



2017.

Villamosenergia-átvitel

BMEVIVEACoo

Dr. Hartmann Bálint

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	i
1 Transzformátorok.....	1
1.1 Háromtekercselésű transzformátor.....	3
1.2 Takarékkapcsolású transzformátor	5
1.3 Feszültségszabályozás transzformátorokkal	8
1.3.1 Az áttétel-változtatás áramköri leképezése.....	9
1.3.2 Az áttétel-változtatás hatása sugaras hálózati üzemben	9
1.3.3 Az áttétel-változtatás hatása hurkolt hálózaton	10
1.3.4 Keresztszabályozós (fázistoló) transzformátorok.....	11
2 KÖF és KIF hálózatok, feszültségszabályozás, veszteségek.....	14
2.1 Elosztóhálózat szerepkörök	14
2.2 KÖF és KIF hálózati topológiák	14
2.2.1 Tipizált transzformátorok.....	14
2.2.2 Tipizált vezető-keresztmetszetek.....	15
2.2.3 Topológiák	15
2.3 KÖF és KIF hálózatok feszültségkarakterisztikái	17
2.3.1 Feszültségesés.....	17
2.3.2 Feszültségtűrés	19
2.4 Feszültségszabályozás	20
2.4.1 Terhelésfüggetlen szabályozás.....	22
2.4.2 Terhelésfüggő szabályozás.....	22
2.5 Veszteségek	25
3 22/0,42 kV-os transzformátor	26
3.1 Szerkezeti kialakítás	26
3.2 Gyári adatok, paraméterek (példák).....	26
3.3 Villamos paraméterek a példához.....	27
3.4 Tekercskialakítás, kapcsolási csoport.....	27
3.5 Pozitív sorrendű áramköri modell szimmetrikus (üzemi) állapotok számításához.....	28
3.5.1 Feszültség és áram fázor összefüggések.....	29

3.5.2	Fázisszög forgatás.....	29
3.5.3	Viszonylagos egységek alkalmazása	29
3.6	Üresjárási	30
3.6.1	Terheletlen transzformátor feszültségre kapcsolása	30
3.6.2	Üresjárási feszültség, feszültség-átvitel	30
3.6.3	P_o vasvesztés, R_o söntellenállás	30
3.6.4	I_m mágnesező áram, X_m söntreaktancia, Q_o üresjárási meddő teljesítmény	31
3.7	Rövidzárlás az N oldalon.....	31
3.7.1	Rövidzárlási feszültség.....	31
3.7.2	Áram-átvitel.....	32
3.7.3	Z_{tr} rövidzárlási impedancia	32
3.7.4	P_{rz} és Q_{rz} rövidzárlási veszteség, R_{tr} soros ellenállás, X_{tr} szórási reaktancia	32
3.8	A transzformátor szimmetrikus 3f terhelésű üzeme	33
3.8.1	Névleges terhelési üzemállapot	34
3.8.2	Névlegestől eltérő terhelésű üzem.....	34
4	Transzformátor kapcsolási ábrák	36
4.1	Háromfázisú zárlat.....	36
4.2	Egyfázisú földzárlat	36
4.3	Két fázisú zárlat	37
4.3.1	Y_{d9}	37
4.3.2	D_{y9}	38
4.4	Áramköri elemek rövidzárlási teljesítménye	39
5	Csillagpontföldelés	41
5.1	Csillagpontföldelési módok.....	41
5.2	Egyfázisú földzárlat hatása különböző csillagpontföldelésű hálózatokon	42
5.2.1	Közvetlenül földelt hálózat	42
5.2.2	Szigetelt csillagpontú hálózat	43
5.2.3	Kompenzált (nagy induktivitáson keresztül földelt) hálózat	44
5.3	Földelő és csillagpontképző transzformátorok.....	49
6	Hálózati hibák.....	53
6.1	Soros hibák.....	53
6.1.1	Egyfázisú szakadás, soros impedancia a vezeték egyik fázisában	53
6.1.2	Kétfázisú szakadás.....	56

6.2	Transzfer impedancia sönt- és soros hibák esetén	57
6.3	Szimultán hibák	59
7	Sönt és soros hibák feszültségtorzító hatása 120 kV/KÖF/0,4 kV-os sugaras hálózaton 63	
7.1	Egyfázisú földzárlat 120 kV-on	64
7.2	Egy fázis kikapcsolása 120 kV-on	66
7.3	Egy fázis kikapcsolása, soros feszültségforrásokkal helyettesítés.....	68
7.4	Egy fázis kikapcsolása középfeszültségen.....	71
F1	Függelék – Jellemző villamos paraméterek tervezéshez	74

1 Transzformátorok

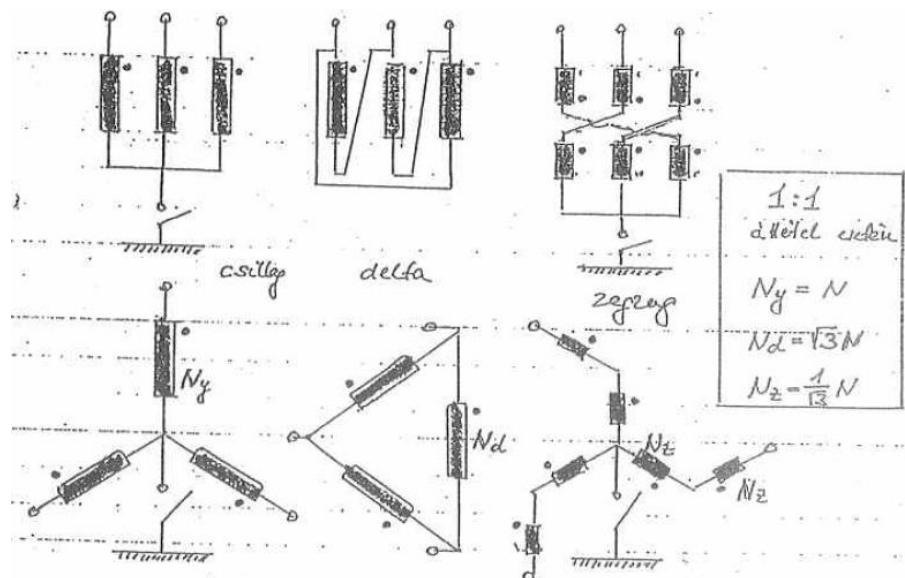
A transzformátorok kapcsolási csoportja a primer és szekunder oldali tekercsek konfigurációját, illetve azok egymáshoz képesti elhelyezkedését adja meg. A többfázisú transzformátor fázistekercsei a transzformátor belsejében különböző konfigurációk szerint köthetők össze, függően attól, hogy milyen jellemzőket várunk el a transzformátortól. A különböző tekercs-kombinációk eltérő fázisszög-különbséget is eredményeznek, mely egyben korlátja is a két rendszer összeköttetésére kiválasztható transzformátorok skálájának is.

A transzformátor tekercskialakítása az alábbiak valamelyike lehet (lásd 1-1. ábra):

- D: delta tekercs, melynél minden fázis kivezetés két tekercshez kapcsolódik, így a tekercsek háromszög alakú elrendezést alkotnak, kivezetéseikkel a háromszög csúcsain
- Y: csillag tekercs, melynél kivezetések mindegyike egy-egy tekercshez tartozik, mely tekercsek másik végpontja közös pontban (csillagpont) találkozik. A csillagpontból kivezetés biztosítható.
- Z: zegzug tekercs, melynél a tekercsek a csillag kapcsoláshoz hasonlóan vannak elrendezve, azonban a három fázist rajzjelében „meghajlítjuk”

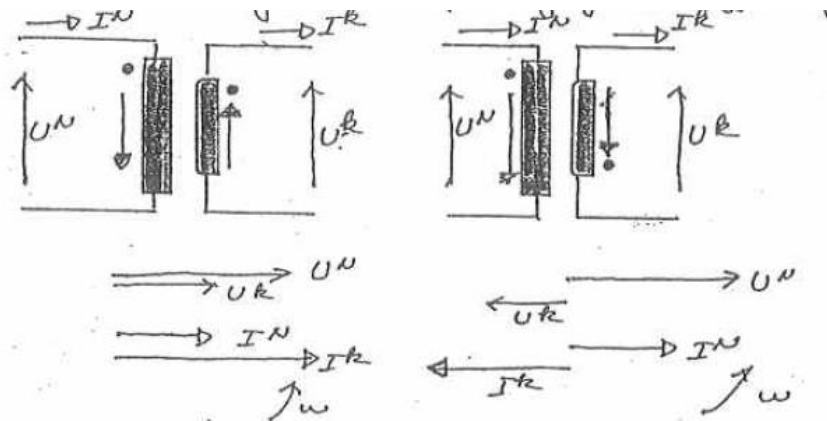
1:1-es áttételt feltételezve az egyes tekercskialakítások menetszámára a következő összefüggések írhatók fel:

$$N_y = N, N_d = \sqrt{3} \cdot N \text{ és } N_z = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot N.$$



1-1. ábra: transzformátorok lehetséges tekercselrendezései

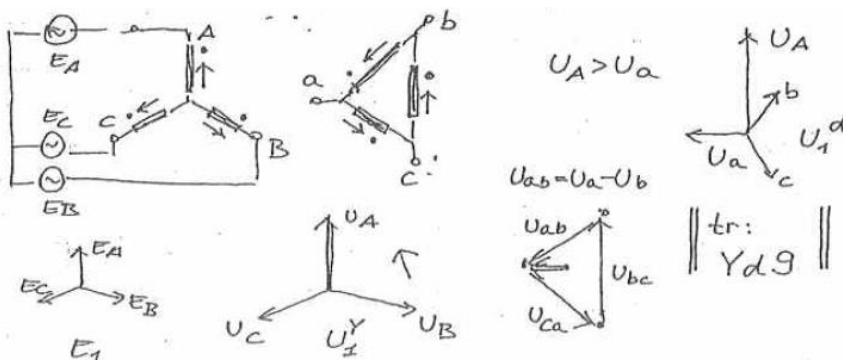
A tekercsek polaritását minden esetben figyelembe kell vennünk, ugyanis ez befolyásolja a primer és szekunder oldalon megjelenő áramok és feszültségek egymáshoz viszonyított szöghelyzetét, ahogy azt az 1-2. ábra is mutatja.



1-2. ábra: transzformátor tekercselésének polaritása

A kapcsolási csoport megjelölése egy egyszerű módja annak, hogy egy kiválasztott transzformátor belső elrendezését leírjuk. Az IEC által alkalmazott szabványos megjelölés szerint a kapcsolási csoportot jelölő kód két vagy három betűből áll, melyet egy vagy két számjegy követ. Mindegyik betű egy tekercscsoportot jelképez: a nagyfeszültségű tekercset nagybetűvel, a közép- vagy kisfeszültségű tekercset kisbetűvel jelöljük. A betűket követő szám a tekercsek közötti fáziskülönbségre (óraszám) utal, ahol a nagyobb feszültségű tekercset tekintjük referenciairánynak. Az IEC jelölés értelmezéséhez használjuk az 1-3. ábra példáját, ahol egy Yd9 transzformátor látható. A nagyobb feszültségű oldal fázisfeszültségei U_A , U_B és U_C , míg a kisebb feszültségű oldalon u_a , u_b és u_c . A csillagkapcsolású oldal fázis- és vonali feszültségeit könnyen meghatározhatjuk a feszültségek alkotta háromszög segítségével. Ha pozitív sorrendű feszültségeket feltételezünk, mindkét tekercs fázorábráját felvehetjük, mely szerint U_A és u_a között -270° a fáziskülönbség, mely hasonló egy óra számlapján a 9 óra pozíciójához. Ezt a forgatást pozitív sorrendű mennyiségekre az alábbiak szerint írhatjuk le:

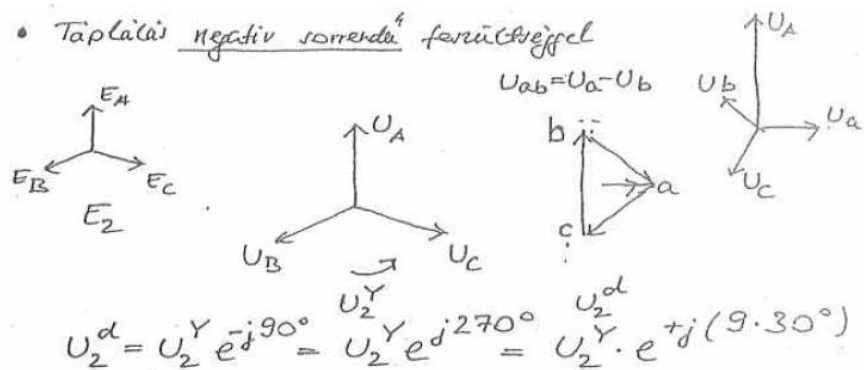
$$U_1^d = U_1^Y \cdot e^{-j \cdot 270^\circ} = U_1^Y \cdot e^{-j \cdot (9 \cdot 30^\circ)}$$



1-3. ábra: transzformátor óraszámának értelmezése, pozitív sorrend

Hasonló gondolatmenettel meghatározhatjuk a negatív sorrend esetét is, melynél ügyelnünk kell az eltérő fázissorrendre. (lásd 1-4. ábra)

$$U_2^d = U_2^Y \cdot e^{j \cdot 270^\circ} = U_1^Y \cdot e^{j \cdot (9 \cdot 30^\circ)}$$



1-4. ábra: transzformátor órászámának értelmezése, negatív sorrend

A lehetséges tekercs párosítások csak egy részét használják valós transzformátoroknál. Amennyiben a transzformátor kapcsolási csoportja Yy, Dd vagy Zz, az órászám páros kell hogy legyen (0, 2, 4, 6, 8 vagy 10). Ha a konstrukció Yd, Dy vagy Yz, az órászám páratlan számnak adódik (1, 3, 5, 7, 9 vagy 11). Az 1-1. táblázat a magyarországi hálózatokon használt transzformátorok kapcsolási csoportjait mutatja be.

1-1. táblázat: magyarországi erőátviteli transzformátorok kapcsolási csoportjai

Feszültség szint	Kapcsolási csoport	Feszültségek
KÖF/0.4 kV	Yz5, Dy5	KÖF: 35, 20, 10, 6 kV
120 kV/KÖF	Yd11 Yy6d	KÖF: 35, 10, 6 kV KÖF: 20 kV
120 kV/KÖF/KÖF	Yd11y6 Yd11d11	120/35/20 kV 120/35/10 kV
NAF/NAF/KÖF	Yyod11 (takarékkapcsolású)	750/400 kV, 400/220 kV, 400/120 kV, 220/120 kV

1.1 Háromtekercselésű transzformátor

Bizonyos esetekben a megszokott két tekercs mellé egy harmadikat is beépítenek a transzformátorokba, ezt a tekercset tercier tekercsnek hívjuk, a konstrukciót pedig háromtekercselésű transzformátornak, mely számos előnnyel bír. A tercier tekercs csökkenti a háromfázisú terhelés aszimmetriájának hatását, átrendezi a zárlati áramok útját, illetve képest az egyfázisú földzárlati áramok korlátozására. A tercier tekercsről gyakran segédüzemi ellátást is végeznek (pl. sönt fojtótekercsek).

Háromtekercselésű transzformátor esetén az áttételek és az impedanciák meghatározásához két tekercset kell kiválasztanunk a háromból (1 – primer oldal, 2 – szekunder oldal, 3 – tercier oldal, U_2 közös feszültség szintre számolva). A névleges teljesítmények kapcsán elmondható, hogy általában $S_1 > S_2$ és $S_1 > S_3$ de S_2 és S_3 viszonyáról csak a konkrét transzformátor ismeretében tudunk nyilatkozni.

$$a_{12} = \frac{U_1}{U_2}, a_{13} = \frac{U_1}{U_3}, a_{23} = \frac{U_2}{U_3}$$

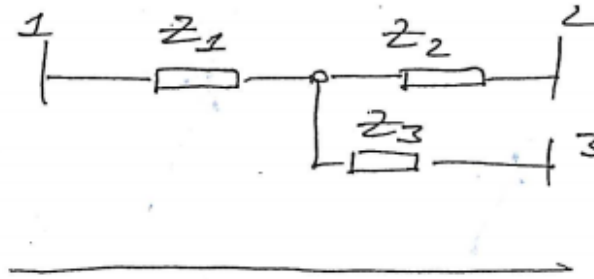
$$Z_{12} = \frac{\varepsilon_{12}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S_2}, Z_{13} = \frac{\varepsilon_{13}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S_3}, Z_{23} = \frac{\varepsilon_{23}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{\min(S_2, S_3)}$$

ahol

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2, Z_{13} = Z_1 + Z_3 \text{ és } Z_{23} = Z_2 + Z_3$$

Ahhoz, hogy a háromtekercselésű transzformátor 1-5. ábra szerinti pozitív sorrendű impedanciáit meghatározzuk, átrendezzük az előző egyenleteket:

$$Z_1 = \frac{Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}}{2}, Z_2 = \frac{Z_{12} - Z_{13} + Z_{23}}{2}, Z_3 = \frac{-Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}{2}$$



1-5. ábra: háromtekercselű transzformátor helyettesítő képe

A fentiek gyakorlatban történő használatát egy 400/128/18 kV-os transzformátor példáján keresztül mutatjuk be. A transzformátor névleges adatai a következők:

- $S_{12} = 250 \text{ MVA}$; $S_3 = 75 \text{ MVA}$
- 250 MVA-re: $\varepsilon_{12} = 15,82\%$; $\varepsilon_{R12} = 0,276\%$; $P_{rz12} = 690,9 \text{ kW}$
- 75 MVA-re: $\varepsilon_{13} = 12,52\%$; $\varepsilon_{R13} = 0,195\%$; $P_{rz13} = 146,2 \text{ kW}$
- 75 MVA-re: $\varepsilon_{23} = 7\%$; $\varepsilon_{R23} = 0,172\%$; $P_{rz23} = 128,9 \text{ kW}$

Látható, hogy $\varepsilon_R \ll \varepsilon$ ezért $\varepsilon_X \cong \varepsilon$.

Üresjárási mérés, táplálás tercier oldalról középállásban:

- $U_3 = 18,03 \text{ kV}$
- $P_{\bar{u}j} = 63,14 \text{ kW}$; 75 MVA – ra 0,084%; 250 MVA – ra 0,0253%
- $\cos(\varphi)_{\text{átlag}} = 0,757$; $\tan(\varphi) = 0,863$
- $Q_{\bar{u}j} = P_{\bar{u}j} \cdot \tan(\varphi) = 54,5 \text{ kvar}$; 75 MVA – ra 0,073%; 250 MVA – ra 0,022%
- $S_{\bar{u}j} = P_{\bar{u}j} / \cos(\varphi) = 83,41 \text{ kVA}$; 75 MVA – ra 0,11%; 250 MVA – ra 0,033%
- $I_{\bar{u}j} = \frac{S_{\bar{u}j}}{\sqrt{3} \cdot U_3} = 2,68 \text{ A}$

A modellt a 400 kV-os oldalra számított impedanciákkal alakítjuk ki. A szórési reaktanciák és a soros ellenállások az alábbiak szerint alakulnak:

$$X_{12} = \frac{\varepsilon_{12}}{100} \cdot \frac{U_1^2}{S_{12}} = 101,2 \Omega; X_{13} = \frac{\varepsilon_{13}}{100} \cdot \frac{U_1^2}{S_3} = 267,1 \Omega; X_{23} = \frac{\varepsilon_{23}}{100} \cdot \frac{U_1^2}{S_3} = 149,3 \Omega$$

$$R_{12} = \frac{\varepsilon_{R12}}{\varepsilon_{12}} \cdot X_{12} = 1,77 \Omega; R_{13} = \frac{\varepsilon_{R13}}{\varepsilon_{13}} \cdot X_{13} = 4,16 \Omega; R_{23} = \frac{\varepsilon_{R23}}{\varepsilon_{23}} \cdot X_{23} = 3,67 \Omega$$

A modell 400 kV-os oldalra számított fiktív soros Z_1 , Z_2 és Z_3 „csillag” elrendezésű impedanciái a korábbi képletek alapján.

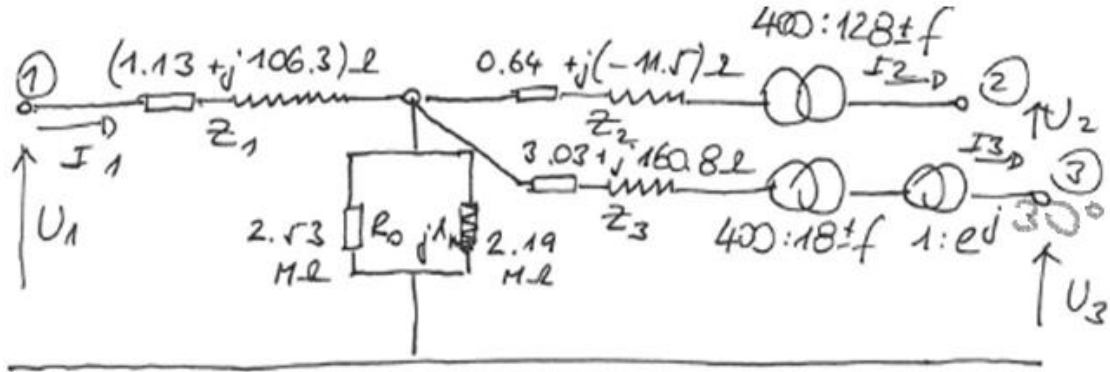
$$Z_1 = R_1 + j \cdot X_1 = (1,13 + j \cdot 106,3) \Omega; Z_2 = R_2 + j \cdot X_2 = (0,64 - j \cdot 11,5) \Omega; Z_3 = R_3 + j \cdot X_3 = (3,03 + j \cdot 106,3) \Omega$$

(X_2 reaktancia értéke negatív, de mivel fiktív helyettesítésről beszélünk, ez nem okoz problémát.)

A modell 400 kV-os oldalra számított fiktív párhuzamos R_o (vasvesztés) és X_m (mágnesező reaktancia) elemei:

$$R_{\bar{u}j} = \frac{U_1^2}{P_{\bar{u}j}} = 2,53 \text{ M}\Omega; \quad X_m = \frac{U_1^2}{Q_{\bar{u}j}} = 2,93 \text{ M}\Omega$$

A pozitív sorrendű áramköri modell transzformátor áttételekkel és a 400 kV-os oldalra számított impedanciákkal az 1-6. ábra szerint alakul (az ábrán helyesen $X_m = 2,93 \text{ M}\Omega$).

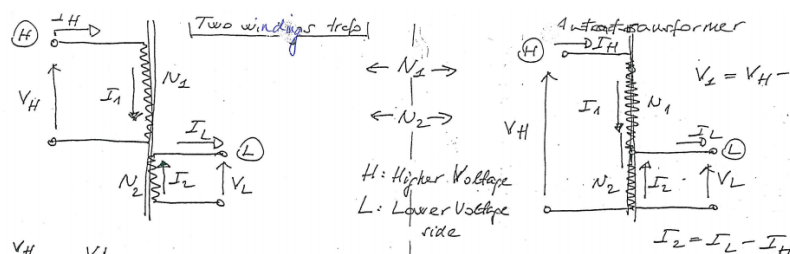


1-6. ábra: háromtekercselű transzformátor részletes pozitív sorrendű áramköri modellje

Az ábra szerinti modellben U_1, U_2, U_3 és I_1, I_2, I_3 rendre a 400/128/18 kV-os (primer-szekunder-tercier) oldali kivezetések „tényleges” pozitív sorrendű feszültsége és árama. A középállástól eltérő fokozatállásban az adott fokozatállás szerint kell meghatározni és beállítani a 400/128 kV $\pm f_2$ és a 400/18 kV $\pm f_3$ áttételhez az $\pm f_2$ és $\pm f_3$ értéket. (Középállásban $f_2=0$ és $f_3=0$). Megjegyezzük, hogy ezen két valós (szögforgatás nélküli) áttétel kiküszöbölhető a velük soros kapcsolásban lévő Z_2 illetve Z_3 impedancia egyenértékű – áttételt is magába foglaló – négyfólussá történő átalakításával, de ezt az eljárást itt most nem részletezzük. A terciér oldalra a D11 óraállást az $1: e^{j-30^\circ}$ fázisforgató transzformátor képezi le, de ez általában elhagyható, mert nincs meghatározó szerepe. Megemlítjük, hogy a három kivezetésű takarékkapcsolású terciér delta tekercsű transzformátort egyes hálózatszámítási alkalmazások fiktív 1 kV-os belső csillagponttal és három, egyenértékű villamos paraméterű – esetünkben 400/1, 128/1 és 18/1 kV-os – transzformátorral képezik le.

1.2 Takarékkapcsolású transzformátor

A takarékkapcsolású transzformátor (vagy autotranszformátor) az eddig megismert kéttekercselű transzformátorokkal összehasonlítva nevezhető egytekercsűnek is. Ennél a konstrukciónál egy közös tekercsrészen osztozik a primer és a szekunder tekercs, kettő helyett tehát csak egy tekercs kell, és annak a közös része kisebb keresztmetszetű, mint egy külön szekunder tekercs. Ezáltal kevesebb a beépítendő rézmenyiség és a rézvesztés is. Mivel a tekercselés kevesebb helyet foglal el, kisebb lehet a vasmag is, így csökken a mágnesező áram és a vasvesztés is. Az 1-7. ábra összehasonlítja a hagyományos kéttekercses és a takarékkapcsolású elrendezést.



1-7. ábra: kéttekercselű takarékkapcsolású transzformátor összehasonlítása

Az ábra alapján definiálhatjuk a transzformátor áttételét:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \text{ és } a_t = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = 1 + \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = 1 + a$$

A szekunder tekercs névleges teljesítményei a takarékkapcsolású esetben:

$$S_{1n} = U_1' \cdot I_1' = (U_1 - U_2) \cdot I_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{a_t}\right)$$

$$S_{2n} = U_2' \cdot I_2' = U_2 \cdot (I_2 - I_1) = U_2 \cdot I_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{a_t}\right)$$

Tehát ha egy kéttekercselésű és egy takarékkapcsolású transzformátor névleges teljesítményeit összehasonlítjuk, a következő összefüggésre jutunk:

$$S_{nt} = S_n \cdot \frac{a_t}{a}$$

Közelítőleg ilyen arányú a réz- és vas súlymegtakarítás, ilyen arányban csökkennek a tekercs- és vasvesztések. A megtakarítás annál nagyobb, minél közelebb van a transzformátor áttétele az egyhez, ezért ilyenkor érdemes takarékkapcsolást alkalmazni.

A takarékkapcsolású transzformátor hátránya, hogy a primer és a szekunder tekercs fémes kapcsolatban van. Nem szabad tehát alkalmazni azokban az esetekben, amikor a feszültség csökkentése életvédelmi okokból van előírva. A takarékkapcsolású transzformátor további hátránya, hogy a rövidzárási árama igen nagy, rövidzáráskor ugyanis a teljes primer feszültség az N_1 - N_2 menetszámú tekercsrészre esetlik, a rövidzárási áramot így csak ennek az impedanciája korlátozza, mely így a névleges áram akár több százszorosa is lehet.

A Magyarországon található átviteli hálózati transzformátorok takarékkapcsolásúak, ami azt jelenti, hogy a primer és szekunder tekercsek egymástól nincsenek villamosan elszigetelve, a szekunder kivezetés a (primer) fázis tekercselés egy megcsapolása a két nagyfeszültségű tekercssel azonos oszlopon elhelyezett tercier tekercs középfeszültségű (jellemzően 18 kV-os) és azoktól villamosan szigetelt. A transzformátortekercselés és a vasmag nagytisztaságú szigetelőolajjal feltöltött edényben helyezkedik el.

Az átviteli hálózatban alkalmazott NAF/NAF takarékkapcsolású transzformátorok fő jellemzői:

1-2. táblázat: NAF/NAF takarékkapcsolású transzformátorok főbb jellemzői

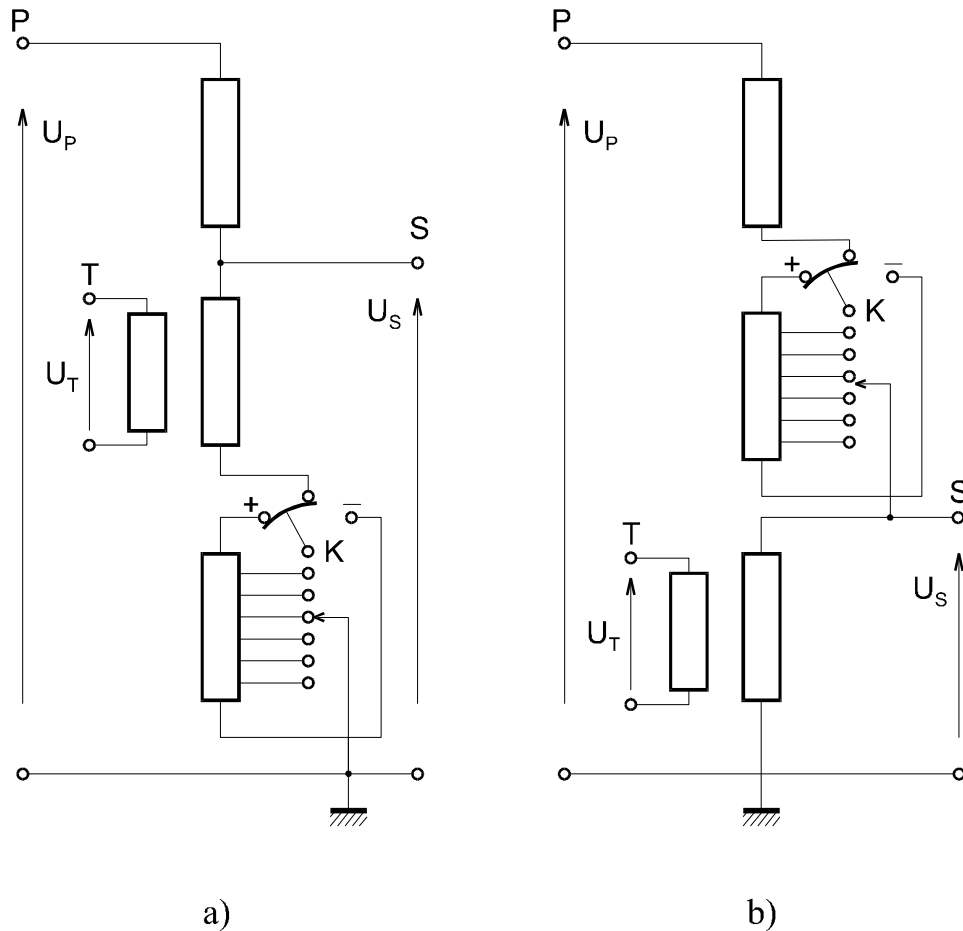
Névleges teljesítmény [MVA]	Középállású áttétel [kV/kV]	Szabályozó fokozatok száma	Szabályozási tartomány
1100	750/417	23	750 kV +5%/-7%
500	400/231	-	nem szabályozható
250	400/132	19	132 kV +10,2%/-11,3%
250	400/128	19	128 kV +10,1%/-11,2%
160	220/126	23	22 kV +12%/-12%

A táblázatból láthatóan a 400/231 kV-os transzformátor állandó áttételű, a többi NAF/NAF transzformátor áttétele terhelés alatt változtatható. A háromfázisú transzformátorok készülhetnek háromfázisú egységként (a három fázis közös olajedénybe építve), illetve összeállíthatók három egyfázisú egységből. A 750/417 kV-os (albertirsai) transzformátor egyfázisú egységekből áll, a 400/231, a 400/132, a 400/128 és a 220/126 kV-os transzformátorok háromfázisú egységként épültek.

1.3 Terhelés alatt szabályozható transzformátorok

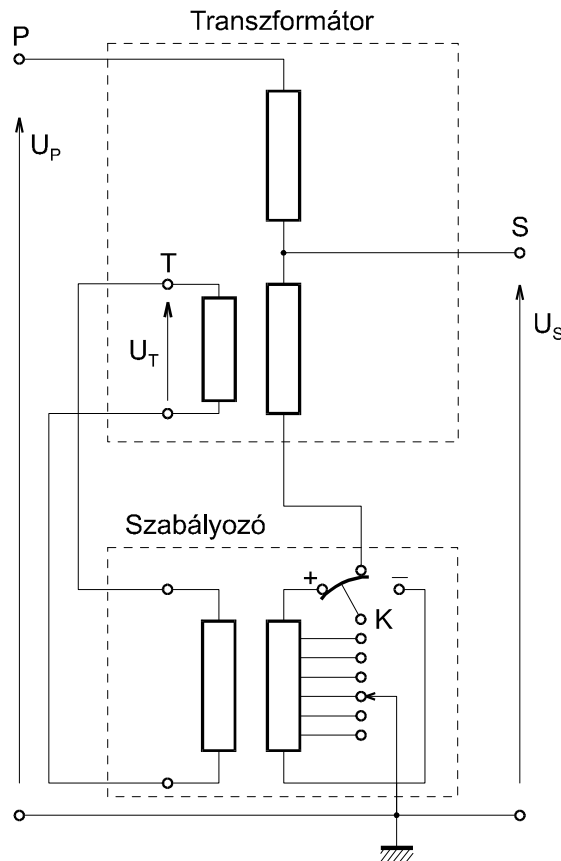
A terhelés alatti szabályozás megoldható a (közös) csillagpontba épített szabályozóval (1-8. ábra a)), ami nem állandó fluxusú szabályozást eredményez, ezért a fel-, ill. leszabályozási feszültség-sáv aszimmetrikus. Másik megoldás az állandó fluxusú, szimmetrikus szabályozási sávot eredményező szabályozó, amilyen a 220/126 kV-os transzformátoroknál került beépítésre. A szabályozó megcsapolások itt a szekunder kivezetés

(közös tekercs) és a nagyfeszültségű tekercs között helyezkednek el (1-8. ábra b)). Az ábrákon bejelölt k pont a középpállást jelenti, a + jel az áttétel növelést (a primer és szekunder feszültség egymástól való távolítását), a - jel az áttétel csökkentést (a primer és szekunder feszültség közelítését) jelenti.



1-8. ábra: transzformátor szabályozások
a) csillagponti (nem állandó fluxusú), b) állandó fluxusú

Csillagponti szabályozás esetén a szabályozó elhelyezhető külön edényben is, amint azt az 1-9. ábra mutatja. Ebben az esetben a szabályozó transzformátor gerjesztését a tercier tekercs szolgáltathatja. A külön edényben elhelyezett szabályozó előnye, hogy a fokozatváltással járó esetleges ívképződés nem a teljes olajteret szennyezi, így nem befolyásolja a főtranszformátorban lévő olaj szigetelőképességét, a főtranszformátor olajterében nincs mozgó alkatrész és a szabályozó meghibásodása, karbantartása esetén a főtranszformátor (középpállásban) tovább működhet. Hátrány, hogy a külön edényben lévő szabályozó esetén nagyobb a helyigény és több készülék beépítése szükséges.



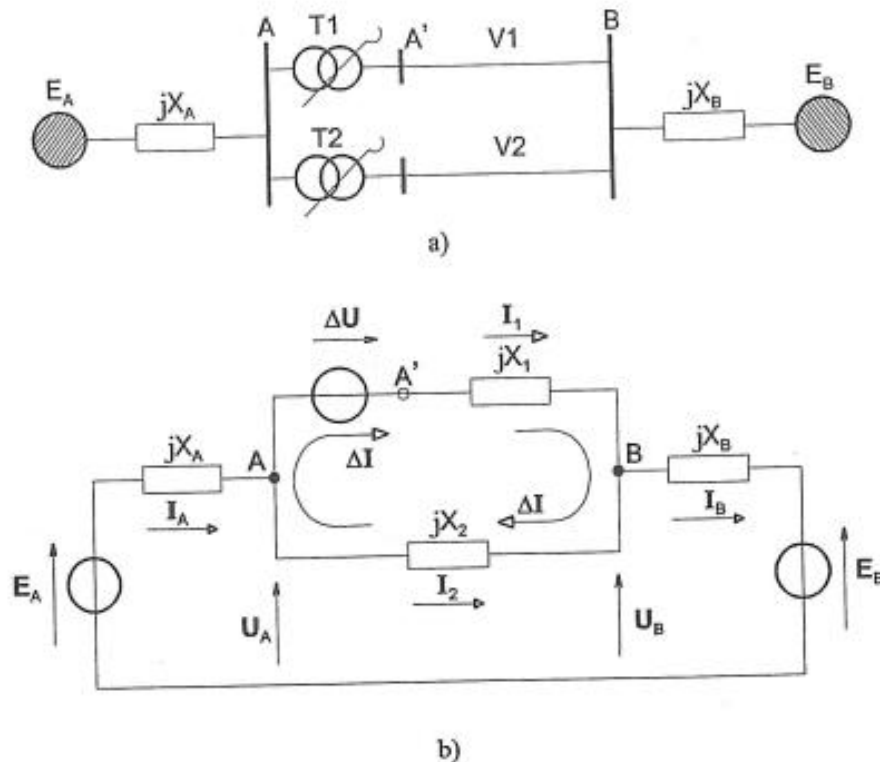
1-9. ábra: csillagponti szabályozó külön olajedényben

Megjegyezzük, hogy a 120 kV/KÖF, terhelés alatt szabályozható transzformátorok primer és szekunder tekercse egymástól szigetelt, a szabályozó a transzformátorral egybeépített, a megcsapolások a 120 kV-os tekercs csillagpontjához közeli potenciálon vannak elhelyezve, a szabályozási tartomány szimmetrikus, értéke $120 \text{ kV} \pm 15\%$. A KÖF/KIF transzformátorok terhelés alatt nem szabályozhatók, kikapcsolt állapotban a menetszám áttétel a középálláshoz képest ± 3 , vagy $\pm 5\%$ -kal módosítható. Az új típusú elosztóhálózati transzformátorok között már találhatunk terhelés alatt állítható menetszámú egységeket is (OLTC – on-load tap changer).

