

## 6. ZÁRLATOK

### 6.1 Zárlat keletkezése

A villamos hálózatok folyamatos nyugodt üzemét leggyakrabban a zárlatok zavarják meg. A zárlat a hálózat olyan sönthibája, amelyet a hálózat különböző fázisvezetői vagy a fázisvezető és a föld illetve földelt nullavezető közötti szigetelés teljes letörése vagy fémes lesöntölése idéz elő.

A villamosenergia-átvitel elemei közül legtöbbször a szabadvezeték hálózatokon keletkezik zárlat. Gyakoribb okai a villámcsapás, vezetékszakadás, összelengés, szigetelő átívelés. Kábeleken a szigetelés átütése vagy külső eredetű sérülése, kapcsoló-berendezésekben átívelés, átütés, szigetelőtörés, téves kezelés, nem megfelelő karbantartás miatt jönnek létre zárlatok.

A zárlat hatására bekövetkező feszültségletörés nagy kiterjedésű hálózatrészekben érezteti hatását, veszélyezteti a kooperációs hálózatra dolgozó erőművek üzemét. A névleges áram 10...20-szorosát elérő zárlati áram termikus és dinamikus hatása erősen igénybe veszi a villamos berendezéseket. Jelentős pusztítást okozhat a zárlati ív is.

A káros hatások elleni védelem alapvető feltétele a zárlati jelenségek, a zárlati áram- és feszültségviszonyok részletes ismerete.

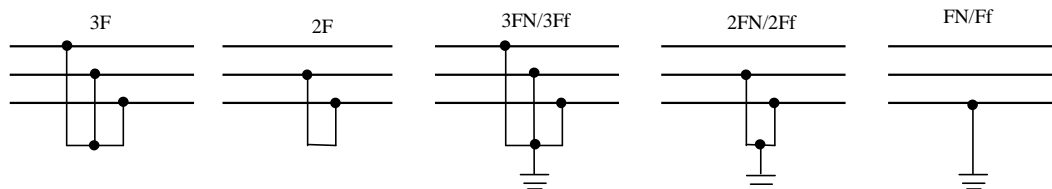
### 6.2 A hálózati zárlatok fajtái

A zárlatot okozó érintkezés létrejöhet közvetlenül vagy villamos íven keresztül. Eszerint megkülönböztetünk fémes, vagy másképpen merev zárlatot, illetve íves zárlatot.

Egyszerű zárlatok a hálózatok azon zárlatai, amelyek az adott időben csak egy hibahelyen lépnek fel. Az egyszerű zárlatok közül a szimmetrikusak mindhárom fázist érintik, az ettől eltérő eseteket aszimmetrikusnak nevezzük.

Egyszerű szimmetrikus zárlatok a következők:

- 3F zárlat      vagy    háromfázisú zárlat
- 3FN zárlat    vagy    szimmetrikus földrövidzárlat
- 3Ff zárlat    vagy    szimmetrikus földzárlat



Egyszerű aszimmetrikus zárlatok:

- 2F zárlat      vagy    kétfázisú zárlat
- 2FN zárlat    vagy    kétfázisú földrövidzárlat
- 2 Ff zárlat    vagy    kétfázisú földzárlat
- FN zárlat     vagy    egyfázisú földrövidzárlat
- Ff zárlat     vagy    egyfázisú földzárlat

Szimultán zárlat (kettős, illetve többszörös zárlat) a hálózatnak az a zárlata, amelyet ugyanazon időben különböző hibahelyeken fellépő egyszerű zárlatok hoznak létre.

A föld felé folyó zárlati áram nagyságát alapvetően befolyásolja, hogy a hálózatnak van-e közvetlenül földelt pontja, vagy csak impedancián keresztül kapcsolódik a földhöz, illetve nincs galvanikus kapcsolat a hálózat és a föld között.

Közvetlenül földelt hálózatokon egyfázisú földzárlat (FN) esetén  $(1...10) \times 10A$  nagyságú rövidzárlati áram folyik. Hasonló nagyságrendű áram folyik a földben 2FN zárlat esetén is. A szigetelt csillagpontú, ill. közvetetten földelt hálózatok (1...35kV) egyfázisú földzárata (Ff) nem jelent rövidzárlatot, a kialakuló áramerősség 10...200A. A 2Ff zárlat esetén is csak az érintett fázisok áramerőssége zárlati nagyságrendű, a földben folyó kisebb értékű. A zárlati áram több nagyságrendű eltérése miatt jelöljük és nevezük másképpen a két hálózattípus földérintéses zárlatát. A nem mereven földelt hálózatok Ff zárlatát földzárlatnak, a közvetlenül földelt hálózatokon fellépő FN zárlatot földrövidzárlatnak nevezük.

A zárlatok előfordulási gyakorisága különféle hálózatokon más és más, a hálózat kialakításától, az oszlopképtől, a földrajzi, éghajlati viszonyoktól stb. függően. Hazánkban az alaphálózat távvezetékein évente és 100 km-enként átlagosan 8-10 zárlat lép fel, melynek kb. 90%-a FN zárlat. Az okok között meghatározó a szigetelők átütése, átívelése. A fáziszárlat azért nem gyakori, mert egyrészt az alaphálózat villámvédő vezetővel készül, másrészt a fázisvezetők távolsága több méter. a 20 és 35kV-os szabadvezetékeink zárlatai gyakorisága 20...30 rövidzárlat évente 100km-re vonatkoztatva. Az alaphálózatokhoz viszonyított nagyobb zárlati gyakoriság oka a védővezető hiánya és a viszonylag kicsi fázistávolság.

### 6.3 A zárlati áramok időbeli lefolyása

A villamosenergia-rendszer hálózatain, berendezéseiben keletkező rövidzárlatokat az erőművek generátorai táplálják. A zárlati áramot korlátozó impedancia időben változó és időben állandó nagyságú összetevőkből áll. Változó összetevő a generátor impedanciája (lásd villamos gépek tantárgy).

#### 6.3.1 Szinkrongépek zárlatai

Ha egy felgerjesztett szinkron generátor kapcsait rövidre zárjuk, a zárlati áram hirtelen igen nagy értékre  $(10...15 \times I_n)$  ugrik fel, majd 2...3s időtartamú átmeneti (tranzien) állapot után üzemi áram nagyságrendűre csökken és a zárlat megszűnéséig gyakorlatilag állandó marad. A zárlati áramnak ezt, az átmeneti jelenségek lejátszódása utáni értékét állandósult zárlati áramnak nevezük. Az állandósult zárlati áramot ( $I_{z\acute{a}}$ ) a névleges fázisfeszültség és a szinkron reaktancia hányadosaként értelmezzük:

$$I_{z\acute{a}} = \frac{U_f}{X_d}$$

A szinkron reaktancia összetevői:

$$X_d = X_s + X_a, \text{ ahol}$$

$X_s$  a generátor armatúratekercsének szórási reaktanciája,

$X_a$  az armatúra visszahatást helyettesítő reaktancia.

