSF ismeretének.

Mivel a VSF közvetlen hálózati mérés útján való meghatározása a gyakorlatban nehézkes, ezért általában közvetve, kismintán vagy számítás útján történik. Nagyobb tervezések, beruházások, statisztikai felmérések stb. céljából a nagyszámú hálózati pont VSF paramétereinek meghatározására kismintát és számítógépet alkalmaznak. A gyakran előforduló egyedi esetekben azonban gazdaságosabb a megfelelő pontosságú manuális számítás, ha van ilyen. Ennek oka az, hogy a kismintán a hálózat leképzése, illetve a számítógépen a programozás a különben rövid mérési, illetve számítási idő költséges és hosszadalmas előzményét képezi. Ez adja meg a jelen cikkben ismertetett számítási módszer jelentőségét.

Nagyszámú hálózati konfigurációra e módszerrel kiszámított VSF paramétereiket a szerző a VEIKI VSF modelljén is kimérte. A kétféle módszerrel kapott eredmények minden esetben megfelelő egyezést mutattak. A VEIKI modellje az egyes hálózati elemeket és azok csillapítási karakterisztikáját nagy pontossággal képezi le [2]. Bizonyos rendelkezésre álló közvetlen hálózati mérések VSF adatait összehasonlítás céljából kismintán is kimértük. Ezek a mérések is bizonyítják a kisminta valóságos hálózattal való egyenértékűségét, így a bemutatandó számítási módszer pontosságának igazolására a VEIKI VSF kismintája alkalmas eszköz.

1. Az alkalmazott számítási módszer elve

A kiterjedt nagyfeszültségű hálózatok távvezetékei elosztott paraméterűek, így a felírható differenciálegyenletek végtelen számú diszkrét periódussal rendelkező megoldása rendkívül bonyolult.

Ha azonban a VSF-t csak a távvezetéken haladó feszültség hullámoknak a vizsgált megszakítási helyhez való visszaérkezésének időpillanatáig vizsgáljuk, akkor a távvezetéseket hullámimpedanciájukkal helyettesíthetjük. Így az eredeti hálózatképet néhány koncentrált elemből álló hálózatra vezetjük vissza. A vizsgált időtartomány a reflektált hullámok figyelembevételével tetszős szerinti mértékben kiterjeszthető.

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

A számítások végrehajtásánál célszerű a csillapítások elhanyagolásának szokásos közelítésével élni. Ez a számításokat jelentősen egyszerűsíti, az eredményekben azonban nem okoz számottevő hibát.

Az eljárás gyakorlati megvalósításánál a Thevenin-elvet, a Laplace-transzformációs számítási módszert és a szimmetrikus összetevők módszerét alkalmazzuk.

Ha a megszakító nyitott kontaktusáról nézett zárlatos hálózat eredő operátoros impedancia függvénye $Z_E(p)$, a zárlati áram Laplace-transzformáltja $I(p)$, akkor a VSF transzformáltja:

$$U(p) = I(p) Z_E(p). \quad (1)$$

A zárlati áram időfüggvénye $I(t) = I_m \omega t$, ugyanis a kHz nagyságrendű VSF-k számításakor csak a zárlati áram nullaátmenete közelében jelentkező, gyakorlatilag egyenes szakasz játszik szerepet, tehát

$$I(p) = I_m \omega / p^2. \quad (2)$$

$Z_E(p)$ a szimmetrikus összetevők módszerével határozható meg a megszakító nyitott kontaktusairól nézett zárlatos hálózat $Z_{E1}(p)$, $Z_{E2}(p)$, $Z_{E0}(p)$ pozitív, negatív és zérus sorrendű eredő impedanciáinak ismeretében. Fentiek értelmében ezekben a sorrendű eredő impedanciákban a generátorokat, transzformátorokat stb. helyettesítő koncentrált induktivitások, kapacitások mellett a távvezetékek hullámellenállásai szerepelnek.

Ismeretes, hogy általában a földetlen háromfázisú rövidzárlat először megszakító fázisa adja a legnagyobb üzemi periódusú visszatérő feszültséget (ez a fázisfeszültség csúcsértékének 1,5-szerese) és a legnagyobb VSF meredekséget. A nemzeti és nemzetközi szabványelírások is ezt a zárlatfajtát tekintik a vizsgálatok alapjának. Ilyen esetben:

$$Z_E(p) = 1,5 Z_{E1}(p). \quad (3)$$

A földelt csillagpontú, nagyfeszültségű rendszeren azonban gyakoriság szempontjából az egyfázisú földrövidzárlatok száma a legnagyobb, statisztikai adatok alapján az összes zárlatok kb. 85%-a. Ebben az esetben:

$$Z_E(p) = [2 Z_{E1}(p) + Z_{E0}(p)]/3. \quad (4)$$

Az üzemi frekvenciájú feszültségnél jóval nagyobb frekvenciájú VSF-re a pozitív és negatív sorrendű impedanciák egyenlők, a (3) és (4) egyenleteket már ennek figyelembevételével írtuk fel.

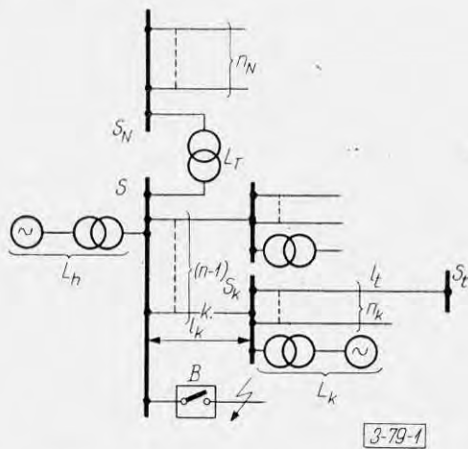
A megszakító kontaktusain fellépő VSF sorrendű összetevői mint vándorhullámok különböző terje-

dési sebességgel behatolnak a távvezetékbe és a távvezeték végeiről visszaverődnek. A visszaverődési tényezők a megfelelő sorrendű hullám- és a távvezeték lezáró eredő impedanciákból határozhatók meg.

2. A VSF számítása szigetelt háromfázisú kapcsolárat megszakítása esetén

2.1. A VSF számítása az első visszavert hullám gyűjtősinre való megérkezéséig

A számítási módszert az 1. ábra viszonylag bonyolult hálózatán mutatjuk meg a szigetelt háromfázisú kapcsolárat először megszakító fázisának esetére. Megjegyezzük, hogy a fontosabb jelöléseket a cikk végén foglaljuk össze.