1.4 Feszültségszabályozás transzformátorokkal

A szabályozások hatásának közelítő meghatározásához (lényegének megmutatásához) tekintsünk egy egyszerű elvi esetet (1-10. ábra). A mögöttes hálózat impedanciái tisztán reaktívak (X_A és X_B), a V_1 és V_2 nagyfeszültségű vezetéket és a velük egységkapcsolásban lévő T_1 , illetve T_2 transzformátort az X_1 , illetve X_2 reaktanciával jellemezzük (a vezeték-kapacitások elhagyása jelen vizsgálatainkhoz megengedhető), a T_1 és T_2 transzformátor középállású áttétele azonos. Az 1-10. ábra a transzformátorok középállású áttétele szerinti pozitív sorrendű áramköri modellt mutatja, viszonylagos egységekre vonatkozóan. A transzformátorszabályozás nélkül alapesetben az A oldalon befolyó I_A és a B oldalon kimenő $I_B = I_A$ a két sín közötti T_1 - V_1 és T_2 - V_2 párhuzamos ágakon az ágimpedanciák szerint oszlik meg (nagyobb reaktanciához kisebb áram):

$$I_1 = I_A \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = I_A \cdot \frac{X_2}{X_1 + X_2} \text{ és } I_2 = I_A - I_1$$



1-10. ábra: transzformátor szabályozások hálózati modellje és áramköri leképezése

1.4.1 Az áttétel-változtatás áramköri leképezése

A transzformátorok középálláshoz képesti áttétel változtatása áramköri szempontból soros feszültségforrás beiktatásával vehető figyelembe (1-10. ábra b)).

Az egyes fázisokba (vagy a pozitív sorrendű áramköri modellbe) sorosan beiktatott szabályozási-feszültség fázishelyzete:

- hossz szabályozás, vagyis feszültség effektív érték szabályozás esetén a primer oldali feszültséggel megegyező fázishelyzetű,
- ferde, illetve kereszt szabályozás, másként fázisszög szabályozás – fázis(szög)tolás – esetén a primer oldali feszültséggel szöget bezáró (ferde szabályozás), vagy arra merőleges fázishelyzetű.

Mondható, hogy a hossz szabályozás a feszültség abszolút értékét, a kereszt (illetve ferde) szabályozás jó közelítéssel csak a feszültség fázisszögét változtatja. Egy hossz szabályozású NAF/NAF transzformátor középállású feszültségáttele 2-3, szabályozási sávja általában $\pm 15\%$ -on belüli (például 400/128 kV $+10,1\%/-11,2\%$). A NAF/NAF fázisszög szabályozó transzformátoregység (általában) azonos névleges feszültségek közötti transzformátor, középállású áttétele tehát 1, és a fázisszög szabályozási sáv általában nem haladja meg $\pm 150^\circ$ sávot. A hossz- és kereszt szabályozásnak sugaras, illetve hurkolt hálózati üzemből eltérő a szerepe és a hatása.

1.4.2 Az áttétel-változtatás hatása sugaras hálózati üzemből

Sugaras hálózati üzemből általában feltételezhető, hogy a vezetékek fogyasztói oldala passzív, tehát ott nincs feszültségtartó képesség (Példaként az 1-10. ábra szerinti elvi hálózati kialakításban a B oldalon nincs E_B forrásfeszültség, de van fogyasztói vételezés.). A sugaras vezeték tápoldalán végzett hossz szabályozás tehát a passzív, fogyasztó oldali feszültség abszolút értékének változásában közvetlenül megjelenik. A kereszt (vagy ferde) szabályozás párhuzamosság nélküli egy útvonalú hálózatkép esetén csak a fogyasztói oldali feszültségnek a tápoldali feszültséghez képesti fázisszögét változtatná, aminek gyakorlati haszna nincs, így azt „egypályás” sugaras üzemből nem alkalmazzák.

1.4.3 Az áttétel-változtatás hatása hurkolt hálózaton

A szabályozások hatásának megmutatásához csak a $T1$ transzformátort szabályozzuk. A $T1$ transzformátort szabályozását leképező ΔU -t a $T1$ -el sorosan beiktatjuk a $T1$ - $V1$ ágba. Ez soros ΔU a kiinduló állapotú áramokra szuperponálódó áramot indít a hálózati hurkokban. Feltételezve, hogy $X_A + X_B \gg X_1 + X_2$, a szabályozás hatására létrejövő ΔI dominánsan az X_1 és X_2 által alkotott hurokban záródik:

$$\Delta I \approx \frac{\Delta U}{j \cdot (X_1 + X_2)}$$

amely az 1-10. ábra szerinti pozitív irányokat tekintve az I_1 áramhoz hozzáadódik, az I_2 áramból levonódik.

Legyen az A sín feszültség fazora a referencia (valós) irányú. Hossz szabályozás esetén a ΔU valós irányú ($\Delta U = \pm \Delta U$), kereszt szabályozás esetén a ΔU képzetes irányú ($\Delta U = \pm j \cdot \Delta U$).

1.4.3.1 Hossz szabályozás hatása párhuzamos ágakban

Láthatjuk, hogy a szabályozás hatására a megváltozott ágáramok:

$$I'_1 = I_1 + \Delta I = I_1 - j \cdot \frac{\pm \Delta U}{X_1 + X_2} \text{ és } I'_2 = I_2 - \Delta I = I_2 + j \cdot \frac{\pm \Delta U}{X_1 + X_2}$$

A $T1$ - $V1$ ágban pozitív ΔU hatására az áram feszültséghez képesti fázisszöge késő irányban változik (nő a pozitív előjelű – induktív – meddőteljesítmény szállítás), a $T2$ - $V2$ ágban az áram fázisszöge kevésbé késő, vagy siető irányban módosul (csökken az induktív meddőteljesítmény szállítás, vagy a meddőáramlás kapacitívra vált). Csak az egyik transzformátorral végzett hossz-szabályozás a párhuzamos ágakon áramló meddőteljesítményeket változtatja meg. A $T1$ és $T2$ kvázi párhuzamosan üzemelő transzformátorok hosszirányú szabályozását egyidejűleg, azonos irányban és mértékben végezve tényleges feszültségváltozást érhetünk el, és elmarad(hat) a gyakorlatban nem kívánatos meddőteljesítmény-köráramlás.

1.4.3.2 Kereszt szabályozás hatása párhuzamos ágakban

Láthatjuk, hogy a szabályozás hatására a megváltozott ágáramok:

$$I'_1 = I_1 - j \cdot \frac{\pm j \Delta U}{X_1 + X_2} = I_1 + \frac{\pm \Delta U}{X_1 + X_2} \text{ és } I'_2 = I_2 + j \cdot \frac{\pm j \Delta U}{X_1 + X_2} = I_2 - \frac{\pm \Delta U}{X_1 + X_2}$$

Az $T1$ - $V1$ ágban $+j\Delta U$ hatására nő az áram hatásos komponense és így nő a P_1 áramlás, a $T2$ - $V2$ ágban pedig kisebb lesz az áramló wattos teljesítmény. A kereszt szabályozás a párhuzamos ágakon (átviteli utakon) áramló hatásos teljesítmények ágak (utak) közötti megoszlását változtatja meg. A $T1$ és $T2$ kvázi párhuzamosan (párhuzamos útvonalon) üzemelő transzformátorok keresztirányú szabályozását egyidejűleg, de ellenkező irányban végezve, a P áramlás átrendezésére való hatás fokozható. A kereszt szabályozás eredményességéhez természetesen nem szükséges, hogy a szabályozott transzformátorok (esetünkben $T1$ és $T2$) primer oldala ugyanazon gyűjtősinre (elvi esetünkben az A sín) kapcsolódjon. Alállomásban, párhuzamos kapcsolásban üzemelő transzformátorokkal kereszt szabályozást tehát csak akkor végeznek (ezt azonos irányban kell végezni), ha a hálózatban létezik párhuzamos áramlási útvonal és a hatásos teljesítmény átrendezése a cél.

1.4.3.3 Hossz szabályozás hatása alállomásban

Tekintsük azt az esetet, hogy az 1-10. ábra szerinti hálózatképben nincs $V1$ és $V2$ vezeték és így a $T1$ és $T2$ transzformátorok az A és B gyűjtősinet összekötve párhuzamos kapcsolásban üzemelnek. Ha hossz szabályozással a $T1$ és $T2$ áttételét növeljük, akkor az alállomás A oldalának U_A , illetve B oldalának U_B feszültsége egymástól „távolodni” fog, ha az áttételeket csökkentjük, akkor a feszültségek egymáshoz „közeledni” fognak. Ez a hatás mindig érvényesül, függetlenül az A és B oldali mögöttes hálózat „erősségétől” (zárlati teljesítményétől, az X_A és X_B értékétől, ezek egymáshoz képesti arányától) vagyis az A és B sín feszültség-megtartási képességétől.

Egyszerűsített megfogalmazásban mondhatjuk, hogy amelyik oldal nagyobb mögöttes zárlati teljesítményű, annak a feszültségét kisebb mértékben növeli/csökkenti a hossz szabályozás, a feszültség „távolítás/közelítés” hatás a kisebb zárlati teljesítményű oldalt nagyobb feszültségváltozásra kényszeríti. A hossz szabályozás szélső

esetekben, például $X_A \ll X_B$ esetén gyakorlatilag csak a villamosan lényegesen „gyengébb” B oldal U_B feszültségét, míg az $X_A \gg X_B$ esetén gyakorlatilag csak A oldal U_A feszültségét fogja megváltoztatni.

Ha a párhuzamos üzemű $T1$ és $T2$ transzformátor közül csak az egyikkel végzünk hossz szabályozást, vagy $T1$ -t és $T2$ -t „szembeszabályozzuk”, akkor $T1$ és $T2$ között meddőteljesítmény keringést hozunk létre, amely veszteségnövelő hatású, de szélső esetben ez éppen a szabályozási célja is lehet.

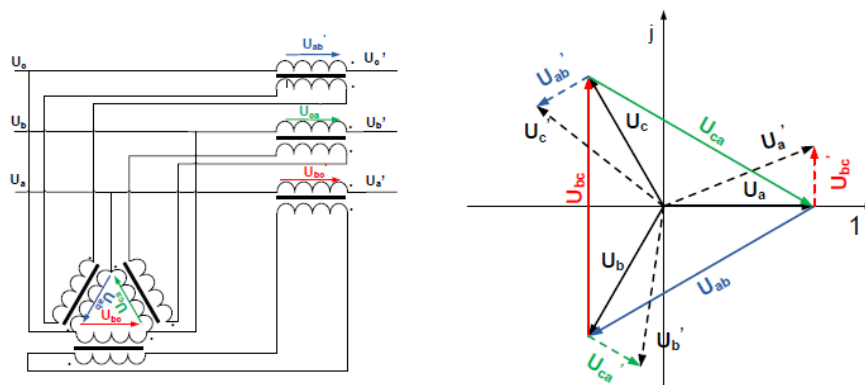
1.4.4 Keresztszabályozós (fázistoló) transzformátorok

Európában már számos helyen alkalmaznak keresztszabályozós transzformátorokat. A francia hálózatban az első ilyen típusú készülék 1998 októbere óta üzemel és a spanyolországi tranzit átvitel 200 MW-os növelését tette lehetővé új összeköttetés létesítése nélkül. Franciaország és Belgium között 2007-ben létesült Chooz Monceau határkeresztező vezeték a régi Chooz Jamiolle vezeték ehelyett, a Monceau alállomáson található keresztszabályozós transzformátor létesítését követően. Ezzel megnőtt a két ország közötti átviteli kapacitás. Belgium további három berendezés építését tervezi, hogy megbirkózzon a Franciaország és Németország közötti tranzit áramlások problémáival.

Ausztriában a 2006 és 2007 közötti tél december és március között nagyon meleg volt, ami a fogyasztás csökkenését eredményezte. A fogyasztási igény csökkenése elérte a 4,3%-ot az előző évihez képest. A csúcsigény 9586 MW volt, ami 195 MW-tal maradt el az előző évitől. A csökkent fogyasztás ellenére egyes időszakokban az ország jelentős importra szorult a hőerőművek alacsony termelése miatt. Három keresztszabályozós transzformátort építettek be 2006 novemberében a hálózatba, ez lehetővé tette a három, Ausztria északi és déli részét összekötő, 220 kV feszültségű vezetékek teljesítményáramlásainak kiegyensúlyozottabb elosztását. Ezek fontos beruházások voltak a szűk átviteli keresztmetszet növelésére. Ennek ellenére szükség van további fejlesztésekre is 380 kV feszültségű távvezeték építésével.

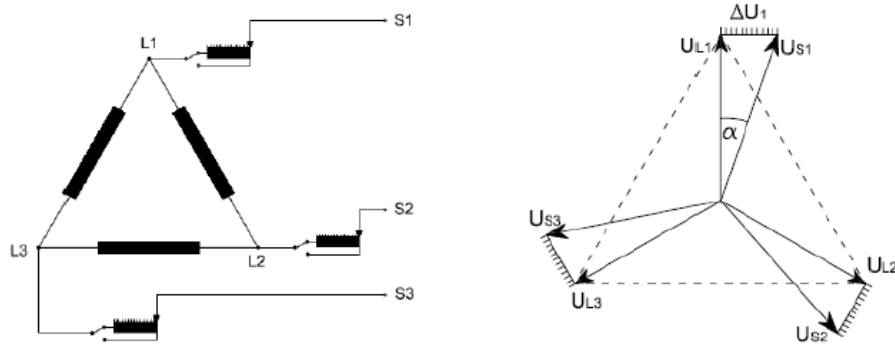
Hollandia és Németország határa közelében már régóta üzemelt egy fázistoló transzformátor. Hollandia két további fázistoló transzformátort helyezett üzembe, hogy még egyenletesebben ossza el a Németország felé menő határkeresztező vezetékeken lévő teljesítményt. Hurkolt hálózaton az egyes határkeresztező vezetékek terhelődését a hálózat impedanciái szabják meg, ami általában nem biztosítja a vezetékek egyenletes terhelődését, ezért a határkeresztező átviteli kapacitás nem egyenlő az egyes határkeresztező vezetékek átviteli kapacitásának összegével. Ez a probléma vezetett két keresztszabályozós transzformátor megépítéséhez Hollandia északi részén, Meeden állomáson. Az ország déli része közelebb van a jelentősen aláhurkolt európai hálózathoz, mint az északi, ami miatt a Németországgal való déli összeköttetéseknél az átviteli kapacitás kisebb a kellenél. A fázistoló transzformátorok a teljesítményáramlásokat az északi összeköttetések felé tudják terelni, ami a vezetékek terhelődésének kiegyenlítését eredményezi.

Az indirekt vagy kvadratúra fázistoló transzformátor (indirect vagy quadrature PST) felépítését és vektorábráját az 1-11. ábra mutatja. A feszültségek szögét úgy tolja el, hogy az egyes fázisfeszültségekre szuperponálja a másik két fázis különbségének valamekkora részét (külön szabályozó). Az ábra alapján a fázisforgatás $\varphi = \arctg(U_{bc}'/U_a)$. A módszer hátránya, hogy a fázistolás során a feszültség nagysága megváltozik: $|U_a'| = U_a / \cos\varphi$.

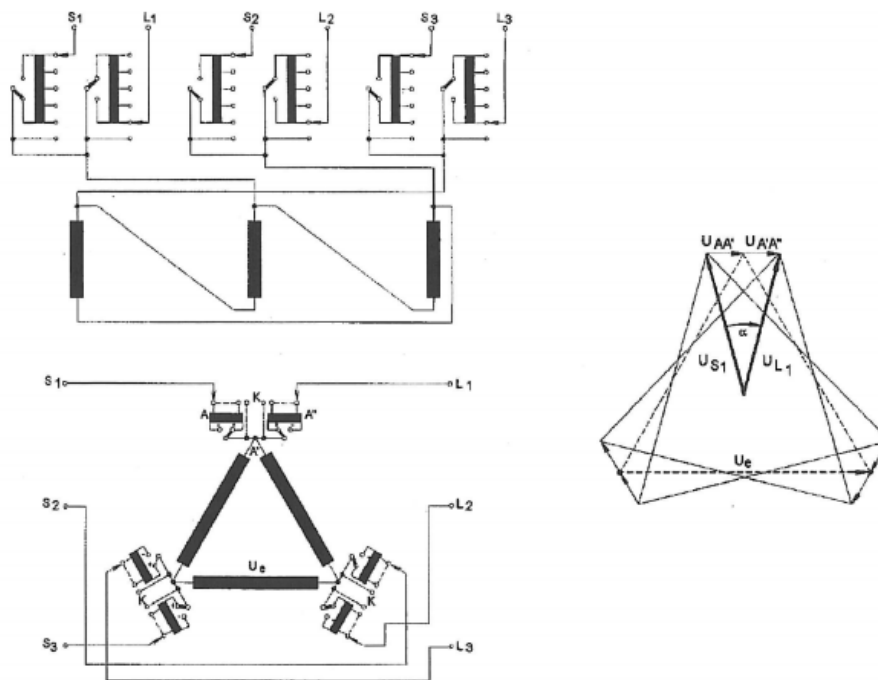


1-11. ábra: indirekt fázistoló transzformátor

A közvetlen fázistoló transzformátoroknak két típusa van: a szimmetrikus (1-13. ábra) és az aszimmetrikus (1-12. ábra). Az aszimmetrikus fázistoló transzformátor vektorábrája hasonló az indirekt fázistoló transzformátoréhoz. Az előbbihez képest annyiban tér el ez a típus, hogy nincsen külön gerjesztőtekercse a szabályozó tekercseknek. Ezek a fő tekercsek oszlopain vannak, onnan kapják a gerjesztést. A szimmetrikus kialakítás esetén a fázistolást létrehozó tekercsek ugyanarra az oszlopra vannak tekercselve, mint a fő delta tekercsek. Tehát az 1-es fázis AA' és A'A'' tekercsei a 2-es és 3-as fázis közötti tekercs oszlopán vannak. Az AA' tekercsen indukálódott feszültség az S_1 feszültséghez (U_{S1}) hozzáadódik, ez $U_{A'}$, ami $\alpha/2$ szöget zár be U_{S1} -gyel, és nagysága is kisebb. Az A'A'' tekercs feszültsége még hozzáadódik $U_{A'}$ -höz, így adódik U_{L1} . Ennek a különleges kialakításnak köszönhetően a fázistolás után $|U_{L1}| = |U_{S1}|$.

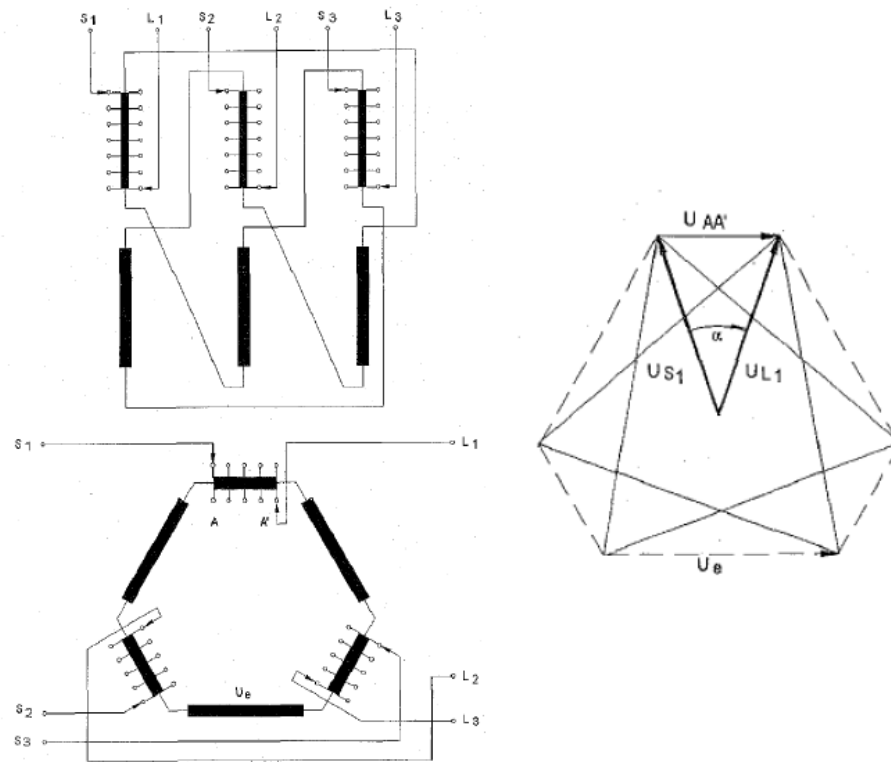


1-12. ábra: aszimmetrikus fázistoló transzformátor



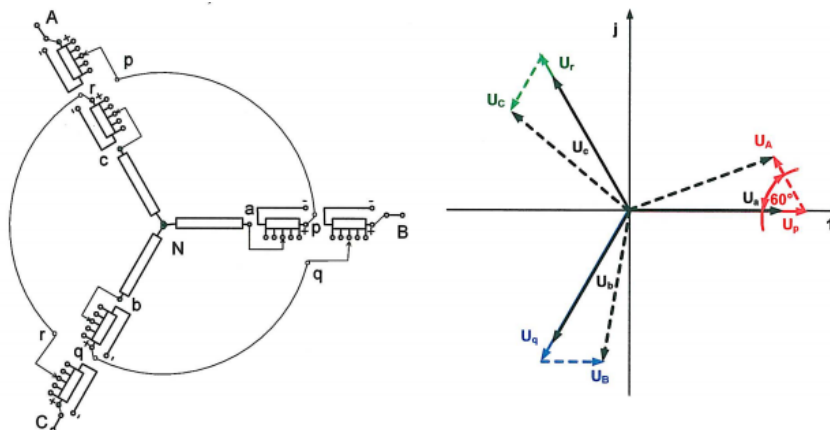
1-13. ábra: közvetlen, szimmetrikus fázistoló transzformátor

Az 1-14. ábra mutatja az ún. delta-hexagonális fázistoló transzformátor tekercseléseinek kapcsolását. A feszültség szabályozó tekercsek ugyanarra az oszlopra vannak szerelve, mint a fő delta tekercsek. Az 1-es fázis szabályozója a 2-es és 3-as fázis közötti deltatekercs oszlopán van. A szabályozó $U_{AA'}$ feszültsége hozzáadódik U_{S1} -hez, így adódik U_{L1} . A kimenő feszültség amplitúdója egyenlő a bemenő feszültség amplitúdójával.



1-14. ábra: delta-hexagonális fázistoló transzformátor

Az 1-15. ábra által mutatott elrendezés az előbbiektől abban különbözik, hogy itt a fő tekercsek nem deltába, hanem csillagba vannak kapcsolva. A fázisfeszültséghez hozzáadódik egy velük egy fázisban lévő és egy másik fázis feszültségével párhuzamos komponens. Így elérhető, hogy a feszültség nagysága szabályozható legyen, illetve hogy a fázistolás ne változtassa meg a feszültség abszolútértékét.



1-15. ábra: autotranszformátor jellegű fázistoló transzformátor

2 KÖF és KIF hálózatok, feszültségszabályozás, veszteségek

2.1 Elosztóhálózat szerepkörök

Magyarországon az elosztó hálózat az elosztói engedélyesek tulajdonában lévő, szabvány szerint 132 kV*, 35 kV, 22 kV*, 11 kV* és 0,4 kV névleges feszültségű villamosenergia-hálózat. (* A gyakorlatban általában 120 kV-os, 20 kV-os és 10 kV-os hálózatként nevezik). A következőkben megadjuk az elosztó hálózatok hálózati szerepkörének néhány fő jellemzőjét.

Nagyfeszültségű, 132 kV-os elosztó hálózat:

- a 400/132 (vagy /128 kV, /126 kV) és a 220/126 kV-os átviteli hálózati transzformátorok 120 kV-os oldalán, az ún. átadási pontokon vesz át villamos energiát a 400 kV-os és 220 kV-os átviteli hálózatról,
- fogadja a 132 kV-ra csatlakozó erőművek termelését,
- ellátja a 120 kV/KÖF közcélú hálózati és a 120 kV/KÖF ipari alállomásokat,
- az üzembiztonság fenntartása érdekében hurkolt hálózati alakzatokban üzemel (kivéve a sugarasan ellátott célállomásokat), jelenleg általában a 400 és 220 kV-os átviteli hálózatot is „aláhurkolva”, bár már többször felmerült az üzemvitel szempontjából egyszerűbb, önálló 132 kV-os elosztó hálózati körzetek kialakítása, „saját” 400 kV-os, illetve 220 kV-os tápponttal.

Középfeszültségű, 22 kV-os (vidéken szabadvezetékes, városokban kábeles) és 11 kV-os (kábeles) elosztó hálózat:

- 120 kV/KÖF transzformátor állomásokról induló KÖF leágazásokon (22 kV-on állomásonként átlagosan 10-12 leágazás, egy leágazás – gerinc+szárnyak – átlagosan 60 km) látja el a KÖF/0,4 kV-os közcélú vagy ipari transzformátorokat,
- fogadja az adott térségben ún. elosztott jellegű, növekvő mértékben megújuló energiaforrásokat felhasználó kiserőművek termelését,
- üzemszerűen az egyszerűbb üzemvitelt adó sugaras hálózati alakzatban „működik”, megfelelő helyeken kialakított bontási/összekapcsolási pontokkal biztosítva a tartalékelátás(ok) lehetőségét,
- leágazásaira (gerinc- vagy szárnyvezetékre) csatlakozó kiserőmű(vek) esetén a sugaras alakzat már nem egy táppontú, amely a szokásostól eltérő üzemvitelt kíván.

Kisfeszültségű, 0,4 kV-os (vidéken szabadvezetékes vagy szigetelt légvezetékes, városokban kábeles) elosztó hálózat KÖF/0,4 kV-os körzetekben, üzemszerűen sugaras alakzatban:

- ellátja a 400/231 V csatlakozású felhasználókat, három vagy egyfázisú csatlakozással,
- fogadja a háztartási méretű kiserőművek (HMKE<50 kVA) termelését.

2.2 KÖF és KIF hálózati topológiák

2.2.1 Tipizált transzformátorok

2.2.1.1 NAF/NAF transzformátor

- 120 kV $\pm$ 15%/22 kV Ynynd_t6, S_n: 16, 25 vagy 40 MVA
- 120 kV $\pm$ 15%/11 kV Ynd₁₁, S_n: 25 vagy 40 MVA

A 22 és 11 kV-os hálózat közös táppontjaiban általában három tekercselésű transzformátorokat kell alkalmazni.

2.2.1.2 KÖF/KIF transzformátor

- 22 kV/0,42 kV/0,242 kV $\pm$ 2x2,5% Dyn5, Yzn5
- 11 kV/0,42 kV/0,242 kV $\pm$ 2,5% Dyn5, Yzn5
- Alállomásokban, S_n: 50, 100, 160, 250, 400, 630 vagy 1000 kVA
- Oszlop transzformátorok, S_n: 50-630 kVA
- épített házas és lemezházas transzformátorállomások, S_n: 160-1000 kVA

A közcélú kiefeszűltűgű hálózati táplálására kiépített állomások teljesítménye általában 630 kVA, indokolt esetben legfeljebb 1000 kVA. A transzformátort kiterheltnak kell minősíteni, ha a mértékadó terhelése (negyedórás átlagterhelések maximuma) a névleges teljesítményének 80%-át meghaladja.

2.2.2 Tipizált vezető-keresztmetszetek

132 kV-os szabadvezeték

- Fázisvezető: ACSR, 150/25, 250/40, 385/35, 560/50 (mm²)
- Védővezető: ACSR, 50/30, 95/55 (mm²)

132 kV-os kábel

- A 132 kV-os kábelek alkalmazása minden esetben egyedi műszaki-gazdasági vizsgálatot igényel.

Középfeszűltűgű szabadvezeték, burkolt szabadvezeték

- Anyaga: AASC (Al)
- Keresztmetszet: gerinc jellegű fővezeték: 95, 120 (mm²), leágazás jellegű vezeték: 50 mm²

Középfeszűltűgű kábel (egyerű)

- Anyaga: ASC (Al)
- Keresztmetszet: 95, 150, 180, 240 (mm²)

Kiefeszűltűgű szabadvezeték, szigetelt szabadvezeték

- Anyaga: ASC (Al)
- Keresztmetszet: gerinc jellegű fővezeték: 95 mm², leágazás jellegű vezeték: 50 mm², csatlakozó jellegű vezeték: 16, 25, 35 (mm²), közvilágítási fővezeték: 25 mm², közvilágítási leágazó vezeték: 25 mm²

Kiefeszűltűgű kábel

- Anyaga: Al
- Keresztmetszet: gerinc jellegű fővezeték: 150, 240 (mm²), leágazás jellegű vezeték: 50, 150 mm², csatlakozó jellegű vezeték: 50, 95 (mm²), közvilágítási fővezeték: 16 mm² (Cu), közvilágítási leágazó vezeték: 16 mm² (Cu)

2.2.3 Topológiák

Gerincvezeték (fővezeték): Gerincvezetéknek (fővezetéknek) nevezzük a középfeszűltűgű elosztóhálózat táppontjaiból kiinduló vezetékot, amely a róla leágazó szárnyvezetékek és fogyasztók közvetlen táplálására szolgál.

Szárnyvezeték (leágazás): Szárnyvezetéknek (leágazásnak) nevezzük a gerincvezetéket az elosztóhálózat fogyasztóit képező közép/kiefeszűltűgű állomásokkal, illetve a középfeszűltűgű fogyasztókkal összekötő vezetékot.

Célvezeték: Célvezetéknek nevezzük az elosztóhálózat táppontjából kiinduló vezetékot, amely egy állomást táplál és róla szárnyvezetékek és fogyasztói transzformátorok nem ágaznak le.

Sugaras hálózat: Egy táppontból táplált gerincvezetékiből is ezek szárnyvezetékeiből álló olyan hálózat melynek vezetékai sem egymással, sem más táppontokból ellátott vezetékkel nincsenek kapcsolatban.

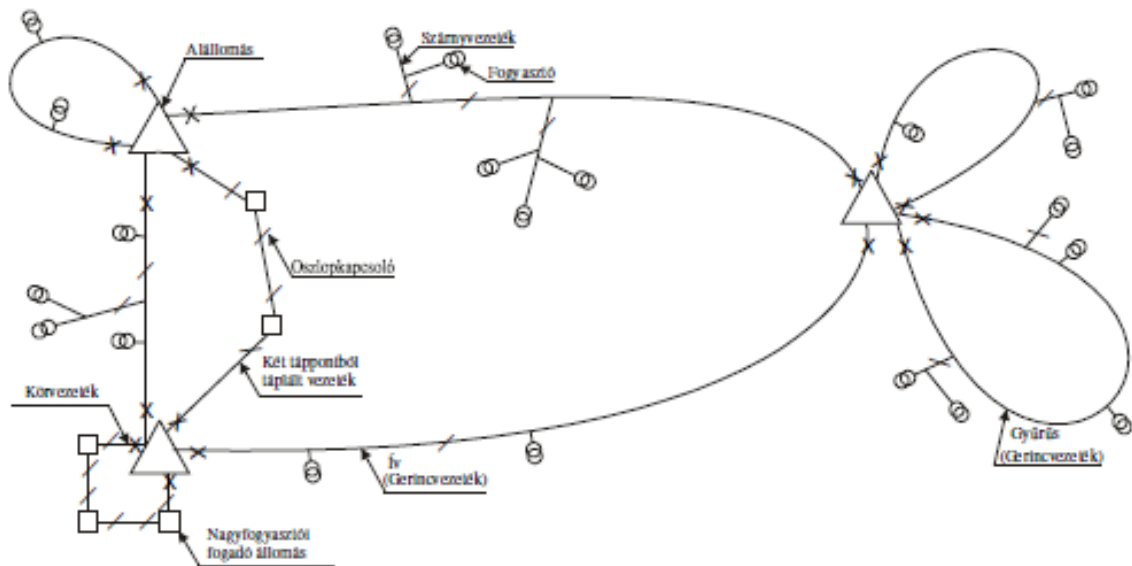
Íves hálózat: Az a gerincvezetékekből és ezek szárnyvezetékeiből álló hálózat, ahol a gerincvezetékek két vége két különböző táppontba csatlakozik. A gerincvezetékek egy hosszanti üzemszerű bontási hellyel rendelkeznek, és sugarasan üzemelnek.

Gyűrűs hálózat: Az a gerincvezetésekből és ezek szárnyvezetékeiből álló hálózat, melyeknél a gerincvezeték két vége ugyanazon tápponthoz csatlakozik. Egy hosszanti üzemszerű bontási helyet tartalmaznak, sugarasan üzemelnek.

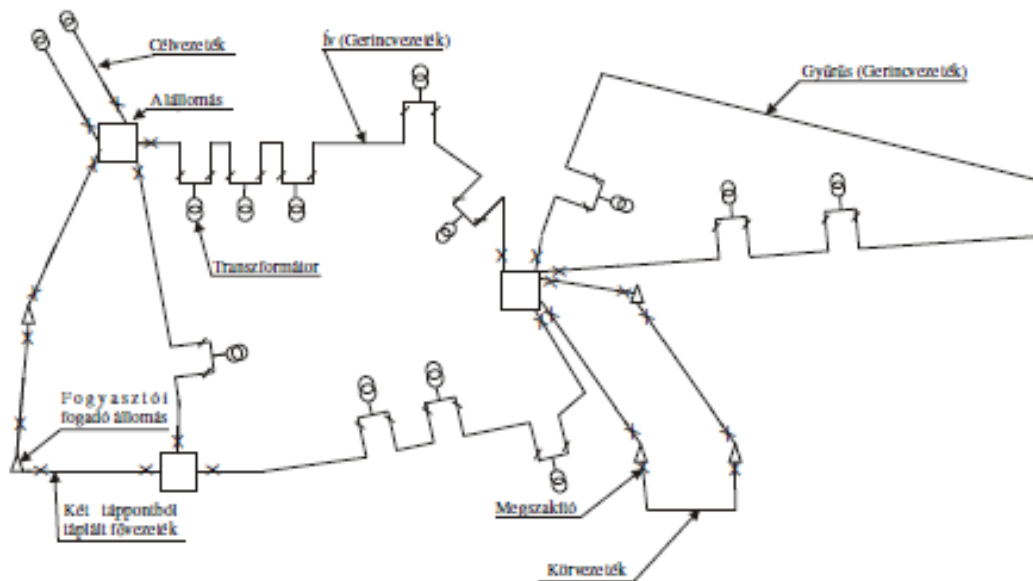
Körhálózat: A körhálózat olyan gerincvezeték szakaszokból álló köralakzat, amely egynél több, védelmi szempontból önálló vezetékszakaszból áll, a gerincvezeték-szakaszok üzemszerűen megszakítók (esetleg biztosítás terhelésszakaszolókon) keresztül össze vannak kapcsolva és a két végső vezetékszakasz ugyanazon táppont gyűjtősinjéhez csatlakozik. A körhálózat közbenső gyűjtősinjeiről koncentrált fogyasztók ágazhatnak le.

Hurkolt hálózat: Olyan zárt vezetékrendszer, amelyben üzemszerűen több zárt kör van, a vezetékek a csomópontokban többszörösen kapcsolódnak egymással és így az áram az egyes csomópontoknál elhelyezett fogyasztókhoz több oldalról különféle utakon juthat el. A hurkolt hálózatot egy vagy több táppontból lehet táplálni.