Az armatúravisszahatás csökkenti a gép pólusfluxusát, ezért csökken az indukált feszültség és a zárlati áram. Az előzőeket az állandósult zárlati áram számításánál úgy vesszük figyelembe, mintha a pólusfeszültség állandó  $U_f$  nagyságú maradna és a gép szinkron reaktanciája növekedne a kezdeti  $X_s$ -ről  $X_s + X_a$  értékre. A tekercsek nagy önindukciója miatt az armatúravisszahatás kialakulásához idő szükséges, ez az oka a zárlati áram időbeni csökkenésének.

Az állandósult zárlati áram a generátor háromfázisú kapocszárlatánál a legkisebb, egy fázistekercs rövidzárásánál a legnagyobb. A 3F zárlatnál ugyanis a három fázistekercs armatúrafuxusa csökkenti a pólusfluxust, ezért a generátor fokozottabban lemágneseződik.

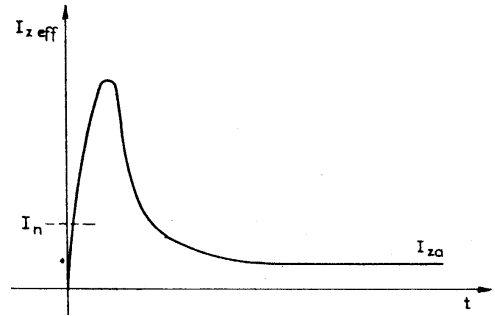
A villamos gépek tantárgyból ismert összefüggések:

$$X_d = \frac{\epsilon_d}{100I} Z_n = \frac{U_f}{I_{z\acute{a}}}, \text{ ebből}$$

$$I_{z\acute{a}} = \frac{100 U_f}{\epsilon_d Z_n}$$

Mivel  $\epsilon_d > 100\%$  és  $I_n = \frac{U_f}{Z_n}$ , ebből következik,

hogy  $I_{z\acute{a}} < I_n$ . Vagyis a korszerű szinkron gépek állandósult kapocszárlati árama kisebb, mint a névleges áram.

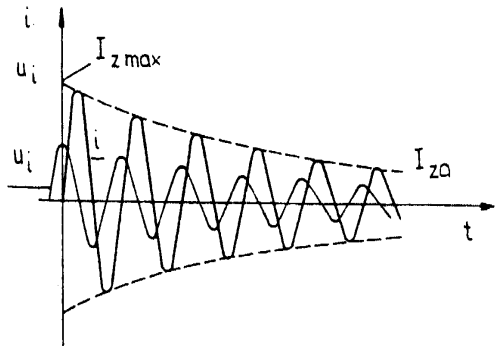


A zárlati áram effektív értékének időbeli lefolyását mutatja az ábra.

A zárlati áram hullámgörbéje az időtengelyhez viszonyítva szimmetrikus, vagy aszimmetrikus lehet, attól függően, hogy a feszültség hullám melyik pontjánál következett be a zárlat. Ennek megfelelően megkülönböztetünk szimmetrikus lefolyású és aszimmetrikus lefolyású zárlatokat.

#### Szimmetrikus lefolyású zárlatok

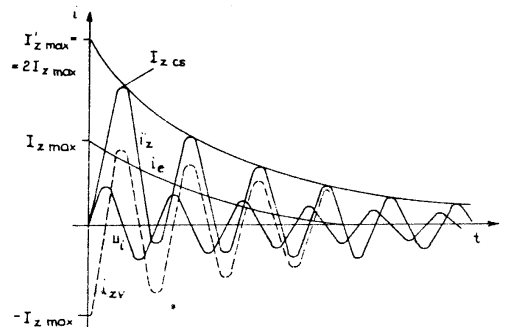
Időben szimmetrikus lefolyású zárlat csak abban az esetben lép fel, ha a feszültség csúcserőértékénél keletkezik. Mivel a generátor impedanciája gyakorlatilag tisztán reaktancia, kapocszárlat esetén a zárlati áram  $90^\circ$ -kal késik a feszültséghez képest. Az alábbi ábrán a zárlati áram és az indukált feszültség időbeli lefolyása látható. A zárlati áram időbeli lefolyásának ábrázolásánál hasznos segítség a változó nagyságú szinusz hullámok csúcseit összekötő burkológörbe megrajzolása. A burkológörbe a  $t=0$  időpillanatra extrapolált  $I_{z\max}$  értékről exponenciális törvény szerint csökken az  $I_{z\acute{a}}$  állandósult értékre.



#### Aszimmetrikus lefolyású zárlatok

A feszültségmaximumtól eltérő esetben bekövetkező zárlatnál az ábrázolt zárlati áram kezdetben aszimmetrikusan hullámzik az időtengelyhez képest. Az alábbi ábra segítségével azt az esetet vizsgáljuk, amikor a zárlat a feszültség nulla értékének pillanatában lép fel.

Az áramkör gyakorlatilag tisztán induktív, az áramnak  $90^\circ$ -kal kell késnie a feszültséghez képest. Ez azt jelenti, hogy a zárlat pillanatában



az addig nulla értékű áramnak hirtelen a negatív félhullám csúcserkére  $-I_{zmax}$ -ra – kellene ugrania, ami viszont fizikai lehetetlenség, mert ebben az esetben végtelen nagy feszültség kellene az önindukció legyőzéséhez. Ezért az áramnak mindenképpen nulla értékről kell kiindulnia, de ugyanakkor  $90^0$ -kal késnie is kell a feszültséghez képest. Ezt az ellenmondást az egyenáramú összetevő megjelenése oldja fel. Kezdeti értéken ugyanolyan nagyságú, de ellentétes értelmű, mint a zárlati áram váltakozó áramú összetevőjének  $t=0$  időponthoz tartozó értéke. A zárlat fellépésekor tehát a zárlati áram váltakozó áramú összetevőjének nagysága éppen a negatív maximum, vagyis  $90^0$ -kal késik a feszültséghez képest, a zárlati áramerődő értéke (a váltakozó áramú és az egyenáramú összetevő előjelhelyes összege) pedig nulla.

Az egyenáramú összetevő is exponenciálisan csökken és néhány perióduson belül megszűnik. Amíg fennáll, addig szuperponálódik a váltakozó áramú hullámra. Ennek következtében az eredő áram az időtengelyhez képest aszimmetrikusan váltakozva csökken. Innen ered az aszimmetrikus zárlat elnevezés. Az ábrán jól látszik a váltakozó áramú összetevő és az eredő zárlati áram hullámrajza. A zárlati áram burkológörbéje az egyenáramú összetevő miatt pontosan kétszer akkora értékűnél kezdődik, mint szimmetrikus zárlat esetén.

$$I'_{zmax} = 2 I_{zmax}$$

Ebben a kifejezésben  $I_{zmax} = \sqrt{2}I_{zeff}$ , ahol  $I_{zeff}$  a váltakozó áramú összetevő kezdeti effektív értéke. Az ábrából is kitűnik, hogy a nulla értékből kiinduló zárlati áram első csúcserkéje ( $I_{zcs}$ ) nem érheti el az

$$I'_{zmax} = 2\sqrt{2}I_{zeff}$$

nagyságot, hiszen a kialakulásáig eltelt idő alatt mind az egyenáramú, mind a váltakozó áramú összetevő csillapodik. A gyakorlatban a dinamikus hatás szempontjából mértékadó csúcserkéket a következő összefüggéssel számolják:

$$I_{zcs} = 1,8\sqrt{2}I_{zeff}.$$

Ezt az áramot szokás lököáramnak is nevezni.