1. ábra. Hálózat a számítási módszer bemutatásához

A zárlatos s gyűjtősinre becsatlakozó legrövidebb távvezeték – legyen az a k vezeték – ellenkező végén levő sk gyűjtősinről a visszavert hullám tk idő múlva érkezik meg az s gyűjtősinre.

$$t_k = 2l_k/v_1 \quad (5)$$

Az (5) egyenlettel meghatározott tk ideig az eredő operátoros impedanciát a (6) adja:

$$Z_E(p) = 1,5 [z_{e1} * p L_{h1} * (p L_{T1} + z_{N1})] \quad (6)$$

ahol * jellel a párhuzamos kapcsolást jelöltük, tehát például:

$$z_{e1} * p L_{h1} = z_{e1} p L_{h1} / (z_{e1} + p L_{h1})$$

A (6) átalakításával a (7) adódik:

$$Z_E(p) = 1,5 p (p A + B) / (p^2 C + p D + E) \quad (7)$$

ahol

$$\left. \begin{aligned} A &= L_{T1} L_{h1} z_{e1} \\ B &= L_{h1} z_{e1} z_{N1} \\ C &= L_{T1} L_{h1} \\ D &= (L_{h1} + L_{T1}) z_{e1} + L_{h1} z_{N1} \\ E &= z_{e1} z_{N1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$Z_E(p)$ nevezőjének gyökei legyenek: α_1 és α_2 , tehát

$$p^2 C + p D + E = C (p - \alpha_1) (p - \alpha_2) \quad (9)$$

A VSF transzformáltja:

$$U(p) = 1,5 I_m \omega (p A + B) / p C (p - \alpha_1) (p - \alpha_2) \quad (10)$$

A (10) visszatranszformálásával a VSF-re a $0 \leq t \leq t_k$ időtartományban a (11) adódik.

$$U(t) = 1,5 \frac{I_m \cdot \omega}{C} \left[\frac{B}{\alpha_1 \alpha_2} + \frac{\alpha_1 A + B}{\alpha_1 (\alpha_1 - \alpha_2)} \exp(\alpha_1 t) + \frac{\alpha_2 A + B}{\alpha_2 (\alpha_2 - \alpha_1)} \exp(\alpha_2 t) \right] \quad (11)$$

A VSF meredeksége a (11) differenciálásával adódik, értéke a $t = 0$ időpillanatban a legnagyobb:

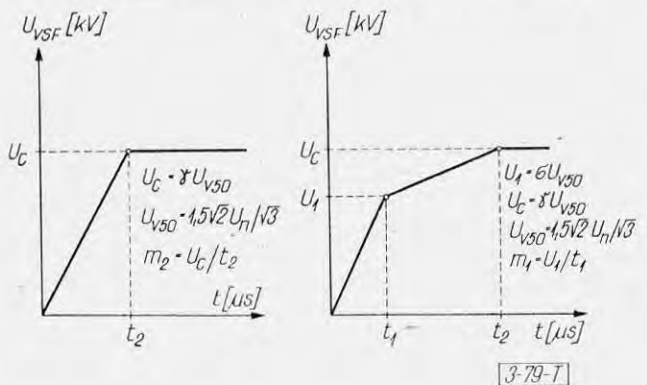
$$m = \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{t=0} = 1,5 I_m \cdot \omega \cdot z_{e1} \quad (11^*)$$

A kezdeti meredekség kifejezése igen egyszerű, a zárlati árammal és a zárlatos gyűjtősinre becsatlakozó vezeték eredő hullámellenállásával arányos.

Az 1. ábra viszonylag bonyolult hálózatán túlmenően a gyakorlatban előforduló fontosabb hálózatokra a Függelékben foglaljuk össze a számítási eredményeket.

Az IEC Publication 56-2 [3] és 56-4 [4] által a különböző U_n névleges feszültségű megszakítókra 100 és 60%-os névleges megszakítási teljesítmény és 1,5 first-pole-to-clear factor esetére előírt két és négy paraméteres VSF adatait az alábbi táblázatban foglaltuk össze. A paraméterek jelentését a táblázathoz mellékelt magyarázó ábrák adják.

U_n [kV]	100%				60%			
	t_1 [μs]	σ	t_2 [μs]	γ	t_1 [μs]	σ	t_2 [μs]	γ
12	-	-	60	1,4	-	-	25,5	1,5
24	-	-	88	1,4	-	-	37,5	1,5
36	-	-	108	1,4	-	-	46,5	1,5
123	150	1,0	450	1,4	-	-	112	1,5
245	300	1,0	900	1,4	150	1,0	900	1,5



A szabványos VSF paraméterek ismerete azért fontos, mert a vizsgált hálózati ponton fellépő zár-lati teljesítmény mellett a megszakítóra garantált és a fenti módon számolt VSF összehasonlító elem-zéséből dönthető el, hogy a megszakító az adott hálózati ponton üzembiztosan működik-e vagy sem.

Az esetek jelentős részében t_k nagyobb, mint a táblázatban szereplő t_1 (illetve t_2) idő, tehát a visszavert hullámokkal nem kell számolni. Ha azonban az s gyűjtősínre csatlakozó távvezetékek rövidege miatt $t_k < t_1$ (illetve t_2), akkor a számítást ki kell terjeszteni a $t > t_k$ időtartományra is, azaz figye-lembe kell venni a visszavert hullámokat. A több-szörös visszaverődések számítását egyszerűsített számítási módszerekkel (lásd a 2.3. pont) mégis el lehet kerülni.

2.2. A VSF számítása a visszavert hullám figyelembevételével

Határozzuk meg az 1. ábra hálózatára a visszavert hullámot, és ennek ismeretében az eredő VSF-t. Az s és s_k gyűjtősíneket kösse össze $\varepsilon \cong 1$ számú távvezeték, gyakori eset ugyanis, hogy az alállomásokat például kettős háromfázisú távveze-ték köti össze, azaz $\varepsilon = 2$.