Kihelyezett és végponti állomásos hálózat: Egy táppontból kihelyezett transzformátor állomásból álló hálózat (szabadvezetékkel vagy kábellel). Az állomásban vagy megszakító vagy biztosítás terhelésszakaszoló van telepítve. Ilyen állomás átmeneti (ideiglenes) ellátására vagy a fogyasztó határozott kívánságára létesíthető.



2-1. ábra: KÖF szabadvezeték topológiák



2-2. ábra: KÖF kábel topológiák

2.3 KÖF és KIF hálózatok feszültségkarakterisztikái

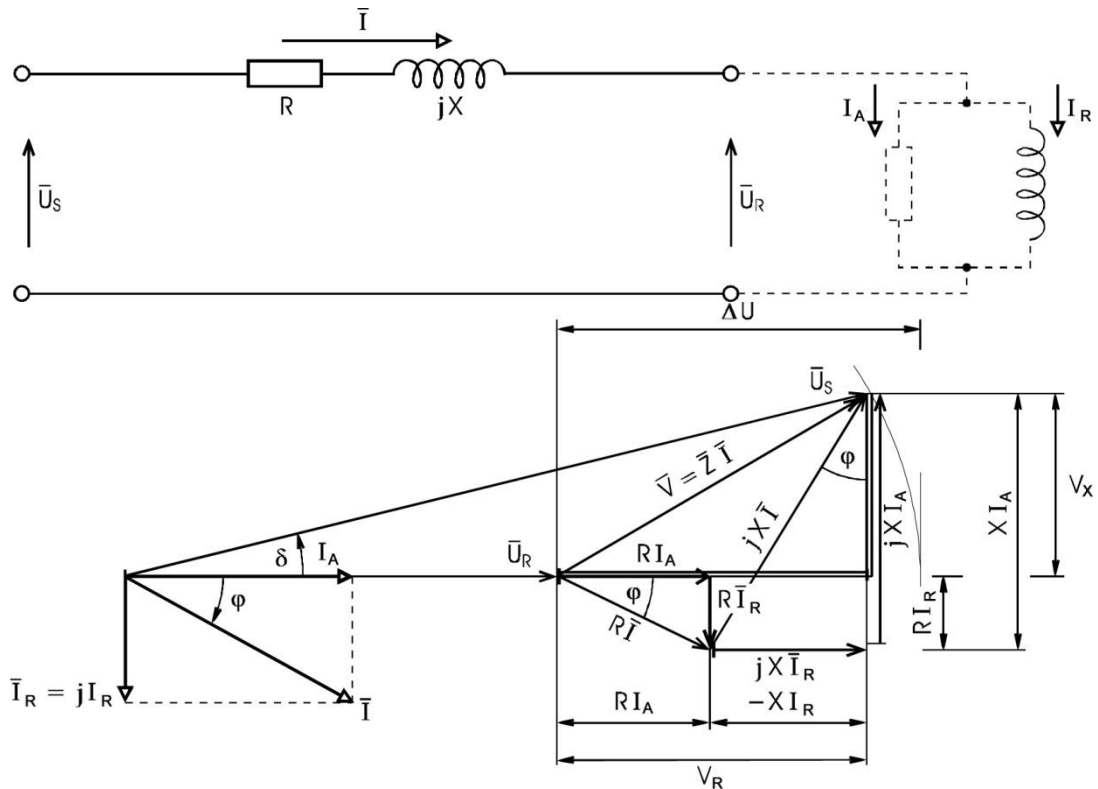
A fogyasztók szabványos feszültségértékkel való ellátásához a következőket kell meghatározni, illetve figyelembe venni:

- KÖF hálózaton megengedhető feszültségtűrés,
- KIF hálózaton megengedhető feszültségtűrés,
- automatikus feszültségszabályozás holsávja,
- maximális KÖF tápfeszültség,
- a vezetékív üzemszerű feszültségese a csúcsidőszakban (vezetékív közepén bontva),
- feszültségprofil csúcsidőszaki üzemszerű állapotra,
- minimális (völgyidőszaki) terheléshez tartozó KÖF feszültség (vezetékív közepén bontva),
- feszültségprofil völgyidőszaki állapotra,
- ATSZ beállítási tartománya
- a vezetékív üzemzavari feszültségese a legkedvezőtlenebb esetben (vezetékív végén),
- feszültségprofil üzemzavari állapotra,
- üzemszerűen a vezetékív végéig tápláló hálózat (kábelhálózat) feszültségese,
- fojtótekerces hatása a feszültségésre.

2.3.1 Feszültségese

Az elosztó hálózati szerepű, sugarasan üzemelő közép- és kisfeszültségű vezetékek nem túl nagy hosszúságúak, középfeszültségen a gyakorlatban néhányszor 10 km-es, kisfeszültségen néhány 100 méteres vezeték hosszakkal lehet számolni. A rövid vezetékek a soros impedanciájával vehetők figyelembe, szabadvezetékek söntimpedanciája a teljesítmény átvitel szempontjából végtelen nagyra tekinthető.

A távvezetésekből, generátorokból és transzformátorból álló átviteli útvonal soros leképezése R és X elemeket is tartalmaz. (2-3. ábra).



2-3. ábra: feszültségesés soros impedancián

Ha a vezetéken átfolyó áramot $I \angle \varphi$ jelöli, a hatására létrejövő komplex feszültségesés nagysága:

$$\bar{V} = \bar{U}_S - \bar{U}_R = \bar{Z} \cdot \bar{I} = (R + j \cdot X) \cdot (I_A - j \cdot I_R) = (R \cdot I_A - X \cdot I_R) + j \cdot (R \cdot I_R + X \cdot I_A)$$

amit két összetevőre bonthatunk.

A hosszirányú összetevő:

$$\bar{V}_R = R \cdot I_A - X \cdot I_R$$

A keresztirányú összetevő:

$$\bar{V}_X = R \cdot I_R + X \cdot I_A$$

$$\bar{V}_X = R \cdot I_R + X \cdot I_A$$

A hosszirányú összetevőt kifejezhetjük a végponti feszültségfázorok szögműködésével is, $\delta = \angle \bar{U}_S - \angle \bar{U}_R$:

$$\bar{V}_R = \bar{U}_S \cdot \cos \delta - \bar{U}_R$$

Mivel a δ szög általában kicsit, az előző egyenlet egyszerűbb formában is közelíthető:

$$\bar{V}_R = \bar{U}_S - \bar{U}_R$$

ami szerint a hosszirányú feszültségesés nagysága közel megegyezik a fogyasztó által érzékelt feszültségesés nagyságával.

A leágazás jellemző feszültségértékeit a következők szerint definiálhatjuk.

Végponti terhelés:

$$\bar{V}_R = R \cdot I_A - X \cdot I_R$$

Egyenletesen eloszló terhelés, terhelési súlypont a vezeték felénél:

$$\bar{V}_{EE} = \frac{1}{2} \cdot \bar{V}_R$$

Szektor jellegű eloszló terhelés, terhelési súlypont a vezeték harmadánál, a tápponttól távolodva csökkenő mértékű terhelés:

$$\bar{V}_{SZCS} = \frac{1}{3} \cdot \bar{V}_R$$

Szektor jellegű eloszló terhelés, terhelési súlypont a vezeték harmadánál, a tápponttól távolodva növekvő mértékű terhelés:

$$\bar{V}_{SZN} = \frac{2}{3} \cdot \bar{V}_R$$

Ha a vezetékíven üzemszerűen középen van kialakítva a bontáspont akkor üzemzavari ellátás esetén legrosszabb esetben az ívet egészen a másik táppontig kell ellátni. Elvi esetben, ha a bontási ponttól másik táppontig a távolság szintén l , a két szakasz terhelési jellege és mértéke azonos, akkor az üzemzavari feszültségesés a $2l$ hosszúságú:

- $\bar{V}_{EE,üzemzavari} = 4 \cdot \bar{V}_R$ egyenletesen eloszló terhelés esetén
- $\bar{V}_{SZ,üzemzavari} = 3 \cdot \bar{V}_{SZCS}$ szektor jellegű eloszló terhelés esetén, terhelési súlypont a vezeték harmadánál, a tápponttól távolodva csökkenő mértékű terhelés.

A feszültségesések meghatározásakor és az eredmények felhasználásakor az alábbi szempontokat, körülményeket kell figyelembe venni:

- Üzemi állapotban a bontási pont az ív közepe táján vagy végpontján van-e.
- Az ívről induló sugaras leágazás helye üzemszerűen középen történő bontásnál legkedvezőtlenebb esetben közvetlenül a bontáspont előtt; ív végponton történő bontásnál a vezeték középső szakaszán van.
- A tápponthez legközelebb lévő transzformátor legalább 30% terhelésű csúcsidőszakban és terheletlen völgyidőszakban.
- A villamosan legtávolabb lévő transzformátor névlegesen terhelt.
- A közép/kisfeszültségű transzformátorok 22 kV-on feszültségmódosító megcsapolással rendelkeznek.
- Az ív táppontjában terheléstől függő automatikus feszültségszabályozás van.

2.3.2 Feszültségtűrés

2.3.2.1 KÖF hálózatok

$U_n \pm 10\%$

Ha $U_n = 22$ kV, feszültség 19,8 és 24,2 kV között

Ha $U_n = 11$ kV, feszültség 9,9 és 12 kV között

2.3.2.2 KIF hálózatok

$U_n \pm 10\%$

$U_n = 400/231$ V, vonali feszültség 360 és 440 V, fázisfeszültség 208 és 254 V között

A csatlakozóvezeték és a méretlen fővezeték együttes feszültségesése legfeljebb 2% (általában 1+1%), ez 8/4,62 V. A kisfeszültségű hálózatokon az időleges feszültségváltozások legfeljebb 15%-al térhetnek el a névleges értéktől (vonali feszültség 340 és 460 V, fázisfeszültség 196 és 266 V között).

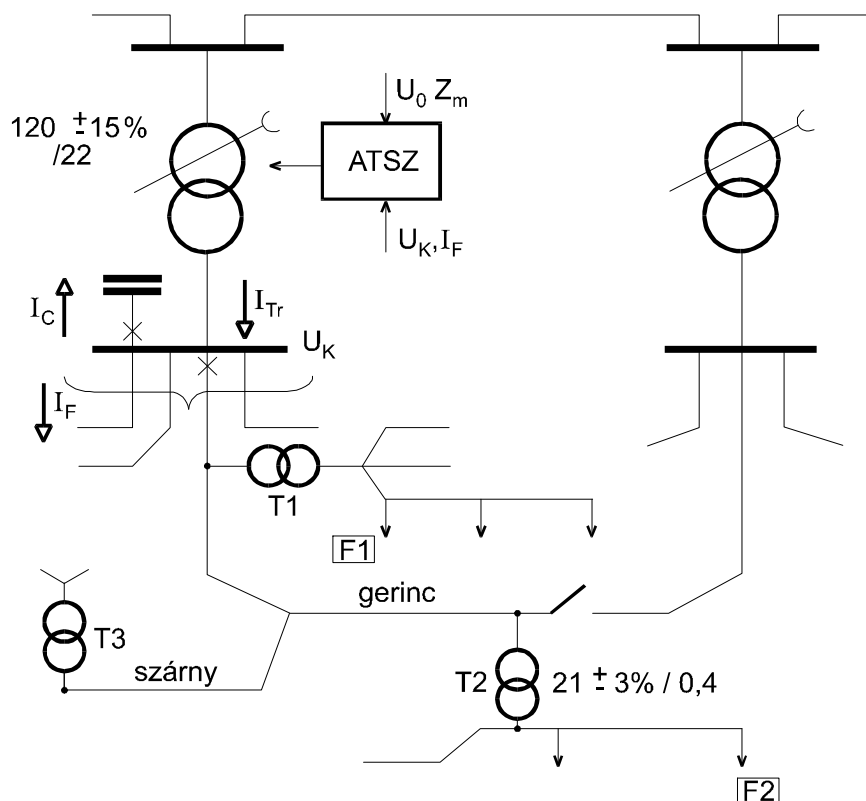
2.4 Feszültségszabályozás

A 120 kV/KÖF transzformátorállomás – KÖF (22 kV, 11 kV) távvezeték – KÖF/0,4 kV-os transzformátor – 0,4 kV-os kisfeszültségű vezeték – fogyasztói csatlakozás alkotta teljesítményszállítási útvonalat az üzemszerűen sugaras hálózati ellátás jellemzi. A 400 V névleges feszültségű háromfázisú, illetve a 230 V-os egyfázisú fogyasztók csatlakozási pontjára előírt $U_n \pm 10\%$ -os ($400/231 \text{ V} \pm 40/23 \text{ V}$) üzemi feszültség szolgáltatása a megfelelő méretezés (vezeték keresztmetszet és tápvonal hosszúság, transzformátor névleges teljesítmény és névleges középállású áttétel, fogyasztói és áramszolgáltatói meddőteljesítmény kompenzáció) mellett általában csak a 120 kV/KÖF állomás KÖF oldali feszültségének szabályozásával biztosítható.

A szabályozás szükségességének alapvető oka a fogyasztói teljesítményigény időbeni változása:

- A rendszerterhelés, illetve a 120 kV-on szállított teljesítmény változása miatt az átviteli hálózati NAF/120 kV-os szabályozások ellenére változni fog a 120 kV/KÖF táppontok 120 kV-os oldali feszültsége, ezt az ingadozást a KÖF oldalra vonatkozóan ki kell küszöbölni.
- A KÖF és a 0,4 kV-os hálózati elemeken (vezeték, transzformátor) a terhelés függvényében változik a feszültségesés, ezeket a változásokat a KÖF és KIF fogyasztói csatlakozási pontokra vonatkozóan ellensúlyozni kell.

Ezt a szükséges feszültségszabályozást a 120 kV/KÖF transzformátor(ok) áttételének terhelés alatti változtatásával (fokozatléptetés) lehet megoldani, a 120 kV-os oldalon kialakított áttétel-változtatási lehetőség révén. A 120/22 kV és a 120/11 kV-os transzformátorok, $\pm 15\%$ -os primer oldali csillagponti szabályozással rendelkeznek, a fokozatok száma 27, vagy 19 (középállás és ± 13 , illetve ± 9 fokozatlépés, fokozatonként 1,15% illetve 1,66% feszültségszabályozás). Az automatikus feszültségszabályozás szükséges holtávja a fokozatváltás szabályozási értékének 1,5-szerese, 27 fokozat esetén 1,7%, 19 fokozat esetén 2,5%.



2-4. ábra: 120 kV/KÖF hálózat

Példaként tekintsünk egy $120 \pm 15\% / 22 \text{ kV}$ áttételű, ± 9 fokozatban szabályozható transzformátorral üzemelő állomást, amely a KÖF sínről induló gerincvezetésekre, illetve az ezekről leágazó szárnyvezetésekre kapcsolódó, régebben $21/0,4 \text{ kV}$ -os, újabban $22/0,42 \text{ kV}$ -os névleges (középállású) áttételű transzformátorokon keresztül táplálja a $400/231 \text{ V}$ -os fogyasztói hálózati körzeteket (2-4. ábra). A $22/0,42 \text{ kV}$ -os transzformátorok a középálláson kívül a 22 kV -os oldalon a $+2,5$ és $+5\%$ -os (a $0,4 \text{ kV}$ -os oldalra feszültséget csökkentő), illetve a $-2,5$ és -5% -os (a $0,4 \text{ kV}$ -os oldalra feszültséget növelő) megcsapolásba, a régebbi $21/0,4 \text{ kV}$ -os transzformátorok a 21 kV -os oldalon a $+3\%$ -os vagy a -3% -os megcsapolásba is köthetők, de csak a hálózatról lekapcsolt állapotban. A továbbiakban az újabb $22 \pm 2 \cdot 2,5\% / 0,42 \text{ kV}$ -os transzformátorokat vesszük figyelembe, amelyeknél a $22/0,42 \text{ kV}$ középállású névleges áttétel a $0,42/0,4$ arány szerint $+5\%$ feszültségnövekedést eredményez a $0,4 \text{ kV}$ -os névleges feszültségű oldalra. Fontos megemlíteni, hogy elemzéseink és következtetéseink közvetlenül csak azokra az esetekre érvényesek, amelyekben a KÖF és KIF vezetésekre nem csatlakoznak kiserőművek, mert ezek üzeme megváltoztatja a vezeték menti feszültségviszonyokat.

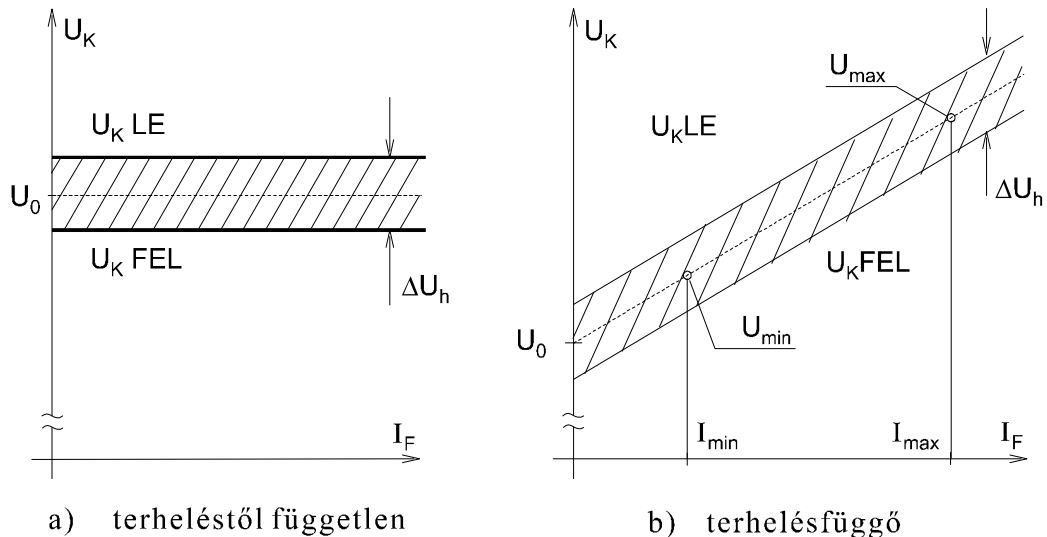
A KÖF sín U_K feszültségének szabályozásával a $400/231 \text{ V}$ névleges feszültségű fogyasztói csatlakozási pontokra kell biztosítani a feszültségnek a névleges (100%-os) érték körüli $\pm 10\%$ -os sávon belül való megtartását. A szabályozási feladat, lényegét tekintve, a következők szerint fogalmazható meg:

A villamosan legközelebbi fogyasztónál (az ábrán a T_1 transzformátorkörzetben F_1) a feszültség ne legyen túl nagy ($U_{F1} \leq 440/254 \text{ V}$), és a villamosan legtávolabbi fogyasztónál (az ábrán a T_2 körzetben F_2 , vagy a T_3 körzetben F_3) a feszültség ne legyen túl kicsi ($U_{F2}, U_{F3} \geq 360/208 \text{ V}$).

Völgyterheléskor az első feltétel megtartásához a 20 kV -os tápponti feszültség csökkentésének határt szab a második feltétel, csúcsterheléskor a második feltétel megtartásához a feszültség növelésének határt szab az első feltétel. Megemlítjük, hogy a gerincvezetésekre csatlakozó $22/0,42 \text{ kV}$ -os transzformátorok esetében a tápponthoz villamosan közeli (az ábrán T_1), illetve távoli (T_2) helyzet felcserélődhet: például, ha az érintett 22 kV -os ívet tartalékelátásban egy másik $120/22 \text{ kV}$ -os állomásból tápláljuk, úgy, hogy az eredeti táppontonál bontjuk, az üzemszerűen nyitott leágazás végen pedig zárjuk a 22 kV -os ívet. Ezért a tápponthoz közeli (T_1) transzformátornál, a $0,4 \text{ kV}$ -os oldal feszültségét csökkentő, 22 kV -os oldali $+n\%$ -os ($0,4 \text{ kV}$ -os oldalra feszültség csökkentő) megcsapolásba való kötés nem célszerű alkalmazni. Hasonlóan mondhatjuk azt is, hogy általában a villamosan távoli transzformátoroknál (esetünkben a T_2) sem célszerű a $0,4 \text{ kV}$ -os oldalra feszültségnövelő $-n\%$ -os megcsapolásba kötés alkalmazása. A $\pm n\%$ -os megcsapolás kihasználása általában a szárnyvezeteki transzformátoroknál (az ábrán a T_3 lehet indokolt).

A 22 kV -os tápponti gyűjtősin U_K feszültségének automatikus szabályozását kétféle megfontolás szerint végezhetjük:

- Transzformátor terheléstől független (U_o alappjel szerinti) U_K értékre szabályozás
- Transzformátor terhelésétől függő (U_o alappjeltől és terhelő áramtól függő) U_K értékre szabályozás



2-5: transzformátor szabályozás karakterisztikái

2.4.1 Terhelésfüggetlen szabályozás

Az első esetben csak a 120 kV-os oldali feszültség-ingadozásokat és a 120/22 kV-os transzformátoron fellépő – a transzformátor terhelő áramától függő – feszültségeseést kompenzáljuk, és a beállított (esetenként módosított) U_0 alapjel szerinti U_K értékre szabályozunk. A 120 kV-os oldali fokozatléptetés a KÖF oldalra feszültségváltozást eredményez. A fel/le szabályozások elhatárolása céljából szabályozási holtávot (ΔU_h) kell tartani, amelyet az egy fokozatléptetés okozta feszültségváltozásnál (ΔU_{fok}) nagyobbra kell megválasztani. Esetünkben $\Delta U_{fok} = 1,66\%$, tehát a $\Delta U_h = 2,5\%$ holtáv beállítása megfelelő. A terhelő áramtól nem függő U_K értékre történő szabályozásnál az Automatikus Transzformátor Szabályozó (ATSZ) által érzékelt feszültségre az

$$U_{\hat{E}} = U_K = |\overline{U_K}|$$

egyenlet érvényes, és a terhelés alatti automatikus szabályozás (fokozat léptetés) az alábbi feltételek szerint valósul meg:

- U_K felszabályozás, ha $U_{\hat{E}} < U_{0A}$ where $U_{0A} = U_0 - \Delta U_h/2$
- U_K leszabályozás, ha $U_{\hat{E}} > U_{0F}$ where $U_{0F} = U_0 + \Delta U_h/2$

Az U_0 érték szükség szerint (távkezeléssel) módosítható. Az U_K felszabályozás a 120 kV-os oldali a fokozatléptetést a kisebb menetszámok (a -15%) irányába, a leszabályozás a nagyobb menetszámok (a +15%) irányába vezérli. Ha az U_K a holtávba esik, akkor nem lesz fokozatléptetés. Az időleges ingadozások miatti felesleges szabályozást a fokozatváltás megfelelő késleltetésével (például 60-120 s) kell elkerülni.

2.4.2 Terhelésfüggő szabályozás

A második esetben a 22 és 0,4 kV-os oldalon fellépő – az egyes leágazásokban a „saját” terhelő áramtól függően változó – feszültségeseéseket is ellensúlyozni kívánjuk, elvileg úgy, mintha a 120/22 kV-os transzformátor terhelését figyelembe véve az összes leágazás által ellátott teljes fogyasztói terület fiktív villamos súlypontjában tartanánk állandó értéken a feszültséget. Ezt az elvet úgy valósítjuk meg, hogy a transzformátort terhelő I_{TR} áramból és az alállomási (esetenként ki-vagy bekapcsolt) kondenzátortelep(ek) I_C áramából képezzük a teljes fogyasztói terület eredő I_F áramfelvételét az

$$I_F = I_{TR} - I_C$$

A szabályozóban egy beállított Z_M műimpedancián fellépő feszültségeséssel módosítjuk az alállomási gyűjtősin tényleges U_K feszültségét, és ezt tekintjük az U_E érzékelt feszültségnek:

$$U_E = |U_K - Z_M \cdot I_F|$$

A szabályozási logika a továbbiakban ugyanaz, mint az első esetben, de a beállított U_o alapjel most a fiktív villamos súlypont állandó értéken (pontosabban a holtávon belül) tartott feszültségének feleltethető meg.

A terhelésfüggő feszültségszabályozás elvének alkalmazásához megemlítjük, hogy az U_E képzés analóg módon a legegyszerűbben úgy valósítható meg, hogy például az U_K -hoz a b - a vonali feszültséget, az I_F -hez a b - a vonali feszültséggel az átlagos esetekben gyakorlatilag azonos fázishelyzetű b fázisáramot vesszük, és így $Z_M = R_M$ választással élhetünk. A csúcs- és völgyterhelési állapotokhoz rendelhető (mérésekből általában ismert) I_{max} és I_{min} eredő fogyasztói áramfelvételtől és az elemzések, fogyasztó oldali mérések alapján megfelelően tartott 22 kV-os tápponti U_{max} és U_{min} feszültségekből a kompenzációhoz szükséges R_M és a beállítandó U_o alapjel meghatározható:

$$R_M = \frac{(U_{max} - U_{min})}{(I_{max} - I_{min})}$$

$$U_o = U_{max} - R_M \cdot I_{max}$$

Az adott 120 kV/KÖF állomás fogyasztó körzetének sajátosságaitól függ, hogy a terheléstől függő, vagy az attól független U_K szabályozást célszerű-e alkalmazni. Például jelentősen eltérő hosszúságú 22 kV-os gerincvezetékek és/vagy vegyesen szabadvezetékes és kábeles leágazások esetén a terhelésfüggő szabályozást nem célszerű alkalmazni. (Ugyancsak az alapjel szerinti U_K -ra szabályozás lehet az előnyösebb megoldás egy 120/6 kV-os ipartelepi fogadóállomásban.)

A fogyasztónál szükséges 100±10%-os feszültségsáv megtartásához a szabályozás mellett természetesen nem nélkülözhető a közép- és kiefeszültségű elosztóhálózat megfelelő méretezése. Tájékoztatásként megadjuk a tervezésnél irányelvként figyelembe veendő megengedhető csúcsidejű feszültségeséseket egy 120/22 kV-os tápponti állomásból induló 22 kV-os távvezetésekre és egy 22/0,42 kV-os transzformátorkörzetre vonatkozóan:

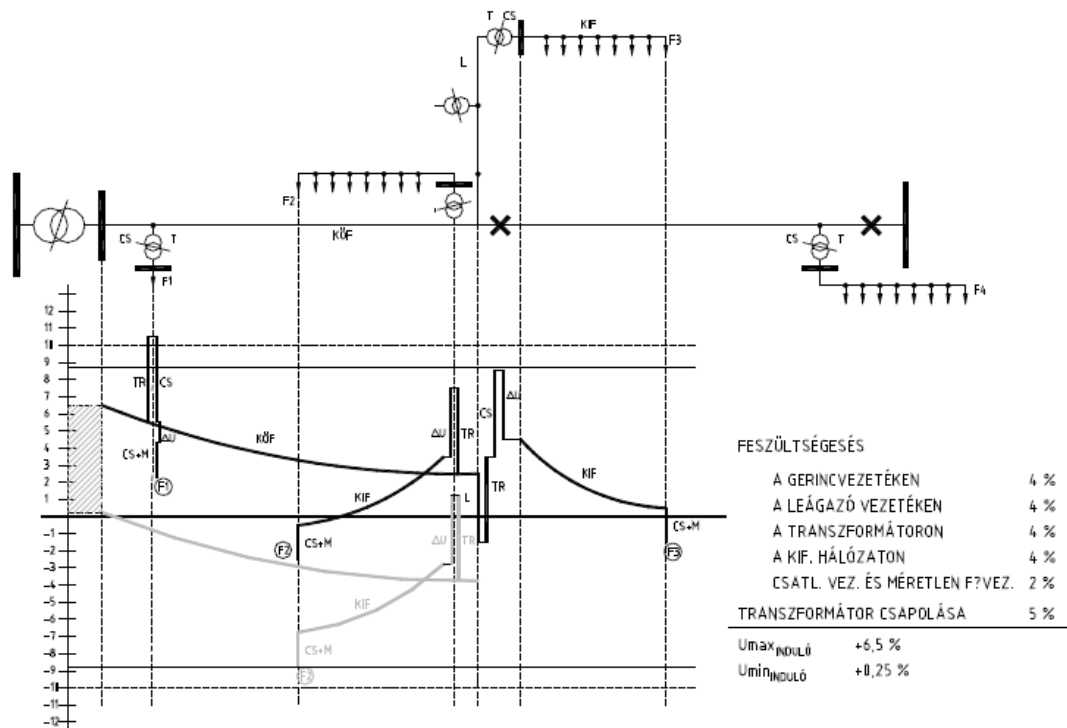
2-1. táblázat: maximális engedélyezett feszültségesés csúcsterhelési időszakban

Hálózati elem	Maximális engedélyezett feszültségesés [%]
22 kV-os gerincvezeték	4
22 kV-os leágazás	4
22/0,4 kV-os transzformátor	4
0,4 kV-os vezeték	4
beköví- és méretlen vezetékek	2

A megadott számértékek alapján – feltételezve a megengedett feszültségesések tényleges kihasználását és figyelembe véve a ±1,25%-os szabályozási holtávot – a villamosan legtávolabbi kiefeszültségű fogyasztóig összességében elvileg $4 + 4 + 4 + 4 + 2 - 1,25 = 16,75\%$ a megengedhető feszültségesés.

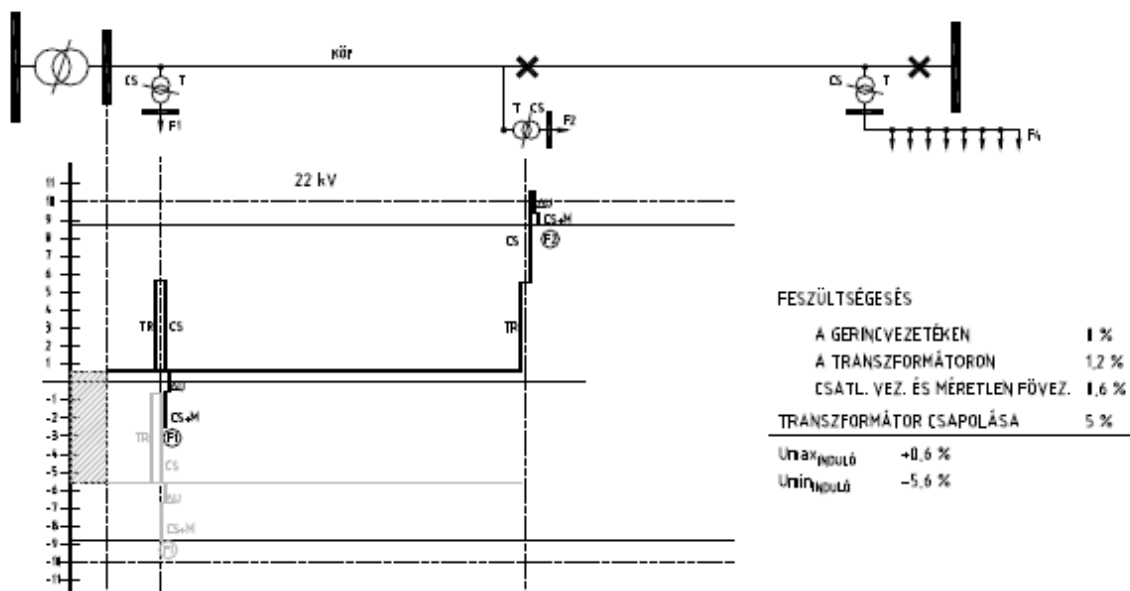
Figyelembe véve a transzformátorok 22/0,42 kV-os névleges áttételét és a 0,4 kV-os oldalra maximum 5%-ot növelő/csökkentő megcsapolási lehetőséget, meg lehet állapítani a 22 kV-os tápponti gyűjtősin csúcsterheléskor szükséges legkisebb és völgyterheléskor még megengedhető legnagyobb elvi értékét.

$$100.5\% \leq U_K \leq 106.5\%$$



2-6. ábra: 20 kV-os szabadvezetékes ellátás elvi feszültségprofilja maximális (csúcsterhelés) feszültségesésekkel (a vezetékív közepén bontva)

TR: a 22/0,42 kV-os áttétel hatása, CS: a megcsapolás hatása, ΔU: feszültségesés a transzformátoron



2-7. ábra: 20 kV-os szabadvezetékes ellátás elvi feszültségprofilja minimális (völgyterhelés) feszültségesésekkel (a vezetékív közepén bontva)

TR: a 22/0,42 kV-os áttétel hatása, CS: a megcsapolás hatása, ΔU: feszültségesés a transzformátoron

2.5 Veszteségek

2-2. táblázat: KÖF és KIF elosztóhálózati veszteségek eloszlása

Hálózati elem	Részesedés [%]
NAF vezetékek (120 kV)	10
NAF/KÖF és KÖF/KÖF transzformátorok	5
KÖF vezetékek	24
KÖF/KIF transzformátorok	21
KIF vezetékek	40

2-3. táblázat: KÖF elosztóhálózati veszteségek eloszlása

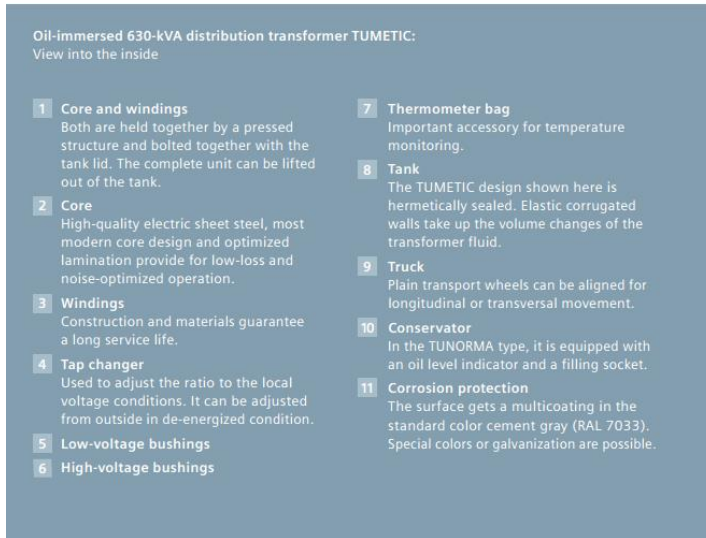
Hálózati elem	Részesedés [%]
Hálózat	89,2
Fojtók	2,3
Kábelek dielektromos vesztesége	6,8
Kondenzátorok	1,1
Feszültségváltók	0,7

2-4. táblázat: KIF elosztóhálózati veszteségek eloszlása

Hálózati elem	Részesedés [%]
Kommunális hálózat	63
Közvilágítás	20
Csatlakozó vezetékek	5
Fogyasztásmérők	5
HKV, RKV	2
Kondenzátorok	~0

3 22/0,42 kV-os transzformátor

3.1 Szerkezeti kialakítás



3-1. ábra: 22/0,42 kV-os transzformátor szerkezeti kialakítása

1. vasmag és tekercselés, 2. vasmag, 3. tekercselések, 4. megcsapolás átkapcsoló, 5. kisebb feszültség átvezetők, 6. nagyobb feszültség átvezetők, 7. hőmérő zseb, 8. olajedény, 9. görgős alváz, 10. tágulási tartály, 11. korrózióvédelem

3.2 Gyári adatok, paraméterek (példák)

TSR 100/22 háromfázisú olajos elosztó transzformátor

- Névleges feszültség: 22 kV $\pm$ 2x2,5%/0,42 kV
- Kapcsolási csoport: Dyn5
- Névleges rövidzárási feszültség: 50-630 kVA: 4,0% -5%,+10% 630-2500 kVA: 6,0%

Névleges teljesítmény: 160 kVA

- Névleges áramerősség: 4,2/220 A
- P_{ij} : 300 W+3%
- P_{rz} : 2000 W+3%
- Össztömeg/olaj: 770/160 kg
- Méret: 0,98*0,69*1,33 m
- Ár: 1,4 M HUF (2011)

Névleges teljesítmény: 250 kVA

- Névleges áramerősség: 6,55/343,7 A
- P_{ij} : 425 W+3%
- P_{rz} : 2750 W+3%
- Össztömeg/olaj: 1100/210 kg
- Méret: 1*0,67*1,45 m
- Ár: 1,6 M HUF (2011)

Névleges teljesítmény: 400 kVA

- Névleges áramerősség: 10,5/550 A
- P_{ij} : 610 W+3%

- P_{rz} : 3850 W+3%
- Össztömeg/olaj: 1320/260 kg
- Méret: 1,12*0,82*1,53 m
- Ár: 2 M HUF (2011)