### 6.3.2 A zárlati áram időbeli lefolyásának szakaszai

A szimmetrikus és aszimmetrikus zárlatok vizsgálatánál láthattuk, hogy az armatúravisszahatás fokozatos kialakulása miatt a zárlati áram váltakozó összetevője exponenciálisan csökken. A kezdeti értéket tulajdonképpen csak a szórási reaktancia korlátozza, az első félhullám csúcserkéjét viszont már a kezdődő armatúravisszahatás is csökkenti. A rövidzárást követő néhány másodperc transziens (átmeneti) rövidzárási áramát ( $I_z$ ) rövidzárási kísérlettel állapítják meg, ennek alapján állandó fázisfeszültség feltételezésével lehet számítani az ún. transziens reaktanciát

$$X'_d = \frac{U_{nf}}{I_z}.$$

A transziens reaktancia és a névleges fázisfeszültség ismeretében természetesen számítható is a transziens zárlati áram

$$I'_z = \frac{U_{nf}}{X'_d}.$$

Ha a szinkrongép forgórésze tömör, vagy csillapító rudazatos, akkor a kezdeti lemágneseződés kisebb mértékű, a rövidzárást követően a transziens áramot meghaladó ún. szubtransziens rövidzárlati áram jön létre.

$$I_z'' = \frac{U_{nf}}{X_d''}, \text{ ahol } I_z'' \text{ a szubtranzien্স zárlati áram,}$$

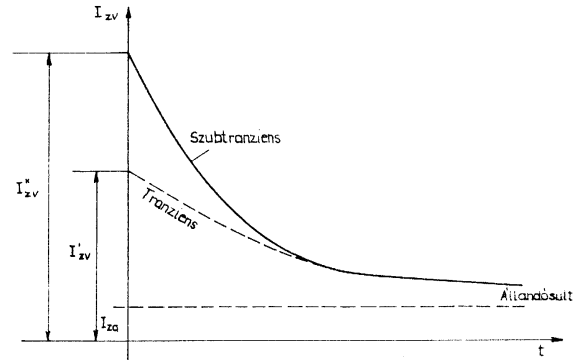
$X_d''$  a szubtranzien্স reaktancia.

A tömör vas és a csillapító rudazat nagy ellenállása miatt a zárlati áram szubtranzien্স összetevője néhány periódus alatt elhal. Az ábra jól szemlélteti a szinkrongép kapocszárlatánál keletkező zárlati áram időbeli lefolyásának három szakaszát. A kezdeti gyorsan csillapodó szubtranzien্স áram burkológörbéjének  $t=0$  időpillanatra visszavetített értéke

$$I_{zv}'' = \frac{\sqrt{2}U_f}{X_d''}.$$

Ugyanez a tranziens áramnál

$$I_{zv}' = \frac{\sqrt{2}U_f}{X_d'} \text{ összefüggéssel számítható.}$$



### 6.3.3 A külső reaktancia figyelembevétele hálózati zárlatnál

Ha a 3F zárlat a generátor kapcsaitól távol következik be, akkor a fázisvezetők reaktanciája (impedanciája) a soros jelleg miatt szintén korlátozza a zárlati áramot. A szubtranzien্স, tranziens és az állandósult zárlati áram  $t=0$  időpillanatra vetített értéke a következőképpen változik:

$$I_{zv}'' = \frac{\sqrt{2}U_f}{X_d'' + X_k}; \quad I_{zv}' = \frac{\sqrt{2}U_f}{X_d' + X_k}; \quad I_{z\acute{a}} = \frac{\sqrt{2}U_f}{X_d + X_k}.$$

Minél nagyobb a távolság a generátor és a zárlati hely között, annál nagyobb a fázisvezetők  $X_k$  külső reaktanciája. Ha  $X_k$  értéke elég nagy, akkor közömbös, hogy  $X_d''$ ,  $X_d'$  vagy  $X_d$  adódik hozzá, vagyis a zárlati áram szubtranzien্স, tranziens és állandósult értéke között gyakorlatilag nem lesz nagy különbség. Fizikai szemlélettel is könnyen belátható, hogy a sok generátorból táplált zárlat áramából egy-egy generátorra viszonylag kis rész jut, az állórész áram csak kevéssel növekszik, az armatúrafluxus pólusfluxusra gyakorolt legerjesztő hatása nem lesz számottevő. Az ilyen, a generátor kapcsoktól, vagyis az erőművektől viszonylag távol eső zárlatokat állandó feszültségről táplált zárlatoknak nevezzük.

Az előbbiekből az is következik, hogy  $X_d''$  és  $X_d'$  egyébként is közeli értékei miatt hálózati zárlatoknál elsősorban a szubtranzien্স és tranziens áramok közötti különbség válik elhanyagolhatóvá. Ezért a gyakorlati számolásoknál a hálózati zárlatoknál a generátorokat a tranziens reaktanciájukkal vesszük figyelembe és az áram időbeni csekély csillapodásával nem törődünk.

### 6.4 A zárlatszámítás alapelvei, módszerei

A zárlatok romboló hatása elleni hatékony védelem alapfeltétele a zárlati áram várható értékének ismerete. Ezt a célt szolgálja a zárlatszámítás.

A zárlatot rendszerint nem egy, hanem több erőmű, tehát sok generátor táplálja. Ezeket a hibahellyel rendszerint párhuzamos áramutak kötik össze. A számítás első lépése mindig a hálózati elemek (generátorok, transzformátorok, fojtótekercek, szabadvezetékek, kábelek) egyedi impedanciájának meghatározása, majd ezekből a vizsgált hálózat helyettesítő

kapcsolásának felrajzolása. Ezt követi az esetleges hurkolt részek átalakítása, a soros és párhuzamos részelemek összevonása. A végeredmény egy egyszerű áramkör, amely egyetlen generátort és egyetlen impedanciát tartalmaz. Ebből a hibahely zárlati árama Ohm törvénye alapján megállapítható.

A zárlati áram párhuzamos ágak közti megoszlását az áramosztó elv alapján határozhatjuk meg, a hálózat egyes pontjain a zárlat alatt uralkodó feszültséget pedig a hibahely nulla feszültségéből kiindulva az egyes elemek ismert impedanciáján átfolyó, s az áramosztás eredményeként már ugyancsak ismert áramok által okozott feszültségesésekből állapíthatjuk meg, a hibahelytől az áramforrások felé haladva.

A következőkben a szimmetrikus zárlatok (3F) gyakorlatban alkalmazott számítási módszereiből ismerhetünk meg kettőt. Mindegyik módszert egyszerűsítettük az alábbi, a kielégítő pontosságot nem veszélyeztető elhanyagolásokkal:

- a zárlatokat állandó feszültségről táplálnak tekintjük,
- a szinkron generátorokat tranziens reaktanciájukkal vesszük figyelembe,
- a hálózatokat terheletlennek tekintjük.