A k távvezeték felől az s_k gyűjtősínre érkező pozitív sorrendű feszültség-hullámra vonatkozó reflexiós tényező:

$$R_{sk1} = (Z_{sk1} - z_{\varepsilon 1}) / (Z_{sk1} + z_{\varepsilon 1}). \quad (12)$$

A k távvezeték felől az s gyűjtősínre visszaérkező pozitív sorrendű feszültség-hullámra vonatkozó ref-lexiós tényező:

$$R_{s1} = (Z_{s1} - z_{\varepsilon 1}) / (Z_{s1} + z_{\varepsilon 1}). \quad (13)$$

Az s gyűjtősínen az első visszavert hullám által okozott feszültség Laplace-transzformáltja:

$$U_{Rk}(p) = 1,5 I_m \omega Z_{E1}(p) R_{sk1} (1 + R_{s1}) / p^2. \quad (14)$$

R_{s1} kifejezését átalakítva az alábbi általános ér-vényű egyenlet adódik:

$$U_{Rk}(p) = 3 I_m \omega Z_{E1}^2(p) R_{sk1} / p^2 z_{\varepsilon 1}. \quad (15)$$

A (15) egyenletet alkalmazzuk az 1. ábra konkrét hálózatára, ekkor:

$$Z_{sk1} = z_{k1} * p L_{k1}, \quad (16)$$

így R_{sk1} nevezője elsőfokú, gyöke legyen α_3 .

$U_{Rk}(p)$ nevezője két kétszeres (α_1 és α_2) és egy egyszeres (α_3) gyökkel rendelkezik. A többszörös gyökök miatt a (15) egyenletet célszerű a konvo-lúció-tétel (Faltung-integrál) alkalmazásával visz-szatranszformálni, így a (17) egyenlethez jutunk. Az integrálás végrehajtása minden esetben igen egyszerű, mivel az integrandus konstans és expo-nenciális tagok összege.

$$U_{Rk}(t') = \frac{3 I_m \omega}{z_{\varepsilon 1} C^2 M} \left[\left(R V t' - \frac{S V}{\alpha_2 - \alpha_1} - \frac{T V}{\alpha_3 - \alpha_1} + \frac{R Y}{\alpha_1 - \alpha_2} \right) \cdot \exp(\alpha_1 t') + \left(S Y t' + \frac{S V}{\alpha_2 - \alpha_1} - \frac{R Y}{\alpha_1 - \alpha_2} - \frac{T Y}{\alpha_3 - \alpha_2} \right) \cdot \exp(\alpha_2 t') + \left(\frac{T V}{\alpha_3 - \alpha_1} + \frac{T Y}{\alpha_3 - \alpha_2} \right) \exp(\alpha_3 t') \right], \quad (17)$$

ahol

$$\left. \begin{aligned} R &= (\alpha_1 A + B)^2 / (\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3) \\ S &= (\alpha_2 A + B)^2 / (\alpha_2 - \alpha_1)(\alpha_2 - \alpha_3) \\ T &= (\alpha_3 A + B)^2 / (\alpha_3 - \alpha_1)(\alpha_3 - \alpha_2) \\ V &= [\alpha_1 L_{k1}(z_{k1} - z_{\varepsilon 1}) - z_{k1} z_{\varepsilon 1}] / (\alpha_1 - \alpha_2) \\ Y &= [\alpha_2 L_{k1}(z_{k1} - z_{\varepsilon 1}) - z_{k1} z_{\varepsilon 1}] / (\alpha_2 - \alpha_1) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

A (8), (9) egyenletek adják A, B, C, D, E, α_1 és α_2 értékeit, továbbá

$$\alpha_3 = -z_{k1} z_{\varepsilon 1} / M \quad (19)$$

$$M = L_{k1}(z_{k1} + z_{\varepsilon 1}). \quad (20)$$

Mivel az $U_{Rk}(t')$ visszavert hullám az s gyűjtősínen a $t_k = 2l_k/v_1$ időponttól kezdve jelentkezik, ezért a visszavert hullámot leíró egyenleteinkben t helyébe t' került.

$$t' = t - 2l_k/v_1. \quad (21)$$

A (17) és (21) egyenletek alapján nemcsak a k , hanem akár az összes vezetékre is számíthatjuk a visszavert hullámok időfüggvényét annak sor-rendjében, ahogy az s gyűjtősínre visszaérkeznek.

A visszavert hullámok ismeretében az eredő VSF:

$$U_e(t) = U(t) + \sum_{k=1}^{n-1} U_{Rk}(t'). \quad (22)$$

A (22) egyenletben az $U(t)$ függvényt a (11), az $U_{Rk}(t')$ függvényt a (17) egyenlet adta meg.

A visszavert hullámok számítása lehetővé teszi a VSF $0 \leq t \leq 4l_k/v_1$ időtartományban való számí-tását. Számításainkban feltételezzük, hogy a k ve-zetékéről az s_k gyűjtősínen levő l_k hosszúságú veze-tékbe behatoló hullám az s_i gyűjtősínről visszav-erődve, majd a k vezetékbe behatolva nem érke-zik meg az s gyűjtősínre a vizsgált $4l_k/v_1$ ideig, tehát:

$$4l_k/v_1 < (2l_k + 2l_i)/v_1.$$

Ellenkező esetben vagy a számítás időhatárát csök-kentjük, vagy a fentiekhez hasonlóan ezt a hullá-mot is számítjuk.

2.3. A VSF egyszerűsített számítási módszerei

A megszakítókra gyakorolt hatás szempontjából a VSF kezdeti szakasza nagy jelentőségű. A 2.1. pont alapján a VSF kezdeti szakasza egyszerűen számítható, így az első visszavert hullám s gyűjtő-sínre való megérkezéséig nem célszerű egyszerűsí-tésekkel élni. Ha az s gyűjtősínre csatlakozó leg-rövidebb távvezeték hossza olyan kicsiny, hogy

a 2.2. pontban tárgyalt visszavert hullámokat figyelembe kell venni, vagy esetleg többszörös visszaverődésekkel kell számolni, akkor célszerű egyszerűsített számítási módszereket alkalmazni. De ezek alkalmazása esetében is a VSF kezdeti szakaszát az első visszaverődésig a 2.1. szerinti pontos formulákkal célszerű számolni, noha a két görbe közt a legtöbb esetben nincs lényeges eltérés.

Az irodalomból [5] ismeretes, hogy a távvezetékek a tranziensek számításánál a lezáró impedanciáuktól függően koncentrált elemekkel helyettesíthetők. A nagyfeszültségű hálózatokon gyakorlatilag előforduló lezárások esetében (kivéve az üresen járó távvezetéseket) a számítás időtartomány kibővítésének érdekében a legrövidebb távvezeték inductívitasával helyettesíthetjük, kapacitásait elhanyagoljuk.