Névleges teljesítmény: 1600 kVA

- Névleges áramerősség: 42/2200 A
- P_{ij} 1700 W+3%
- P_{rz} : 14000 W+3%
- Össztömeg/olaj: 3250/610 kg
- Méret: 1,66*1,10*1,90 m
- Ár: 4,7 M HUF (2011)

3.3 Villamos paraméterek a példához

Névleges feszültségek: $U_{N,n}=22$ kV, $U_{K,n}=420$ V

Fokozatkapcsoló a nagyfeszültségű oldalon: $\pm 2*2,5\%$

Névleges teljesítmény: $S_n=160$ kVA

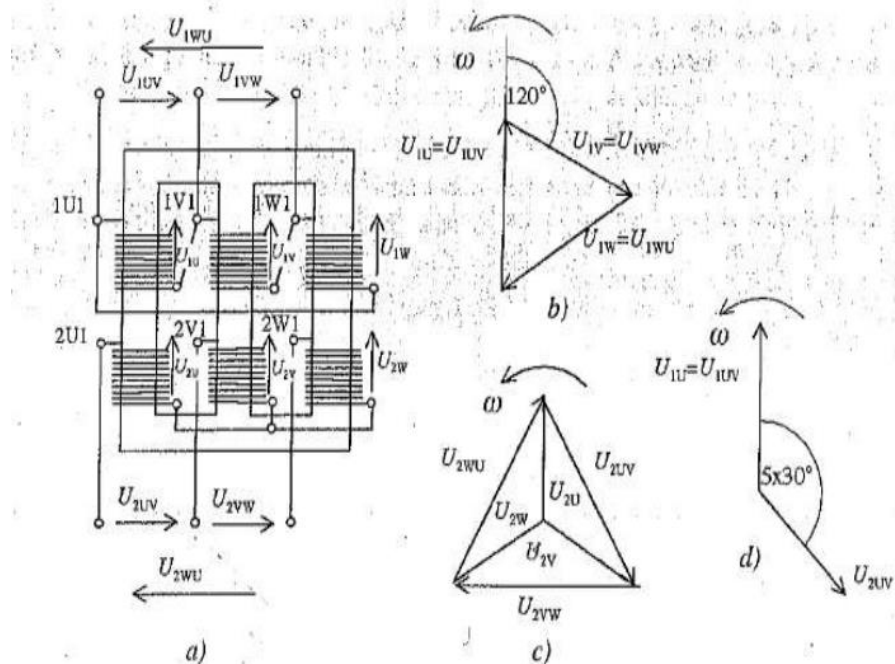
Névleges áramerősségek: $I_{N,n}=4,2$ A, $I_{K,n}=220$ A

Kapcsolási csoport: Dy5

Üresjárási paraméterek: $P_{ij}=300$ W (max +3%), $I_{ij}\approx 2\%$

Rövidzárási paraméterek: $P_{rz}=200$ W (max +3%), $\varepsilon=4\%$

3.4 Tekercskialakítás, kapcsolási csoport



3-2. ábra: Dy5 kapcsolású transzformátor

Nagyfeszültségű tekercsek:

- Tekercsek eleje: 1U1, 1V1, 1W1

- Tekercsek vége: 1U2, 1V2, 1W2

Kisfeszültségű tekercsek:

- Tekercsek eleje: 2U1, 2V1, 2W1
- Tekercsek vége: 2U2, 2V2, 2W2

Fázisok: L1, L2, L3

Földelt csillagpont: N

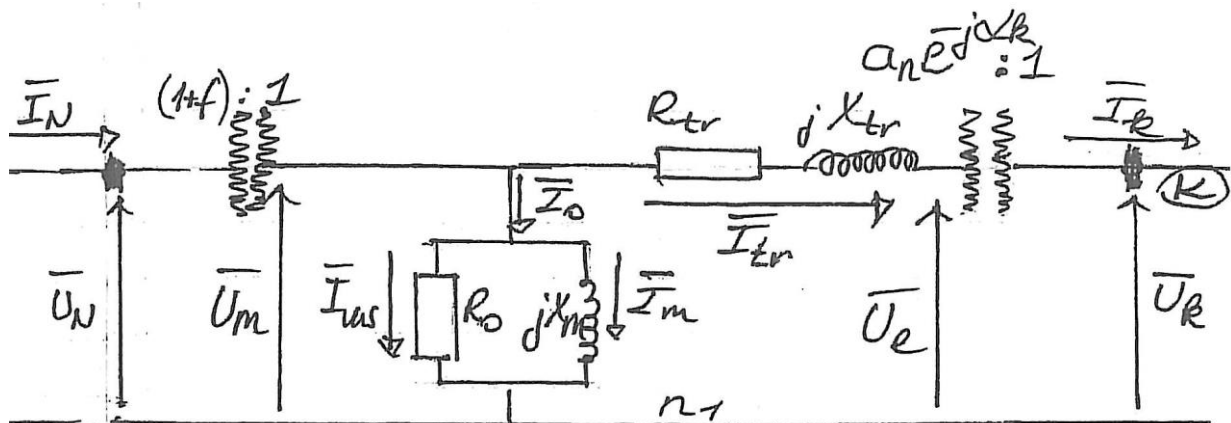
3.5 Pozitív sorrendű áramköri modell szimmetrikus (üzemi) állapotok számításához

A modell állandósult szimmetrikus (üzem)állapotok vizsgálatára alkalmas. A modellben és a képletekben most nem jelöljük a pozitív sorrendre utaló 1 „index”-et, a jelölt áram- és feszültségfázorok szimmetrikus üzemállapotban az a fázisértékeket is jelentik. Az $a_n = 22/0.42 \text{ kV/kV}$ a transzformátor névleges középállású áttétele, viszonylagos egységben értett mennyiségekhez $a_n = 1$. Az $e^{-j\alpha_k}$ a fázisszög forgatást írja le, Dy5 transzformátor esetében pozitív sorrendre, D→y irányban $\alpha_k = -150^\circ$, a komplex áttétel $a_n \cdot e^{-j\alpha_k}$: 1.

Az áttétel a névlegeshez képest az NF oldalon a menetszám-megcsapolás szerint kissé módosítható, a 22 kV-os oldalon csökkentett menetszám (pl. -2,5%) a 0,42 kV-os KIF oldalra feszültséget növelő hatású (nő a menetfeszültség). Ezt a hatást az $a_f = (1 + f)$: 1 „fokozatállás áttétel” írja le, amelyhez tehát $f = 0,025, -0,05, 0, +0,025, +0,05$ lehet.

A modellben az R és X paramétereket a NF oldalra $f=0$ -ra vonatkozó valós értékkel, vagy (a transzformátor névleges adataira vonatkozóan) viszonylagos értékben (ve) adjuk meg. A jelölt áram- és feszültségfázorok az R , X paraméterek értelmezésével (Ω vagy ve) összhangban [A] és [V] értékben vagy ve-ben értendők. Az U_N és I_N az N oldali kivezetésen, az U_k és I_k a k oldali kivezetésen „mérhető” pozitív sorrendű feszültség, illetve áramfázorok. A modellben a R_o (illetve I_{vas}) a vasvesztés, az X_m (illetve I_m) a mágnesező áram, a $Z_{tr} = R_{tr} + jX_{tr}$ soros impedanciában az R_{tr} az NF és KF tekercsvesztések, az X_{tr} a szórási reaktancia leképezéséhez szükséges. Az I_{vas} és I_m áramot, illetve ezek I_o eredőjét (az üresjárási állandósult áramfelvételt) a modellben szinuszos áramnak tekintjük. A modellbeli $(1+f)$ megcsapolás utáni U_m feszültség, a Z_{tr} impedancián folyó I_{tr} áram és az a_n áttétel előtti U_e feszültség a valóságban nem létezik, ezek csak modellezési (számítási) segédmennyiségek:

- az U_m a megcsapolás okozta (menet)feszültségváltozást írja le,
- az I_{tr} árammal a transzformátoron fellépő feszültségesés, és soros veszteség számítható,
- az U_e az $a_n \cdot e^{-j\alpha_k}$: 1 áttétellel a k oldali kivezetés feszültségét adja meg.



3-3. ábra: a transzformátor pozitív sorrendű modellje

3.5.1 Feszültség és áram fázor összefüggések

A modellhez felírható fázor-összefüggések (pozitív sorrend):

$$U_m = U_N / (1 + f) \text{ vagy } U_N = U_m \cdot (1 + f)$$

$$I_0 = I_{vas} + I_m, I_{vas} = U_m / R_0, I_m = U_m / j \cdot X_0$$

$$I_N = (I_{tr} + I_0) / (1 + f) \text{ vagy } (I_{tr} + I_0) = I_N \cdot (1 + f)$$

$$U_e = U_m - Z_{tr} \cdot I_{tr} \text{ vagy } U_m = U_e + Z_{tr} \cdot I_{tr} \text{ amelyhez } Z_{tr} = R_{tr} + j \cdot X_{tr}$$

3.5.2 Fázisszög forgatás

A modellbeli U_e és I_{tr} alkalmazásával, megjelölve a szimmetrikus összetevő sorrendeket:

- pozitív sorrendű fázorra: $U_{k1} = U_{e1} \cdot (1/a_n) \cdot e^{j\alpha_k}$ and $I_{k1} = I_{tr1} \cdot a_n \cdot e^{j\alpha_k}$
- negatív sorrendű fázorra: $U_{k2} = U_{e2} \cdot (1/a_n) \cdot e^{-j\alpha_k}$ and $I_{k2} = I_{tr2} \cdot a_n \cdot e^{-j\alpha_k}$

ahol $\alpha_k = -150^\circ$ és $e^{-j150^\circ} = \frac{-\sqrt{3}-j \cdot 1}{2}$

3.5.3 Viszonylagos egységek alkalmazása

Transzformátor-paraméterek meghatározásánál, üzemállapotok vizsgálatánál (számításánál) célszerű az egyes mennyiségeket a transzformátor névleges adataira vonatkozó viszonylagos egységben kezelni. Például $I_{N,alap} [A] = I_{N,n} [A]$ és így:

$$I_N [v.e.] = \frac{I_N [A]}{I_{N,n} [A]}$$

$$S [v.e.] = U [v.e.] \cdot I [v.e.]$$

és így

$$S_{1f} [VA] = S [v.e.] \cdot S_{3f,n} [VA] / 3 \text{ és } S_{3f} [VA] = 3 \cdot S_{1f} [VA] = S [v.e.] \cdot S_{3f,n} [VA]$$

A transzformátor névleges árama, feltételezve, hogy $U_{N,n}=22 \text{ kV}$, $U_{k,n}=0,42 \text{ kV}$ és $S_{tr}=160 \text{ kVA}$:

$$I_{N,n} = (S_{tr}/3) / U_{N,fázis} = S_{tr} / (\sqrt{3} \cdot U_{N,n}) = 160 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3) = 4,2 \text{ A}$$

$$I_{k,n} = (S_{tr}/3) / U_{k,fázis} = S_{tr} / (\sqrt{3} \cdot U_{k,n}) = 160 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 0,42 \cdot 10^3) = 220 \text{ A}$$

A transzformátor névleges terhelési impedanciája egy fiktív impedancia, amely a névleges feszültség és a névleges áram hányadosa:

$$Z_N = (U_{N,n}/\sqrt{3}) / I_{N,n} = U_{N,n}^2 / S_{tr} = (22 \cdot 10^3)^2 / (160 \cdot 10^3) = 3025 \Omega$$

$$Z_k = (U_{k,n}/\sqrt{3}) / I_{k,n} = U_{k,n}^2 / S_{tr} = (0,42 \cdot 10^3)^2 / (160 \cdot 10^3) = 1,1025 \Omega$$

A modellben a viszonyítás alapja a transzformátor valamely névleges értéke, amely 1 v.e. értéknek felel meg.

- $I_N = 1 \text{ v.e.}$ ha $I_N = I_{N,n} = 4,2 \text{ A}$
- $I_k = 1 \text{ v.e.}$ ha $I_k = I_{k,n} = 220 \text{ A}$
- $U_N = 1 \text{ v.e.}$ ha $U_N = U_{N,fázis} = 22 \text{ kV} / \sqrt{3} = 12,7 \text{ kV}$
- $U_k = 1 \text{ v.e.}$ ha $U_k = U_{k,fázis} = 0,42 \text{ kV} / \sqrt{3} = 242,5 \text{ V}$

- $S_{3f} = 1 \text{ v. e.}$ ha $S_{3f} = S_{tr} = 160 \text{ kVA}$
- $a_n = 1 \text{ v. e.}$ mert az áttétel a névleges feszültségek szerinti érték.

3.6 Üresjárás

3.6.1 Terheletlen transzformátor feszültségre kapcsolása

Terheletlen háromfázisú transzformátort szimmetrikus 3f feszültségre kapcsolva először az egyik fázisban, majd ezt követően egyidejűleg a másik két fázisban indul meg az áram. A bekapcsolási i_{tr} áram(lökés) t_0 - t_1 - t_2 időfüggvényének elvi jellegét mutatja a 3-4. ábra.



3-4. ábra: transzformátor bekapcsolási árama

Az $u(t) = d\Psi(t)/dt$ tehát a transzformátorra kapcsolt szinuszos feszültség „ellensúlyozására” $u_{tr}(t)$ szinuszos indukált feszültség, ehhez szinuszos $d\Psi_{tr}(t)$ fluxus szükséges..

A bekapcsolást követően az áramalak a fluxus „képzéséhez” erősen torzult, jelentős a kezdeti áramcsúcs. Ennek oka hármas:

- a vasmagos tekercs nemlineáris (telítődő) mágnesezési jelleggörbéje
- a vas bekapcsolás előtti maradó mágnessége
- az RL áramkör bekapcsolásakor létrejövő egyirányú áram (fluxus)

3.6.2 Üresjárási feszültség, feszültség-áttétel

Ha a megcsapolás középállásban van ($f=0$), és az N oldalon névleges feszültség van (22 kV vonali, 12,7 kV fázisfeszültség), az $a_n = 22/0,42 \text{ kV/kV}$ névleges áttétel szerint a k oldalon $U_k = U_N/a_n = 420 \text{ V}$ lesz a feszültség. Ha a fokozatállító pozícióját változtatjuk, a feszültségek is megváltoznak. Például ha $f=0,025$, a kisfeszültségű oldalon $U_k = (1/a_f) \cdot U_N/a_n = (1/(1-0,025)) \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,42/22 = 430,77 \text{ V}$. Viszonylagos egységekkel számítva: $U_k [\text{v. e.}] = U_N [\text{v. e.}]/(1+f)$. (Mivel $f \ll 1$, $1/(1-f) \cong 1+f$ és $1/(1+f) \cong 1-f$.)

A Dy5 kapcsolás fázisforgató hatása miatt szimmetrikus N oldali feszültségeknél a k oldali feszültségek rendre 150° -ot késnek az azonos értelmű N oldali feszültséghez képest. Például ha $U_{N,a} = 22/\sqrt{3} \angle 0^\circ \text{ kV}$ is a választott referencia:

$$U_{N,ab} = U_{N,a} - U_{N,b} = 22/\sqrt{3} \angle 0^\circ - 22/\sqrt{3} \angle -120^\circ = 22 \angle 30^\circ \text{ kV}$$

és így

$$U_{k,ab} = U_{k,a} - U_{k,b} = 420/\sqrt{3} \angle -150^\circ - 420/\sqrt{3} \angle +90^\circ = 420 \angle -120^\circ \text{ V}$$

3.6.3 P_0 vasvesztesség, R_0 söntellenállás

Üresjárásban, névleges feszültségen a transzformátor háromfázisú vesztesége 300 W, vagy viszonylagos egységekben számolva: $P_0 [\text{v. e.}] = P_0/S_{tr} = 300/(160 \cdot 10^3) = 1,87 \cdot 10^{-3} \text{ v. e.}$ ($= 0,187\%$).

Mivel viszonylagos egységekben $P_0 [\text{v. e.}] = U_N^2/R_0$ és $U_N = 1 \text{ v. e.}$, $P_0 [\text{v. e.}] = 1/R_0 [\text{v. e.}]$. Ebből $R_0 [\text{v. e.}] = 1/P_0 [\text{v. e.}] = 533 \text{ v. e.}$, ami az N oldalra számolva $R_0 = R_0 [\text{v. e.}] \cdot Z_N = 533 \cdot 3025 = 1613 \cdot 10^3 \Omega$. R_0 alapján számítható a vasvesztességgel arányos áram:

$$I_{vas} [\text{v. e.}] = 1/R_0 [\text{v. e.}] = P_0 [\text{v. e.}] = 0,00187 \text{ v. e.}$$

és

$$I_{vas} = I_{vas} [v.e.] \cdot I_{N,n} = 0,00187 \cdot 4,2 A = 7,87 mA$$

A névlegestől eltérő megcsapolás esetén viszonylagos egységben $P_0 = U_m^2 / R_0 = P_0 \cdot (U_N / (1 + f))^2$.

3.6.4 I_m mágnesező áram, X_m söntreaktancia, Q_0 üresjárási meddő teljesítmény

Az üresjárási áram 2% (0,02 v.e.). Az I_m mágnesező árammal és az U_N feszültséggel az üresjárási meddőteliesség számítható:

$$Q_0 [v.e.] = U_N [v.e.] \cdot I_m [v.e.]$$

Kihasználva, hogy $S_0^2 = P_0^2 + Q_0^2$, $Q_0 = 19,9 \cdot 10^{-3} [v.e.]$ (1,99%). Mivel $Q_0 [Var] = Q_0 [v.e.] \cdot S_{tr} [VA]$, $Q_0 = 19,9 \cdot 10^{-3} \cdot 160 \cdot 10^3 = 3,168 kVar$.

Feltételezve, hogy $U_N=1$, a mágnesező áram $I_m [v.e.] = Q_0 [v.e.] = 19,9 \cdot 10^{-3} v.e.$, vagy $I_m = I_m [v.e.] \cdot I_{N,n} = 19,9 \cdot 10^{-3} \cdot 4,2 = 83,6 mA$.

Viszonylagos egységben $X_m [v.e.] = U_N^2 [v.e.] / Q_0 [v.e.] = 1 / Q_0 [v.e.] = 50,23 v.e.$. Az impedanciákat az N oldalra számítva $X_m [v.e.] = 152 \cdot 10^3 \Omega$ adódik. A transzformátor áttételét ismerve az értékek átszámíthatók a k oldalra: $X_m = 152 \cdot 10^3 \Omega / a_n^2 = 152 \cdot 10^3 / 2743,7 = 55,4 \Omega$.

A névlegestől eltérő feszültség vagy megcsapolás esetén viszonylagos egységben közelítéssel $Q_0 = U_m^2 / X_m = Q_0 \cdot (U_N / (1 + f))^2$.

3-1. táblázat: üresjárási paraméterek összefoglalása

P_0		Q_0		R_0 (N oldal)		X_m (N oldal)	
0,3 kW	$1,87 \cdot 10^{-3} v.e.$	3,186 kVar	$19,9 \cdot 10^{-3} v.e.$	1613 kΩ	533 v.e.	152 kΩ	53,6 v.e.

Továbbá $S_0 [v.e.] = I_0 [v.e.]$, $I_{vas} [v.e.] = P_0 [v.e.]$, $I_m [v.e.] = Q_0 [v.e.]$, $R_0 [v.e.] = 1 / P_0 [v.e.]$ és $X_m [v.e.] = 1 / Q_0 [v.e.]$.

A számított értékek alapján (és általánosságban is helytállóan): $X_m \approx 0,1 \cdot R_0$ és $I_m \approx 10 \cdot I_{vas}$ így $Q_0 \approx 10 \cdot P_0$. Megállapíthatjuk, hogy R_0 és X_m a transzformátor névleges terhelési impedanciájához képest jelentősen nagy értékek, az I_m és I_{vas} a névleges áramhoz képest kis értékek, ezért ezek a „söntáramok” egy terhelt transzformátornál az I_N és I_k áramok számításánál elhagyhatók.

A P_0 és a Q_0 teljesítmények a névleges S_{tr} teljesítményhez képest kis értékek, ezek a teljesítménymérlegben „utólag” is figyelembe vehetők, az energiamérlegben az üresjárási veszteségi (P_0 szerinti időarányos) energiát figyelembe kell venni.

3.7 Rövidzárás az N oldalon

3.7.1 Rövidzárási feszültség

A transzformátor rövidzárási mérésénél az N oldal kivezetéseit rövidre zárjuk és úgy állítjuk be a k oldali U_k feszültséget, hogy a kivezetéseken a névleges áramerősséget mérhessük. Az $U_{k,rz}$ rövidzárási feszültség százalékban megadott értéke a „drop” (ε_{rz}) amely az $U_{k,n}$ (100%) névleges feszültséghez viszonyítva értendő. Példánkban $\varepsilon_z = 100 \cdot U_{N,sc} / U_{N,n} = 4\%$, ami $U_{k,rz} = 0,04 \cdot U_k = 16,8 V$ vonali feszültség értéket jelent. Ha a mérést az N oldali feszültséggel és a k oldal rövidre zárásával végezzük, eredményként azonos drop értéket kapunk.

A fokozatállító nem középállásban van, a nagy- és kisfeszültségű oldal áramai egyidejűleg nem lehetnek egyenlők az adott oldal névleges áramával. Ha a rövidzárast a megcsapolásos (változó menetszámú) N oldalon képezzük és a nem változó menetszámú k oldalról táplálva névleges áramot állítunk be, akkor a különböző fokozatokhoz közel állandó értéket kapunk ($\varepsilon_Z \cong 0,04$).

3.7.2 Áram-átvitel

A transzformátor áram-átvittele a kivezetések I_k , illetve I_N áramára vonatkozik. Az $a_n = 22/0,42 = 52,38$ értékkel (a kisebb feszültségű oldalon nagyobb az áram) az I_o „söntáram” elhanyagolásával, az $\alpha_k = -150^\circ$ fázisforgató hatást figyelembe véve (pozitív sorrendben, illetve szimmetrikus üzemiállapot vagy 3f rövidzárlat esetén):

- ha $f=0$: $I_k = a_n \cdot I_N \cdot e^{j\alpha_k}$ és $I_N = I_k \cdot e^{-j\alpha_k}/a_n$
- ha $f \neq 0$: $I_k = (1+f) \cdot a_n \cdot I_N \cdot e^{j\alpha_k}$ és $I_N = I_k \cdot e^{-j\alpha_k}/((1+f) \cdot a_n) \cong I_k \cdot e^{-j\alpha_k} \cdot (1-f)/a_n$

Például rövidzárlati mérésnél az $f=-0,05$ megcsapoláshoz a k oldali $U_{k1} = 0,04 \angle 0^\circ = U_{k,a}$ v. e. feszültség referenciairányához pozitív sorrendre $I_{k,a} = I_{k1} = 1,0 \angle -71,8^\circ$ és $I_{N,a} = I_{N1} = 1,053 \angle +78,2^\circ$ adódik.

3.7.3 Z_{tr} rövidzárlati impedancia

A transzformátor rövidzárlati mérése alapján meghatározható a transzformátor Z_{tr} pozitív sorrendű, ún. rövidzárlati impedanciája: $Z_{k,tr} = U_{k,0}/I_{k,n} = 0,04/1 = 0,04$ v. e.. Ezt a k oldali Z_k értékkel szorozva $Z_{k,tr} = Z_{k,tr} [v. e.] \cdot Z_k = 0,0441 \Omega$ a k oldalról mérhető rövidzárlati impedancia, ami egy 0,4 kV-on átlagos pozitív sorrendű vezeték impedanciát véve, impedancia szempontjából körülbelül 100 m hosszú vezetéknek felel meg. Ha $f=0$, $Z_{N,tr} = Z_{k,tr} = 0,04$ v. e. és $Z_{N,tr} = 121 \Omega$, ami egy 20 kV-on átlagos impedanciát véve, körülbelül 240 km hosszú vezetéknek felel meg.

Ha $f \neq 0$:

$$Z_{k,tr} \approx \text{állandó}$$

$$Z_{N,tr} = (1+f)^2 \cdot Z_{N,tr}|_{f=0}$$

Szélső esetekben ($f=\pm 5\%$)

$$Z_{N,tr}|_{f=+0,05} = 0,044 \text{ v. e.} = 133,4 \Omega$$

$$Z_{N,tr}|_{f=-0,05} = 0,036 \text{ v. e.} = 109,2 \Omega$$

3.7.4 P_{rz} és Q_{rz} rövidzárlati veszteség, R_{tr} soros ellenállás, X_{tr} szórási reaktancia

A rövidzárlati méréskor mindkét oldalon névleges áramerősséghez a 3 fázisú veszteség 2000 W, ez viszonylagos egységekben $P_{rz} [v. e.] = P_{rz} [W]/S_{tr} [VA] = 2000/(160 \cdot 10^3) = 0,0125$ v. e.. A modell alapján viszonylagos egységben $P_{rz} [v. e.] = R_{tr} [v. e.] \cdot (I_{k,n} [v. e.])^2$ és mivel $I_{k,n} [v. e.] = 1$, $P_{rz} [v. e.] = R_{tr}$ v. e. = 0,0125, és így $\varepsilon_R [v. e.] = R_{tr} [v. e.] = P_{rz}/S_{tr} = 0,0125$ v. e...

A névleges terhelési impedanciákkal szorozva $R_{k,tr} = 0,01377 \Omega$ és $R_{N,tr} = 37,79 \Omega$. A transzformátor X_{tr} szórási reaktanciájával a $Z_{tr} = R_{tr} + j \cdot X_{tr}$ transzformátor impedancia értelmezhető, amelyhez az $\varepsilon_Z = \varepsilon_R + j \cdot \varepsilon_X$ értelmű rövidzárlati feszültséget rendelhetjük. Az $\varepsilon_Z^2 = \varepsilon_R^2 + \varepsilon_X^2$ összefüggésből ε_Z és ε_R ismeretében ε_X meghatározható. Példánkban $\varepsilon_Z = 0,04$, $\varepsilon_R = 0,0125$ és $\varepsilon_X = 0,038$. Ez alapján $X_{tr} [v. e.] = \varepsilon_X [v. e.] = 0,038$ és így $\varepsilon_X [v. e.] = Q_{rz} [v. e.] = Q_{rz}/S_{tr}$ és $X_{k,tr} = 0,0419 \Omega$, $X_{N,tr} = 114,95 \Omega$. A Z_{tr} impedancia fázisszöge $71,8^\circ$, vagy másképp $Z_{tr} = R_{tr} + j \cdot X_{tr} = 0,0125 + j \cdot 0,038 = 0,04 \angle 71,8^\circ$ v. e..

Az X_{tr} szórási reaktanciához $Q_{rz} [v.e.] = X_{N,tr} [v.e.] \cdot I_{k,n}^2 [v.e.] = 0,038$ névleges meddőteljesítmény veszteség rendelhető, és ez alapján $\varepsilon_X [v.e.] = Q_{rz} [v.e.] = Q_{rz}/S_{tr}$. A névleges teljesítménnyel szorozva $Q_{rz} = Q_{rz} [v.e.] \cdot S_{tr} = 0,038 \cdot 160 \cdot 10^3 = 6,08 \text{ kVar}$.

A transzformátoron fellépő veszteségekre írható:

$$P_{veszt} [v.e.] = \varepsilon_R [v.e.] \cdot I_{k,n}^2 [v.e.] \text{ és } P_{veszt,3f} [W] = P_{rz} [W] \cdot (I_k/I_{k,n})^2$$

$$Q_{veszt} [v.e.] = \varepsilon_X [v.e.] \cdot I_{k,n}^2 [v.e.] \text{ és } Q_{veszt,3f} [Var] = Q_{rz} [Var] \cdot (I_k/I_{k,n})^2$$

3-2. táblázat: rövidzárási paraméterek összefoglalása

P_{rz}		Q_{rz}		R_{tr} (N oldal)		X_{tr} (N oldal)	
2 kW	0,0125 v.e.	6,08 kVar	0,038 v.e.	37,79 Ω	0,0125 v.e.	114,95 Ω	0,038 v.e.

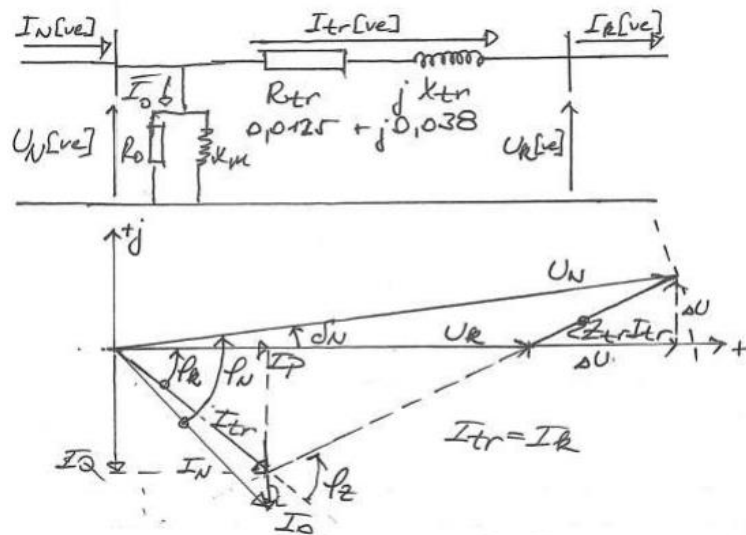
Illetve $P_{rz} [v.e.] = R_{tr} [v.e.] = \varepsilon_R [v.e.] = P_{rz} [W]/S_{tr} [VA]$, $Q_{rz} [v.e.] = X_{tr} [v.e.] = \varepsilon_X [v.e.] = Q_{rz} [Var]/S_{tr} [VA]$ és $Z_{tr} = R_{tr} + j \cdot X_{tr} = 0,0125 + j \cdot 0,038 = 0,04 \angle 71,8^\circ \text{ v.e.}$

3.8 A transzformátor szimmetrikus 3f terhelésű üzeme

A transzformátor szimmetrikus 3f terhelésű üzemállapotának vizsgálatához most:

- az N oldali megcsapolást nem vesszük figyelembe: $f=0$
- a Dy5 fázisforgató hatást nem vesszük figyelembe, mert szimmetrikus üzemállapotban ez a mennyiségi viszonyokat nem befolyásolja, legyen tehát $(\alpha_k=0^\circ)$
- a transzformátoron fellépő feszültségesést a ún. hosszirányú feszültségesés szerint számítjuk

A számításokat a transzformátor névleges adataira vonatkozó viszonylagos egységekben végezzük. A vonatkozó pozitív sorrendű modellt és a (szándékosan nem arányos, de minőségileg helyes) fazorábrát a 3-5. ábra mutatja.



3-5. ábra: a transzformátor pozitív sorrendű modellje

3.8.1 Névleges terhelési üzemállapot

Legyen a transzformátor k oldalán a névleges 420 V (vonali) a tényleges feszültség, és legyen a terhelő áram is névleges (220 A/fázis). Így a k oldali kivezetésen leadott látszólagos teljesítmény (160 kVA) is egyenlő 1 v.e.-gel. Legyen a k oldalon a terhelés teljesítménytényezője $\cos\varphi_k = 0,96$ ($\varphi = 16,26^\circ$), amely szeirnt $I_{tr} = 1 \angle -16,26^\circ$. A hatásos és meddő teljesítmények rendre $P_k = S_k \cdot \cos\varphi_k = 0,96$ v.e. és $Q_k = S_k \cdot \sin\varphi_k = 0,28$ v.e..

A feszültségesés számításához a soros impedancián átfolyó I_{tr} áramot bontsuk két komponensre. Az első az U_k feszültséggel azonos fázishelyzetű és így a P_k -val arányos, azaz $I_P = P_k/U_k = 0,96$ v.e.. A második komponens 90° -kal késik, és Q_k -val arányos: $I_Q = Q_k/U_k = 0,028$ v.e.. Ezeket az értékeket használva I_{tr} átírható a következő formára: $I_{tr} = I_P - j \cdot I_Q = 0,96 - j \cdot 0,028$ v.e.. A transzformátor impedanciája $Z_{tr} = R_{tr} + j \cdot X_{tr} = 0,0125 + j \cdot 0,038 = 0,04 \angle 71,8^\circ$.

A fázorábra alapján a transzformátoron fellépő feszültségesés:

$$\Delta U_{tr} \cong R_{tr} \cdot I_P + X_{tr} \cdot I_Q = 0,0125 \cdot 0,96 + 0,038 \cdot 0,28 = 0,0226 \text{ v.e.}$$

Az N oldal feszültsége:

$$|U_N| = |U_k| + \Delta U_{tr} \cong U_k \angle 0^\circ + \Delta U_u = 1 + 0,0226 = 1,0226 \text{ v.e.}$$

A terhelő áram által okozott soros veszteség:

$$P_{veszt} = R_{tr} \cdot I_{tr}^2 = \varepsilon_R \cdot I_{tr}^2 = P_{rz} \cdot I_{tr}^2$$

$$Q_{veszt} = X_{tr} \cdot I_{tr}^2 = \varepsilon_X \cdot I_{tr}^2 = Q_{rz} \cdot I_{tr}^2$$

amely $P_{veszt} = P_{rz} = 0,0125$ v.e. és $Q_{veszt} = Q_{rz} = 0,038$ v.e.. veszteséget jelent.

Az üresjárási (vas)veszteségek és a mágnesező teljesítmény:

$$P_{0,terhelt} = P_0 \cdot U_N^2 = 0,00187 \cdot 1,0226^2 = 0,001961 \text{ v.e.}$$

$$Q_{0,terhelt} = Q_0 \cdot U_N^2 = 0,0199 \cdot 1,0226^2 = 0,0208 \text{ v.e.}$$

Az N oldali teljesítmény a soros veszteség és az üresjárási veszteség alapján a k oldali teljesítményből meghatározható:

$$P_N = P_k + P_{veszt} + P_{0,terhelt} = 0,96 + 0,0125 + 0,00195 = 0,9744 \text{ v.e.}$$

$$Q_N = Q_k + Q_{veszt} + Q_{0,terhelt} = 0,28 + 0,038 + 0,0208 = 0,3388 \text{ v.e.}$$

Ezekkel és a névleges teljesítménnyel összegzésként $P_k = 153,6 \text{ kW}$, $P_{veszt} = 2 \text{ kW}$, $P_{0,terhelt} = 0,314 \text{ kW}$, $P_N = 155,91 \text{ kW}$, $Q_k = 44,8 \text{ kVar}$, $Q_{veszt} = 6,08 \text{ kVar}$, $Q_{0,terhelt} = 3,33 \text{ kVar}$, $Q_N = 54,21 \text{ kVar}$.

A veszteség százalékos értéke $V\% = 100 \cdot (P_0 + P_{0,terhelt})/P_k = 100 \cdot (0,3 + 2)/153,6 = 1,5\%$.

Kihasználva, hogy $S_N^2 = P_N^2 + Q_N^2$, $S_N = 1,0317$ v.e.. Az N oldali teljesítménytényező: $\cos\varphi_N = P_N/S_N = 0,9445$, azaz a teljesítménytényező rosszabb az N oldalon a k oldalhoz képest (0,96).

Az N oldali áram $I_N = S_N/U_N = 1,0317/1,0226 = 1,009$ v.e.. A két feszültségházor közötti szögelfordulás $\sin\delta_N = \Delta U_\delta/U_N = 0,03298/1,0226 = 0,032283$, ahol $\Delta U_\delta = -R_{tr} \cdot I_Q + X_{tr} \cdot I_P = -0,0125 \cdot 0,28 + 0,038 \cdot 0,96 = 0,03298$ v.e..

3.8.2 Névlegestől eltérő terhelésű üzem

A transzformátor tényleges villamos igénybevételét a szigetelésekre vonatkozóan a feszültség, a melegedésre (és zárlat esetén a dinamikai igénybevételre) vonatkozóan az áramerősség jelenti.

A transzformátoron fellépő ΔU_{tr} feszültségesést viszonylagos egységben megadó $\Delta U_{tr} \cong R_{tr} \cdot I_P + X_{tr} \cdot I_Q$ kifejezés átrendezhető, kihasználva, hogy viszonylagos egységekben $R_{tr} = \varepsilon_R$, $X_{tr} = \varepsilon_X$, és így $\tan \varphi_k = Q_k/P_k$, és $I_{tr} = I_k$, $I_P = I_k \cdot \cos \varphi_k$, és $\Delta U_{tr} \cong (\varepsilon_R + \tan \varphi_k \cdot \varepsilon_X) \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k$ amely szemléletesen mutatja a feszültségesés paraméter- és terhelésfüggését. Hálózattervezésnél (méretezésnél) a transzformátornál max. 3% dropot szokás figyelembe venni (7,27 V/fázis).