#### 6.4.1 Zárlatszámítás a reaktanciák ohmokban megadott értékeivel

A hálózati elemek komplex impedanciái helyett – a bonyolult, sok hibalehetőséget magába foglaló számítások elkerülése végett – általában skaláris értékekkel számolunk, csak a reaktanciákat vesszük figyelembe, a rezisztenciákat elhanyagoljuk. Így a számolt zárlati áram a ténylegesnél nagyobb értékű, de az eltérés nem jelentős. Az egyes hálózati elemek reaktanciáit az alábbiak szerint határozhatjuk meg:

Távvezetékek, kábelek:

$$X = x l \quad \begin{array}{l} \text{távvezeték} \quad x = 0,4 \dots 0,5 \text{ } \Omega/\text{km} \\ \text{kábel} \quad \quad \quad x = 0,1 \dots 0,2 \text{ } \Omega/\text{km}. \end{array}$$

Generátorok:

$$X_G = \frac{\varepsilon U_n^2}{100 S_n} \quad \text{ahol } \varepsilon \text{ a generátor tranziens reaktanciája százalékos értékben,}$$

$S_n$  a generátor látszólagos teljesítménye,  
 $U_n$  a generátor névleges feszültsége.

Transzformátorok:

$$X_T = \frac{\varepsilon U_n^2}{100 S_n} \quad \text{ahol } \varepsilon \text{ a transzformátor dropja,}$$

$S_n$  a transzformátor látszólagos teljesítménye,  
 $U_n$  a transzformátor névleges feszültsége.

Fojtótekercek:

$$X_F = \frac{\varepsilon U_n^2}{100 S_n} \quad \text{ahol } \varepsilon \text{ a fojtótekerecs százalékos reaktanciája,}$$

$S_n$  a fojtótekerecs látszólagos teljesítménye,  
 $U_n$  a fojtótekerecs névleges feszültsége.

Mögöttes hálózat:

$X_H = \frac{U_n^2}{S_{zH}}$  ahol,  $S_{zH}$  a mögöttes hálózat zárlati teljesítménye, ha a zárlat a csatlakozó gyűjtősínen következik be,  
 $U_n$  a mögöttes hálózat névleges feszültsége.

A transzformátorok miatt az egyes hálózati elemek reaktanciái különböző névleges feszültségekre vonatkoznak, így közvetlenül nem vonhatók össze. Ki kell jelölni egy  $U_{sz}$  számítási feszültséget és az összes hálózati elem reaktanciáját erre a feszültségre kell átszámolni. A reaktanciák redukálását úgy kell elvégezni, hogy közben a zárlati teljesítmény ne változzon meg.

$$S_z = \frac{U_n^2}{X_n} = \frac{U_{sz}^2}{X'}, \quad \text{ebből} \quad X' = \frac{U_{sz}^2}{U_n^2} X_n.$$

A képletben  $X'$  az  $U_n$  névleges feszültségű,  $X_n$  névleges reaktanciájú hálózatelem  $U_{sz}$  számítási feszültségre redukált reaktanciája.

A transzformátor, generátor és fojtótekerics redukált reaktanciája:

$$X' = \frac{U_{sz}^2}{U_n^2} X_n = \frac{U_{sz}^2}{U_n^2} \frac{\varepsilon}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{\varepsilon}{100} \frac{U_{sz}^2}{S_n}.$$

A mögöttes hálózat redukált reaktanciája:

$$X' = \frac{U_{sz}^2}{U_n^2} X_n = \frac{U_{sz}^2}{U_n^2} \frac{U_n^2}{S_{zH}} = \frac{U_{sz}^2}{S_{zH}}.$$

Redukált reaktanciákból épül fel a hálózat egyfázisú helyettesítő kapcsolása. Az így kialakított, látszólag több sarkú kapcsolat egyik pólusa a zárlat helye. A másik pólust az áramforrásokat helyettesítő redukált reaktanciák szabad kapcsainak összekötésével kapjuk. A feszültségforrás a számítási feszültség fázisértékét szolgáltató ideális generátor.

Az  $X_e'$  eredő redukált reaktanciát az elektrotechnikában megismertek (soros és párhuzamos elemi részek egymást követő összevonása, szükség esetén háromszög-csillag átalakítás) szerint lehet meghatározni. Az egy fázisban folyó zárlati áram a számítási feszültség fázisértéke és az  $X_e'$  reaktancia hányadosaként számolható:

$$I_z' = \frac{U_{sz}}{\sqrt{3} X_e'} = \frac{U_{sz}}{\sqrt{3} X_e'}$$

Ha a választott számítási feszültség nem azonos a zárlatos szakasz névleges feszültségével, akkor a számított zárlati áramot ( $I_z'$ ) a teljesítményazonosság elve alapján át kell redukálni ( $I_z$ ) az adott szakasz névleges feszültségére:

$$U_{sz} I_z' = U_n I_z, \quad \Rightarrow \quad I_z = \frac{U_{sz}}{U_n} I_z'$$

A háromfázisú zárlati teljesítmény:

$$S_z = \sqrt{3}U_{sz} I'_z = \sqrt{3}U_{sz} \frac{U_{sz}}{\sqrt{3}X'_e} = \frac{U_{sz}^2}{X'_e}$$

Az alábbi mintapéldán mutatjuk be a zárlatszámítás menetét:

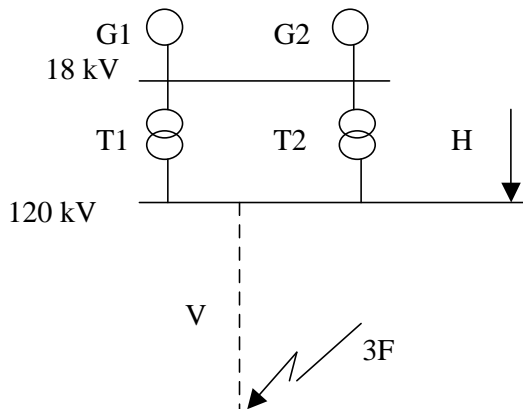
Végezzünk zárlatszámítást az alábbi hálózatrészleten:

G1; G2: 125 MVA,  $\epsilon$ : 10%

T1; T2: 125 MVA,  $\epsilon$ : 8%

V:  $x' = 0,3 \Omega/\text{km}$ ,  $l=50 \text{ km}$

H: 1250MVA

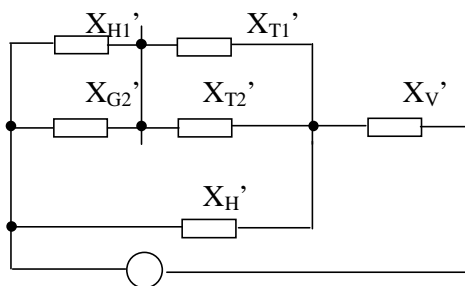


Feladatok:

- Határozza meg a zárlati teljesítmény nagyságát!
- Határozza meg a szimmetrikus zárlati áram effektív értékét!
- Határozza meg az aszimmetrikus zárlati áram csúcserőértékét, ha  $\kappa=1,8$ !
- Határozza meg, hogy a generátorok egyenként, ill. a mögöttes hálózat mekkora teljesítménnyel táplálják a zárlatot!