A visszaverődési tényező, illetve a visszavert hullámok beható vizsgálata alapján kijelenthetjük, hogy az eljárás annál kisebb hibát okoz, minél nagyobb a zárlatos s gyűjtősínre becsatlakozó – tehát a helyettesítendő k . távvezetékekkel párhuzamosan kapcsolódó – távvezetékek száma, továbbá minél kisebb a k . távvezeték és a s_k gyűjtősín mögötti hálózat zárlati impedanciáinak aránya. Az elméleti meggondolásokon túlmenően a VEIKI VSF modelljén végzett mérések is bizonyították, hogy a legtöbb esetben $l_k < (15-20)$ km hosszúságú távvezetéknel a koncentrált inductívitasával történő helyettesítés nem okoz számottevő eltérést a VSF görbe menetében.

Vizsgáljuk meg az 1. ábra szerinti hálózat VSF-ét abban az esetben, ha a k . távvezeték $L_{R1} = l_k L_1 / \varepsilon$ értékű pozitív sorrendű koncentrált inductívitasával helyettesítjük.

A VSF időfüggvényét a (23) egyenlet adja:

$$U(t) = 1,5 \frac{I_m \omega}{D} \left[\frac{-C}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} + \frac{A \alpha_1^2 + B \alpha_1 + C}{\alpha_1 (\alpha_1 - \alpha_2) (\alpha_1 - \alpha_3)} \cdot \exp(\alpha_1 t) + \frac{A \alpha_2^2 + B \alpha_2 + C}{\alpha_2 (\alpha_2 - \alpha_1) (\alpha_2 - \alpha_3)} \exp(\alpha_2 t) + \frac{A \alpha_3^2 + B \alpha_3 + C}{\alpha_3 (\alpha_3 - \alpha_1) (\alpha_3 - \alpha_2)} \exp(\alpha_3 t) \right], \quad (23)$$

ahol

$$p^3 D + p^2 E + p F + G = D(p - \alpha_1)(p - \alpha_2)(p - \alpha_3) \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= D z_{e\epsilon 1} \\ B &= A(z_{N1}/L_{T1} + z_{k1}/L_{k1} + z_{k1}/L_{R1}) \\ C &= L_{h1} z_{e\epsilon 1} z_{N1} z_{k1} (L_{R1} + L_{k1}) \\ D &= L_{T1} L_{h1} L_{R1} L_{k1} \\ E &= A(1/L_{R1} + 1/L_{T1} + 1/L_{h1}) + B/z_{e\epsilon 1} \\ F &= C(1/z_{e\epsilon 1} + 1/z_{N1}) + G L_{T1}/z_{N1} + z_{e\epsilon 1} z_{N1} L_{k1} (L_{h1} + L_{R1}) \\ G &= z_{e\epsilon 1} z_{N1} z_{k1} (L_{h1} + L_{R1} + L_{k1}) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Abban az esetben, ha az s gyűjtősínre nagyon rövid távvezeték is csatlakozik, akkor ezt a távvezetékét nulla inductívitasal helyettesíthetjük, azaz rövidre zárhatjuk. Az eljárás hibája ugyanazoktól a kritériumoktól függ, mint az inductívitasal történő helyettesítés esetében. A VSF modellen végzett mérések azt bizonyították, hogy az esetek többségében az $l_k < (5-7)$ km hosszúságú távvezeték rövidre zárható.

Az 1. ábra k . távvezetékének rövidre zárásakor az s_k gyűjtősín közvetlenül az s gyűjtősínhez kapcsolódik, azaz az s és s_k gyűjtősínen levő impedanciák párhuzamosan kapcsolódnak. Ez azt is jelenti, hogy a 2.1. pontban tárgyalt képletek érvényesek annak figyelembevételével, hogy az s gyűjtősínre csatlakozó eredő inductívitas és eredő hullámellenállás számértéke megváltozik.

Kiterjedt – tehát n elég nagy – hálózatok VSF-ének meghatározásánál lehetőség van a fenti két egyszerűsített eljárás kombinált alkalmazására is. Tehát például az s gyűjtősín legrövidebb távvezetékét rövidre zárjuk, a következő legrövidebb hosszúságút (amely nemcsak az s , hanem az s_k gyűjtősínen is lehet) ismét helyettesítjük.

Az egyszerűsítések alkalmazása az esetek nagy részében lehetővé teszi a vizsgálható időtartomány kiterjesztését a visszavert hullámok számítása nélkül.

3. A VSF számítása a gyűjtősín egyik távvezetékén fellépő szigetelt háromfázisú kistávolságú zárlat megszakítása esetén

A számítást a szigetelt háromfázisú kistávolságú zárlat először megszakító fázisának esetére végezzük el. Szimmetrikus összetevők módszerével bizonyítható, hogy az először megszakító fázis kontaktusairól nézett eredő operátoros impedanciát (26) adja.

$$Z_E(p) = 1,5 Z_{ET1}(p) + 1,5 z_1. \quad (26)$$

Z_{ET1} -vel jelöltük a megszakítótól az s gyűjtősín felé eső hálózatrész pozitív sorrendű operátoros impedanciájának fázis értékét. Ez megegyezik a 2. pontban tárgyalt, kapocszárlat esetén használt pozitív sorrendű eredő operátoros impedanciával. A VSF Laplace transzformáltja:

$$U(p) = 1,5 I_m \omega Z_{ET1}/p^2 + 1,5 I_m \omega z_1/p^2. \quad (27)$$

Az $U(p)$ első tagja megegyezik a 2. pontban számolt szigetelt háromfázisú kapocszárlat először megszakító fázisán fellépő VSF Laplace transzformáltjával. A VSF időfüggvényének első tagját az egyes hálózatokra a 2. pontban levezetett eredmények adják, természetesen a kapocszárlat áramának helyébe a rövid távvezeték szakasz impedanciája által korlátozott zárlati áram kerül.

A második tag a rövid vezeték szakasz rezgéseinek transzformáltját adja meg. A rövid vezeték szakasz rezgéseinek időfüggvénye:

$$U_s(t) = 1,5 I_m \omega z_1 t. \quad (28)$$

A vezetékoldali hullám a hibahelyről visszaverődik, a megszakító vezetékoldali pontjára megérkezve újra visszaverődik és a fenti folyamat periódikusan ismétlődik. Ennek eredményeként alakul ki a megszakító vezetékfelőli oldalán a fűrészfog alakú rezgés.