A hatásos és meddő soros veszteségek a transzformátor terhelésének függvényében változnak, $P_{veszt} = P_{rz} \cdot I_k^2$ és $Q_{veszt} = Q_{rz} \cdot I_k^2$ viszonylagos egységekben kifejezve. Például ha a terhelőáram a névleges szint 50%-a, a hatásos és meddő veszteségek nagysága rendre $0,78 \cdot 10^{-3}$ v.e. és $2,37 \cdot 10^{-3}$ v.e.. Ha a terhelőáram a névleges 120%-a, a veszteségek $18 \cdot 10^{-3}$ v.e. és $54,7 \cdot 10^{-3}$ v.e..

A transzformátor mágnesezési vasvesztése és mágnesezési meddőteljesítményfelvétele az U_N feszültséggel és az f megcsapolással jó közelítéssel:

$$P_{0,terhelt} = P_0 \cdot (U_N/(1+f))^2$$

$$Q_{0,terhelt} = Q_0 \cdot (U_N/(1+f))^2$$

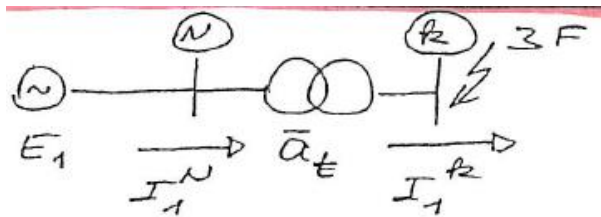
Az N oldalon alkalmazott $f < 0$ megcsapolás növeli a k oldali kivezetésen mérhető U_k feszültséget, a transzformátorkörzet teljes 0,4 kV-os hálózatának feszültségprofilját kb. $(1+f)$ -szeres mértékben megemeli, az $f > 0$ kb. $(1-f)$ -szeres k oldali feszültségcsökkenést eredményez. A 120/22 kV-os nagyfeszültségű alállomástól villamosan távoli 20 kV-os csatlakozású 22/0,42 kV-os transzformátornál az $f < 0$, a villamosan közeli transzformátornál az $f > 0$ megcsapolás jöhet szóba.

4 Transzformátor kapocszárlata

A transzformátorok kapocszárlatát különböző zárlatfajták használatával, és különböző kapcsolási csoportú transzformátorokon mutatjuk be. A fejezet célja bemutatni, hogy az egyes zárlatok alatt milyen áramelrendeződés alakul ki a transzformátor tekercseiben. A további számításokhoz feltételezzük, hogy a transzformátor névleges áttétele $a_t = 1$, azaz viszonylagos egységekben végezhetjük a számítást. Ezt kihasználva a transzformátor komplex forgatását $\bar{a}_t = a_t \cdot e^{j\varphi}$ fejezi ki.

4.1 Háromfázisú zárlat

Háromfázisú rövidzárlat esetén a hiba szimmetrikus jellege miatt elegendő a pozitív sorrendű helyettesítő képet használnunk a hálózat vizsgálatához



4-1. ábra: háromfázisú zárlat modellje

A k oldal fázisáramai:

$$I_a^k = I_1^k, I_b^k = a^2 \cdot I_1^k, I_c^k = a \cdot I_1^k$$

ahol a a komplex forgató operátor, $a = e^{j120^\circ}$.

Az N oldal áramait az alábbi képlet szerint számolhatjuk:

$$I_1^N = I_1^k \cdot \frac{1}{a_t} \cdot e^{+j\varphi}$$

Kihasználva, hogy $a_t = 1$, az egyenlet egyszerűsíthető a következő formára:

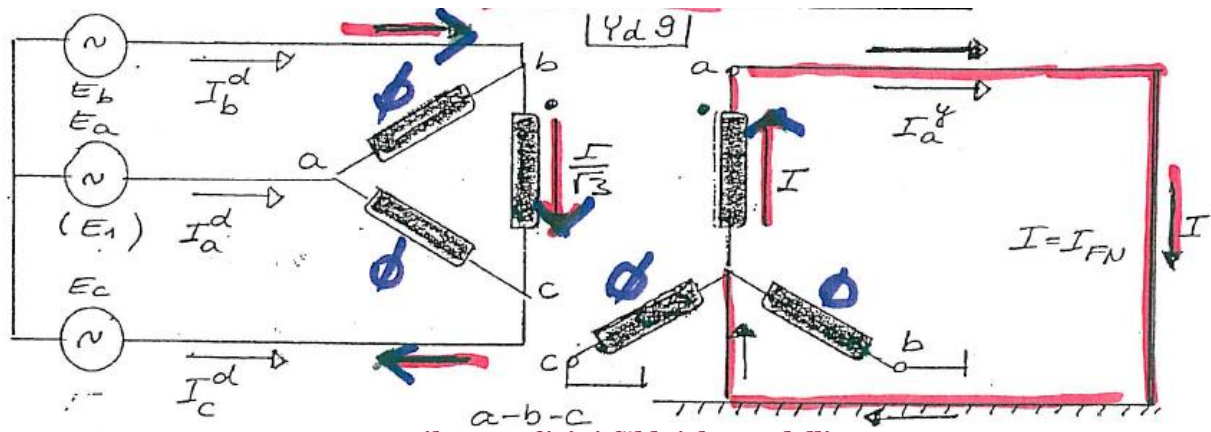
$$I_1^N = I_1^k \cdot e^{+j\varphi}$$

Így az N oldalra az alábbi fázisáramok adódnak:

$$I_a^N = I_1^N, I_b^N = a^2 \cdot I_1^N, I_c^N = a \cdot I_1^N$$

4.2 Egyfázisú földzárlat

Az egyfázisú földzárlat hatásainak bemutatásához Ynd9 kapcsolású transzformátort használunk, (N oldal csillagba, k oldal deltába kapcsolva, 9 órás forgatás). A zárlatot a transzformátor N oldalán képezzük, a kialakuló áramokat a következő ábra mutatja.



4-2. ábra: egyfázisú földzárát modellje

Az N (Y) oldal fázisáramai:

$$I_a^Y = I, I_b^Y = 0, I_c^Y = 0$$

A k oldal (d) fázisáramait a transzformátor gerjesztési egyenleteit felhasználva határozhatjuk meg (a fázisáramokat át kell alakítanunk vonali áramokká!):

$$I_a^d = 0, I_b^d = \frac{I}{\sqrt{3}}, I_c^d = -I_b^d$$

A következő lépésben az áramokat sorrendi összetevőkre bontjuk, elsőként az N oldalra (A transzformációkat nem részletezzük.)

$$I_0^Y = \frac{I}{3}, I_1^Y = \frac{I}{3}, I_2^Y = \frac{I}{3}$$

A k oldali áramok számításához az alábbi egyenleteket kell használnunk:

$$I_1^N = I_1^k \cdot \frac{1}{a_t} \cdot e^{+j\varphi}$$

$$I_2^N = I_2^k \cdot \frac{1}{a_t} \cdot e^{-j\varphi}$$

Figyeljünk arra, hogy a pozitív és negatív sorrendű áramokat ellentétes irányban forgatja az operátor. Mivel a k oldali tekercs deltába van kapcsolva, a zérus sorrendű komponens azon az oldalon nem jelenik meg.

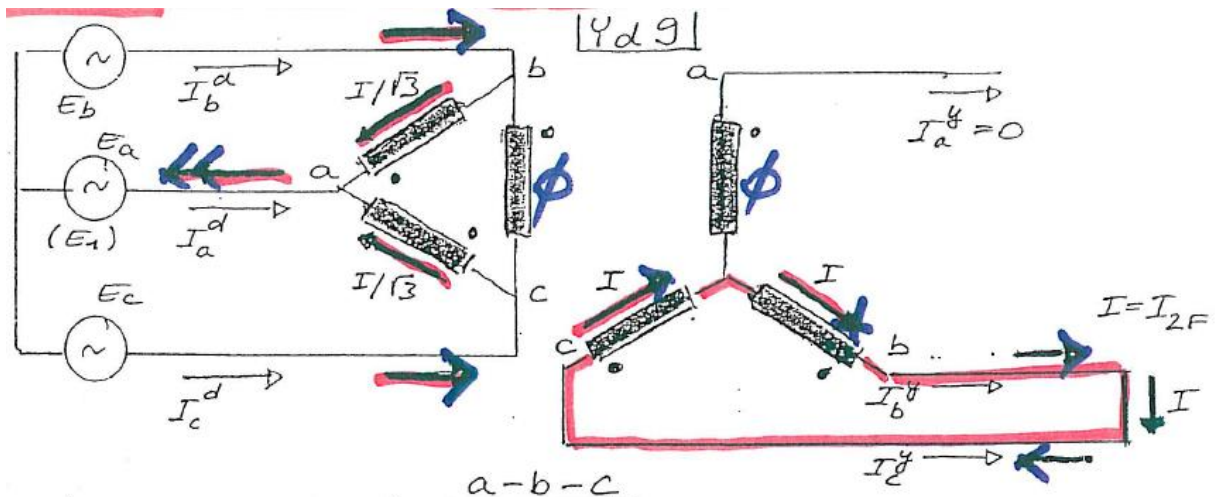
$$I_0^d = 0, I_1^d = I_1^Y \cdot e^{-j270^\circ} = j \cdot \frac{I}{3}, I_2^d = I_2^Y \cdot e^{+j270^\circ} = -j \cdot \frac{I}{3}$$

4.3 Két fázisú zárlat

Kétfázisú zárlatok esetén két különböző kapcsolási csoportú transzformátor esetét is tárgyaljuk.

4.3.1 Yd9

Az első esetben Yd9 transzformátort vizsgálunk. A zárlatot az N oldalon képezzük, a kialakuló áramokat az ábra mutatja.



4-3. ábra: kétfázisú zárlat modellje, Yd9 kapcsolási csoport

Az N (Y) oldal fázisáramai:

$$I_a^y = 0, I_b^y = I, I_c^y = -I$$

A k oldal (d) fázisáramait a transzformátor gerjesztési egyenleteit felhasználva határozhatjuk meg:

$$I_a^d = -2 \cdot \frac{I}{\sqrt{3}}, I_b^d = \frac{I}{\sqrt{3}}, I_c^d = I_b^d$$

Az N oldali sorrendi áramkomponensek:

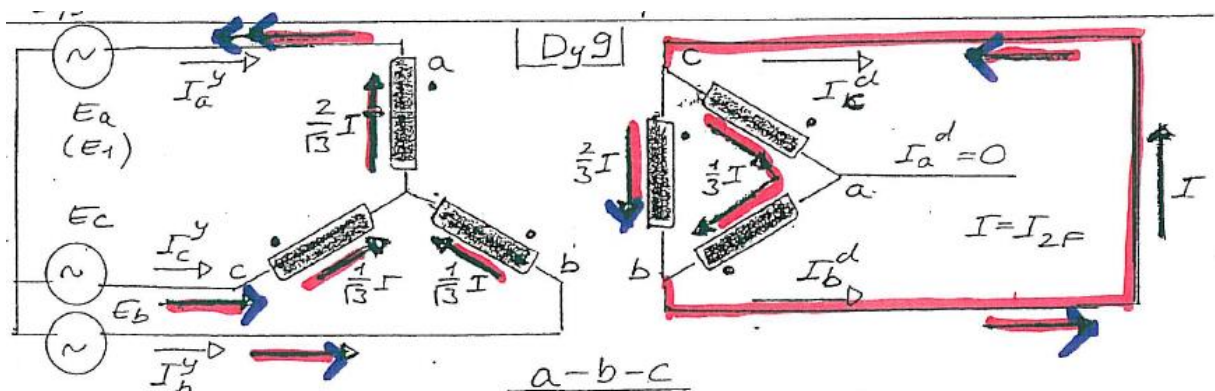
$$I_0^y = 0, I_1^y = j \cdot \frac{I}{\sqrt{3}}, I_2^y = -I_1^y$$

A komplex forgatás elvégzésével adódnak a k oldali áramok:

$$I_0^d = 0, I_1^d = I_1^y \cdot e^{-j270^\circ} = -\frac{I}{\sqrt{3}}, I_2^d = I_2^y \cdot e^{+j270^\circ} = -\frac{I}{\sqrt{3}}$$

4.3.2 Dy9

A második esetben Dyn9 kapcsolási csoportú transzformátort vizsgálunk. A zárlatot ebben az esetben is az N oldalon képezzük, a kialakuló áramokat az ábra mutatja.



4-4. ábra: kétfázisú zárlat modellje, Dy9 kapcsolási csoport

A k (d) oldal fázisáramai:

$$I_a^d = 0, I_b^d = I, I_c^d = -I$$

Az N oldal (Y) fázisáramait a transzformátor gerjesztési egyenleteit felhasználva határozhatjuk meg:

$$I_a^Y = -2 \cdot \frac{I}{\sqrt{3}}, I_b^Y = \frac{I}{\sqrt{3}}, I_c^Y = I_b^Y$$

Az N oldali sorrendi áramkomponensek:

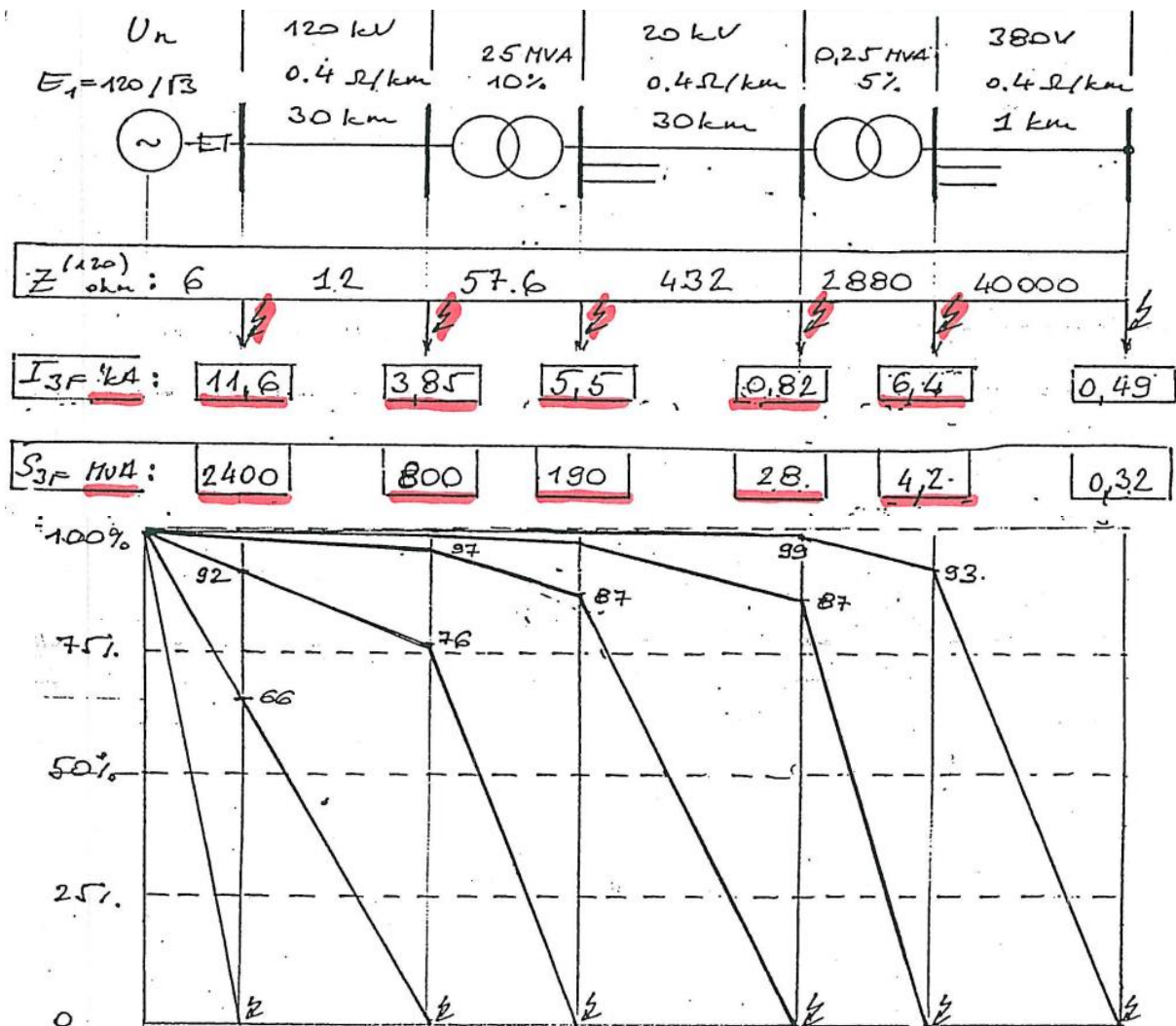
$$I_0^d = 0, I_1^d = j \cdot \frac{I}{\sqrt{3}}, I_2^d = -I_1^d$$

A komplex forgatás elvégzésével adódnak a k oldali áramok:

$$I_0^Y = 0, I_1^Y = I_1^d \cdot e^{-j270^\circ} = -\frac{I}{\sqrt{3}}, I_2^Y = I_2^d \cdot e^{+j270^\circ} = -\frac{I}{\sqrt{3}}$$

4.4 Áramköri elemek rövidzárási teljesítménye

Az egyes feszültség szintek jó összehasonlítására ad lehetőséget a háromfázisú zárlati áramok és teljesítmények, illetve a maradó feszültségek vizsgálata. A 4-5. ábra hat különböző esetre mutatja meg a tipikus értékeket, az az egyes esetek a vizsgált ponton bekövetkező háromfázisú zárlat hatását mutatja. Az egyes hálózati elemek paramétereit valós hálózatok alapján vettük fel, egyes esetekben pedig közelítéseket alkalmaztunk.



4-5. ábra: háromfázisú rövidzárlat hatása a hálózat különböző pontjain

Egy másik hasznos (de napjainkban ritkábban használt) definíció a vizsgált hálózati elem saját zárlati teljesítménye, mely adott elem soros zárlati áram (és teljesítmény) korlátozó képességét mutatja meg. A saját zárlati teljesítmény S_A impedanciájú hálózati elemre az alábbiak szerint számolható:

$$S_{rz,3f}^{saját} = U_n^2 / |Z_A|$$

mivel $I_{rz,3f} = E_1 / |Z_A|$ és $S_{rz,3f}^{saját} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{rz,3f}$.

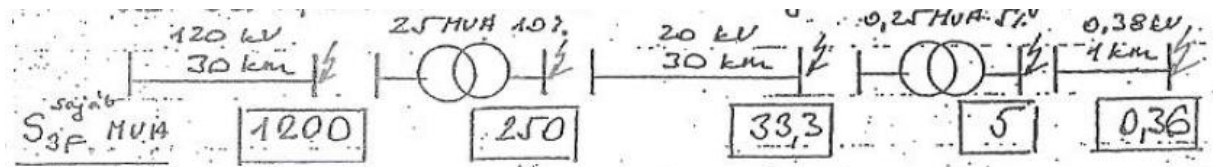
Egymással sorba kötött Z_A és Z_B impedanciák esetén, feltételezve, hogy az impedanciák R/X aránya közel megegyező:

$$S_{rz,3f}^{saját} = \frac{U_n^2}{|Z_A + Z_B|} = \frac{S_{rz,3f}^{saját,A} \cdot S_{rz,3f}^{saját,B}}{S_{rz,3f}^{saját,A} + S_{rz,3f}^{saját,B}}$$

Párhuzamosan kapcsolt Z_A és Z_B impedanciák esetén, feltételezve, hogy az impedanciák R/X aránya közel megegyező:

$$S_{rz,3f}^{saját} = S_{rz,3f}^{saját,A} + S_{rz,3f}^{saját,B}$$

A fenti egyenleteket a 4-5. ábra szerinti hálózatra értelmezve számítható az egyes hálózati elemek saját zárlati teljesítménye. (4-6. ábra)



4-6. ábra: 120 kV-20 kV-0,4 kV-os átviteli út saját zárlati teljesítményei

5 Csillagpontföldelés

5.1 Csillagpontföldelési módok

Az egyes csillagpontföldelési megoldások összehasonlítását az 5-1. táblázat ismerteti. Az előnyöket **félkövér**, a hátrányokat *dőlt* betűvel jelöltük.

5-1. táblázat: csillagpontföldelési módok

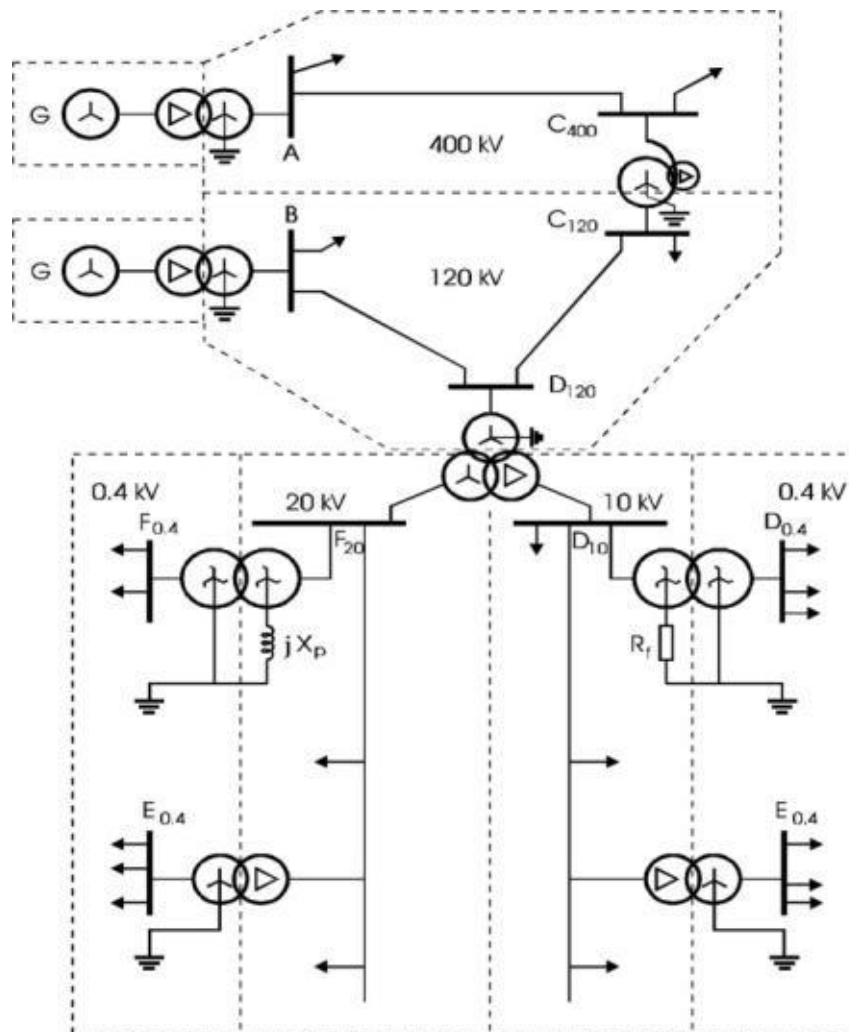
Szempont	Nem közvetlenül földelt	Közvetlenül földelt
Ép fázisok feszültsége állandósult állapot tranzienst	<i>Nagy(obb)</i> $\approx U_n$ 2-5-ször U_f	Kicsi $< 0.8 \cdot U_n$
Földzárlati áram	Kis földzárlati áram: szigetelt csillagpont kapacitív áram: < 10 A kompenzált csillagpont maradékáram: $< 5-10$ A ellenálláson keresztül földelt csillagpont: 100-150 A	<i>Magas földzárlati áram</i>
Védelmi berendezések érzékelése	U_o alapján a földzárlatok érzékelhetők <i>Nehéz a hibahely szelektív érzékelése</i>	Szelektív érzékelés

Az alaphálózati erőművek generátor egységei az általános gyakorlat szerint földetetlen csillagkapcsolásúak és a blokktranszformátor delta tekercseléséhez csatlakoznak. Ezzel a generátor oldali földpotenciál szempontjából függetlenné válik a nagyfeszültségű alaphálózat (120 és 400 kV) földpotenciál viszonyaitól. A NAF/KÖF transzformátorok középfeszültségű oldalon delta vagy szigetelt csillagkapcsolású tekercsei földpotenciál szempontjából függetlenítik a középfeszültségű hálózatot és lehetővé teszik ennek az alaphálózattól eltérő csillagpont kezelését. A nemzetközi gyakorlat a 110 kV-ig terjedő középfeszültségű hálózat csillagpontföldelésében nem egységes. Ezen a feszültségszinten minden lehetséges módszerrel találkozhatunk:

- szigetelt csillagpont
- hangolt induktivitással földelt csillagpont (Petersen tekercs)
- impedancián (ellenálláson) keresztül földelt csillagpont
- hatásosan földelt csillagpont.

A 0,4 kV-os kisfeszültségű hálózat csillagpontja minden esetben közvetlenül földelt, sőt a csillagpontból induló nullavezető több pontban is földelt. A földelés és a nullázás célja definitív potenciálviszony biztosítása, ami érintésvédelem szempontjából is fontos.

Az 5-1. ábra összefoglalja a különböző feszültségszinteken és hálózati szerepkörökben alkalmazott földelési módokat.



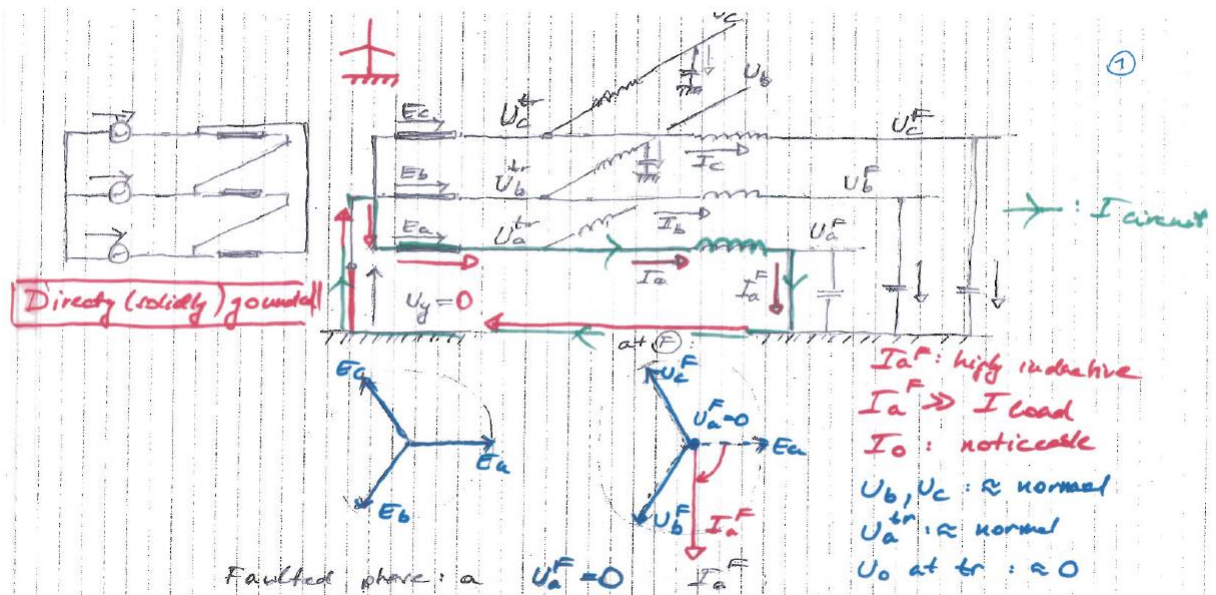
5-1. ábra: földelési módok feszültség szint és topológia szerint

5.2 Egyfázisú földzárlat hatása különböző csillagpontföldelésű hálózatokon

A következőkben összehasonlítjuk a csillagpontföldelés módjait, az egyfázisú földzárlat egyszerű példáján keresztül. Az egyszerűbb leképezés érdekében minden esetben az a fázist tekintjük zárlatosnak, a transzformátor csillag kapcsolású oldalán. A transzformátor delta kapcsolású oldalához csatlakozó táphálózat a hiba során is szimmetrikus üzemet mutat, így azt szimmetrikus elektromotoros erővel képezzük le.

5.2.1 Közvetlenül földelt hálózat

A közvetlenül földelt hálózatok esetét bemutató helyettesítő képet az 5-2. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy a zárlati áram döntő része átfolyik a transzformátor csillagpontján, így a csillagponti feszültség (U_y) értéke jó közelítéssel zérus. Ezen felül megállapítható, hogy a zérus sorrendű áram (I_o) nagysága nem lesz elhanyagolható. Ahogy a fázorábra mutatja, az ép fázisok feszültsége a hiba fennállása alatt névleges értéken marad, így az ezekhez a fázisokhoz kapcsolódó fogyasztók nem érzékelik a hibát.



5-2. ábra: közvetlenül földelt hálózat

A transzformátor gyűjtőcsínén mérhető fázisfeszültségek:

$$U_a^{tr} = U_y + E_a - \Delta U_a^{tr} \cong E_a$$

$$U_b^{tr} = U_y + E_b - \Delta U_b^{tr} \cong E_b$$

$$U_c^{tr} = U_y + E_c - \Delta U_c^{tr} \cong E_c$$

A hibahelyen mérhető fázisfeszültségek:

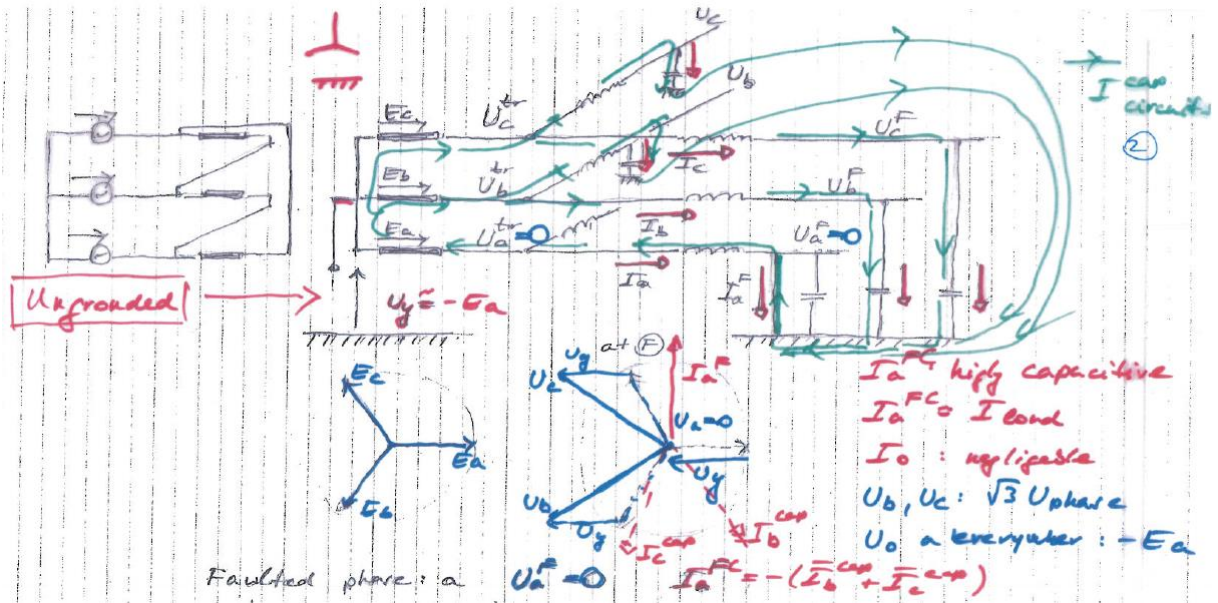
$$U_a^f = U_a^{tr} - \Delta U_a^{vez} = 0$$

$$U_b^f = U_b^{tr} - \Delta U_b^{vez} \cong E_b$$

$$U_c^f = U_c^{tr} - \Delta U_c^{vez} \cong E_c$$

5.2.2 Szigetelt csillagpontú hálózat

A szigetelt csillagponttal kiépített hálózatok viselkedését bemutató helyettesítő képet az 5-3. ábra mutatja. Amennyiben földzárlat következik be egy ilyen hálózaton, az eredetileg szimmetrikus feszültségháromszög $U_y \cong -E_a$ feszültséggel eltolódik, mivel az a fázis földpotenciálra kerül. A vonali feszültségek nem változnak, azonban míg a zárlatos fázis feszültsége zérusra csökken, az ép fázisokban (b és c) a feszültség vonali értékre nő. Az ép fázisok feszültségének hatására kapacitív földzárlati áram indul meg a C_0 földkapacitáson keresztül. A kapacitív áramhurkok a transzformátoron és a hibahelyen keresztül záródnak. A zérus sorrendű áram (I_0) nagysága elhanyagolható lesz.



5-3. ábra: szigetelt csillagpontú hálózat

A transzformátor gyűjtőcsínén mérhető fázisfeszültségek:

$$U_a^{tr} = U_y + E_a - \Delta U_a^{tr} \cong E_a$$

$$|U_b^{tr}| = |U_y + E_b - \Delta U_b^{tr}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

$$|U_c^{tr}| = |U_y + E_c - \Delta U_c^{tr}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

A hibahelyen mérhető fázisfeszültségek:

$$U_a^F = U_a^{tr} - \Delta U_a^{vez} = 0$$

$$|U_b^F| = |U_b^{tr} - \Delta U_b^{vez}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

$$|U_c^F| = |U_c^{tr} - \Delta U_c^{vez}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

5.2.3 Kompenzált (nagy induktivitáson keresztül földelt) hálózat

A kompenzált hálózatok helyettesítő képét az 5-4. ábra mutatja. Amennyiben ilyen hálózaton lép fel földzárlat, a csillagpont és a föld közé beiktatott induktivitás (Petersen tekercs) alkalmazásával a hibahelyen át záródó induktív jellegű áram jön létre. Ha ennek az induktív áramnak a nagysága hasonló a kapacitív földzárlati áram nagyságához, a hibahelyi íven folyó áram elvben nulla lesz, az ív kialszik és a földzárlat önmagától megszűnik.

A kapacitív földzárlati áram nagysága:

$$I_{C,1FN} = -(I_b + I_c)$$

ahol

$$\bar{I}_b = j \cdot \omega_n \cdot C_0 \cdot \bar{U}_b \text{ és } \bar{I}_c = j \cdot \omega_n \cdot C_0 \cdot \bar{U}_c, \text{ így } |\bar{I}_b| = |\bar{I}_c| = \omega_n \cdot C_0 \cdot \sqrt{3} \cdot |E_a| \text{ és } |\bar{I}_b + \bar{I}_c| = \omega_n \cdot C_0 \cdot 3 \cdot |E_a|$$

A Petersen tekercs induktív árama (feltételezve, hogy $X_p \gg X_{tr}$):

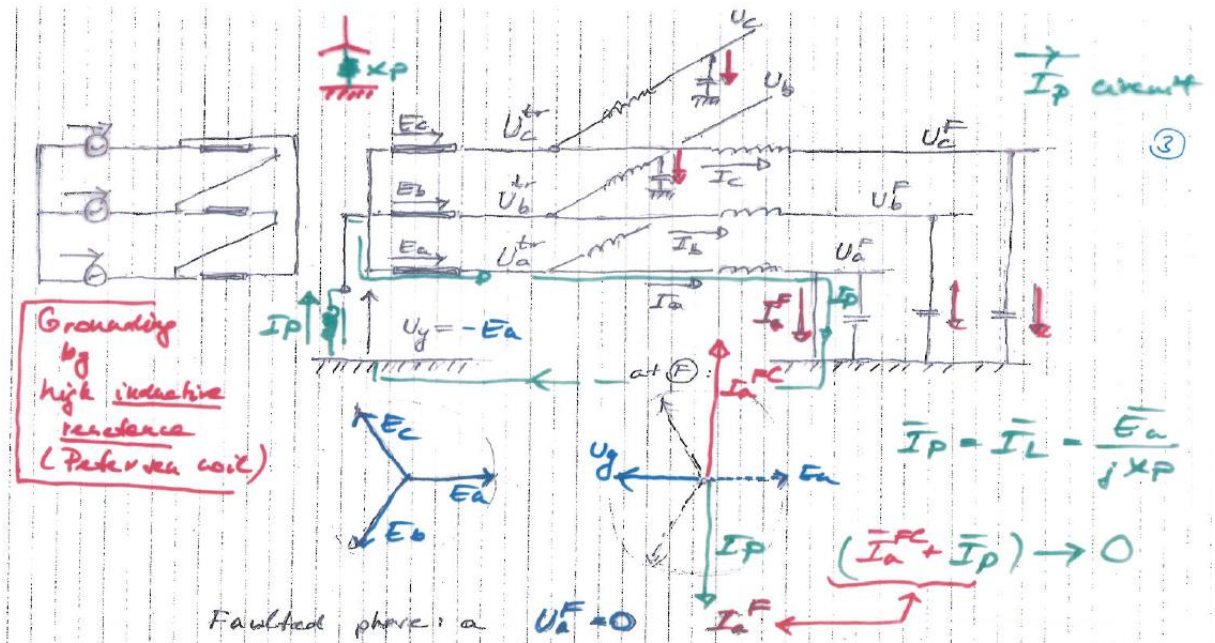
$$I_L = \frac{E_a}{j \cdot \omega_n \cdot L_p}$$

Így a hibahelyi áram:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{C,1FN} + \bar{I}_L \approx 0$$

Ebben az esetben a $\omega_n \cdot C_0 \cdot 3 \approx \frac{1}{\omega_n \cdot L_P}$ feltétel teljesül.