Megoldás:

a)



$U_{sz} = 10\text{kV}$ , ezért az összefüggések következőképpen alakulnak:

Generátoroknál, transzformátoroknál, fojtótekerceknél:

$$X' = \frac{\epsilon}{100} \frac{U_{sz}^2}{S_n} = \frac{\epsilon}{100} \frac{10^2}{S_n} = \frac{\epsilon}{S_n}$$



Mögöttes hálózatoknál:

$$X' = \frac{U_{sz}^2}{S_{zH}} = \frac{10^2}{S_{zH}} = \frac{100}{S_{zH}}$$

Távvezetékekénél:

$$X' = \frac{U_{sz}^2}{U_n^2} X = \frac{10^2}{U_n^2} X = \frac{100X}{U_n^2}$$

Ezen összefüggések alkalmazásával:

$$X_H' = \frac{100}{S_{zH1}} = \frac{100}{1250} = 0,08(\Omega) \quad X_{T1}' = X_{T2}' = \frac{\epsilon_T}{S_T} = \frac{8}{125} = 0,064(\Omega)$$

$$X_{G1}' = X_{G2}' = \frac{\epsilon_G}{S_G} = \frac{10}{125} = 0,08(\Omega) \quad X_V' = \frac{100 \cdot X' \cdot l}{U_n^2} = \frac{100 \cdot 0,3 \cdot 50}{120^2} = 0,104(\Omega)$$

$$X_{GT}' = \frac{X_{G1}'}{2} + \frac{X_{T1}'}{2} = \frac{0,08}{2} + \frac{0,064}{2} = 0,072(\Omega)$$

$$X_{GTH}' = \frac{X_{GT}' \cdot X_H'}{X_{GT}' + X_H'} = \frac{0,072 \cdot 0,08}{0,072 + 0,08} = 0,038(\Omega)$$

$$X_e' = X_{GTH}' + X_V' = 0,038 + 0,104 = 0,142(\Omega)$$

$$S_{z1} = \frac{100}{X_e'} = \frac{100}{0,142} = 704,22(\text{MVA})$$

b)

$$I_Z = \frac{S_Z}{\sqrt{3}U_Z} = \frac{704,22}{\sqrt{3} \cdot 120} = 3,39(\text{kA})$$

c)

$$I_{zacs}' = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_Z = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 3,39 = 8,63(\text{kA})$$

d)

$$S_{zH}' = S_Z \frac{X_{GTH}'}{X_H'} = 704,22 \frac{0,038}{0,08} = 334,5(\text{MVA})$$

$$S_{zG1} = S_{zG2} = \frac{S_Z - S_{zH}'}{2} = \frac{704,22 - 334,5}{2} = 184,86(\text{MVA})$$

### 6.4.2 Záratszámítás az reaktanciák százalékos értékével

A hálózati elemek jelentős részénél (generátorok, transzformátorok, fojtótekercek) a reaktanciák százalékos értékét alapadatként ismerjük. Ezen hálózatok záratait az egyszerűbb redukálhatóság miatt célszerű a reaktanciák százalékos értékeivel számolni.

A számítások elvégzéséhez először egy  $S_a$  számítási alapteljesítményt kell választani (célszerűen 1 MVA, 10 MVA vagy 100 MVA) és erre kell átszámítani az egyes elemek százalékos reaktanciáját. Az átszámítás ezen módszernél is a zárlati teljesítmény változatlanságán alapul.

$$S_z = \frac{100}{\varepsilon_n} S_n = \frac{100}{\varepsilon'} S_a. \quad \text{Ebből} \quad \varepsilon' = \varepsilon_n \frac{S_a}{S_n}$$

Ezzel az összefüggéssel redukáljuk a transzformátorok, generátorok és fojtótekercek százalékos reaktanciáját.

Szabadvezetékek és kábelek esetén:

$$\varepsilon_n = \frac{\sqrt{3}IX_n}{U_n} 100 = \frac{\sqrt{3} \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} X_n}{U_n} 100 = \frac{S_n X_n 100}{U_n^2}$$
$$\varepsilon' = \varepsilon_n \frac{S_a}{S_n} = \frac{S_n X_n 100}{U_n^2} \frac{S_a}{S_n} = \frac{100 X_n S_a}{U_n^2}$$

A mögöttes hálózat felfogható egy olyan hálózati elemnek, amelynek százalékos feszültségesése  $\varepsilon_n = 100\%$  A redukált százalékos reaktancia:

$$\varepsilon' = \varepsilon_n \frac{S_a}{S_n} = 100 \frac{S_a}{S_{zH}}$$

A helyettesítő kapcsolás kialakítása, az eredő százalékos reaktancia meghatározása az ohmos módszerrel leírtak szerint történik.

A háromfázisú zárlati teljesítmény:

$$S_z = \frac{100}{\varepsilon_e} S_a.$$

A zárlati áram:

$$I_z = \frac{S_z}{\sqrt{3}U_n},$$

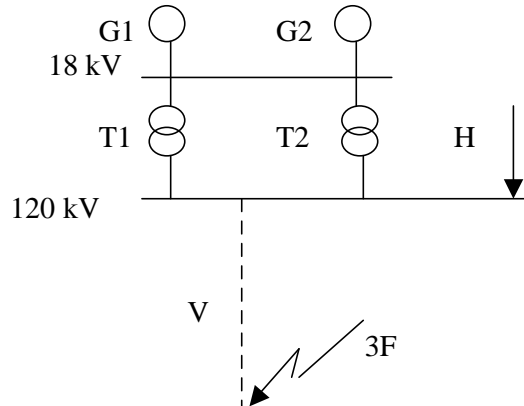
ahol  $U_n$  a zárlatos hálózatelem névleges (vonali) feszültsége.

A módszer gyakorlati alkalmazását az ohmokban megadott reaktanciáknál megoldott példával mutatjuk be.

Példa:

Végezzen zárlatszámítást az alábbi hálózatrészleten:

- G1; G2: 125 MVA,  $\epsilon$ : 10%  
 T1; T2: 125 MVA,  $\epsilon$ : 8%  
 V:  $x' = 0,3 \Omega/\text{km}$ ,  $l = 50 \text{ km}$   
 H: 1250MVA



Feladatok:

- Határozza meg a zárlati teljesítmény nagyságát!
- Határozza meg a szimmetrikus zárlati áram effektív értékét!
- Határozza meg az aszimmetrikus zárlati áram csúcserőértékét, ha  $\kappa = 1,8$ !
- Határozza meg, hogy a generátorok egyenként, ill. a mögöttes hálózat mekkora teljesítménnyel táplálják a zárlatot!