4. A VSF számítása egyfázisú földrövidzárlat megszakítása esetén

Az egyfázisú kapcsolárlat megszakításakor fellépő VSF transzformáltja az első visszaverődésig:

$$U_F(p) = [2U_1(p) + U_0(p)]/3 = [2I(p)Z_{E1}(p) + I(p)Z_{E0}(p)]/3 \quad (29)$$

$U_1(p)$ és $U_0(p)$ pozitív, illetve zérusrendű feszültségek, valamint az ezek által keltett vándorhullámok külön-külön a 2. pont szerint számítandók az alábbiak figyelembevételével:

a) A pozitív sorrendű feszültségek és feszültség-hullámok számításánál a 2. pont-beli 1,5-szeres szorzó ($1,5Z_{E1}$) helyébe 1-szeres szorzó (Z_{E1}) kerül.

b) A zérusrendű feszültségek és feszültség-hullámok számításánál valamennyi 1 indexszel jelölt pozitív sorrendű érték helyébe 0 indexszel jelölt zérus sorrendű érték kerül, természetesen itt is az 1,5-szeres szorzó helyett 1-szeres szorzóval kell számolni.

c) A szigetelt háromfázisú zárlat árama helyébe a földrövidzárlat árama kerül.

d) A pozitív és zérus sorrendű feszültségek és visszavert hullámok ismeretében az eredő feszültséget az

$$U(t) = [2U_1(t) + U_0(t)]/3$$

képlet alapján számítjuk.

e) A vizsgálható időtartomány meghatározásánál és a különböző sorrendű feszültségek összegezésénél vigyázni kell arra, hogy a pozitív és zérus sorrendű hullámok különböző sebességgel haladnak ($v_0 \approx 0,9 v_1$).

f) A földrövidzárlat megszakításakor fellépő VSF számításakor értelemszerűen alkalmazhatók a 2.3. pontban tárgyalt egyszerűsített számítási módszerek.

g) Kistávolságú földrövidzárlat megszakításakor fellépő VSF számítása az a–f pontok szem előtt tartásával a 3. pont szerint történik.

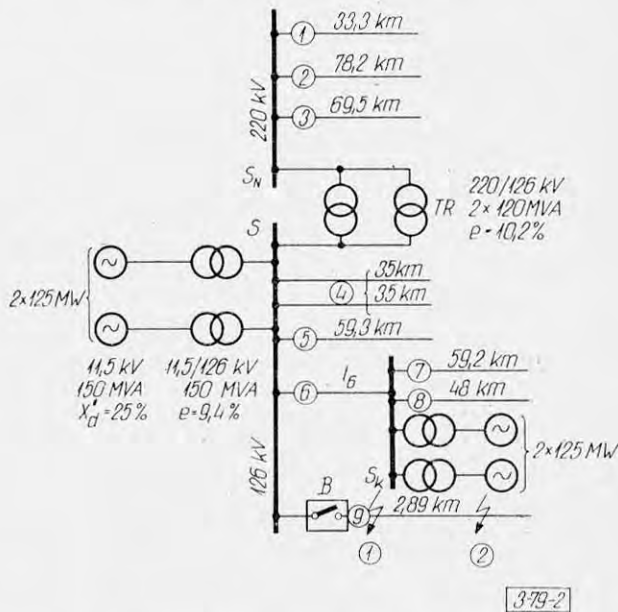
5. Mérési és számítási eredmények összehasonlítása, példák

A bemutatott számítási módszerrel néhány példát oldunk meg, összehasonlítjuk a számítással kapott eredményeket a VEIKI VSF modelljén mért eredményekkel.

A vizsgált hálózatot a 2. ábra mutatja. A távvezetékek adatai egységesen:

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

Az egyes távvezetékek hosszát a 2. ábrán a távvezetékek mellett tüntettük fel. Példáinkban a hálózat paraméterei azonosak, csak a hibahely és a 6. vezeték hossza változik. Az impedanciákat a transzformátorok 126 kV-os oldalára számítjuk át. A két 220/126 kV-os, egyenként 120 MVA névleges teljesítményű transzformátor eredő inductivitása $L_{T1} = 21,4 \text{ mH/fázis}$. Mind az s , mind az s_k gyűjtősinhez 2 db, egyenként 125 MW-os generátor-transzformátor blokkból álló erőmű csatlakozik. Az s és s_k gyűjtősinhez csatlakozó erőmű inductivitása egyaránt $L_{H1} = L_{k1} = 58 \text{ mH/fázis}$.



2. ábra. Hálózat, amelynek VSF-ét példánkban határozzuk meg

5.1. Példa

A 2. ábra hálózatán az 1. hibahelyen fellépő szigetelt háromfázisú kapcsolárlat árama:

$$I_m = \sqrt{2}I = 32,3 \text{ kA} .$$

A legrövidebb távvezeték a 6. számú távvezeték hossza: $l_6 = 16,5 \text{ km}$. A szigetelt háromfázisú kapcsolárlat először megszakító fázisán fellépő VSF-t t_k ideig a (30) adja meg:

$$U(t) = 122,6 [7,19 - 5,98 \exp(-412t) - 1,21 \exp(-7490t)] \text{ kV} \quad (30)$$

$$t_k = 2l_6/v_1 = 110 \mu\text{s} .$$

A (30)-ba t másodpercben helyettesítendő. A VSF kezdeti meredeksége:

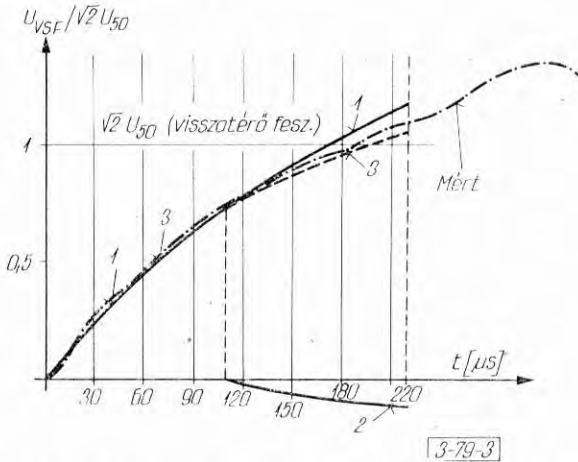
$$m = \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{t=0} = 1,41 \text{ kV}/\mu\text{s} .$$