Az ív kialakítását követően a feszültség a hibahelyen csak lassan tér vissza, a $3X_P$ és X_{C0} reaktanciák által alkotott 50 Hz-es rezgőkör több perduson át bekövetkező lecsengésének ütemében. Ezért a csillagpont kompenzálás az ívelő földzárlat kialakulását is megelőzheti. A hiba előtt szimmetrikus feszültség háromszög $U_y \cong -E_a$ feszültséggel eltolódik, a vonali és fázisfeszültségek a szigetelt csillagpontú rendszereknél ismertetethez hasonlóan viselkednek.



5-4. ábra: kompenzált földelésű hálózat

A transzformátor gyűjtőcsínén mérhető fázisfeszültségek:

$$U_a^{tr} = U_y + E_a - \Delta U_a^{tr} \cong E_a$$

$$|U_b^{tr}| = |U_y + E_b - \Delta U_b^{tr}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

$$|U_c^{tr}| = |U_y + E_c - \Delta U_c^{tr}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

A hibahelyen mérhető fázisfeszültségek:

$$U_a^F = U_a^{tr} - \Delta U_a^{line} = 0$$

$$|U_b^F| = |U_b^{tr} - \Delta U_b^{line}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

$$|U_c^F| = |U_c^{tr} - \Delta U_c^{line}| = \sqrt{3} \cdot E_a$$

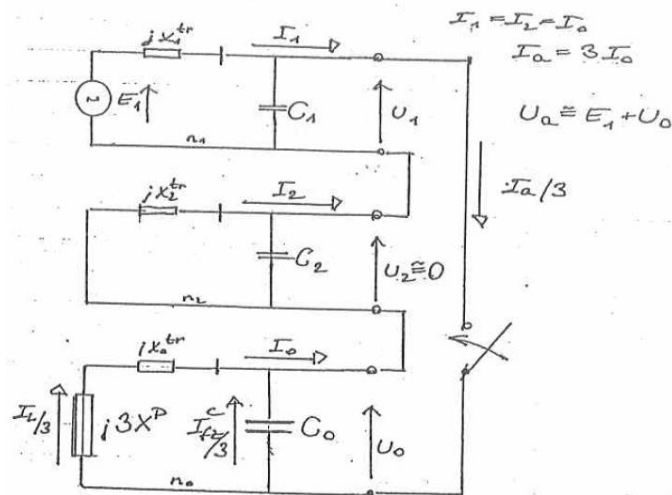
Ahhoz, hogy a kompenzált hálózaton a földzárlati ív kualudjon, az alábbi feltételeknek kell teljesülniük:

- Íves (nem fémes) földzárlatról legyen szó
- A maradékáram legyen kisebb 10-20A -nél. A maradékáramnak több forrása van:

- a csillagponti induktivitás, mint vasmagos tekercs veszteségi ellenállásán folyó, wattos maradékáram
- a felharmonikus áramok, amelyre a kompenzálás nem hangolt
- az induktív maradékáram, ami abból adódik, hogy a soros rezonanciaveszély elkerülésére az I_L kompenzáló áramot kb. 5%-kal nagyobbra kell beállítani, mint I_C .
- A hibahelyi feszültség lassan térjen vissza; a zérus sorrendű hálózat 50 Hz-es önfrekvenciája és kis csillapítása (sokáig leng)
- A hibahely villamos szilárdsága gyorsabb ütemben térjen vissza, mint a zérus sorrendű feszültség lecsengési üteme (azaz: a zárlatos fázis feszültségének visszatérési üteme)

A kompenzálás hatásossága 50 A feletti kapacitív földzárlati áramú hálózatoknál csökken és 100 A körül az ívkialvással már nem számolhatunk. Tájékoztatóul a 20 kV-os szabadvezeték kapacitív földzárlati árama kb. 5 A/100 km, míg kábel esetén ez 60-szor nagyobb (3 A/km). Ezért még sok száz km összhosszúságú 20 kV-os szabadvezeték hálózatnál is hatásos a kompenzálás, míg vegyes hálózatoknál a kábel részarányának növekedése rontja a kompenzálás hatásosságát.

A kompenzátság fokának bevezetéséhez az előzőekben látott hálózat sorrendi helyettesítő képét használjuk (5-5. ábra). Az áramkör a zárlat állandósult állapotát képezi le; C_1 , C_2 és C_0 a vezetékek földkapacitásai. Az állandósult állapot esetén a pozitív és zérus sorrendű összetevők nagyon kis szerepet játszanak, valamint $I_1 = I_2 = I_0$. Feltételezzük, hogy $X_p \gg X_1^{tr} = X_2^{tr}$ és $3 \cdot X_p = 3 \cdot \omega_n \cdot L_p$.



5-5. ábra: egyfázisú földzárlat sorrendi helyettesítő képe

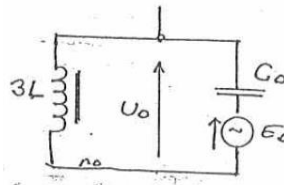
Ha a Petersen tekercs impedanciáját megfelelően választjuk meg, a zérus sorrendű áramkomponens minimalizálható, így pedig a zárlati áram nagysága is alacsony értéken tartható ($I_a \approx 0$ ha $I_0 \approx 0$). Ahhoz hogy ezt teljesíteni tudjuk, a Petersen tekercset úgy kell kiválasztanunk, hogy annak impedanciája pontosan megegyezzen a vezetékek zérus sorrendű kapacitásával:

$$3 \cdot \omega_n \cdot L_p \cong \frac{1}{\omega_n \cdot C_0}$$

Ha az impedanciák pontosan megegyeznek ($3 \cdot \omega_n \cdot L_p = \frac{1}{\omega_n \cdot C_0}$), a hálózat zérus sorrendű impedanciája a végtelenhez tart ($X_0 \rightarrow \infty$) és rezonancia jön létre. A rezonanciafrekvencia kiszámolható a következők szerint:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot L_p \cdot C_0}}$$

Az 5-6. ábra segítségével tovább vizsgáljuk a kapacitív aszimmetria és a lehetséges rezonancia kérdéskörét. Az ábra a zérus sorrendű helyettesítőképet mutatja, a hiba bekövetkezte előtt; a transzformátor ellenállását és reaktanciáját elhanyagoljuk.



5-6. ábra: zérus sorrendű hálózatrész a hiba bekövetkezte előtt

Ha a vezetékek földkapacitásai nem képeznek szimmetrikus rendszert, a csillagpont E_0 feszültséggel eltolódik (kihasználva a $C_0 = \frac{1}{3} \cdot (C_{aG} + C_{bG} + C_{cG})$ összefüggést):

$$|E_0| = |E_1| \cdot \frac{C_{aG} + a^2 \cdot C_{bG} + a \cdot C_{cG}}{C_{aG} + C_{bG} + C_{cG}}$$

Az így kialakuló zérus sorrendű feszültség:

$$|U_0| = |E_0| \cdot \left| \frac{j \cdot \omega_n \cdot 3 \cdot L}{j \cdot \omega_n \cdot 3 \cdot L - \frac{1}{j \cdot \omega_n \cdot C_0}} \right| = \left| E_0 \cdot \frac{\omega_n^2 \cdot 3 \cdot L \cdot C_0}{\omega_n^2 \cdot 3 \cdot L \cdot C_0 - 1} \right|$$

Átrendezésve:

$$U_0 = E_0 \cdot \frac{1}{1 - k}$$

Ha k értéke 1-hez tart ($k \rightarrow 1$), a zérus sorrendű hálózat feszültsége korlátozás nélkül nő ($U_0 \rightarrow \infty$), ami rezonanciát okoz a hálózaton.

Tökéletesen pontos kompenzálást ugyanakkor nem lehet megvalósítani. Mind a Petersen tekercs, mint a hálózat egyéb elemei veszteséges elemek, így csupán elméleti szempontból beszélhetünk arról, hogy a tisztán kapacitív zárlati áramot kívánjuk egy tisztán induktív árammal kompenzálni. A valóságban egy ohmos-kapacitív áramot kell kompenzálnunk egy ohmos-induktívval, ami ohmos maradékáramok nélkül nem megvalósítható. A Petersen tekercs ezen felül nem alkalmas a harmonikus feszültségtorzulások kompenzálására sem. Mivel a hálózatok kapacitása változik (pl. vezetékek ki- és bekapcsolása), a szükséges kompenzáció mértéke is folyamatosan változik. Utóbbi nehézséget a hangolható tekercsek alkalmazása kiküszöböli, melynek során egy vasmagot helyeznek a légmagos tekercsbe, annak pozícióját pedig periodikusan végzett zérus sorrendű kapacitás mérések eredményeinek függvényében változtatják.

Tökéletes kompenzálásra nem is célszerű a gyakorlatban törekedni, mivel a földkapacitások nem szimmetrikusak, így pedig ép (zárlatmentes) állapotban is 100-200 V nagyságrendű zérus sorrendű feszültséget mérhetünk a hálózaton.

A kompenzátsági fokának definíciója szerint k nagyságát az induktív és kapacitív áramok aránya adja:

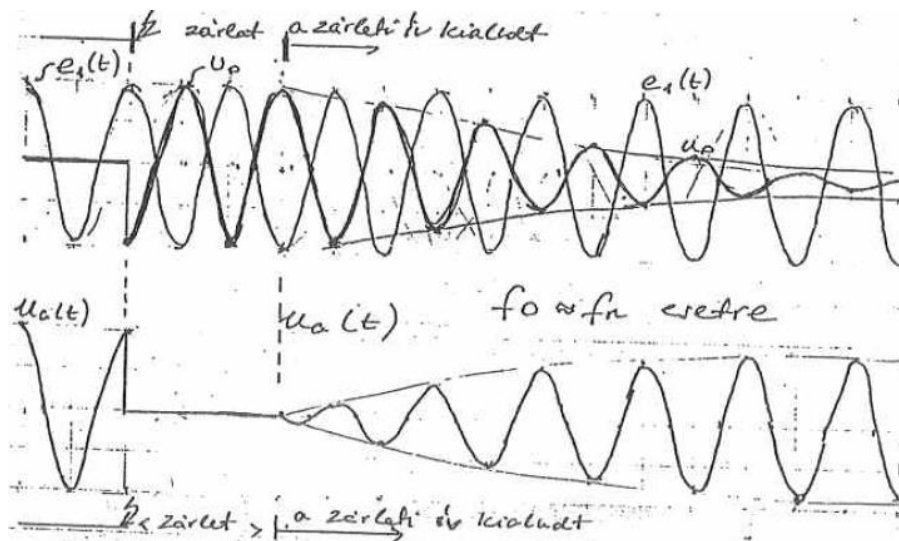
$$k = \frac{|\bar{I}_L|}{|\bar{I}_{C,sc}|} = \frac{1}{\omega_n^2 \cdot 3 \cdot L_P \cdot C_0} = \frac{\omega_0^2}{\omega_n^2}$$

Látható, hogy a kompenzátsági fok befolyásolja a zárlat alatti rezonanciafrekvenciát:

$$f_0 = 50 \cdot \sqrt{k}$$

A valóságban nem csak a tökéletes kompenzálást kell elkerülnünk, hanem az alulkompenzálást is. A zárlat során a távvezetékek induktivitása állandó értékű, azonban a leágazások lekapcsolásával a rendszer zérus sorrendű kapacitása csökken, ez pedig növeli a rezonancia frekvencia értékét. Ha a hálózat alulkompenzált volt ($f_0 < f_n$), az frekvencia emelkedésének eredményeként előállhat olyan eset, amikor $f_0 \approx f_n$.

Zárlat során a hibás fázis és a zérus sorrendű feszültség tranziensei az 5-7. ábra szerint alakulnak. A Petersen tekercssel történő földelés nem akadályozza meg az áramok fellépését, ahogy a csillagpont szigetelése sem. Ugyanakkor a zérus sorrendű feszültség értéke nem marad állandó, azt a korábban bemutatott LC rezgőkör csillapítani fogja. A csillapítás sebességét az áramkör sajátrezgése határozza meg, mely gyakorlatilag megegyezik a névleges frekvenciával, hiszen a Petersen tekercs impedanciáját úgy választottuk meg. Az ív kialakulása után a zérus sorrendű feszültség csillapítva tér vissza, míg a táplálást jelentő elektromotoros erő csillapítatlan marad. A hibahely visszatérő feszültségét ennek a két komponensnek a különbsége alkotja, így nagysága tartósan alacsony marad, megakadályozva ezzel az ív visszagyújtását és az ívelő földzárlat kialakulását.



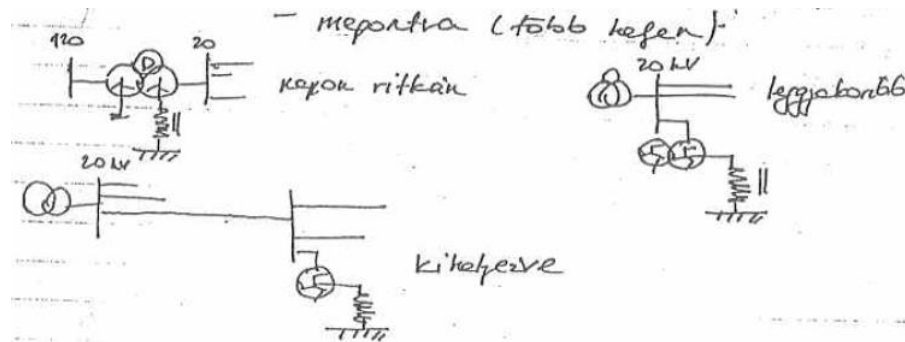
5-7. ábra: kompenzált hálózatok feszültségtranziensei egyfázisú földzárlat során

A visszatérő feszültség meghatározásához kihasználjuk, hogy $u_2(t) = 0$, és $u_a(t) = u_1(t) + u_0(t)$. Mivel $u_1(t) = e_1(t) = e_a(t)$, így $u_a(t) = e_a(t) + u_0(t)$ írható.

Összefoglalva, a Petersen tekercsnek kettős feladata van. Egyrészt minimalizálja a földzárlati áramot, így az ív nagy valószínűséggel kialszik. Másrészt fékezi a zárlatos fázis feszültségének felépülését, csökkentve ezzel a visszagyújtás esélyét.

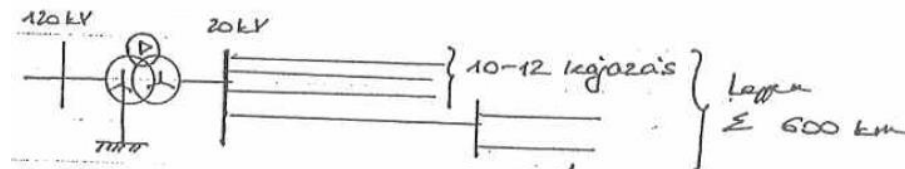
A Petersen tekercset a hálózat következő pontjain helyezhetjük el:

- 120 kV/KÖF transzformátorok szekunder tekercsének csillagpontjába kapcsolva (Általában nem használjuk, mert a 120 kV-os oldali földzárlat hatására zérus sorrendű áramok folynak át a transzformátoron, így a csillagpontba helyezett kompenzáló tekercsen $3 \cdot I_0$ áram folyhat, nagy csillagponti potenciálemelkedést okozva az egyébként zárlatmentes KÖF hálózaton.)
- 120 kV/KÖF alállomások KÖF oldalához csatlakozó zezug transzformátor csillagpontjába kapcsolva (elterjedt megoldás)
- Kihelyezett Petersen tekercs esetén távoli KÖF gyűjtősinhez csatlakozó zezug transzformátor csillagpontjába kapcsolva



5-8. ábra: Petersen tekercs elhelyezésének lehetőségei

Egy vizsgált hálózat adatainak ismeretében a jellemző egyfázisú földzárlati áramok nagysága meghatározható. Az 5-9. ábra szerinti példában a 120 kV/KÖF alállomás 10-12 leágazást lát el, melyek összesített hossza 600 km. A pozitív és zérus sorrendű kapacitás nagysága rendre 10,1 és 4,4 nF/km. A földzárlati áram nagysága így: $I_{C,1FN} \cong \omega_n \cdot 3 \cdot C_0 \cdot U_f \cdot 600 \text{ km} = 28,8 \text{ A}$. Ahhoz, hogy körülbelül $k = 1,1 - 1,2$ közötti túlkompenzálást biztosítsunk, $I_L = 40 \text{ A}$ névleges áramú Petersen tekercset kell választanunk.

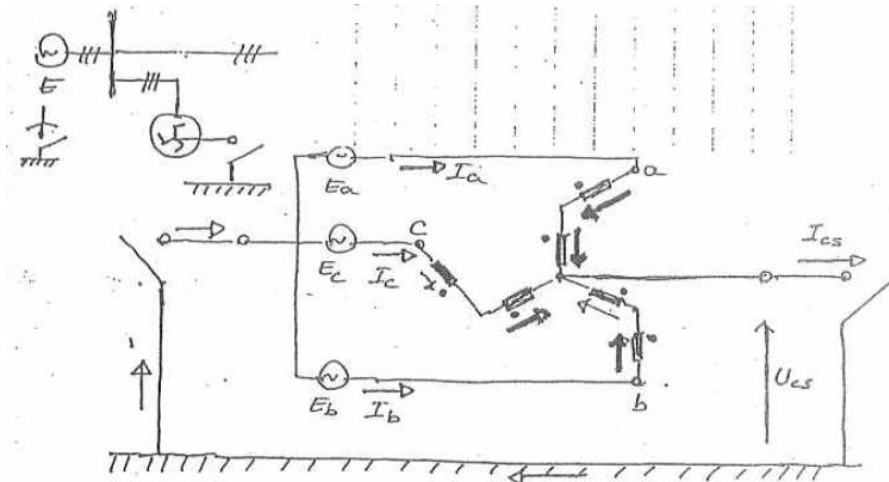


5-9. ábra: a példában használt kompenzált hálózat

Kiterjedt kábelhálózatok esetén – így a 10 kV-os városi kábelhálózatoknál – ellenálláson át földelik a csillagpontot. Az ellenállás értékét 25-100 Ω között úgy választják meg, hogy az 100-150 A földzárlati áramok eredményezzen. Ez megakadályozza az ívelő földzárlat kialakulását (az ívkialvás után a C_0 -ban maradt töltés gyorsan kisül [lehetőleg 10 ms alatt], így lecseng a zérus sorrendű feszültség) és egyben lehetővé teszi a szelektív földzárlatvédelmi érzékelést. Az ún. hosszúföldelésnek tehát ívöltő hatása nincs, hiszen kábelhálózatokon egyrészt nem várható múló jellegű hiba, másrészt a kábelek nagy zérus sorrendű kapacitása miatt kismértékű topológia változás is nagy kapacitás változást eredményezne.

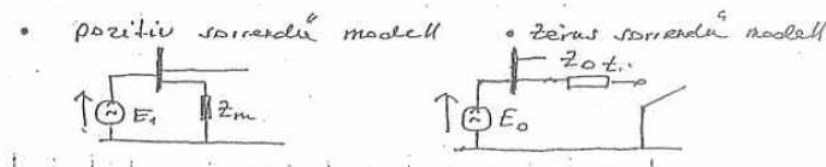
5.3 Földelő és csillagpontképző transzformátorok

A csillagpontképző transzformátorok olyan háromfázisú transzformátorok, melyek földelési lehetőséget biztosítanak a villamosenergia-rendszer különböző pontjain, akár közvetlenül, akár impedancián keresztül. Emellett lokális, kis teljesítményű terhelések kiszolgálására is alkalmasak. A földelési pont létrehozására leggyakrabban zezug transzformátorokat alkalmaznak, melyekben három pár koncentrikusan elhelyezett tekercset találunk. Ennél a konstrukciónál a csillagpont eltolódása elhanyagolható, így gyakorlatilag fix csillagpontot képezünk. Ez kis impedanciás áramutat biztosít a zérus sorrendű áramok számára, így földzárlatok esetén a zárlati áram erre folyik. Az 5-10. ábra egy tipikus elrendezést mutat.



5-10. ábra: zezug tekercselésű csillagpontképző transzformátor

Normál üzemi körülmények között az E_a , E_b és E_c feszültségek szimmetrikus rendszert alkotnak, így csak mágnesező áramot vesznek fel a tápláló háromfázisú rendszerből. Az áramok vektoriális összege (gyakorlatilag a csillagpont árama) zérus, így a csillagpont feszültsége is zérus. Ha a transzformatort zérus sorrendű feszültséggel (E_0) tápláljuk, a fázisfeszültségek fázorjai egy irányba rendeződnek, és áramot hoznak létre a csillagponton keresztül. Ha a táphálózat maga is földelt, a csillagpont feszültsége egyenlő lesz a zérus sorrendű feszültséggel ($U_y = E_0$). Ha a földelőkapcsolót zárjuk, a kialakuló áramok nagyságát ($I_a = I_b = I_c = I_0$) a transzformátor szórási impedanciája fogja meghatározni, az áramok összege $I_y = 3 \cdot I_0$ pedig a földelésen keresztül folyik, így a csillagpont feszültsége zérusra redukálódik. A vizsgált hálózat pozitív és zérus sorrendű helyettesítését az 5-11. ábra mutatja.



5-11. ábra: pozitív és zérus sorrendű modell

Az 5-12. ábra egy földelő transzformátor működését mutatja egyfázisú földzárlat közben, melynek segítségével egy elméleti fizikai modellt alkothatunk. A zárlat bekövetkezésekor ($U_a = 0$) az áram zérus sorrendű összetevője a nullvezetőn keresztül kezd folyni, majd eloszlik a transzformátor fázisai között. A zezug transzformátor kialakításának köszönhetően a vasmag mindegyik oszlopán két különböző fázis „féltekercsei” is megtalálhatók, így azonos nagyságú, de ellentétes irányú áramok folynak mindegyik tekercsben. Ennek eredményeként a mágneses fluxusok semlegesítik egymást, így a hiba során is névleges feszültséget és áramokat figyelhetünk meg a hálózat által ellátott terheléseknél (csak hibajelzést kapunk). A transzformatort elhagyó áramkomponensek egyenként a teljes terhelés harmadát képesek kiszolgálni.

A kialakuló áramköri elrendezésben a tápponti áramok nagyságát a következők szerint határozhatjuk meg (az ábra referenciairányait használva):

$$I_a^E = \frac{2}{3} \cdot I; I_b^E = -\frac{1}{3} \cdot I; I_c^E = -\frac{1}{3} \cdot I$$

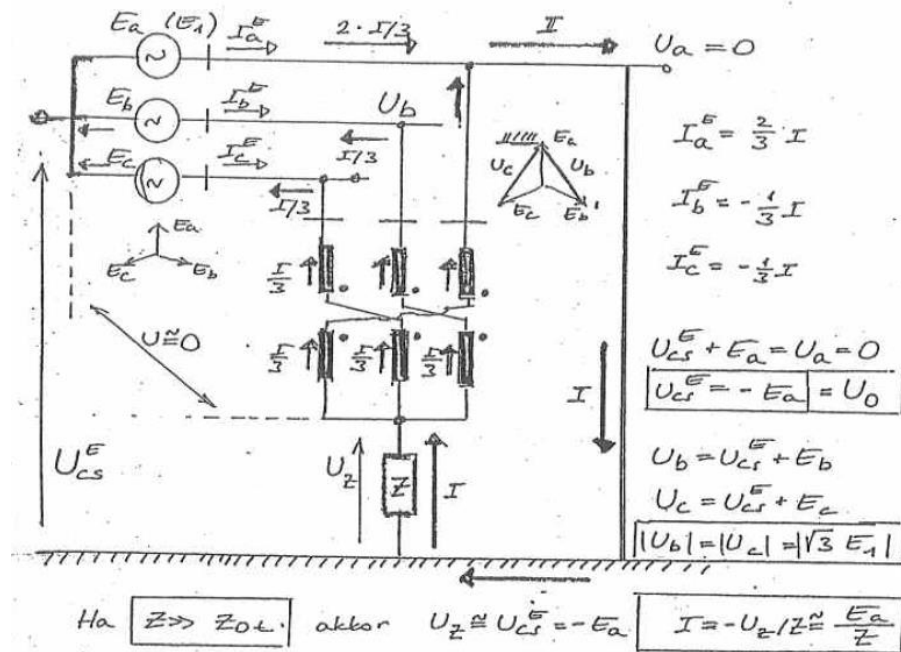
A zárlatos fázis hibahelyi feszültségét a Kirchoff egyenlet segítségével határozhatjuk meg:

$$U_{cs}^E + E_a = U_a = 0$$

melyet továbbalakítva megkapjuk, hogy $U_{cs}^E = -E_a$, ami egyenlő tovább U_o -val, a csillagpont eltolódásának eredményeként. Az ép fázisok feszültségét a csillagponti feszültség és az egyes fázisokban lévő elektromotoros erő összegeként kapjuk meg:

$$U_b = U_{cs}^E + E_b \text{ és } U_c = U_{cs}^E + E_c$$

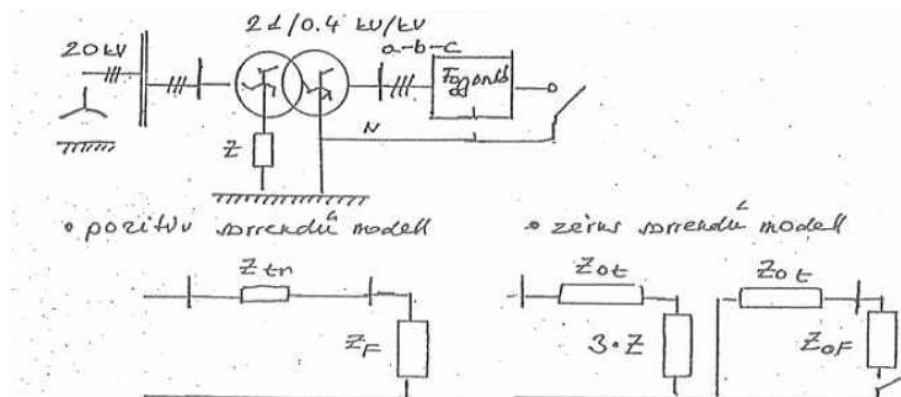
Látható, hogy mivel az elektromotoros erők szimmetrikus rendszert alkotnak, és $U_{cs}^E = -E_a$, az ép fázisok fázisfeszültsége vonali értékre emelkedik: $|U_b| = |U_c| = |\sqrt{3}| \cdot E_1$.



5-12. ábra: földelőtranszformátor működése földzárlat során

A zárlati áram nagyságát egy sorosan kapcsolt impedanciával tudjuk biztonságos értéken tartani. Ezzel a földelő transzformátor mesterséges földelési pontot biztosít minden egyfázisú terhelés számára is amellet, hogy semelegesíti a zárlati áramot. Az elrendezés nagy impedanciát mutat pozitív és negatív sorrendekkel szemben, de a földzárlati áramok (zérus sorrend) számára áramutat biztosít, lehetővé téve a védelmi berendezések működését. (A zérus sorrendű áram időtartamát néhány másodpercben korlátozzák.)

A zezug kapcsolású földelő transzformátorok általános sorrendi leképezései az 5-13. ábra szerint alakulnak.



5-13. ábra: zezug kapcsolású földelőtranszformátor pozitív és zérus sorrendű helyettesítőképe

Amennyiben a földelő transzformátorokat összehasonlítjuk a hagyományos erőátviteli transzformátorokkal, a következő különbségeket azonosíthatjuk.

Földelő transzformátoroknál a teljesítményáramlás egyirányú, míg erőátviteli egységeknél ez lehet kétirányú is. A földelő transzformátorok feladata elsődlegesen a mesterséges csillagpont megteremtése, míg az erőátviteli transzformátorokat teljesítmény átvitelére és különböző feszültség szintek összekötésére használjuk. A földelő transzformátorok jelentősen kisebb szórási reaktanciával rendelkeznek, és nem esetükben nem találkozhatunk harmonikus maradékáramokkal.

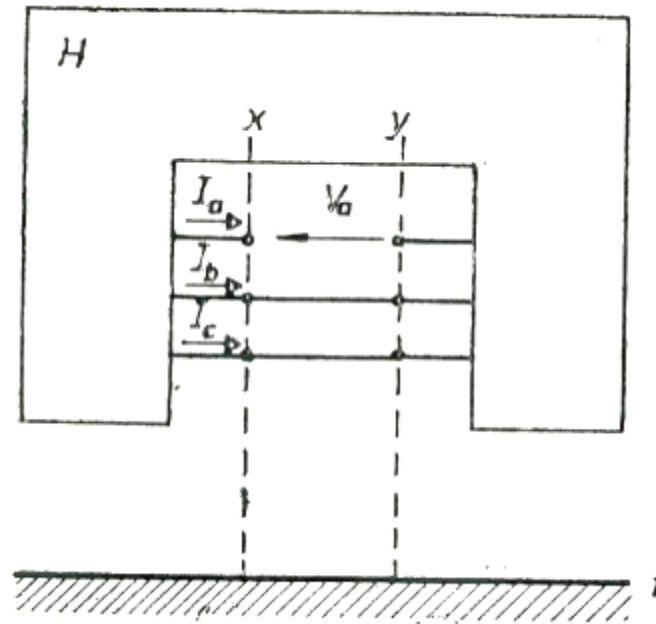
6 Hálózati hibák

6.1 Soros hibák

Soros hibának tekintjük azt a hibafajtát, amikor egy viszonylag rövid – néhány méter nagyságrendű, esetleg egy oszlopköz nagyságú – szakaszon a három fázisvezető soros impedanciája markánsan eltér egymástól.

6.1.1 Egyfázisú szakadás, soros impedancia a vezeték egyik fázisában

Az egyfázisú szakadás a vezeték egy vezetőjének szakadását jelenti, a vázlatot a 6-1. ábra ismerteti. A szakadás a referencifázisban, azaz az a fázisban következik be, például megszakító, szakaszoló nyitása, vagy áramkötés leesése következtében. A nem szimmetrikus szakasz elejét x -szel, végét y -nal jelöljük.



6-1. ábra: egyfázisú szakadás hálózati modellje

A feszültségek és áramok különbözőek x -nél és y -nál. Az x oldali feszültségvektor:

$$U = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

Az y oldali feszültségvektor:

$$U' = \begin{bmatrix} U'_a \\ U'_b \\ U'_c \end{bmatrix}$$

A soros feszültségek vektora:

$$V = U - U'$$

A néhány méternyi vezeték impedanciamentesnek tekintjük, amelyen soros feszültségesés nem keletkezik. A hibahelyi aszimmetria alapján felírható összefüggések:

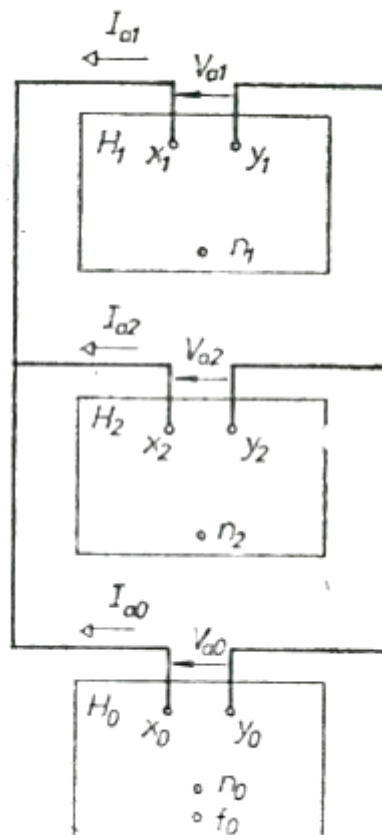
$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ és } I = \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Végezzük el a szimmetrikus összetevő transzformációt

$$V_s = A^{-1} \cdot V = \begin{bmatrix} \frac{V_a}{3} \\ \frac{V_a}{3} \\ \frac{V_a}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

$$I_s = A^{-1} \cdot I = \begin{bmatrix} \frac{I_b + I_c}{3} \\ \frac{a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c}{3} \\ \frac{a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

A kiinduló egyenlet is tartalmazta, hogy $I_a = 0 = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$, ezt a komponensek összeadása ki is adja. Ez azt jelenti, hogy az összetevő hálózatokból kifolyó áramok összege nullát ad. $V_{a0} = V_{a1} = V_{a2}$ pedig párhuzamosan kapcsolásra utal az x - y kapocspárra vonatkozóan. Üzemszerűen a teljesítményátvitel a pozitív sorrendű hálózatban történik, és ez a szakadás miatt nem szűnik meg, csak az x_i - y_i pontok között az impedancia nulláról a párhuzamosan kapcsolt negatív és zérus sorrendű hálózatok párhuzamos eredő impedanciájának értékére nő. Így a negatív és zérus sorrendű hálózatokon is folyik áram. A zérus sorrendű hálózaton ez esetleges – aszerint, hogy x_0 és y_0 között tud-e zérus sorrendű áram folyni.



6-2. ábra: egyfázisú szakadás helyettesítő vázlata

Tekintsük most azt az esetet, hogy az a fázisba soros Z impedancia kapcsolódik be. (Például ellenállásos megszakító nem zárja rövidre az ellenállást.)

A soros feszültségek vektora:

$$V = \begin{bmatrix} Z \cdot I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

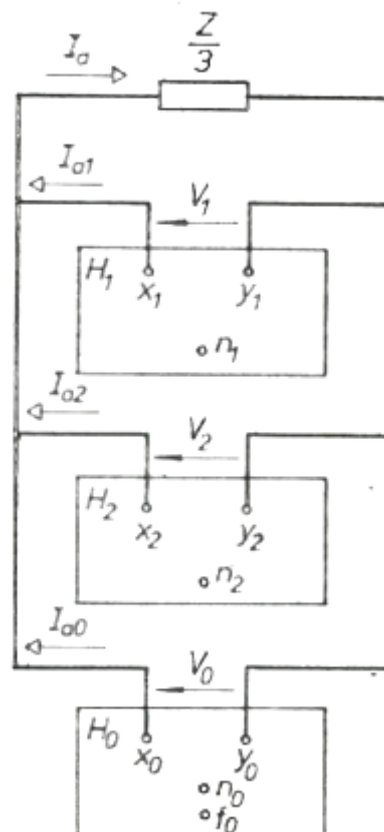
A szimmetrikus összetevők:

$$V_s = A^{-1} \cdot V = \begin{bmatrix} \frac{Z \cdot I_a}{3} \\ \frac{Z \cdot I_a}{3} \\ \frac{Z \cdot I_a}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Innen:

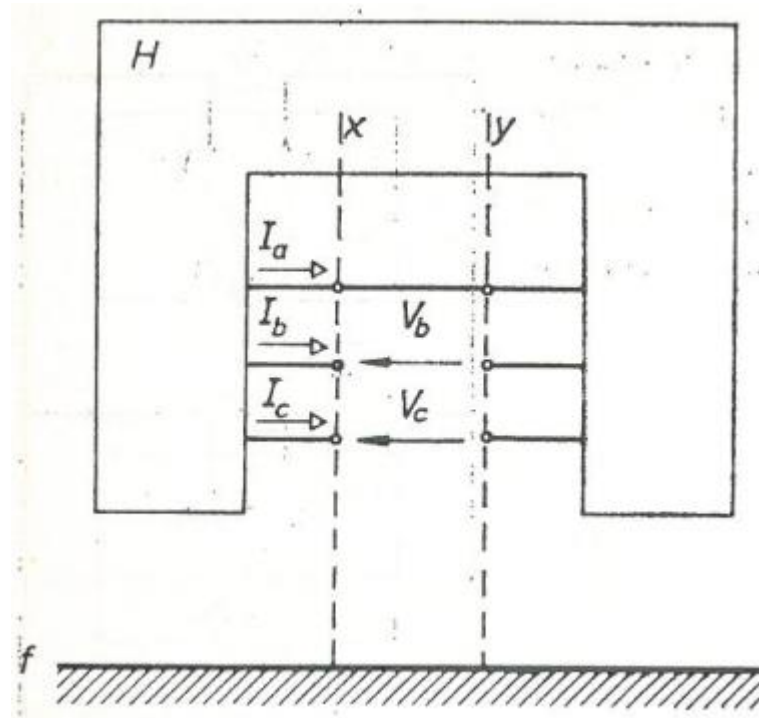
$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{Z \cdot I_a}{3} = \frac{Z \cdot (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2})}{3}$$

A helyettesítő sémát a 6-3. ábra mutatja. Az ábra hasonlít az előbbiekhez, de most még egy $\frac{Z}{3}$ -as párhuzamos ág is van. Világos, hogy ha $Z \rightarrow \infty$, akkor ezt az eset átmegy teljes szakadásba. Ha pedig $Z \rightarrow 0$, akkor x_1 és y_1 közé impedanciamentes rövidzár kerül, és a pozitív sorrendű hálózatban visszaáll a hibamentes állapot, mivel az x_1 és y_1 közötti rövidzár tökéletesen söntöli a negatív és zárus sorrendű hálózatokat.