Megoldás:

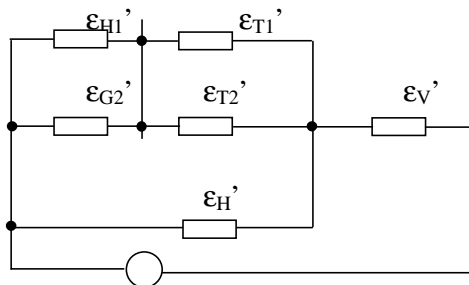
Az  $S_a$  számítási alapteljesítményt  $S_a = 1\text{MVA}$ -nek választva, az összefüggések az alábbiak szerint alakulnak:

generátor, transzformátor, fojtótekerecs:  $\epsilon'_{GTF} = \epsilon_{GTF} \frac{S_a}{S_{GTF}} = \frac{\epsilon_{GTF}}{S_{GTF}}$

szabadvezeték, kábel:  $\epsilon'_V = \frac{100X_V}{U_n^2} S_a = \frac{100X_V}{U_n^2}$

mögöttes hálózat:  $\epsilon'_H = \frac{100}{S_{zH}} S_a = \frac{100}{S_{zH}}$

a)



$$\begin{aligned}\varepsilon_H' &= \frac{100}{S_{ZH1}} = \frac{100}{1250} = 0,08(\%) & \varepsilon_{T1}' = \varepsilon_{T2}' &= \frac{\varepsilon_T}{S_T} = \frac{8}{125} = 0,064(\%) \\ \varepsilon_{G1}' = \varepsilon_{G2}' &= \frac{\varepsilon_G}{S_G} = \frac{10}{125} = 0,08(\%) & \varepsilon_V' &= \frac{100 \cdot x \cdot l}{U_n^2} = \frac{100 \cdot 0,3 \cdot 50}{120^2} = 0,104(\%) \\ \varepsilon_{GT}' &= \frac{\varepsilon_{G1}'}{2} + \frac{\varepsilon_{T1}'}{2} = \frac{0,08}{2} + \frac{0,064}{2} = 0,072(\%) \\ \varepsilon_{GTH}' &= \frac{\varepsilon_{GT}' \cdot \varepsilon_H'}{\varepsilon_{GT}' + \varepsilon_H'} = \frac{0,072 \cdot 0,08}{0,072 + 0,08} = 0,038(\%) \\ \varepsilon_e' &= \varepsilon_{GTH}' + \varepsilon_V' = 0,038 + 0,104 = 0,142(\%) \\ S_{Z1} &= \frac{100}{\varepsilon_e'} = \frac{100}{0,142} = 704,22(\text{MVA})\end{aligned}$$

b)

$$I_Z = \frac{S_Z}{\sqrt{3}U_Z} = \frac{704,22}{\sqrt{3} \cdot 120} = 3,39(\text{kA})$$

c)

$$I_{zacs}' = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_Z = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 3,39 = 8,63(\text{kA})$$

d)

$$S_{ZH}' = S_Z \frac{\varepsilon_{GTH}'}{\varepsilon_H'} = 704,22 \frac{0,038}{0,08} = 334,5(\text{MVA})$$

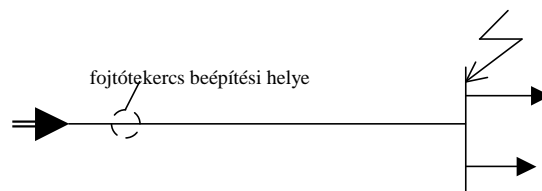
$$S_{ZG1} = S_{ZG2} = \frac{S_Z - S_{ZH}'}{2} = \frac{704,22 - 334,5}{2} = 184,86(\text{MVA})$$

## 6.5 Zárlatkorlátozó fojtótekerics

A zárlati áramok és teljesítmények nagysága a különböző feszültségű hálózatokon növekvő tendenciát mutat. Ennek oka, hogy az erőművek, vezetékek, transzformátorok számának növekedése csökkenti az eredő impedanciát, így a zárlati áram növekszik. A zárlat romboló hatása miatt gondoskodni kell a zárlati áram (teljesítmény) korlátozásáról. Ennek megoldásai lehetnek: zárlatkorlátozó impedanciák alkalmazása, különleges hálózati kapcsolások, automatikák és áramkorlátozó biztosítók. Itt a zárlatkorlátozó fojtótekerccsel foglalkozunk

A zárlatkorlátozó fojtótekerics a hálózat soros eleme, reaktanciája megnöveli a zárlati áramkör eredő reaktanciáját, ezáltal a zárlati áram és a zárlati teljesítmény előre meghatározható értékűre csökken. Ha például az alábbi fogyasztói állomáson 3F zárlat keletkezik, a távvezetéken

$$I_z = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_e} = \frac{U_{nf}}{X_e} \text{ nagyságú zárlati áram folyik és a zárlati teljesítmény } S_z = \frac{U_n^2}{X_e}.$$



A fojtótekerics beépítése után

$$I_{zc} = \frac{U_{nf}}{X_e + X_f}; \quad S_{zc} = \frac{U_n^2}{X_e + X_f}$$

A zárlati áram és a zárlati teljesítmény fordítottan arányos a reaktanciával. Könnyű belátni, hogy

$$I_{zc} < I_z \quad \text{és} \quad S_{zc} < S_z.$$

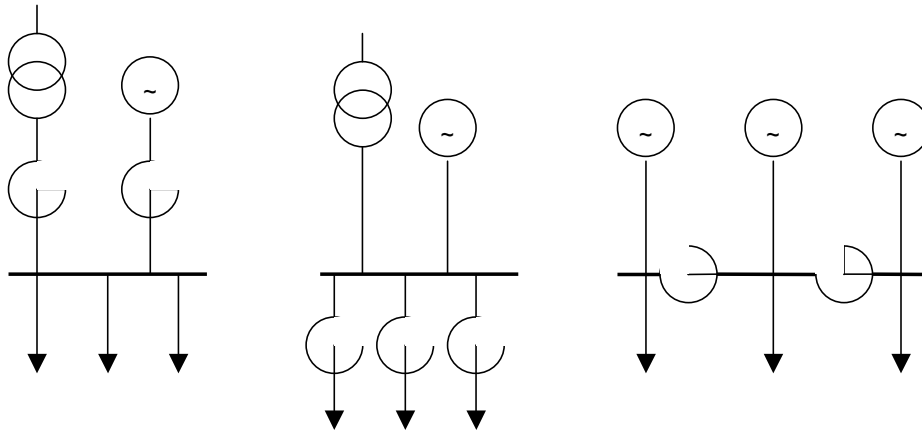
A gyakorlatban az ismert  $U_n$  és  $S_z$  értékekhez kell akkora  $X_f$  fojtóreaktanciát választani, hogy a zárlati teljesítmény valamilyen szempont alapján kijelölt  $S_{zc}$  értékűre csökkenjen.  $X_f$  meghatározásához átrendezve írjuk fel az egyenletet:

$$X_e + X_f = \frac{U_n^2}{S_{zc}}, \text{ az eredeti adatokból kifejezett } X_e = \frac{U_n^2}{S_z} - t \text{ behelyettesítve}$$

$$X_f = \frac{U_n^2}{S_{zc}} - \frac{U_n^2}{S_z}.$$

A zárlatkorlátozó fojtótekerics alkalmazását általában gazdaságossági szempontok indokolják. Egy készülék vagy berendezés ugyanis annál drágább, minél nagyobb zárlati teljesítmény elviselésére alkalmas, vagyis minél nagyobb a zárlati szilárdsága.