A $2l_6/v_1 \leq t \leq 4l_6/v_1 = 220 \mu\text{s}$ időtartományban – a távvezetékek hosszából következően – csak a 6. távvezeték visszavert hullámával kell számolni. A visszavert hullám időfüggvénye:

$$U_R(t') = 1620 [(-22,95t' - 0,01473) \exp(-412t') + (-17,45t' + 0,01516) \exp(-7490t') - 0,00043 \exp(-2153t')] \text{ kV} \quad (31)$$

$$t' = t - 110 \cdot 10^{-6} \text{ s.}$$

A (22) alapján az eredő VSF a (30) és (31) összegeként adódik. A (30) egyenlettel számolt VSF-t a 3. ábra 1. görbéje, a (31) egyenlettel számolt visszavert hullámot a 2. görbe, a $0 \leq t \leq 220 \mu\text{s}$ időtartományban az eredő VSF-t a 3. görbe mutatja. Természetesen a $0 \leq t \leq 110 \mu\text{s}$ időtartományban az 1. és 3. görbék egybeesnek. A mért és számított görbék jól egyeznek.



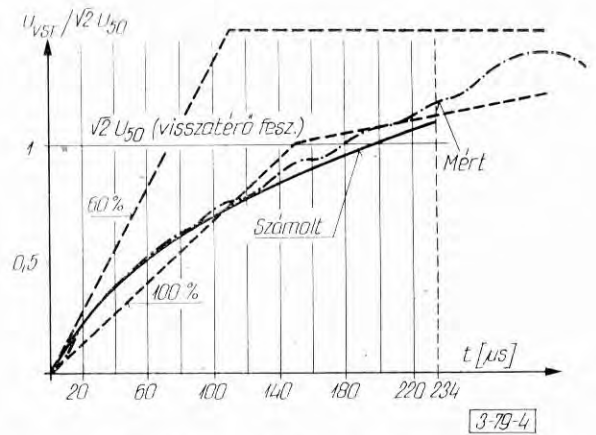
3. ábra. Az 5.1. példa szigetelt háromfázisú kapocszárlatának először megszakító fázisán fellépő VSF görbe alakja.
1. görbe a visszavert hullám nélkül számított VSF;
2. görbe a számított visszavert hullám;
3. görbe a számított eredő VSF

5.2. Példa

Határozzuk meg a 2. ábra hálózatán az 1. hibahelyen keletkező szigetelt háromfázisú kapocszárlat először megszakító fázisán fellépő VSF-t abban az esetben, ha a legrövidebb távvezeték, a 6. számú távvezeték hossza: $l_6 = 8,4 \text{ km}$. A zárlati áram: $I_m = \sqrt{2} I = 34,0 \text{ kA}$. A vizsgálható időtartomány megnövelése érdekében a 6. távvezeték helyettesítsük – a 2.3. pontban elmondottaknak megfelelően – az induktivitásával. Mivel a következő legrövidebb távvezeték a 4. számú kettős háromfázisú távvezeték – amelynek hossza $l_4 = 35 \text{ km}$ –, ezért a $0 \leq t \leq t_4 = 234 \mu\text{s}$ időtartományban a (23) alapján számolt VSF:

$$U(t) = 211,5 [2,375 - 0,537 \exp(-7000t) - 0,129 \exp(-35400t) - 1,71 \exp(-650t)] \text{ kV.} \quad (32)$$

A (32) alapján számolt és a modellen mért VSF görbéket a 4. ábrán hasonlítottuk össze. A zárlati teljesítmény 5250 MVA, tehát egy 6000 MVA-es megszakító névleges megszakítási teljesítményének 88%-a. A megszakító működésének ellenőrzéséhez a táblázat alapján a 4. ábrába berajzoltuk a 100 és 60%-os névleges megszakítási teljesítményhez tartozó szabványos VSF paramétereket is.



4. ábra. Az 5.2. példa szigetelt háromfázisú kapocszárlatának először megszakító fázisán fellépő VSF görbe alakja a legrövidebb távvezeték koncentrált induktivitással történő helyettesítése esetén

5.3. Példa

Határozzuk meg a 2. ábra hálózatán a 2. hibahelyen keletkező szigetelt háromfázisú zárlat először megszakító fázisán fellépő VSF-t. A 6. távvezeték hossza: $l_6 = 16,5 \text{ km}$, a zárlatos rövid vezeték szakasz hossza: $l_9 = 2,89 \text{ km}$. A zárlati áram: $I_m = \sqrt{2} I = 23,8 \text{ kA}$. A (27) értelmében a VSF első tagjának időfüggvényét a kapocszárlat esetére levezetett egyenlet adja meg, de a kistávolságú zárlatnak megfelelő lecsökkent zárlati árammal kell számolni. Tehát a (30) egyenletet 23,8/32,3 arányban kell csökkenteni. A (27) második tagjának időfüggvényét a (28) adta meg. A fentiek figyelembevételével az eredő VSF:

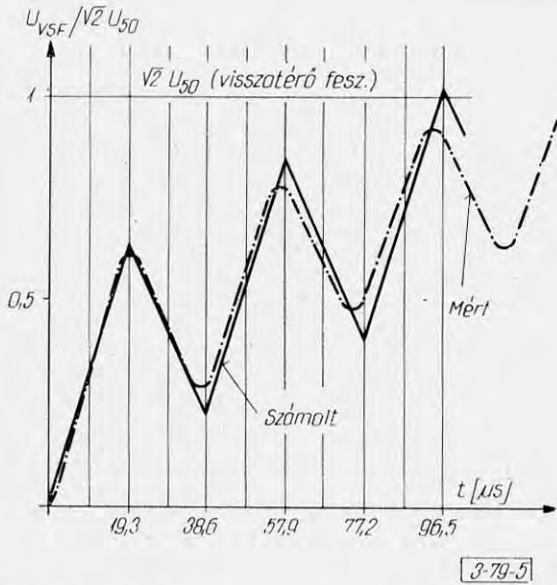
$$U(t) = 90,3 [7,19 - 5,98 \exp(-412t) - 1,21 \exp(-7490t)] + 4,21 \cdot 10^6 t \text{ kV} \quad (33)$$

$$m = \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{t=0} = 5,25 \text{ kV}/\mu\text{s.} \quad (33')$$

A (33)-ban t értéke másodpercben helyettesítendő. A (33) utolsó tagjában $t = 2 \cdot 2,89/0,3 = 19,3 \mu\text{s}$ időnként irányváltás lép fel. A (33) egyenlet csak a $0 \leq t \leq 110 \mu\text{s}$ időtartományban írja le helyesen a VSF-t mivel a $t = 110 \mu\text{s}$ időpillanatban az s gyűjtősinre érkeznek az s_k gyűjtősinről visszavert hullám. A (33) egyenlet alapján számolt és a modellen mért VSF görbéket az 5. ábrán mutatjuk be.