6-3. ábra: helyettesítő kapcsolás az a fázisba iktatott Z impedancia esetén

6.1.2 Kétfázisú szakadás



6-4. ábra: kétfázisú szakadás

A hálózatot a 6-4. ábra mutatja. A hibahelyi aszimmetria alapján felírható egyenletek:

$$V = \begin{bmatrix} 0 \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \text{ és } I = \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Áttérve a szimmetrikus összetevőkre:

$$V_s = A^{-1} \cdot V = \begin{bmatrix} \frac{V_b + V_c}{3} \\ \frac{a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c}{3} \\ \frac{a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Innen az $1 + a + a^2 = 0$ azonosság felhasználásával:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$$

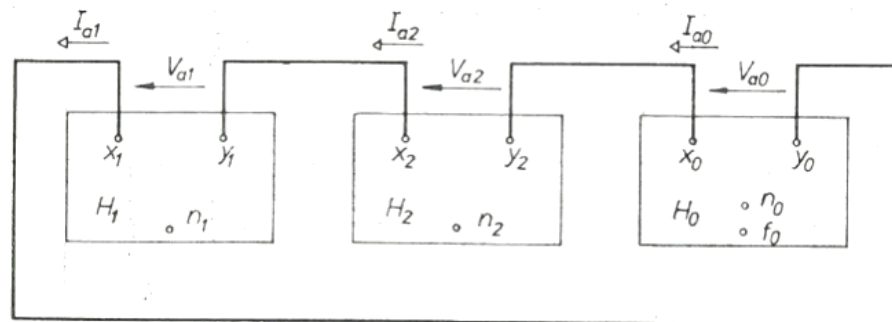
Az áramok összetevői:

$$I_s = A^{-1} \cdot I = \begin{bmatrix} \frac{I_a}{3} \\ \frac{I_a}{3} \\ \frac{I_a}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

vagyis

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$$

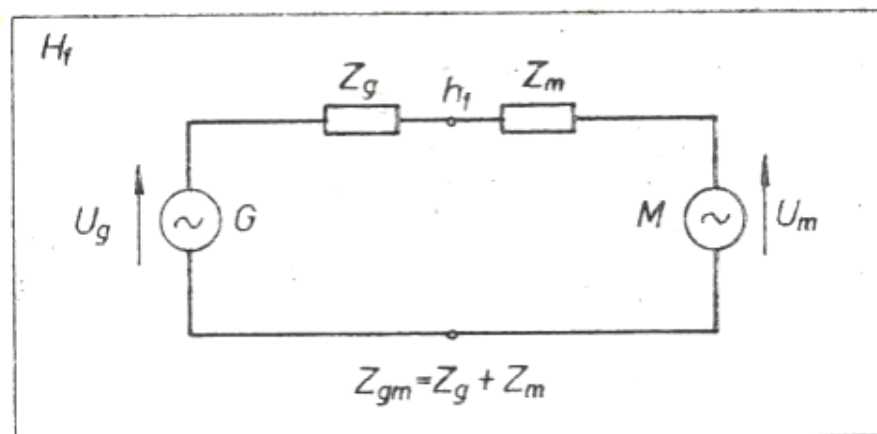
Az előbbi összefüggéseknek az összetevő hálózatok sorba kapcsolása felel meg (6-5. ábra). A pozitív sorrendű hálózatba nagy impedancia kapcsolódik, ami erősen csökkenti, de nem szünteti meg az átvihető teljesítményt.



6-5. ábra: kétfázisú szakadás helyettesítő vázlata

6.2 Transzfer impedancia sönt- és soros hibák esetén

Vizsgálatunk célja adott, szimmetrikus összetevőkkel diagonalizálható impedanciamátrixú hálózaton bekövetkező zárlatok és szakadások következtében keletkező transzfer impedanciák összehasonlítása. A 6-6. ábra az ép hálózatot mutatja, amelynek egyik oldalán a generátor, a másik oldalán a fogyasztót reprezentáló (szinkron) motor látható.



6-6. ábra: generátorból és fogyasztóból álló hálózat szimmetrikus, hibamentes állapotban

A 6-7. ábra az FN, 2FN, 2F, 3F(N) sönthibáknak megfelelő egyszerűsített kapcsolásokat mutatja. Sönthibák esetén a transzfer impedancia az ábra jelöléseivel a következőképpen írható:

$$Z_{gm} = Z_g + Z_m + \frac{Z_g \cdot Z_m}{Z_{kereszt}}$$

ahol $Z_{kereszt}$ a hiba következtében a pozitív sorrendű hálózatba iktatódó keresztirányú impedancia. Ennek értéke FN zárlatnál:

$$Z_{kereszt}^{FN} = Z_2 + Z_0$$

ahol Z_2 és Z_0 a negatív és zérus sorrendű hálózat hibahelyi mérési ponti impedanciája.

2FN zárlatnál:

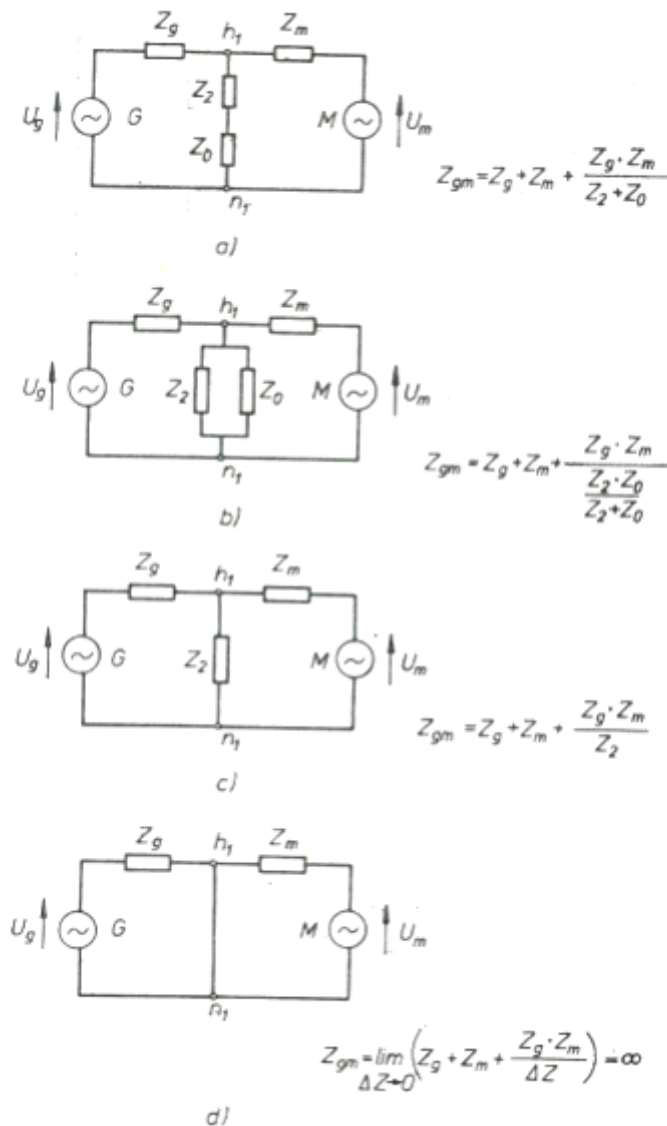
$$Z_{kereszt}^{2FN} = \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

2F zárlatnál:

$$Z_{kereszt}^{2F} = Z_2$$

és 3F(N) zárlatnál:

$$Z_{kereszt}^{3F(N)} = 0$$



**6-7. ábra: generátorból és fogyasztókból álló hálózat helyettesítése sönthibák esetén
a) 1FN zárlat, b) 2FN zárlat, c) 2F zárlat, d) 3F zárlat**

A 6-8. ábra ismerteti a kétfázisú és egyfázisú szakadást, valamint az általános soros hiba helyettesítő kapcsolását. Itt a transzfer impedancia képlete:

$$Z_{gm} = Z_g + Z_m + Z_{soros}$$

ahol Z_{soros} a hiba következtében a pozitív sorrendű hálózatra iktatódó soros impedancia. Ez kétfázisú szakadásnál:

$$Z_{soros} = Z_2 + Z_0$$

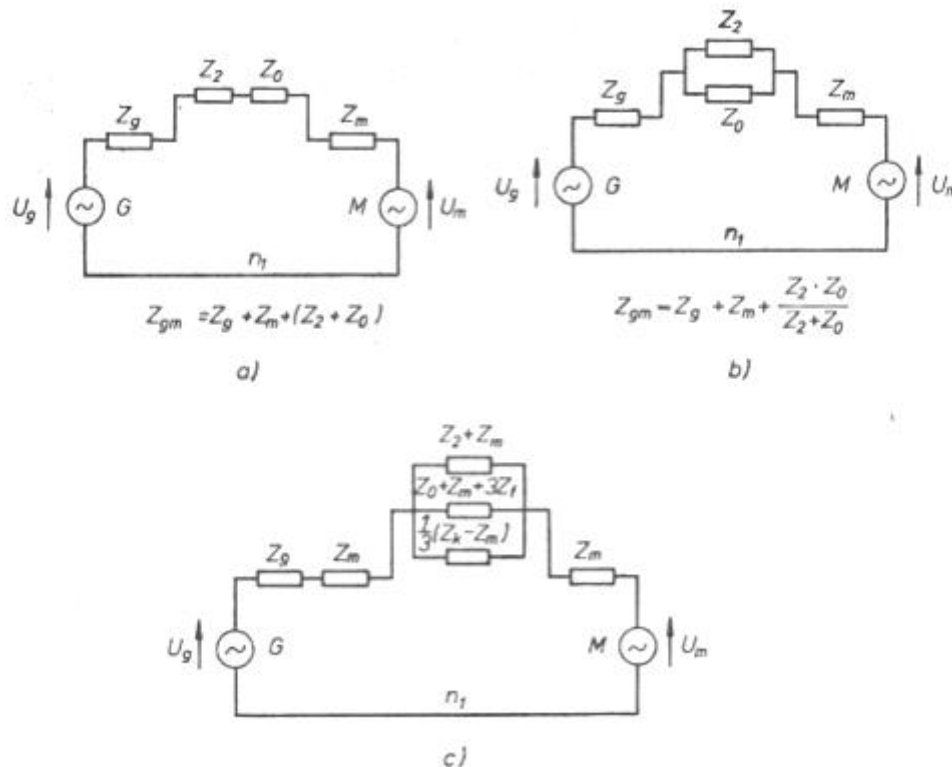
egyfázisú szakadásnál:

$$Z_{soros} = \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

általános referenciaszimmetrikus soros hiba (aszimmetria) esetén:

$$Z_{soros} = Z_m + (Z_2 + Z_m) \times (Z_0 + Z_m + 3 \cdot Z_f) \times \frac{Z_k - Z_m}{3}$$

ahol Z_k , Z_m és Z_f a 6-8. ábra szerinti impedanciák. A transzfer impedancia szoros kapcsolatban áll a hálózaton átvihető teljesítménnyel.



6-8. ábra: generátorból és fogyasztóból álló hálózat helyettesítése soros hibák esetén
a) kétfázisú szakadás, b) egyfázisú szakadás, c) az a fázisban Z_k , a b és a c fázisban Z_m , a földvezetőben Z_f impedancia

6.3 Szimultán hibák

A zárlatok és a szakadások rövid ideig tartó események, illetve, ha nem szűnnek meg, az érintett vezetékrészt kikapcsolják. A jelenségek rövidsége miatt annak valószínűsége, hogy egymástól függetlenül két hiba egyidejűleg következzen be, igen kicsi. Ezért általában a hálózatokat ilyen jellegű, egymástól független többszörös hibára nem is méretezik. A gyakorlatban viszont szükség van arra, hogy többszörös hibák által keltett helyzetet is számítással nyomon tudjunk követni. Az ilyen hibák jelentős része ugyanis olyan, ahol az okok nem függetlenek egymástól. Például leszakad egy vezető és ugyanott zárlatot okoz; vagy őszi ködös időben, amikor a szigetelőkön kialakult szennyréteg többé-kevésbé vezetővé válik, átívelés keletkezik; átível a leggyengébb szigetelő, ugyanakkor több hasonló állapotú szigetelő van a hálózaton. Például az FN zárlat ideje

alatt – amint azt meg is mutatjuk – az ép fázisok feszültsége megemelkedik, és egy másik vagy több más szigetelő esetleg több kilométer távolságra a zárlat helyétől egyidejűleg átívelhet. A zárlatok különböző fázisban is keletkezhetnek, tehát az a fázis nem tekinthető minden esetben referencifázisnak, Keletkezhet például az első FN zárlat az a fázis és a föld, a második pedig nagy távolságra ettől a b és a föld között. Ilyen hibafajttával eddig még nem foglalkoztunk. Ezek nem független események, és így egyidejű bekövetkezésükre számítani kell. Az előbb említett hibafajta, amit kettős földzárlatnak nevezünk, nem közvetlenül földelt csillagpontú hálózatokon azért is fontos mert az egyszerre FN zárlat nem vált ki nagy zárlati áramokat, csak potenciálettolódást, és ezért nem kapcsolják ki azonnal (a másodperc törtrésze alatt) a hibás hálózatrészt; így van idő arra, hogy az emelkedett feszültségű ép fázisban is létrejöhessen FN zárlat.

Ez nem 2FN zárlat, mert az csak akkor lenne, ha azonos vezeték-keresztmetszetben jönne létre, most azonban, mint említettük, a két FN zárlat nagy távolságra egymástól következik be, a két pont között jelentős feszültségkülönbség lehet. Ezért ezt a zárlatfajtát a 2FN sémája nem írja le, nem mutatja helyesen a homogén rövidzárlati áramok pályáját és értékét sem, hiszen itt kettős földzárlat esetén két fázisvezető érintkezik, nem impedanciamentesen, hanem a föld impedanciáján keresztül.

A szimultán hibák vizsgálata tehát fontos lehet például az alkalmazandó védelem fajtája és annak beállítása szempontjából. Fontos szerepe van a szimultán hibáknak olyan esetek tárgyalhatóságának megteremtésében is, amelyek egyébként igen körülményesen volnának számíthatók. Például aszimmetrikus fogyasztókat ellátó vezetékek zárlatainak vagy szakadásainak számításakor, vagy ha adott vezetéken FN zárlat keletkezik, és a vezeték zárlatos fázisvezetőkének két végén lévő megszakítókat működtetik, ekkor egy FN zárlatot és két soros hibát veszünk figyelembe – azaz háromszoros szimultán hibát –, hogy a körülményeket helyesen leképezzük. Látni fogjuk, hogy a szimultán hibák módszere ügyesen alkalmazva bővíti a lehetőséget a problémák megoldására.

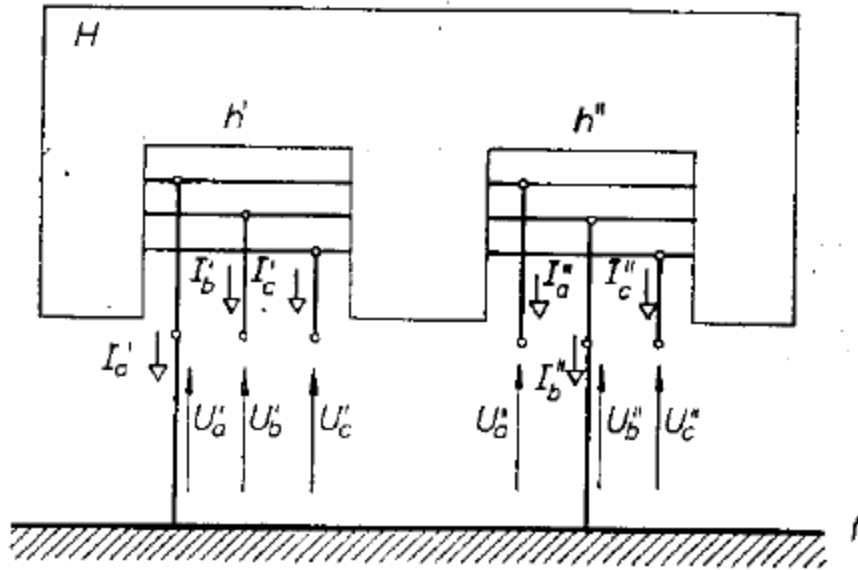
Az aszimmetrikus hibáknál (sönt és soros) láttuk, hogy hibahelyenként három egyenletet kellett felírni. Kézenfekvő, hogy a második hibahelyen további három egyenletet és általában k hiba egyidejű fennállása esetén $3k$ egyenletet lehet felírni.

A hibahelyenként három független összefüggés arra alkalmas, hogy hat ismeretlent meghatározzunk a többi összefüggés segítségével. (Az áram és a feszültség szimmetrikus összetevőiből hármat kiszámíthatunk, a hibahelyre felírt három egyenletből, az Ohm-törvény segítségével pedig további hármat.) Hibahelyenként három egyenletet fogunk használni a szimultán hibáknál is.

Az olvasónak valószínűleg feltűnt, hogy ha FN zárlatról volt szó, akkor mindig az a fázis – referencifázis – került zárlatba, 2F zárlatnál viszont a b és c fázis között volt zárlat. Egyfázisú szakadás esetén mindig az a fázis, kétfázisúnál a b és c fázisvezetőben volt a szakadás. Eddigi vizsgálataink során tehát az a volt a referencifázis. A szimultán hibákat szimmetria szempontjából két csoportba sorolhatjuk:

- mindegyik hiba az a fázisra, mint referencifázisra szimmetrikus, például FN(a) és egyfázisú szakadás az a fázisban
- az egyes hibák különböző fázisokra referenciaszimmetrikusak, például FN(a) és FN(b), a térben különböző helyeken

Megvizsgáljuk most a kettős földzárlatot. A h' hibahelyen az a , a h'' hibahelyen a b fázis kerül FN zárlatba (6-9. ábra). (Elhagyjuk a hibahelyeken az x , y , z jelölést.) Két zárlat esetén már nem vehetjük fel tetszőlegesen a fázisok elnevezését, ami h' -nél a volt, annak h'' -nél is a -nak kell lennie.



**6-9. ábra: szimultán hiba
a h' hibahelyen az a fázis, a h'' hibahelyen a b fázis kerül egyfázisú földzárlatba**

A h' hibahelyre felírjuk az összetevők feszültség- és áramegyenleteit:

$$I'_{a0} = I'_{a1} = I'_{a2}$$

$$U'_{a0} + U'_{a1} + U'_{a2} = 0$$

Ez a hiba önmagában a pozitív, negatív és zérus sorrendű hálózat h' hibahelyen való sorba kapcsolását jelenti.

Vizsgáljuk most a h'' hibahelyet. A hibahelyi egyenletek:

$$I''_a = I''_c = 0$$

$$U''_b = 0$$

Bontsuk az előbbi mennyiségeket szimmetrikus összetevőkre úgy, hogy a referenciafázis az a legyen.

$$U'_s = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U''_a \\ 0 \\ U''_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U''_a + U''_c}{3} \\ \frac{U''_a + a^2 \cdot U''_c}{3} \\ \frac{U''_a + a \cdot U''_c}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U''_{a0} \\ U''_{a1} \\ U''_{a2} \end{bmatrix}$$

$$I''_s = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I''_b \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I''_b}{3} \\ \frac{a \cdot I''_b}{3} \\ \frac{a^2 \cdot I''_b}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I''_{a0} \\ I''_{a1} \\ I''_{a2} \end{bmatrix}$$

Ezek alapján pedig a h'' hibahelyre a következő egyenletek írhatók:

$$I''_{a0} = a^2 \cdot I''_{a1} = a \cdot I''_{a2} = \frac{I''_b}{3}$$

$$U''_{a0} + a^2 \cdot U''_{a1} + a \cdot U''_{a2} = 0$$

vagy másképpen:

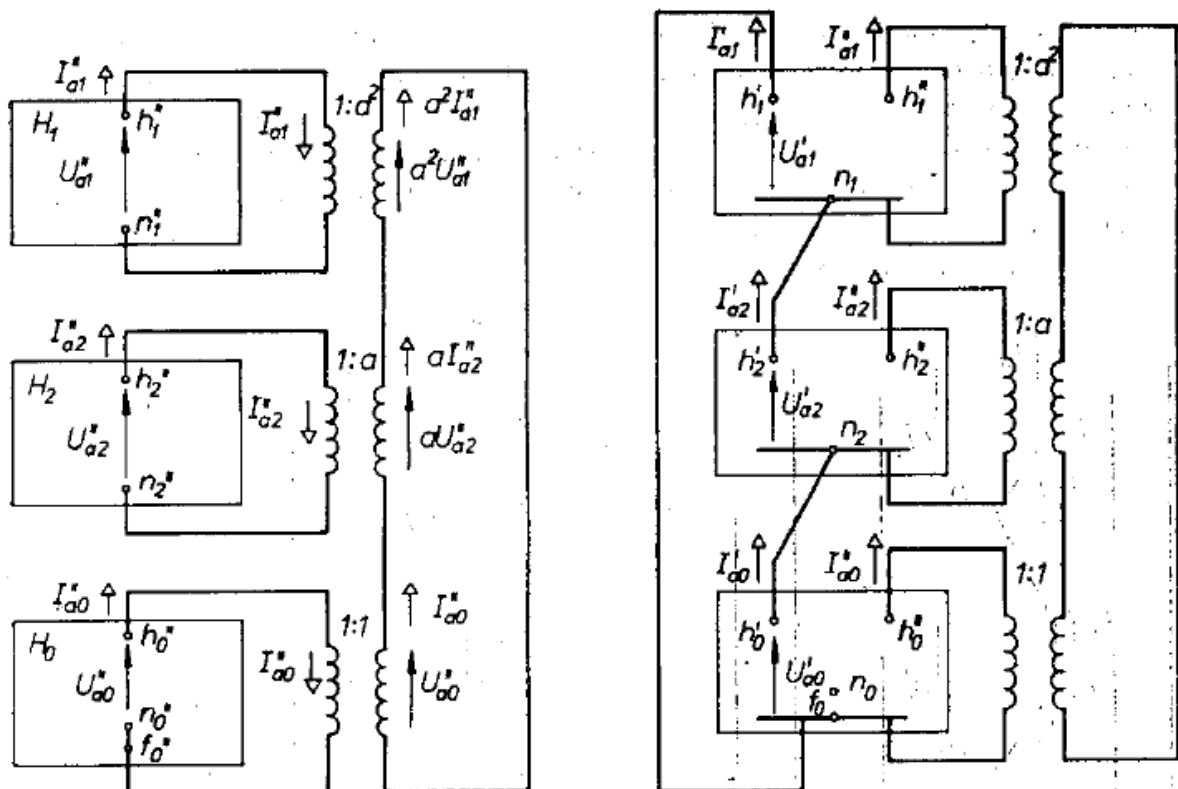
$$I''_{b0} = I''_{b1} = I''_{b2} = \frac{I''_b}{3}$$

$$U''_{b0} + U''_{b1} + U''_{b2} = 0$$

ami tükrözi, hogy a hiba a b fázisra szimmetrikus.

A szimmetrikus összetevőkre vonatkozó hibahelyi egyenletek alapján a 6-10. ábra ismerteti a H hálózat helyettesítő kapcsolását arra az esetre, amikor a h'' helyen FN zárlat van a b fázisban. A vázlatban forgató transzformátorokat találunk, melyek az összetevő áramokat és feszültségeket azonos módon forgatják el. Ezek a transzformátorok a referenciafázis helyi transzformációját végzik el, segítségükkel a h'' hibahelyen az a fázisról, mint referenciafázisról a b -re térhetünk át.

Miután sikerült helyettesítenünk egy nem referenciaszimmetrikus hibát, összeállítjuk a kettős földzárlat helyettesítő vázlatát. Itt feltételeztük, hogy a rendszer csillagpontjai nem földeltek, és így egyetlen FN zárlat következtében nagy árlati áramok nem folynának. Ha a h' és h'' között a hálózatban galvanikus kapcsolat létezik, akkor kettős földzárlat esetén a hálózaton jelentős áram folyhat, amely rövidzárlati is lehet. Ez a módszer tehát lehetővé teszi tetszőleges aszimmetrikus hibák kombinációinak leképezését.



6-10. ábra

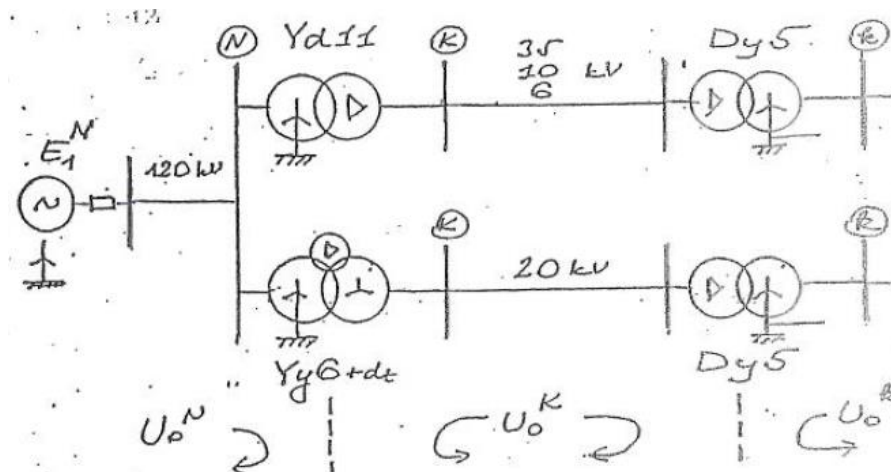
- a) helyettesítő kapcsolás a h'' hibahelyen a b fázisban bekövetkező egyfázisú földzárlatra
b) a szimultán hiba teljes helyettesítő vázlata

7 Sönt és soros hibák feszültségtorzító hatása 120 kV/KÖF/0,4 kV-os sugaras hálózaton

A fejezetben hálózati hibák feszültségtorzító hatását vizsgáljuk, az alábbi eseteket tárgyalva:

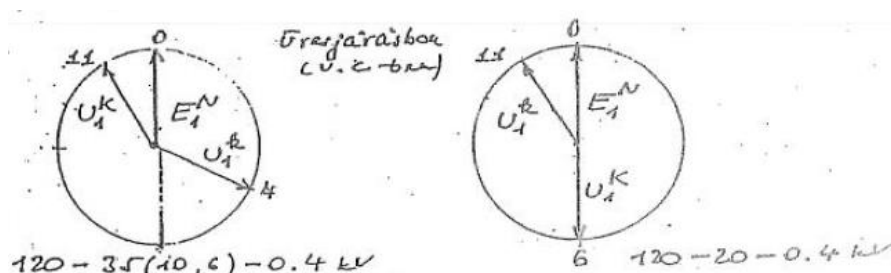
- Egyfázisú földzárlat 120 kV-on
- Egy fázis kikapcsolása 120 kV-on
- Egy fázis kiesése középfeszültségen

A 7-1. ábra a 120 kV/KÖF/0,4 kV-os hálózatok jellegzetes topológiáját mutatja, a legelterjedtebb transzformátor kapcsolási csoportok megjelölésével. Megfigyelhető, hogy a 120 kV/KÖF transzformátorok szekunder oldalán kapcsolását a KÖF hálózat feszültségszintjének megfelelően választják ki, míg a KÖF/0,4 kV-os transzformátorok minden esetben Dy kapcsolásúak. 35, 10 és 6 kV-os vezetékek esetén Ynd11 transzformátorok kerülnek beépítésre, míg 20 kV-os hálózatoknál Yny6 a jellemző kapcsolási csoport, tercier delta tekercessel. Az átviteli útban található két transzformáció földelés szempontjából is felosztja a hálózatot, a NAF, KÖF és KIF hálózatrészekben fellépő zérus sorrendű feszültség így nem terjed egyik feszültségszintről a másikra.



7-1. ábra: 120 kV/KÖF/0,4 kV-os hálózatok általános topológiája

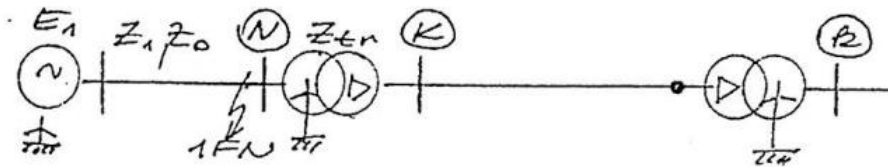
A 7-2. ábra a pozitív sorrendű feszültségfazorokat mutatja. Feltételezve, hogy viszonylagos egységek használatával végezzük számításainkat, a feszültségfazoroknak a nagysága nem változik, csak azok szöge. Ha a 120 kV-os és a KÖF hálózatrész Ynd11-es transzformátorral van összekötve, a NAF és a KIF oldal közötti szögzültség 120° (4 óra) lesz. A másik esetben 330°-ról (11 óra) beszélhetünk. A NAF/KÖF és KÖF/KIF transzformátorok megfelelő kombinációjával gyakorlatilag tetszleges fázistolást létrehozhatunk, melyek két csoportba sorolhatók: páros vagy páratlan óraszámúba. A továbbiakban, hogy megkönnyítsük számításainkat, a páratlan óraszámú csoportot 9, a párost 0 óras fázisforgatással fogjuk leképezni.



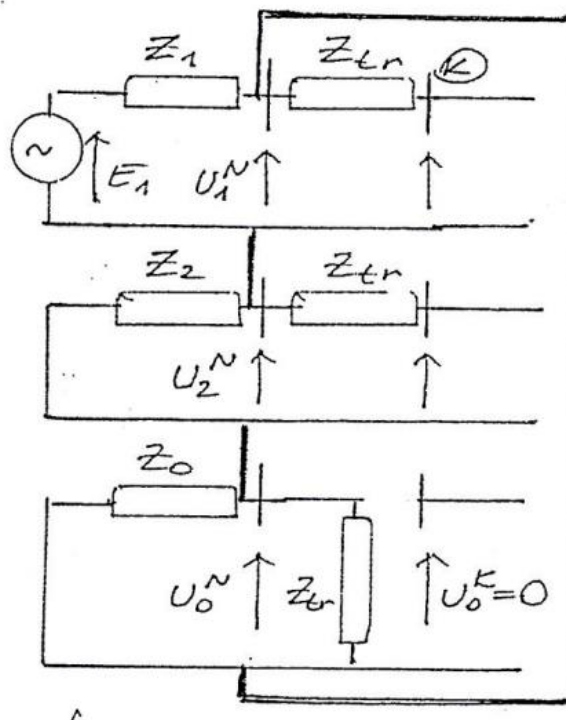
7-2. ábra: a transzformációk fázistoló hatása

7.1 Egyfázisú földzárlat 120 kV-on

Az első példában az egyfázisú földzárlat hatásait ismertetjük. (7-3. ábra) A 120 kV-os (N) és a 0,4 kV-os (k) hálózatrészek földeltek, míg a KÖF (K) részek földeletlenek. A NAF és KIF oldal közötti fázistolás az előzőekben leírtak szerint 0 és 9 óra értéket vesz fel, páros illetve páratlan óraszámok leképezéseként. Ahhoz, hogy meghatározhassuk a fázis és sorrendi összetevőit a rendszernek, elkészítjük a hálózat sorrendi összetevős leképezését. (7-4. ábra)



7-3. ábra: egyfázisú földzárlat 120 kV-on



7-4. ábra: a vizsgált hiba sorrendi összetevős leképezése

Feltételezzük, hogy az impedanciák döntően reaktív jellegűek ($Z = j \cdot X$), illetve hogy arányuk kielégíti a következő összefüggést: $X_1 = X_2 = X_0 \parallel X_{tr}$. Ezen közelítések használatával felírhatjuk az N oldali sorrendi feszültségkomponenseket:

$$U_1^N = E_1 - E_1/3$$

$$U_2^N = 0 - E_1/3$$

$$U_0^N = 0 - E_1/3$$

A sorrendi-fázis transzformáció elvégzése után megállapíthatjuk, hogy a 7-4. ábra által mutatott sorrendi helyettesítőképp megfelelően lett megkonstruálva, hiszen a fázismennyiségek a vártak megfelelően alakulnak:

$$U_a^N = 0$$

$$U_b^N = a^2 \cdot E_1$$

$$U_c^N = a \cdot E_1$$

A k oldali feszültségeket a páros (p) és a páratlan (pt) óraszámok esetére is kiszámoljuk (Ne felejtsük el, hogy a pozitív és a negatív komponensek ellentétes irányban forognak!):

$$U_1^p = U_1^N = E_1 - E_1/3$$

$$U_2^p = U_2^N = 0 - E_1/3$$

$$U_0^p = 0$$

és

$$U_1^{pt} = j \cdot U_1^N = j \cdot E_1 - j \cdot E_1/3$$

$$U_2^{pt} = -j \cdot U_2^N = 0 + j \cdot E_1/3$$

$$U_0^{pt} = 0$$

Miután meghatároztuk a sorrendi feszültségeket, kiszámíthatjuk a fázismennyiségeket is:

$$U_a^p = U_0^p + U_1^p + U_2^p = E_1/3$$

$$U_b^p = U_0^p + a^2 \cdot U_1^p + a \cdot U_2^p = a^2 \cdot E_1 + E_1/3$$

$$U_c^p = U_0^p + a \cdot U_1^p + a^2 \cdot U_2^p = a \cdot E_1 + E_1/3$$

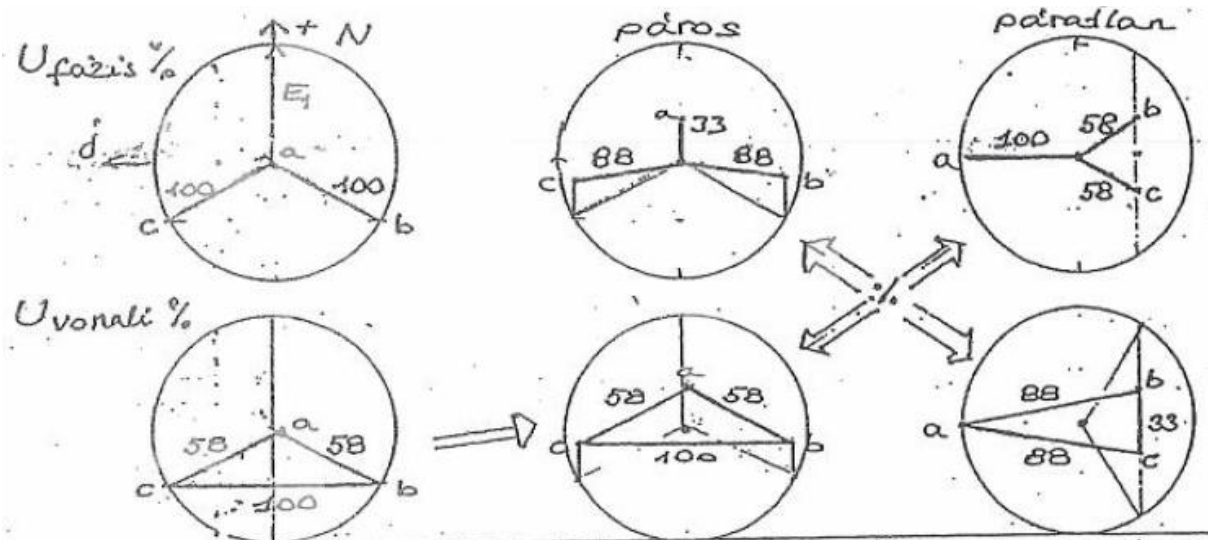
és

$$U_a^{pt} = U_0^{pt} + U_1^{pt} + U_2^{pt} = j \cdot E_1$$

$$U_b^{pt} = U_0^{pt} + a^2 \cdot U_1^{pt} + a \cdot U_2^{pt} = a^2 \cdot j \cdot E_1 - \sqrt{3} \cdot E_1/3$$

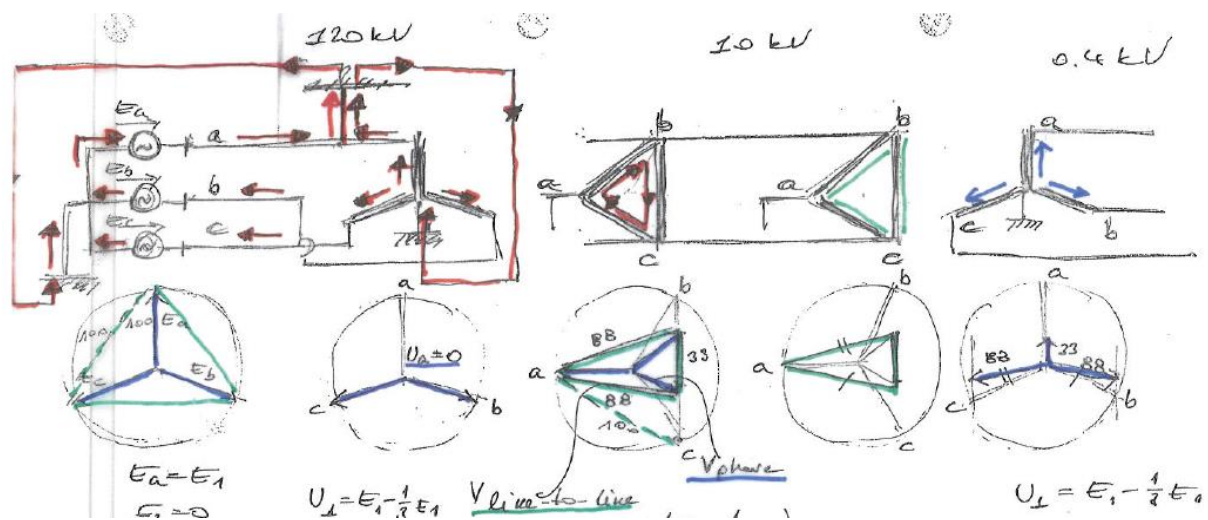
$$U_c^{pt} = U_0^{pt} + a \cdot U_1^{pt} + a^2 \cdot U_2^{pt} = a \cdot j \cdot E_1 + \sqrt{3} \cdot E_1/3$$

A fázisfeszültségek felhasználásával a vizsgált hiba során fellépő fázis és vonali feszültségek egyaránt meghatározhatóak. Ezek fazorábráját mutatja a 7-5. ábra; a felső sorban láthatók a fázismennyiségek, míg az alsóban a vonaliak. Az egyes oszlopok rendre az N oldal, illetve a k oldal páros és páratlan óraszámra érvényes feszültségeit mutatják.



7-5. ábra: fázis- és vonali feszültségek a hiba során

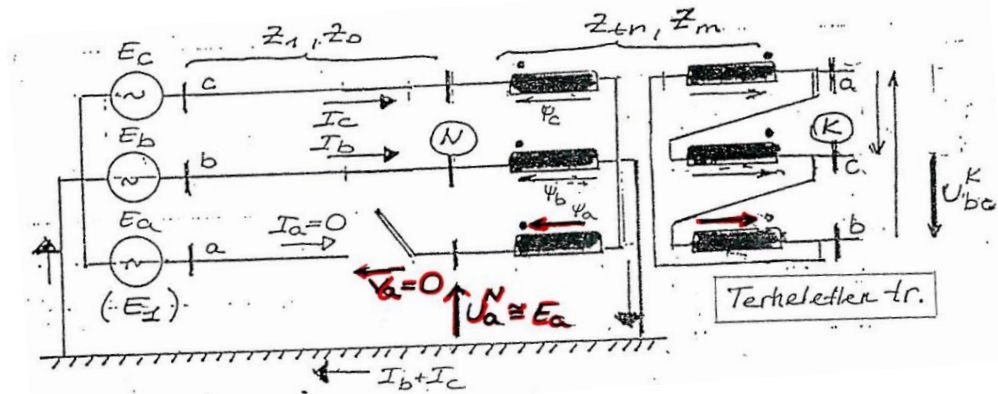
A 7-6. ábra az imént vizsgált egyfázisú földzárlat során kialakuló feszültségek egy részletesebb bemutatását adja, páros órászámot feltételezve az N és a k oldal között.



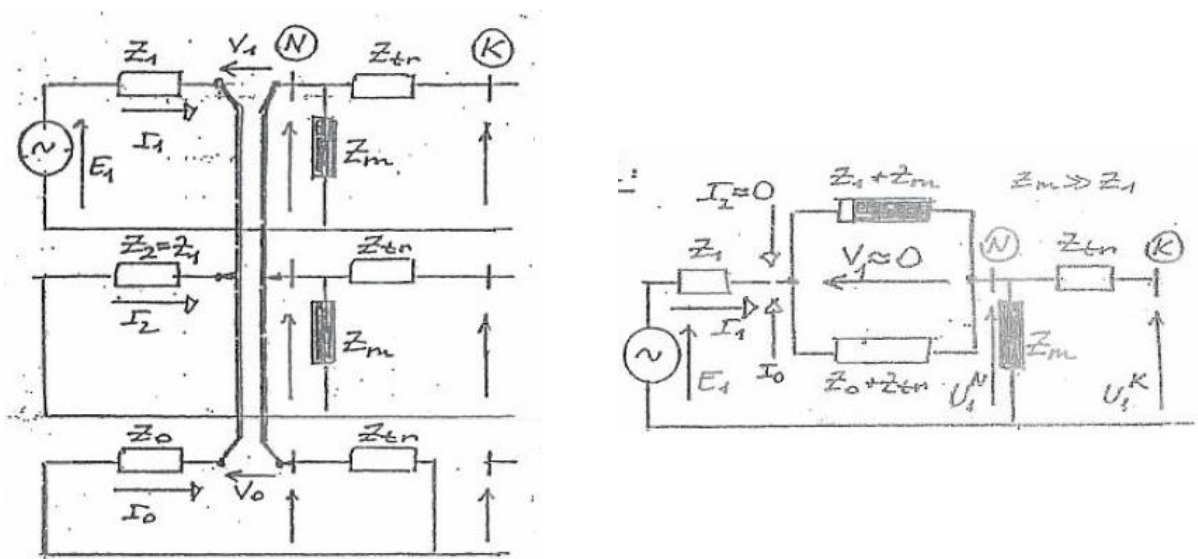
7-6. ábra: fázis- és vonali feszültségek a hiba során, páros órászám

7.2 Egy fázis kikapcsolása 120 kV-on

A második példában azt vizsgáljuk meg, hogy milyen hatást gyakorol a 120 kV-os feszültség szinten bekövetkező egyfázisú soros hiba (kikapcsolás) az alsóbb feszültség szintekre. (A 7-7. ábra mutatja a háromfázisú modellt.) A 120 kV-os hálózat földelt, a KÖF földetlen (delta tekercs) és terheletlen. A tényleges viselkedést ebben az esetben nagyban befolyásolja az üresjárási állapot, mivel a transzformátor a szekunder oldalon mágnesező áramot vesz fel a b és c fázisokban (I_b és I_c). Ennek hatására a delta oldal bc tekercsére kényszerfeszültség kerül, így pedig a csillag oldali a fázison megjelenő fluxus egyenlő lesz $U_a^N \cong -(E_b - E_c)$ -vel, azaz a nyitott kapcsoló pólusai között eső feszültség nagysága zérus ($V_a = 0$). A sorrendi leképezést és annak egy egyszerűsített változatát mutatja a 7-8. ábra.



7-7. ábra: egy fázis kikapcsolása 120 kV-on



7-8. ábra: a vizsgált hiba sorrendi összetevős leképezése

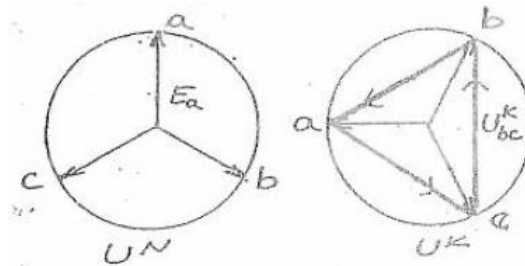
A sorrendi leképezés impedanciáit összehasonlítva feltételezhetjük, hogy $|Z_1 + Z_m| \gg |Z_0 + Z_{tr}|$ és így a negatív sorrendben folyó áram nagysága zérus ($I_2 \approx 0$). Ennek eredményeként $I_1 \approx -I_0$, $I_1 \approx I_m$ és $V_1 \approx 0$. Így a pozitív sorrendű elektromotoros erő nagysága meg fog egyezni az N és a K gyűjtő sínek feszültségével:

$$U_1^N \approx E_1 \text{ és } |U_1^K| \approx |E_1|$$

Ezzel összefüggésben a negatív és zérus sorrendű feszültségek nagysága zérus lesz:

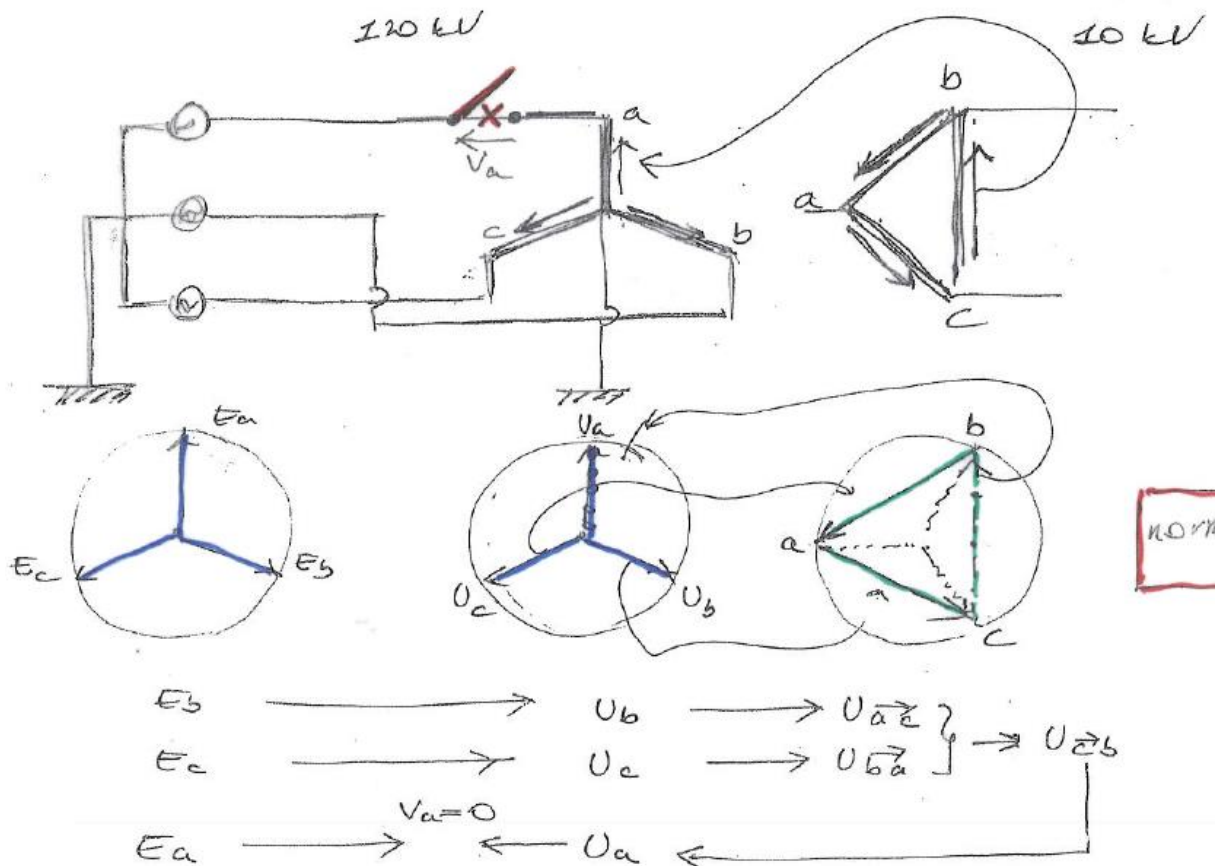
$$U_2^N \approx 0 \text{ és } U_0^N \approx 0$$

Vegyük észre, hogy a hibás üzem ellenére a transzformátor mindkét oldalán épek mind a fázis-, mind a vonali feszültségek! Ezt is mutatja az alábbi fázorábra.



7-9. ábra: fázis- és vonali feszültségek a hiba során

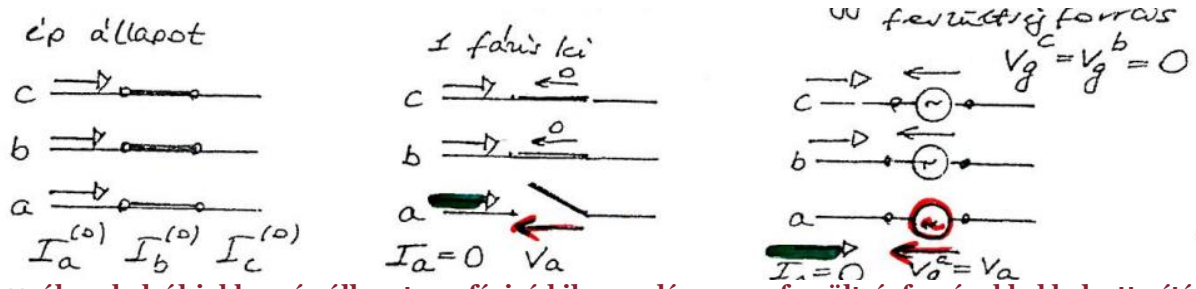
A 7-10. ábra az imént vizsgált egyfázisú kikapcsolás során kialakuló feszültségek egy részletesebb bemutatását adja.



7-10. ábra: fázis- és vonali feszültségek a hiba során

7.3 Egy fázis kikapcsolása, soros feszültségforrásokkal helyettesítés

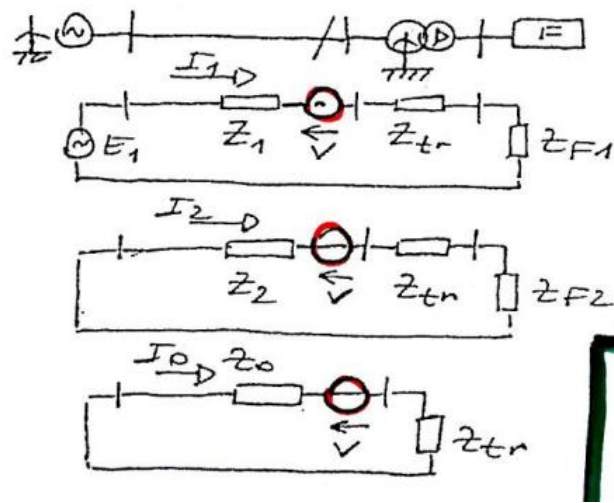
A jelen fejezetben bemutatott eljárás célja, hogy megkönnyítse a bonyolultabb hálózatok hibajelenségeinek vizsgálatát. A módszer alapötlete, hogy minden kapcsolót egy feszültségforrással helyettesít; amennyiben a kapcsoló zárt állapotban van, a rajta eső feszültség zérus, így a helyettesítő feszültségforrás rövidzárként fog viselkedni. (lásd 7-11. ábra) A fázisáramok, illetve sorrendi összetevőik jelölésére az $I_a^{(0)}, I_b^{(0)}, I_c^{(0)}$ és az $I_0^{(0)}, I_1^{(0)}, I_2^{(0)}$ hármast használjuk. V_g feszültség nagyságát úgy választjuk meg, hogy $I_a^{(0)} - I_a^{(V)} = I_a = 0$ teljesüljön, ahol $I_a^{(V)}$ a V_g^a feszültség által létrehozott fiktív áramot jelöli.



7-11. ábra: balról-jobbra: ép állapot, egyfázisú kikapcsolás, soros feszültségforrásokkal helyettesítés

A $V_g^a = 0, V_g^b = 0, V_g^c = 0$ feszültségforrások szimmetrikus komponenseit a 7-12. ábra segítségével határozhatjuk meg:

$$V_1 = V_2 = V_0 = V_a/3 = V$$



7-12. ábra: a vizsgált hiba sorrendi összetevős leképezése, soros feszültségforrások helyettesítésével

Az áramok szuperpozíciójával (a példában $I_2^{(0)} = I_0^{(0)} = 0$):

$$I_1 = I_1^{(0)} - I_1^{(V)}$$

$$I_2 = I_2^{(0)} - I_2^{(V)}$$

$$I_0 = I_0^{(0)} - I_0^{(V)}$$

és

$$I_1 + I_2 + I_0 = I_a = 0$$

Mivel a 7-12. ábra szerinti sorrendi hálózatok egymástól függetlenek, alkalmazható Kirchoff törvénye, és a következő egyenleteket írhatjuk fel:

$$I_1^{(V)} = V/(Z_1 + Z_{tr} + Z_{F1}) = V \cdot Y_1$$

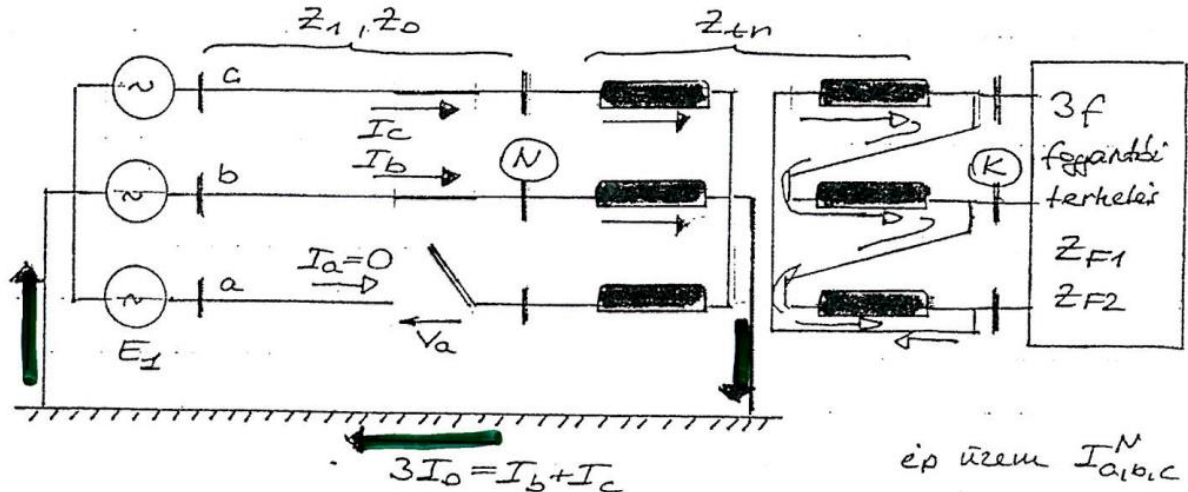
$$I_2^{(V)} = V/(Z_2 + Z_{tr} + Z_{F2}) = V \cdot Y_2$$

$$I_0^{(V)} = V/(Z_0 + Z_{tr}) = V \cdot Y_0$$

A három egyenletet behelyettesítve $I_a = 0$ helyére, átrendezéssel kapjuk:

$$V = \frac{I_1^{(0)} + I_2^{(0)} + I_0^{(0)}}{Y_1 + Y_2 + Y_0}$$

Ezt az újonnan ismertetett módszert használva vizsgáljuk meg ismét a 120 kV-on bekövetkező egyfázisú kikapcsolás hatását, de ezúttal tekintsük a szekunder oldalt (K) terhelés alatt állónak. (7-13. ábra mutatja a modellezett elrendezést)



7-13. ábra: egy fázis kikapcsolása 120 kV-on

Az a fázisban található kapcsoló nyitása előtt a fázisáramok szimmetrikusak voltak:

$$I_a^{(0)} = I_1^{(0)}; I_b^{(0)} = a^2 \cdot I_1^{(0)}; I_c^{(0)} = a \cdot I_1^{(0)}$$

A kapcsoló nyitása után az áramok rendeződnek, az új értékeket pedig a feszültségforrások segítségével tudjuk meghatározni:

$$I_1^{(V)} = Y_1 \cdot V = (Y_1 \cdot I_1^{(0)}) / (Y_1 + Y_2 + Y_0)$$

$$I_2^{(V)} = Y_2 \cdot V = (Y_2 \cdot I_1^{(0)}) / (Y_1 + Y_2 + Y_0)$$

$$I_0^{(V)} = Y_0 \cdot V = (Y_0 \cdot I_1^{(0)}) / (Y_1 + Y_2 + Y_0)$$

illetve

$$V = V_a/3; Y_1 = 1/(Z_1 + Z_{tr} + Z_{F1}); Y_0 = 1/(Z_0 + Z_{tr})$$

Feltételezve, hogy $Z_{F2} = Z_{F1}$ adódik $Y_2 = Y_1$ valamint $I_2^{(V)} = I_1^{(V)} = (Y_1 \cdot I_1^{(0)}) / (2 \cdot Y_1 + Y_0)$. Az admittanciákra vonatkozó $|Y_0| \gg |Y_1|$ szerinti szélső esetben $I_1^{(V)} \ll I_0^{(V)}$ és $I_0^{(V)} \cong I_1^{(0)}$. Az N oldal fázisáramai a következők szerint alakulnak:

$$I_a = I_a^{(0)} - I_0^{(V)} = 0$$

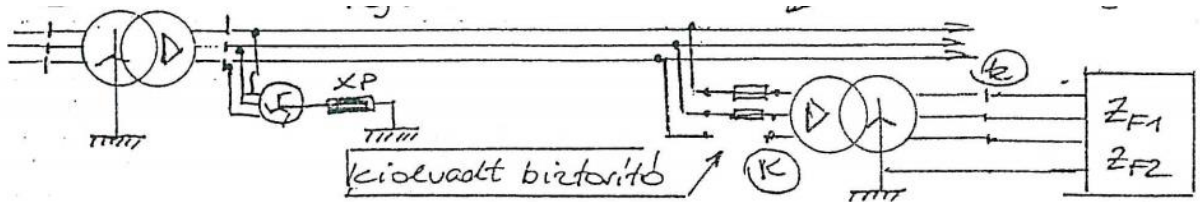
$$I_b = I_b^{(0)} - I_0^{(V)} = I_b^{(0)} - I_1^{(0)}$$

$$I_c = I_c^{(0)} - I_0^{(V)} = I_c^{(0)} - I_1^{(0)}$$

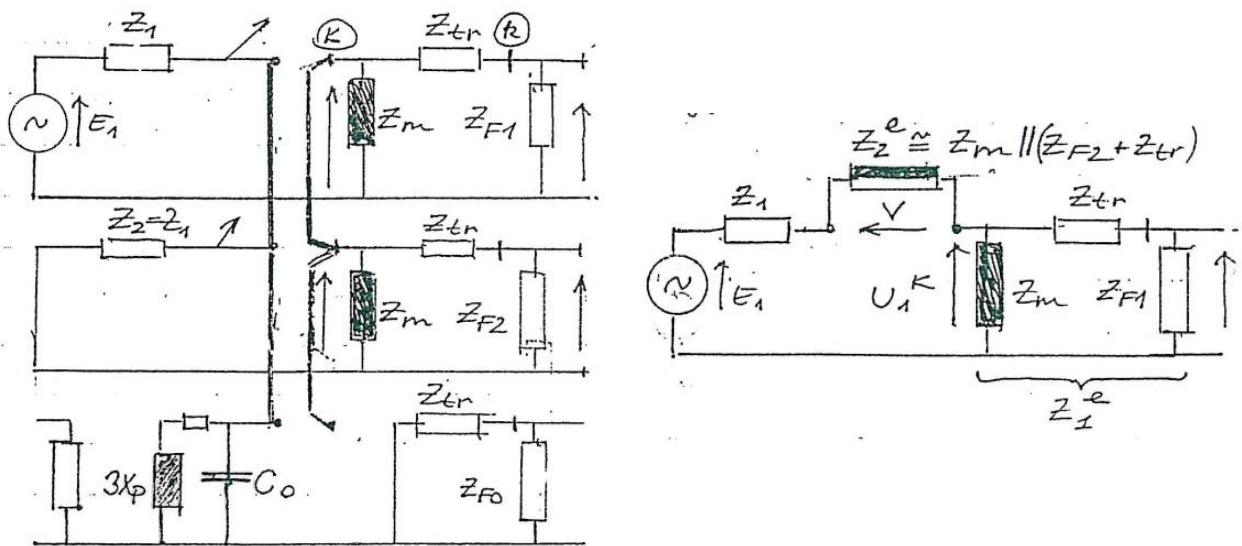
Ami egyben azt is jelenti, hogy $|I_b| = |I_c| = |\sqrt{3} \cdot I_1^{(0)}|$ és $|3 \cdot I_0| = |3 \cdot I_1^{(0)}|$.

7.4 Egy fázis kikapcsolása középfeszültségen

A következő példában a KÖF hálózaton bekövetkező egyfázisú kikapcsolás hatását vizsgáljuk. (A háromfázisú modellt a 7-14. ábra mutatja) A KÖF hálózat földeletlen, a Dy3 kapcsolású elosztóhálózati transzformátor KIF oldala terhelés alatt áll, az egyfázisú kikapcsolást pedig az a fázisban bekövetkező biztosító kioldással modellezzük. Az üzemet ebben az esetben nagyban befolyásolja a távoli Petersen tekercs, a rendszer földkapacitása, illetve a KÖF/KIF transzformátor kapcsolási csoportja, hiszen a zérus sorrendű helyettesítő modell üresjárásnak adódik, így csak a pozitív és negatív sorrendi modelleket kell figyelembe venni. Az ÁBRA mutatja a sorrendi helyettesítőképet (és egy egyszerűsített változatát).



7-14. ábra: egy fázis kikapcsolása középfeszültségen



7-15. ábra: a vizsgált hiba sorrendi összetevős leképezése

A sorrendi modellek impedanciáinak nagyságát összevetve feltételezhetjük, hogy a negatív sorrend helyettesíthető $Z_2^e \approx Z_m \parallel (Z_{F2} + Z_{tr})$ impedanciával. Ha $Z_{F1} \approx Z_{F2}$, $Z_1^e \approx Z_2^e$ írható, így pedig $V = U_1^K = E_1/2$ és $K = -V = -E_1/2$. A k oldal sorrendi és fázis feszültségeit a transzformátor kapcsolási csoportjának segítségével határozhatjuk meg:

$$U_1^k = U_1^K \cdot e^{-j90^\circ} = -j \cdot E_1/2$$

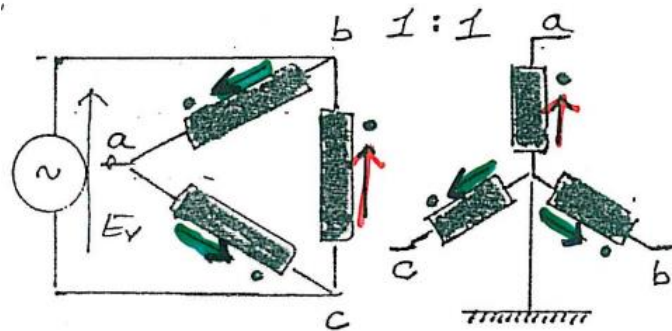
$$U_2^k = U_2^K \cdot e^{+j90^\circ} = -j \cdot E_1/2$$

$$U_a^k = U_1^k + U_2^k = -j \cdot E_1$$

$$U_b^k = U_c^k = (a^2 + a) \cdot (-j \cdot E_1/2)$$

Észrevehetjük, hogy a kiefeszültségű fogyasztók körülbelül kétharmada a névleges feszültség 50%-át fogja csak megkapni, míg a forgó mező hiánya miatt az ide csatlakozó forgógépek nem lesznek képesek üzemelni.

Amennyiben háromfázisú modell és viszonylagos egységek használatával (7-16. ábra) végezzük el a vizsgálatot, ugyanazon eredményekre jutunk.



7-16. ábra: a vizsgált üzemállapot háromfázisú fizikai leképezése

$$E_V = E_b - E_c = \sqrt{3} \cdot E_1 \cdot e^{-j \cdot 90^\circ}$$

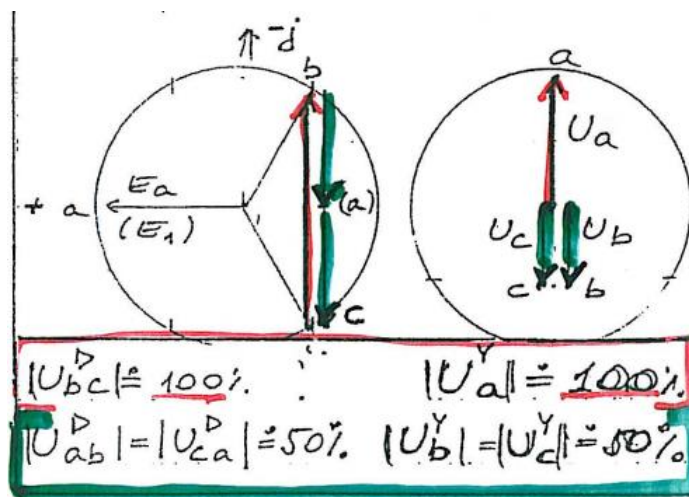
A K oldal feszültségei:

$$U_{bc}^K = E_V; U_{ab}^K = -E_V/2; U_{ca}^K = -E_V/2$$

A k oldal feszültségei

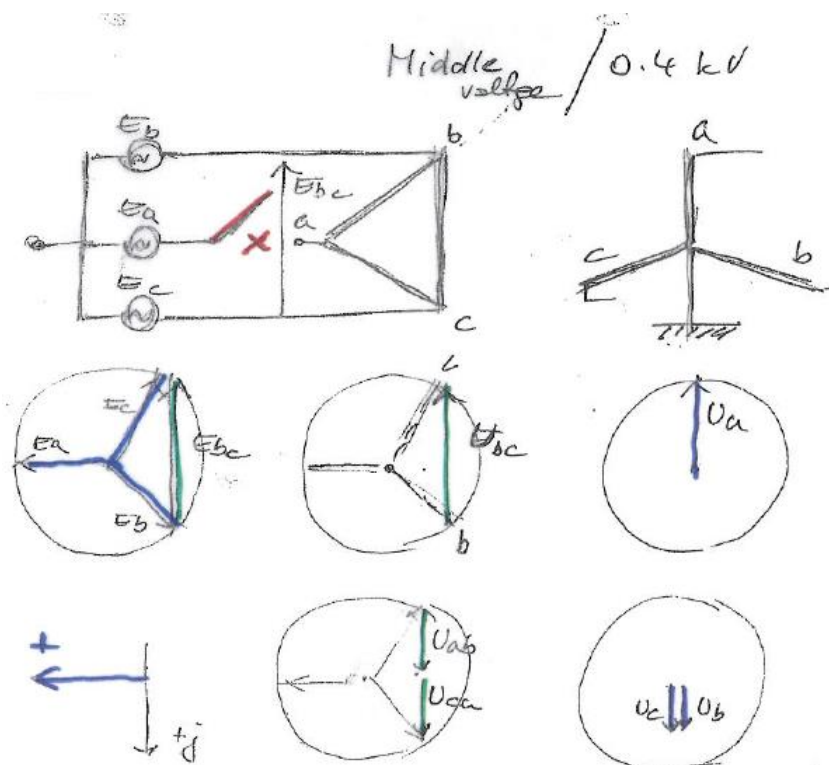
$$U_a^k = U_{bc}^K / \sqrt{3}; U_b^k = U_{ab}^K / \sqrt{3}; U_c^k = U_{ca}^K / \sqrt{3}$$

Az eredmények fázorábrán ábrázolva:



7-17. ábra: fázis- és vonali feszültségek a hiba során

A 7-18. ábra részletesebb képet ad a vizsgált egyfázisú kikapcsolásról, megjelölve a levezetés logikai sorrendjét is.



7-18. ábra: fázis- és vonali feszültségek a hiba során

F1 Függelék – Jellemző villamos paraméterek tervezéshez

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) MVA	P _t MW	Q _c 10km kvar
120	szv.	3*250/40 ACSR	0.117	0.405	9.0	540	112	37.3	400
120	káb.	3*500 Cu	0.070	0.188	170	650	135	244	7700

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) MVA	P _t MW	Q _c 10km kvar
20	szv	3*35 Al	0,825	0,397	8,9	175	6,06	1,06	11,2
		3*50 Al	0,573	0,386	9,2	220	7,62	1,09	11,5
		3*70 Al	0,438	0,376	9,4	260	9,01	1,12	11,8
		3*95 Al	0,311	0,366	9,7	330	11,43	1,15	12,1

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) MVA	P _t MW	Q _c 10km kvar
20	szv	3*25 Ald	1,358	0,410	8,6	180	6,24	1,03	10,8
		3*35 Ald	0,958	0,399	8,9	225	7,79	1,06	11,1
		3*50 Ald	0,665	0,388	9,1	285	9,87	1,09	11,5
		3*70 Ald	0,511	0,375	9,4	335	11,60	1,12	11,8

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) MVA	P _t MW	Q _c 10km kvar
20	káb	3*1*35 Al	0,859	0,152	159	110	3,8	1,8	199,8
		3*1*50 Al	0,631	0,145	175	130	4,5	7,8	219,9
		3*1*70 Al	0,438	0,137	196	158	5,5	8,5	246,3
		3*1*95 Al	0,316	0,130	216	189	6,5	9,1	271,4
		3*1*120 Al	0,251	0,125	235	215	7,5	9,7	295,3
		3*1*150 Al	0,207	0,121	254	240	8,3	10,3	319,2
		3*1*185 Al	0,166	0,117	273	272	9,4	10,8	343,1
		3*1*240 Al	0,127	0,112	304	316	10,9	11,7	382,0
		3*1*300 Al	0,102	0,109	329	356	12,3	12,3	413,4
		3*1*400 Al	0,083	0,105	368	404	14,0	13,3	462,4
		3*1*500 Al	0,068	0,102	402	455	15,7	14,1	505,2

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) MVA	P _t MW	Q _c 10km kvar
10	káb	3*1*35 Al	0,859	0,142	225	108	1,9	2,2	70,7
		3*1*50 Al	0,631	0,135	249	128	2,2	2,4	78,2
		3*1*70 Al	0,438	0,127	283	157	2,7	2,6	88,9
		3*1*95 Al	0,316	0,122	315	187	3,2	2,8	99,0
		3*1*120 Al	0,251	0,117	345	212	3,7	3,0	108,4
		3*1*150 Al	0,207	0,113	374	237	4,1	3,2	117,5
		3*1*185 Al	0,166	0,110	406	269	4,7	3,4	127,5
		3*1*240 Al	0,127	0,105	456	312	5,4	3,7	143,3
		3*1*300 Al	0,102	0,102	495	352	6,1	3,9	155,5
		3*1*400 Al	0,083	0,098	558	399	6,9	4,2	175,3
		3*1*500 Al	0,068	0,096	613	449	7,8	4,5	192,6

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) kVA	P _t MW	Q _c 10km Mvar
0.4	szv	4*16 Al	2,105	0,355		70	48		
		4*25 Al	1,201	0,379		95	66		
		4*35 Al	0,859	0,368		118	82		
		4*50 Al	0,631	0,357		151	105		
		4*70 Al	0,438	0,347		190	132		
		4*95 Al	0,316	0,336		227	157		

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) kVA	P _t MW	Q _c 10km Mvar
0.4	szig szv	4*25 Al	1,201	0,097		110	76		
		4*35 Al	0,859	0,094		120	83		
		4*50 Al	0,631	0,093		140	97		
		4*70 Al	0,438	0,091		190	132		
		4*95 Al	0,316	0,090		200	139		

U kV	tip	mm ² anyag	r ohm/km	x ohm/km	c nF/km	I _{max} A	S _{max} (U) kVA	P _t MW	Q _c 10km Mvar
0.4	káb	4*25 Al	1,201	0,084		82	57		
		4*35 Al	0,859	0,083		100	69		
		4*50 Al	0,631	0,083		119	82		
		4*70 Al	0,438	0,082		152	105		
		4*95 Al	0,316	0,082		186	129		
		4*120 Al	0,251	0,080		216	150		
		4*150 Al	0,207	0,080		246	170		
		4*185 Al	0,166	0,080		285	197		
		4*240 Al	0,127	0,080		338	234		