A fojtótekerics kapcsoló-berendezésben történő elhelyezésére a következő megoldások terjedtek el:



Elhelyezésük:

betáplálás - 120/ középfeszültségű transzformátorok középfeszültségű oldalára, vagy a gyűjtősínes erőművek generátorai és a gyűjtősín közé iktatják

leágazásokba- elmenő vonalakba - ez a leggyakoribb.

gyűjtősínbe - kisebb teljesítményű gyűjtősínes erőművek gyűjtősínjeit több szakaszra bontják és ezeket fojtótekericsen keresztül kapcsolják össze. Ezáltal az egyes sínszakaszok vagy azokról elmenő vonalak zárlataira a többi sínszakaszra csatlakozó generátorok által rátáplált zárlati áramot korlátozzák.

A fojtótekerics légmagos szolenoid, a három egyfázisú egységet egymás tetejére állítva helyezik el úgy, hogy zárlat esetén az egymás fölötti tekercsek vonzzák egymást. Ha lehetőség van rá a földémhez rugós leszorító szerkezetet is erősítenek. A jelentős zárlati

erőhatásnak ellenálló mechanikai váz betonból készül. A tekercselés szigetelése impregnált papíros. Az egymás fölé szerelt fázistekercsek között porcelán támszigetelők helyezkednek el. A síncsatlakozásra kiképzett tekercskivezetések az egységek alján és tetején vannak. Maguk az egységek elfordíthatók úgy, hogy a síncsatlakozások térbelileg a helyi adottságokhoz illeszkedjenek.

Többszintes kapcsoló-berendezésben az alsó szinten helyezik el őket úgy, hogy a szórt mezejébe ne kerüljenek nagy keresztmetszetű vasból készült szerkezeti elemek, mert azokban káros túlmelegedés léphetne fel.

A tekercs névleges áramát úgy kell megválasztani, hogy az nem lehet kisebb mint a leágazásé, ahova beépítésre kerül.

#### A fojtótekercsek villamos jellemzői

A fojtótekercsek ohmokban kifejezett reaktanciája állandó, csak a százalékos reaktanciájának értéke változik a feszültséginttől függően. (Az alkalmazott támszigetelők mérete is ettől függ)

#### Névleges feszültség:

A támszigetelők méretének megválasztása függ ettől 10, 20 és 35 kV lehet.

Névleges áram- megválasztásánál ügyelni kell arra, hogy ne korlátozza a vele sorbakapcsolt készülék, berendezés terhelhetőségét.

50, 100, 160, 200, 250, 320, 500, 630, 800 és 1000 A

A fojtótekercs névleges fázisteljesítményének az  $X_f$  reaktancián átfolyó  $I_n$  névleges áram által létrehozott meddő teljesítményvesztéséget nevezzük, azaz egy fázisra:

$$Q_{nf} = I_n^2 X_f \text{ (var).}$$

A hazai gyártmányú fojtótekercsek névleges fázisteljesítményének sorozata:

35, 50, 75, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500 és 630 kvar.

A fojtótekercs átmenő teljesítménye a névleges áram és a beépítési hely névleges feszültségének szorzata szintén egy fázisra számolva:

$$S_{áf} = U_{nf} I_n \text{ (VA).}$$

A fojtótekercs átmenő teljesítménye tehát nem értelmezhető a beépítési hely névleges feszültsége nélkül, a névleges teljesítmény viszont független attól. A kétféle teljesítmény között a fojtótekercs százalékos reaktanciája teremt kapcsolatot. A százalékos reaktancia fogalmából:

$$\frac{\varepsilon}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3}} = I_n X_n \Rightarrow \varepsilon = \frac{\sqrt{3} I_n X_f}{U_n} 100(\%).$$

A kifejezés számlálóját és nevezőjét  $\sqrt{3} I_n$ -nel megszorozva

$$\varepsilon = \frac{3 I_n^2 X_f}{\sqrt{3} U_n I_n} 100 = \frac{3 Q_{nf}}{S_a} 100 = \frac{Q_n}{S_a} 100.$$

A fojtótekercs százalékos reaktanciája tehát nem egyéb, mint a háromfázisú névleges teljesítménye a háromfázisú átmenő teljesítményének százalékában.

Dinamikus zárlatbiztonság - úgy kell értelmezni, hogy végtelen nagy zárlati teljesítményű - azaz zárlat esetén merev feszültségű - pontról táplálva a fojtótekerccset, annak mechanikailag ki kell bírnia a kapcsainál fellépő zárlat legnagyobb áramcsúcsát.

A zárlati áram effektív értéke ilyenkor:  $I_{\text{zeff}} = \frac{100}{\varepsilon} \cdot I_n$

*A dinamikus zárlatbiztonság általános feltételi egyenlete:*

$$1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{zeff}} \leq D \cdot I_n$$

A fojtótekerccsek dinamikus zárlatbiztonsági szorzója általában  $D=50$ . Ezt behelyettesítve és átrendezve:

$$\varepsilon = \frac{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 100}{50} \geq 5(\%)$$

Ez azt jelenti, hogy egy fojtótekerccs akkor zárlatbiztos, ha a százalékos reaktanciája 5 %-nál nagyobb

A fojtótekerccs termikus zárlatbiztonsága:

A zárlatbiztonsági szorzótényező  $T=40$ , tehát az 1 s-ig megengedhető termikus határáram (másodpercáram):  $I_t = 40 \cdot I_n$

A gyártmánykatalógusok a három másodpercig elviselhető zárlati áramot tüntetik fel.

## 6.6 A lekapcsolási teljesítmény

A zárlat keletkezése és a megszakító működése között eltelik egy kis idő, általában  $t > 0,25$ s. Ez alatt az  $I_z$  egyenáramú összetevője gyakorlatilag megszűnik, sőt a váltakozó áramú összetevő is csillapodik. Ezt egy „ $\mu$ ” tényezővel vesszük figyelembe, amely 1-nél kisebb érték. Ezt táblázatokból, ill. diagramokból lehet kiválasztani minden egyes generátorra, amely táplálja a zárlatot. Mögöttes hálózat esetén  $\mu = 1$ . A lekapcsolási teljesítmény:

$$S_k = 1,1\mu_1 S_{z1} + 1,1\mu_2 S_{z2} + \dots + 1,1\mu_n S_{zn}$$

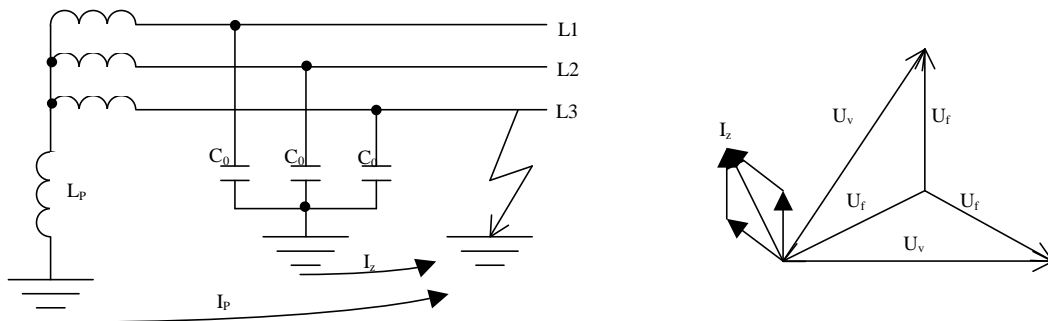
Az összefüggésben az 1,1 szorzótényező a generátoroknál alkalmazott gyorsrágerjesztő automatika működését veszi figyelembe.