Nem jelent problémát a vizsgált időtartomány határának kiterjesztése sem. Ha a (27) első tagjánál figyelembe vesszük – az 5.1. pontban kidolgozott példának megfelelően – a visszavert hullámot, akkor a VSF-t a $0 \leq t \leq 220 \mu\text{s}$ időtartományban határozhatjuk meg.

A kistávolságú zárlat VSF-ének kezdeti meredeksége: $m = 5,25 \text{ kV}/\mu\text{s}$, tehát az 5.1. példa szerinti kapocszárlat kezdeti meredekségének kb. 3,7-szerese, annak ellenére, hogy a kistávolságú zárlati áram a kapocszárlat áramának kb. 73%-a.



5. ábra. Az 5.3. példa szigetelt háromfázisú kistávolságú zárlatának először megszakító fázisán fellépő VSF görbe alakja

Függelék

A 6. ábra összevont hálózatából kiindulva 5 gyakorlatban előforduló esetre adjuk meg a $0 \leq t \leq t_k$ időtartományban a VSF időfüggvényét.

F/1. $L_T = L_B = \infty$ és $C_S = 0$

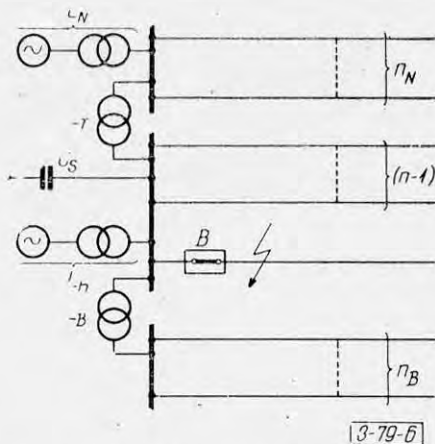
$$U(t) = 1,5 I_m \omega L_{h1} [1 - \exp(\alpha t)]$$

$$\alpha = -z_{e1} / L_{h1}$$

F/2. $L_T = L_B = \infty$

$$U(t) = 1,5 \frac{I_m \omega}{A} \left[\frac{E}{\alpha_1 \alpha_2} + \frac{F}{\alpha_1 (\alpha_1 - \alpha_2)} \exp(\alpha_1 t) + \frac{G}{\alpha_2 (\alpha_2 - \alpha_1)} \exp(\alpha_2 t) \right]$$
 (34)

$$Ap^2 + Bp + D = A(p - \alpha_1)(p - \alpha_2)$$
 (35)



6. ábra. Hálózat a Függelékben tárgyalt esetek VSF-ének számításához

$A = C_{S1}$
 $B = 1/z_{e1}$
 $D = 1/L_{h1}$
 $E = F = G = 1$

F/3. $L_B = \infty$ és $C_S = 0$

A (34) és (35) egyenletekbe helyettesítendő A, B, D, E, F, G konstansok most az alábbi értéket veszik fel:

$A = L_{h1} L_{T1} L_{N1}$
 $B = L_{h1} z_{N1} (L_{T1} + L_{N1}) + L_{N1} z_{e1} (L_{h1} + L_{T1})$
 $D = z_{e1} z_{N1} (L_{h1} + L_{T1} + L_{N1})$
 $E = L_{h1} z_{e1} z_{N1} (L_{T1} + L_{N1})$
 $F = L_{h1} z_{e1} (\alpha_1 L_{T1} L_{N1} + z_{N1} L_{T1} + z_{N1} L_{N1})$
 $G = L_{h1} z_{e1} (\alpha_2 L_{T1} L_{N1} + z_{N1} L_{T1} + z_{N1} L_{N1})$

F/4. $L_N = L_h = \infty$ és $C_S = 0$

$$U(t) = 1,5 \frac{I_m \omega}{A} \left[\frac{E}{\alpha_1 \alpha_2} t + F \frac{\exp(\alpha_1 t) - 1}{\alpha_1^2 (\alpha_1 - \alpha_2)} + G \frac{\exp(\alpha_2 t) - 1}{\alpha_2^2 (\alpha_2 - \alpha_1)} \right]$$
 (36)

$$Ap^2 + Bp + D = A(p - \alpha_1)(p - \alpha_2)$$
 (37)

$A = L_{T1} L_{B1}$
 $B = z_{e1} (L_{T1} + L_{B1}) + L_{T1} z_{B1} + L_{B1} z_{N1}$
 $D = z_{e1} (z_{N1} + z_{B1}) + z_{N1} z_{B1}$
 $E = z_{e1} z_{N1} z_{B1}$
 $F = z_{e1} [\alpha_1^2 A + \alpha_1 (L_{T1} z_{B1} + L_{B1} z_{N1})] + E$
 $G = z_{e1} [\alpha_2^2 A + \alpha_2 (L_{T1} z_{B1} + L_{B1} z_{N1})] + E$

F/5. $L_N = L_B = L_h = \infty$

Az (36) és (37) egyenletekbe helyettesítendő A, B, D, E, F, G konstansok most az alábbi értéket veszik fel:

$A = L_{T1} z_{e1} C_{S1}$
 $B = L_{T1} + C_{S1} z_{e1} z_{N1}$
 $D = z_{e1} + z_{N1}$
 $E = z_{e1} z_{N1}$
 $F = z_{e1} (\alpha_1 L_{T1} + z_{N1})$
 $G = z_{e1} (\alpha_2 L_{T1} + z_{N1})$

A F/2. és F/5. pontokban tárgyalt hálózatok kivételével a számításainkban a gyűjtősínnek, transzformátorok, áramváltók stb. kapacitásait nem vettük figyelembe. A példából látható, hogy ezen kapacitások figyelembevétele a számítás szempontjából nem jelent nehézséget. Számítások és számos VSF modellen végrehajtott mérés bizonyítja, hogy mégis a legtöbb esetben indokolt a gyűjtősínre becsatlakozó néhány távvezeték esetén ezen 5-60 nF/fázis nagyságrendű koncentrálnak tekinthető kapacitások elhanyagolása, mivel jelenlétük nem okoz észrevehető változást a VSF görbe menetében.

Természetesen ezek a viszonylag kisértékű, gyűjtősínre kapcsolódó, koncentrálnak tekinthető kapacitások nem hagyhatók figyelmen kívül a VSF kezdeti (néhány mikrosecundumos) szakaszának vizsgálatakor. Hatásuk azonban $T_d = C_S z_e$ értékkel jellemzett időfeloldással figyelembe vehető. (z_e -vel a gyűjtősínre kapcsolódó távvezeték eredő hullámenállását, C_S -sel a gyűjtősín, transzformátor, áram-

váltó stb. koncentrálnak tekinthető eredő kapacitását jelöltük.)

Ha a gyűjtősínre nagyobb kapacitású elemek (kondenzátor-telepek stb.), csatlakoznak, akkor a VSF számításánál ezek kapacitását nem hanyagolhatjuk el, a $F/2$. és $F/5$. pontokban tárgyalt esetekben ekkor van jelentősége.

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)
p	– Laplace operátor
$I(p)$	– a zárlati áram Laplace transzformáltja
$U(p)$	– a VSF Laplace transzformáltja
$U_{Rk}(p)$	– a visszavert hullám Laplace transzformáltja a k . távvezetéken
$U(t)$	– a VSF időfüggvénye
$U_{Rk}(t)$	– a visszavert hullám időfüggvénye a k . távvezetéken
$U_e(t)$	– az eredő VSF időfüggvénye
$U_s(t)$	– a kistávolságú zárlat esetén a megszakító vezetékfelőli pontján fellépő tranziens feszültség időfüggvénye
I_m	– a zárlati áram csúcserőértéke (A)
I	– a zárlati áram effektív értéke (A)
$v_1; v_0$	– távvezetésekre a hullám terjedési sebességének sorrendi értékei (km/s)
l_k	– a k . távvezeték hossza (km)
a, b	– a transzformátorok menetszám arányai
n	– az s gyűjtősínen levő távvezetékek száma, beleértve a zárlatos távvezetékét is
n_N	– az s_N gyűjtősínre csatlakozó távvezetékek száma
n_k	– az s_k gyűjtősínekre csatlakozó távvezetékek száma, ebbe nem számít bele az s és s_k gyűjtősíneket összekötő ε számú távvezeték
ε	– a vizsgált s gyűjtősínt az s_k gyűjtősínnel összekötő távvezetékek száma
z_1	– a távvezetékek pozitív sorrendű hullámellenállása (ohm)
L_1	– a távvezetékek hosszegységre eső pozitív sorrendű induktivitása (H/km)
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)
$z_{\varepsilon 1} = z_1/\varepsilon$	– a vizsgált s és s_k gyűjtősíneket összekötő k . távvezeték eredő hullámellenállásának pozitív sorrendű értéke (ohm)

$$\begin{aligned} z_{e1} &= z_1/(n-1) \\ z_{\varepsilon e1} &= z_1/(n-1-\varepsilon) \\ z_{k1} &= z_1/n_k \\ z_{N1} &= z_1/a^2 n_N \\ z_{B1} &= z_1/b^2 n_B \end{aligned}$$

$Z_E(p); Z_{E1}(p); Z_{E0}(p)$ – a megszakító nyitott kontaktusairól nézett hálózat eredő operatoros impedanciája és annak sorrendi értékei

$Z_{ET1}(p)$ – a megszakítótól az s gyűjtősín felé eső hálózatrészt eredő operatoros impedanciájának pozitív sorrendű értéke

$Z_{sk1}(p)$ – a vizsgált k . távvezeték végén levő s_k gyűjtősín lezáró operatoros impedanciájának pozitív sorrendű értéke

$Z_{s1}(p)$ – a vizsgált k . távvezeték végén levő s gyűjtősín lezáró operatoros impedanciájának pozitív sorrendű értéke

R_{sk1} – a k . távvezeték s_k gyűjtősín felőli végén a pozitív sorrendű feszültség-hullám reflexiók tényezője

R_{s1} – a k . távvezeték s gyűjtősín felőli végén a pozitív sorrendű feszültség-hullám reflexiók tényezője

IRODALOM

- [1] MIHÁLKOVICS T.: Calculation of Transient Recovery Voltage of Extensive Networks. Conference Paper C 73 183–1 IEEE PES Winter Meeting, New York. 1973.
- [2] MIHÁLKOVICS T., DR. SZABÓ-BAKÓS R.: Tranziens modell a visszaszökőfeszültség vizsgálatára. Elektrotechnika. 1972/3. 71–82. old.
- [3] IEC Publication 56–2: High – voltage alternating current circuit – breakers, Part 2: Rating.
- [4] IEC Publication 56–4: High – voltage alternating current circuit – breakers, Part 4: Type tests and routine tests.
- [5] BÁN G.: Retracing wave phenomena of electric networks to the quasi-stationary processes of lumped circuits. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae. Tomus 58 (1–2) pp. 63–104 (1967).
- [6] COLCLASER, R. G. – BUETTNER, D.: The Traveling-Wave Approach to Transient Recovery Voltage. IEEE Trans. (Power App. and Syst.) July. 1969.
- [7] KÖPPL, G. – GENG, P.: Zur Ermittlung der Transienten wiederkehrenden Spannung in symmetrischen Dreiphasensystemen. Brown Boveri Mitt. 1966. April/Mai S. 311–325.
- [8] AKODISZ, M. M. – KORZUN, P. A.: Vosztanovlenie naprjazsenija na kontaktah vükljuicsátyelej pri otkjuicsenijii pregyelnüh mosnosztyej. Izv Vuz. Energetika 1961. No. 7. 10–16.
- [9] MIHÁLKOVICS T.: Bestimmung der unbeeinflussten Einschwingspannung mit einem Operatorenrechenverfahren aus vorberechneten Gleichungen bei den verteilten Parameter enthaltenden Netzen. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Tomus 68 (1–2) pp. 73–85/1970.
- [10] DR. SZABÓ-BAKÓS R.: A független visszaszökő feszültség paramétereinek vizsgálata 35 kV-os távvezetékek kistávolságú zárlatai esetén. Budapest, 1961. Villenki 349. sz. tanulmány.