## 6.7 Szigetelt csillagpontú hálózat földzárata

A nem közvetlenül földelt csillagpontú hálózatokon az egyfázisú földzáratok nem igényelnek azonnali kikapcsolást, mert a fellépő földzárlati áram kicsi. Az energiaszolgáltatás a földzárlat ellenére hosszabb rövidebb ideig fenntartható, sőt kompenzációval a földzáratok többségét kitevő ún. ívelő zárlatok nagy része az üzem megzavarása nélkül megszüntethető. Az alábbi ábra segítségével vizsgáljuk meg a földzárlati feszültség és áramviszonyokat. A csillagponthoz kapcsolt nagy induktív reaktanciájú tekercs hatását először nem vesszük figyelembe.

Zavarmentes üzemben a fázisvezetők földdel alkotott kapacitásai a hálózat csillagpontját földpotenciálon tartják, tehát a hálózat mindhárom fázisának a földhöz viszonyított feszültsége  $U_f$ .

Ha tartós Ff földzárlat következik be, az érintett fázis földdel alkotott kapacitását a zárlat rövidre zárja, a vezető potenciálját a földhöz rögzíti, a másik két fázis földhöz viszonyított feszültségét  $U_f$ -ről  $U_v$ -ra, a csillagponttét 0-ról  $U_f$ -ra emeli.



Az ép fázisok földhöz viszonyított kapacitásán átfolyó áram szintén megnő, mégpedig

$$I'_c = \sqrt{3}I_{c0} = \sqrt{3}U_f \omega C_0 \text{ értékűre, ahol}$$

$C_0$  – az egyes fázisok földhöz viszonyított kapacitása. A két töltőáram vektoros eredője:

$$I_c = 3U_f \omega C_0.$$

Ívelő zárlat keletkezik, ha valamelyik fázis íven keresztül (szigetelő átível) érintkezik a földdel (föld potenciálú ponttal). Az ív periódusonként kétszer kialszik. Az első kialakításig úgy viselkedik, mintha fémes Ff zárlat lenne. Vizsgáljuk meg a jelenséget. Tételezzük fel, hogy a földzárlat a feszültség hullám csúcsertékénél következett be. A csillagpont feszültsége a földhöz képest nulláról a földzárlatos fázis feszültségére ugrik. Az ív kialszik, de a csillagpont a földkapacitások miatt fázisfeszültségen marad, ezért a hibás fázis feszültsége  $U_{csp} + U_f$ -re (kb.  $2U_f$ -re) nő, ez ismét átütéshez vezet, ív keletkezik. Az áram nullátmenetekor az ív kialszik, a csillagpont már kétszeres fázisfeszültségre kerül. A hibás fázis feszültsége megint emelkedik,  $U_{csp} + U_f$ , már kb.  $3U_f$  és ez a jelenség általában  $5U_f$ -ig tart, mert ekkor már egy ép fázis is átüt és 2Ff zárlat keletkezik, amire a védelem már működik. A valóságban a jelenség lassabban játszódik le a csillapítások miatt. A gyakorlat azt mutatja, hogy 5A-nál kisebb földzárlati áram esetén az ív nem tud fennmaradni, ezért cél a földzárlati áram ilyen mértékűre való csökkentése.

### Földzárlat-kompensálás

A földzárlat-kompensáció célja párhuzamos rezonancia létesítésével a zárlati hibaáram lecsökkentése olyan értékűre, hogy az ívelő zárlat ne tudjon fennmaradni. A megvalósítás lehetőségei:

- a csillagpont földelése induktivitáson (Petersen tekerecs) keresztül;
- Bauch transzformátor alkalmazása (Magyarországon nem használatos).

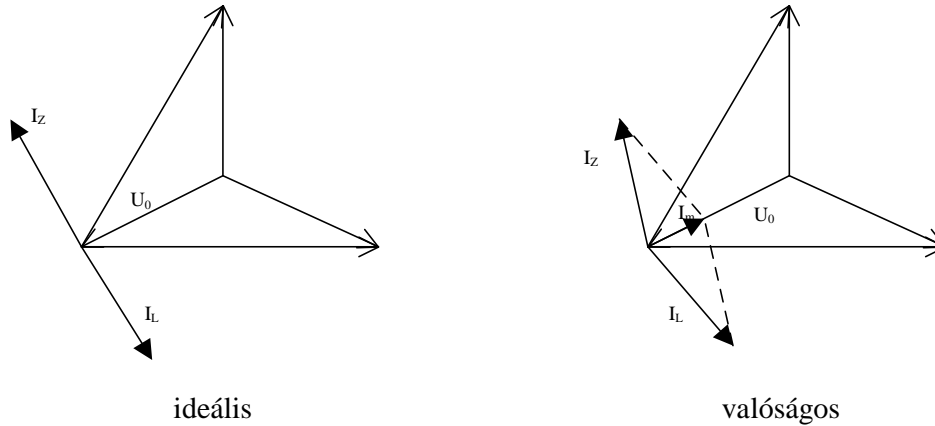
Részletesen a hazai gyakorlatban elterjedt Petersen tekerces (íveltő tekerecs) kompenzációval foglalkozunk. A transzformátor csillagpontja és a földközé kapcsolt  $X_L$  reaktanciájú tekercsen földzárlatkor  $U_f$  feszültség jelenik meg. Hatására folyó

$$I_L = \frac{U_f}{X_L} = \frac{U_f}{\omega L}$$

induktív áram a zárlatos fázison, a hibahelyen és a földön keresztül záródik,  $90^\circ$ -kal késik a csillagponti  $U_0 = U_f$  feszültséghez viszonyítva. A vektor ábrából is látható, hogy  $I_L$  és  $I_c$



iránya ellentétes. Ha tehát nagyságuk egyenlő, akkor eredőjük nulla, vagyis a hibahelyen nem folyik áram.



A kompenzáló tekercs (ívoltó tekercs) induktivitását tehát úgy kell megválasztani, hogy

$$I_L = I_C$$

legyen. Behelyettesítve az előzőekben meghatározott értékeket

$$\frac{U_f}{\omega L} = 3U_f \omega C_0 \quad \Rightarrow \quad \omega L = \frac{1}{3\omega C_0}$$

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0}$$

A valóságban a hálózati elemek hatásos ellenállása, valamint a sugárzás és a levezetés miatt az  $I_C$  kapacitív és az  $I_L$  induktív áramok hatásos összetevőt is tartalmaznak, ezért ezek egymással  $180^\circ$ -nál kisebb szöveget zárnak be. Eredőjük tehát nem nulla, hanem egy viszonylag kicsi ún. maradék áram. Az ívoltás sikeressége érdekében ezt a maradék kell 5A (esetleg 10A) alá csökkenteni.

A Petersen tekercs elhelyezése háromszög kapcsolású transzformátor esetén:

