

$$Q = CU$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

ahol „A” a felületek nagyságát, d a távolságát jelenti.

Amennyiben a kondenzátorokat párhuzamosan kapcsoljuk, akkor ezek eredőjét az alábbi módon határozhatjuk meg:

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_i$$

Soros kapcsolás esetén az eredő:

$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

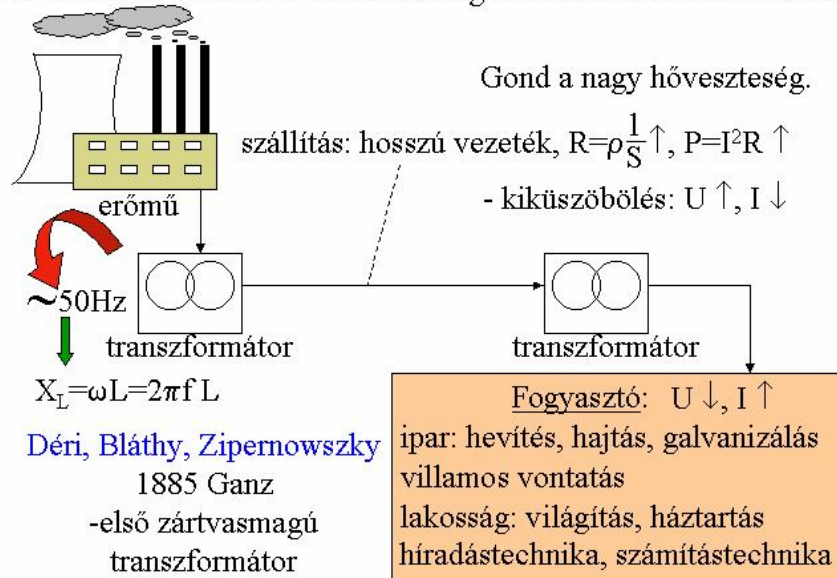
4. Villamos gépek

A villamos gépek – mint minden más gép is – energiát alakítanak át, ezért szokás energiaátalakító berendezésekről beszélni. A transzformátorok villamos energiából villamos energiát képeznek, a forgó villamos gépek többnyire mechanikai energiát alakítanak át villamos energiává vagy fordítva.

4.1. Transzformátorok

A transzformátorokat a műszaki élet legkülönbözőbb területein használják. Alkalmazásukkal a villamos energia jellemzőit (feszültségét, áramerősségét, néha fázisszámát) változtatják meg. Azokat a transzformátorokat, amelyek a villamos energia átvitelében vesznek részt, gyűjtőnéven „erőátviteli” transzformátoroknak nevezzük.

A transzformátornak a villamosenergia átvitelében van fontos szerepe.



80. ábra

Természetesen a műszaki élet egyéb területein is használnak transzformátorokat, pl. elektronika, távközléstechnika, biztonságtechnika, stb. Az alkalmazás célja nagyon változó: feszültség, áram vagy impedancia átalakítása lehet a cél.

4.1.1. Egyfázisú transzformátorok

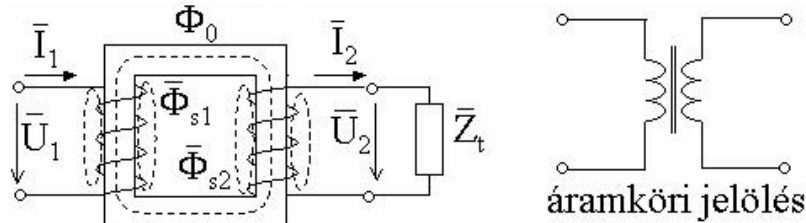
A transzformátorok működését az egyfázisú transzformátorok esetén vizsgáljuk. A transzformátorok működési elve a Faraday féle indukción alapszik, azaz:

$$u_i = N \frac{d\Phi}{dt}$$

A transzformátorok legfontosabb szerkezeti eleme a vasmag és az ezen elhelyezett egy vagy több tekercs. A transzformátor vasmagját általában lemezelten készítik, hogy csökkentsék az örvényáramú veszteséget (vasvesztés = örvényáramú + hiszterézis veszteség). A vasmag kialakítása szerint létezik

- mag
- láncszem
- köpeny

típusú transzformátor.



81. ábra

A fenti ábrában Φ_0 az ún. főfluxus, Φ_{s1} és Φ_{s2} a primer és szekunder tekercsen valamint a levegőn keresztül záródó ún. primer és szekunder szórt fluxus.

Az energiaáramlás szempontjából nézve primer tekercsnek nevezzük azt az oldalt, ahova az energiát be-tápláljuk. Szekunder tekercs az, ahonnan az energiát elvezetjük a fogyasztó/terhelés (Z_t) táplálása érdekében.

Határozzuk meg a transzformátor tekercseiben indukálódó feszültséget:

$$\Phi_0 = \Phi_{0\max} \cdot \sin \omega t$$

Az indukciótörvényt felhasználva:

$$u_{i1} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_0}{dt} = N_1 \cdot \Phi_{0\max} \cdot \cos \omega t$$

$$u_{i2} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_0}{dt} = N_2 \cdot \Phi_{0\max} \cdot \cos \omega t$$

Az indukált feszültség maximuma:

$$u_{i\max} = 2\pi f N \Phi_{0\max}$$

$$u_i = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f N \Phi_{0\max} = 4,44 \cdot f N \Phi_{0\max}$$

Azaz az indukált feszültség a tekercsekben:

$$u_{i1} = 4,44 f N_1 \Phi_{0\max}$$

$$u_{i2} = 4,44 f N_2 \Phi_{0\max}$$

A menetszámáttétel nem más, mint a menetszámok aránya:

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

Az indukált feszültségek aránya megegyezik a menetszámáttétellel. Ezt hívjuk feszültségáttétellek:

$$a_u = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = a = \frac{N_1}{N_2}$$

Ezt az áttételt üresjárásban mérve:

$$U_{i2} = U_{20}$$

$$U_{i1} \approx U_1$$

$$a_u \approx \frac{U_1}{U_{20}}$$

Az áramáttétel a feszültségáttétel reciproka:

$$U_{i1} \cdot I_1 = U_{i2} \cdot I_2$$

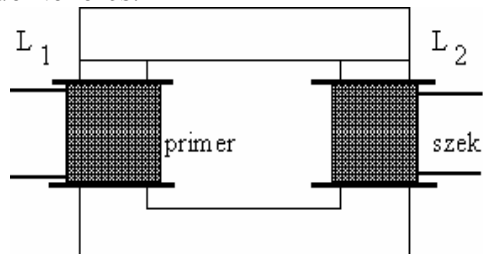
$$a_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_{i2}}{U_{i1}} = \frac{1}{a_u} = \frac{1}{a}$$

Az impedanciaáttétel:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\frac{U_1}{I_1}}{\frac{U_2}{I_2}} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} = a^2$$

4.1.1.1. Egyfázisú transzformátor szerkezete

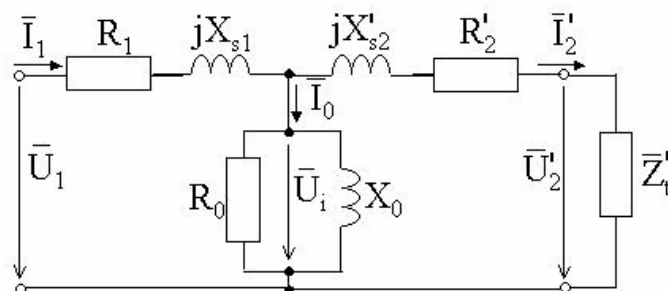
Az alábbi ábra a hagyományos, két tekercses transzformátorok kialakítását mutatja, külön oszlopon helyezkedik el a primer és a szekunder tekercs.



82. ábra

4.1.1.2. Helyettesítő kapcsolási vázlat

Az alábbi ábra mutatja a transzformátorok villamos helyettesítő kapcsolási képét. Ez egy műkapcsolás, amelyhez a transzformátor tényleges fizikai folyamataitól való elvonatkoztatással jutunk. A helyettesítő kapcsolási vázlat ellenállások és reaktanciák kombinációja, amely bizonyos elhanyagolásokkal úgy viselkedik, mint az erőátviteli transzformátor állandósult állapotban.



83. ábra

A helyettesítő kapcsolásban szereplő elemek jelentése:

R_1, R_2 : primer illetve szekunder tekercs ohmikus ellenállása

X_{S1}, X_{S2} : primer illetve szekunder oldali szórási reaktancia

R_0 : vasvesztéséget szimbolizáló ellenállás

X_0 : a főfluxust szimbolizáló reaktancia

Z_t : terhelő impedancia

A vessző (') jelentése: szekunder oldali mennyiségek átszámítása/redukálása a primer oldalra az áttétel (a) figyelembe vételével (pl. $R'_2 = a^2 R_2$)

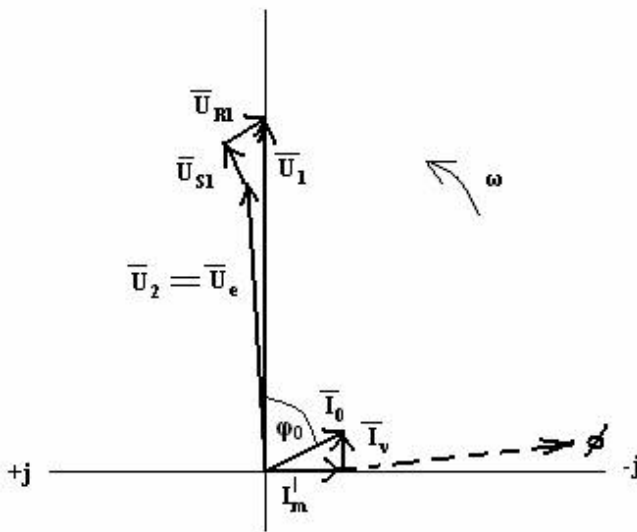
A helyettesítő képben szereplő mennyiségek egymáshoz viszonyított aránya a következő:

$$R_1 : R_2 : X_{S1} : X_{S2} : X_0 : R_0 = 1 : 1 : 2 : 2 : 1000 : 10000$$

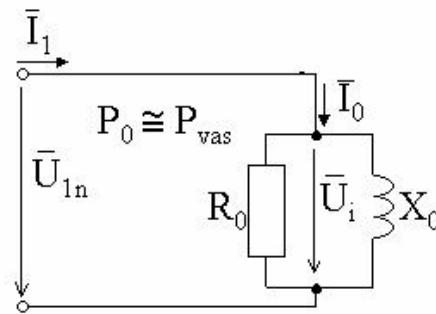
Vizsgáljuk meg a transzformátorok működését különböző üzemállapotban: üresjárásban, névleges terhelésnél és rövidzár esetén.

4.1.1.3. Üresjárás

Üresjárás esetén a transzformátor szekunder kapcsaira nem kapcsolunk terhelést, így a szekunder tekercsben nem folyik áram. Az egyszerűsített helyettesítő kép a 85. ábrán, az üzemállapotra jellemző vektorábra a 84. ábrán látható.



84. ábra



85. ábra

Üresjárás esetén:

$$\cos \varphi \sim 0,1$$

$$I_2' = 0 \Rightarrow \bar{U}_2 = \bar{U}_e$$

$$\bar{U}_e + \bar{U}_{S1} + \bar{U}_{R1} + \bar{U}_1 = 0$$

$$\bar{U}_e = \bar{U}_1 - \bar{U}_{R1} - \bar{U}_{S1}$$

ahol:

- U_1 : primer kapocsfeszültség
- I_v : üresjárási áram wattos komponense
- I_m : üresjárási áram meddő komponense
- I_0 : üresjárási primer áram
- φ_0 : üresjárási fázisszög ($\cos \varphi_0$ üresjárási teljesítmény tényező értéke: $\sim 0,1$)
- U_{R1} : primer tekercs ellenállásán eső feszültség
- U_{S1} : primer tekercs reaktanciáján eső feszültség
- U_e : főfluxus által indukált feszültség

A főfluxus által indukált feszültséget úgy kapjuk meg, hogy az U_1 primer kapocsfeszültségből levonjuk az üresjárási áram által a primer tekercs ellenállásán és szórási reaktanciáján okozott feszültségeket. Az ohmos feszültség fázisban van az üresjárási árammal, a szórt fluxus által indukált feszültség pedig negyed periódussal siet (induktív feszültség).

4.1.1.4. Terhelés

Terheléskor a szekunder kapcsokra fogyasztókat kapcsolunk. A fogyasztókon és a szekunder tekercsen keresztül megindul az I_2 szekunder áram, illetve a helyettesítő kapcsolási vázlat redukált szekunder tekercsén keresztül az I_2' redukált szekunder áram. Nagyságát és fázisát a fogyasztók szabják meg. A fogyasztók általában wattos és meddő teljesítményt is fogyasztanak. Ezért I_2 , illetve I_2' általában késik a szekunder kapocsfeszültség mögött.

Az üzemállapotra jellemző egyenletek:

$$\begin{aligned} I_2' &\neq 0 \\ \bar{U}_e &= \bar{U}_1 - \bar{U}_{R1} - \bar{U}_{S1} \\ \bar{U}_2' &= \bar{U}_e - \bar{U}_{S2}' - \bar{U}_{R2}' \end{aligned}$$

A terhelt transzformátor I_1 primer árama nagyobb, mint az I_0 üresjárású primer áram és más a fázisa. Ezért megváltoztak a primer áram által a primer tekercs ellenállásán és szórási reaktanciáján okozott feszültségeseések is:

$$\begin{aligned} U_{R1} &= I_1 \cdot R_1 \\ U_{S1} &= j \cdot S_1 \cdot I_1 \end{aligned}$$

Ezért változatlan U_1 primer kapocsfeszültség esetén kis mértékben megváltozik U_e is.

$$U_e = U_1 - I_1 \cdot R_1 - j \cdot X_{S1} \cdot I_1$$

Rövidebben jelölve:

$$U_e = U_1 - U_{R1} - U_{S1}$$

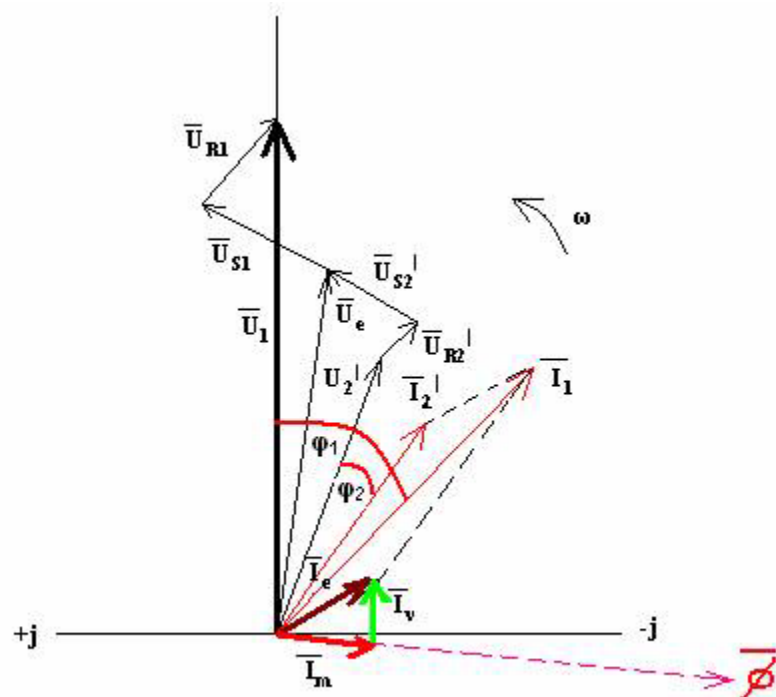
A redukált szekunder kapocsfeszültség:

$$U_2' = U_e - j \cdot X_{S2}' \cdot I_2' - R_2' \cdot I_2'$$

Rövidebben jelölve:

$$U_2' = U_e - U_{S2}' - U_{R2}'$$

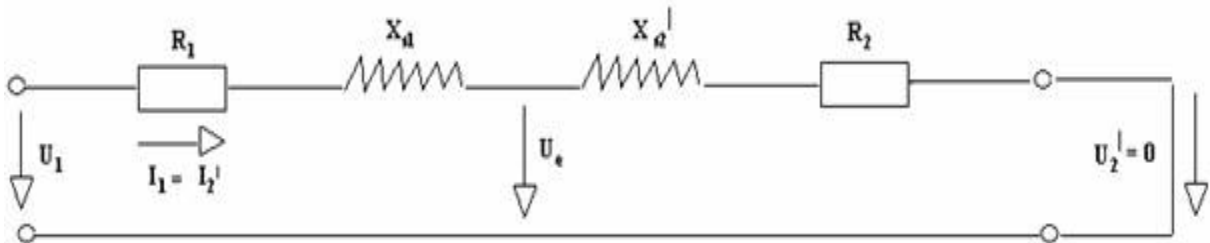
Névleges terhelés esetén az érvényes vektorábra a fentiek alapján az alábbi ábrán látható:



86. ábra

4.1.1.5. Rövidzárás

A rövidzárási állapot az üresjárásival ellentétes szélső terhelési állapot. A szekunder kapcsokat rövidre zárjuk, de ez az állapot nem üzemszerű állapot! Hosszú ideig nem tartható fent, mert a tekercsekben folyó áramok erőssége 10-25-szor nagyobb, mint névleges terhelés esetén. Ez az állapot a transzformátor tönkremenetelét okozhatja ezért különböző védelmeket (pl. megszakítók, olvadó biztosítók) kell beépíteni. A lekapcsolásnak olyan rövid idő alatt kell megtörténnie, hogy a tekercsek ne égjenek el a rövid lekapcsolási idő alatt (nincs idejük felmelegedni). A primer, illetve szekunder árammal arányosan megnövekszik a szórt fluxusok. A szórt fluxusok nagy mechanikai erőt fejtenek ki a tekercsekre a rövidzárási állapotban, ezért a mechanikai méretezésnél ez figyelembe kell venni. Az üzemállapotban érvényes helyettesítő kép az alábbi ábrán látható:



87. ábra

Rövidzárás esetén az alábbi összefüggések érvényesek:

$$I_1 = I_2' = \frac{\bar{U}_1}{R_1 + jX_{S1} + R_2' + jX_{S2}}$$

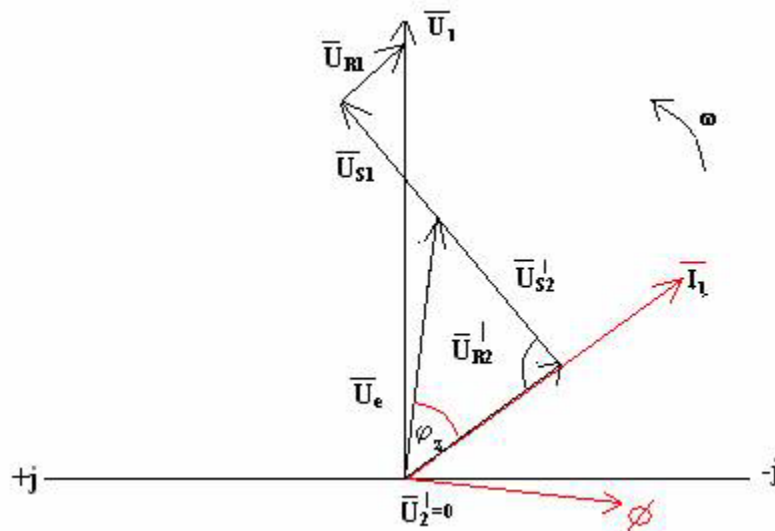
$$I_{lrz} \approx I_{1n} 10 \div 30$$

$$\bar{U}_e = \bar{U}_{R2}' + \bar{U}_{S2}'$$

$$\bar{U}_e = \bar{U}_1 - \bar{U}_{R1} - \bar{U}_{S1}$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_{R2}' + \bar{U}_{S2}' + \bar{U}_{S1} + \bar{U}_{R1} \Rightarrow \bar{U}_e \approx \frac{\bar{U}_1}{2}$$

A fentiek alapján a rövidzárában érvényes vektorábra:



88. ábra

4.1.1.6. Drop (százalékos rövidzárási feszültség)

A transzformátor szekunder kapcsait rövidre zárva, azt a primer feszültséget, amelyenél a primer tekercsben a névleges primer áram (I_{1n}) folyik, rövidzárási feszültségnek nevezzük:

$$U_{1z} = I_{1n} Z_z,$$

természetesen ilyenkor a szekunder tekercsben is a névleges szekunder áram (I_{2n}) folyik. A rövidzárási feszültségnek a névleges primer feszültséghez viszonyított értéke a drop, vagy százalékos rövidzárási feszültség:

$$\varepsilon = \frac{U_{1rz}}{U_{1n}} \cdot 100\% = \frac{I_{1n}}{I_{1rz}} \cdot 100\%$$

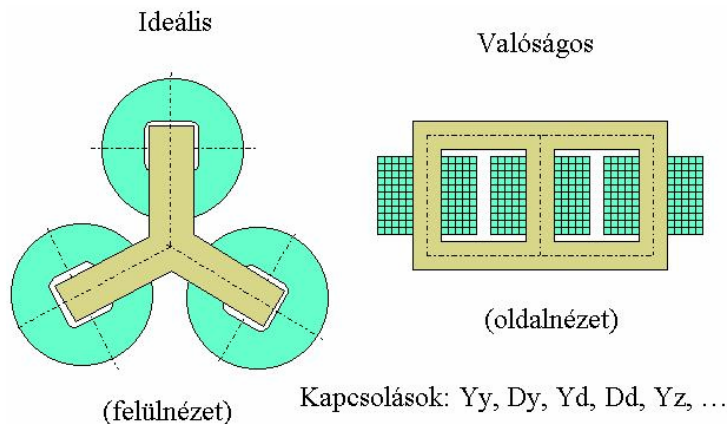
A drop kiszámításával a transzformátor maximális terhelési értékét lehet meghatározni.

A drop tehát a rövidzárási feszültségnek a névleges primer feszültséghez viszonyított értéke százalékos értékben kifejezve. A rövidzárási mérés a rövidzárási feszültség és a tekercs veszteség meghatározására szolgál.

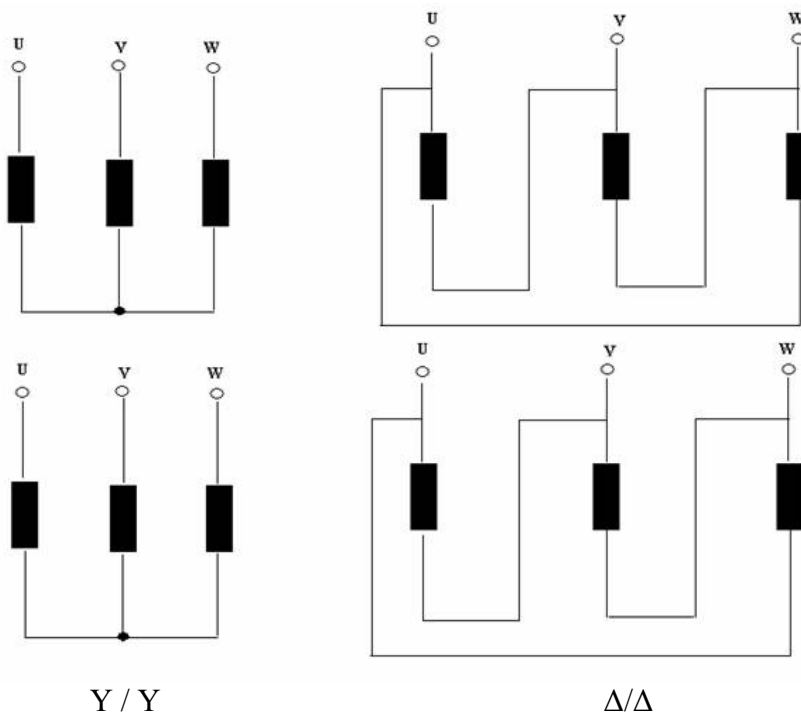
Amennyiben egy transzformátor terhelését növelni kívánjuk, akkor figyelembe kell venni a dropot, mert a kis drop értékű transzformátor túlterhelődik, melegszik és tönkremegy. Ezért általában a transzformátorokat úgy méretezik, hogy még maximális terhelés esetén is legyen 10-20% -os tartaléka.

4.1.2. Háromfázisú transzformátorok

Erőátviteli transzformátorokat tekintve a háromfázisú transzformátoroknak nagyobb a jelentősége, mint az egyfázisúaknak, mivel a villamos energia termelése, elosztása és felhasználása – a gazdasági előnyök miatt – túlnyomórészt háromfázisú rendszerrel történik. Az alábbi ábrákon különböző elrendezésű és kapcsolású transzformátorok láthatók.



89. ábra



90. ábra

4.1.2.1. Csillag-csillag kapcsolású transzformátor

A primer oldalon nincs „0” vezető (szabványos nagyfeszültségű rendszerek). A kiegyenlítő áram a fázis-tekerceken keresztül tud folyni oly módon, hogy mindegyik üresjárású áramhoz hozzáadódik a kiegyenlítő áram egy-egy harmada.

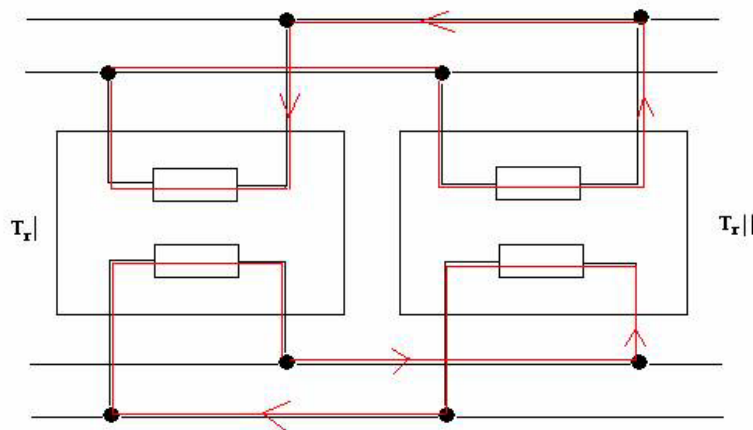
A primer fázis tekercsben a szükséges gerjesztő áramon kívül még a kiegyenlítő áram egy-egy harmada is folyik, melyek minden fázistekercsben azonos fázisúak. Ezek az áramok a szabályos (szimmetrikus) háromfázisú fluxuson felül minden oszlopban azonos fázisú fluxust gerjesztenek. A fluxusok azonos fázisa azt jelenti, hogy irányuk mindhárom oszlopban felfelé, majd egy fél periódus idő múlva lefelé mutat.

4.1.2.2. Háromszög kapcsolású transzformátorok

A háromoszlopos transzformátorok vasmagjában fellépő azonos fluxusok feszültséget indukálnak az egyes fázistekercsekben. Ezek a feszültségek azonos fázisúak, akárcsak az őket indukáló fluxusok, ezért szuperponálódnak (megváltoztatják a fázis feszültségeket, fázisát, jelleggörbe alakját). Ezért a járom fluxusok hatásának kiküszöbölésére a járommenetek alkalmasak. Alkalmazásukkal az oszlopokban folyó fő fluxusok összege minden pillanatban zérus. Hatásukra a járommenetekben olyan áram kering, amelyek gerjesztése az indukáló fluxusok ellen hat. Ezért az azonos fázisú fluxusok elhanyagolhatóan kicsinyek lesznek. A háromszög kapcsolású tekercselés önmagában úgy záródik, hogy mindhárom oszlopot azonos menetszámmal és értelemben járja körül. Hatása ezért olyan, mint a járommeneteké. Az egyfázisú (azonos fázisú zérus – sorrendű) fluxusok elhanyagolhatóan kicsinyek, ha a transzformátor bármelyik tekercselése háromszög kapcsolású. A háromszög kapcsolású tekercselésen belül kering az az áram, amelynek gerjesztése az azonos fázisú fluxusokat lerontja.

4.1.3. Transzformátorok párhuzamos üzeme

Ha adott teljesítmény átvitelére egy transzformátor nem elegendő, akkor több transzformátort kapcsolunk párhuzamosan. Ez azt jelenti, hogy a transzformátorok a teljesítményt közös primer hálózatról veszik fel és közös szekunder fogyasztórendszerre adják le.



91. ábra: Párhuzamosan kapcsolt egyfázisú transzformátorok

A párhuzamos kapcsolást illetve a párhuzamos üzemet az alábbi feltételek egyidejű teljesülése esetén tekinthetjük kifogástalannak:

Párhuzamos üzemhez az alábbiaknak kell teljesülni:

1. Nincs kiegyenlítő áram a párhuzamosan kapcsolt transzformátorok között,
2. Terhelés a transzformátorok között névleges teljesítményeik arányában oszlik meg.

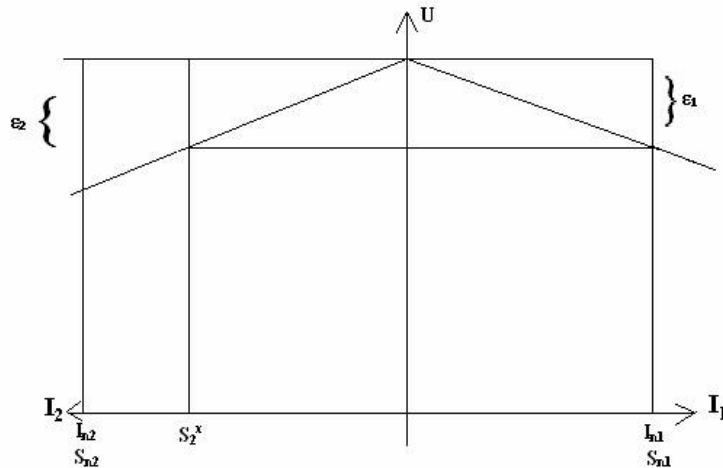
Ezek a feltételek akkor teljesülnek ha:

1. Primer és szekunder feszültségek megegyeznek, azonos az áttétel ($a_1 = a_2$)
2. Fázis feszültségek azonos fázisúak (kapcsolási csoport azonos)

3. A transzformátorok százalékos rövidzárási feszültségei egyenlők (azonos drop) $\varepsilon_1 = \varepsilon_U$

4.1.4. Párhuzamosan kapcsolt transzformátorok terheléeloszlása különböző drop esetén

Ha a párhuzamosan kapcsolt transzformátorok rövidzárási feszültségei nem egyenlők, akkor a terhelésmegoszlás egyenlőtlen. A nagyobb rövidzárási feszültségű transzformátor még nincs kihasználva, leterhelve, amikor a másik már névleges áramával van terhelve. A terhelés tovább már nem növelhető, mert a kis ε -ú transzformátor túlterhelődik. A nagy rövidzárási feszültségű transzformátor árama az ábrából a hasonló háromszögek segítségével számítható. Párhuzamos üzemben csak olyan egységek alkalmazhatók, amelyeknek rövidzárási feszültségei +/- 10% tolerancián belül – egyenlők.



92. ábra

$$\varepsilon_2 > \varepsilon_1$$

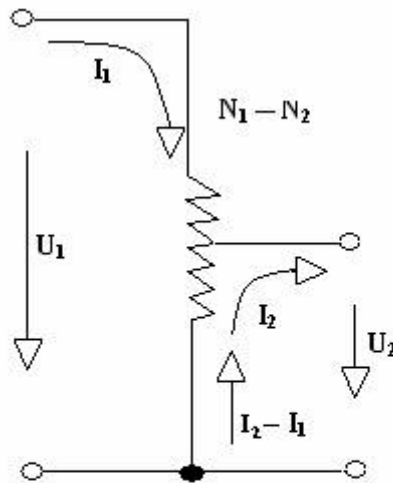
$$S_2^x = S_{n2} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

4.1.5. Különleges transzformátorok

Kialakításuk és felhasználásuk miatt léteznek a hagyományos szerkezetű és felhasználású transzformátoroktól eltérő megoldású berendezések is, ezeket nevezzük különleges transzformátoroknak.

4.1.5.1. Takarékkapcsolású transzformátorok

A takarékkapcsolású transzformátor a váltakozóáramú teljesítmény transzformálására alkalmas legegyszerűbb szerkezet. Az eddig megismert kétkerceses transzformátorral összehasonlítva nevezhetnénk egykerceses transzformátornak is. Elvi kapcsolását mutatja az alábbi ábra:



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

93. ábra

Előnyök:

1. kisebb tekercs- és vasveszteség (mivel a közös menetszámú tekercsrészben a primer és szekunder áram különbsége folyik: $I_2 - I_1$),
2. kisebb méret és súly,
3. egyfázisú és háromfázisú szabályozó transzformátorokként is használhatók

Hátrányok:

1. galvanikus kapcsolat a primer és szekunder tekercs között (biztonsági célú leválasztásra tilos felhasználni!)
2. amennyiben szakadás lép fel az N_2 -nél, akkor $U_2 = U_1$ (életveszélyes lehet!)
3. rövidzárási árama nagy, ui. a teljes primer feszültség az $N_1 - N_2$ menetszámú tekercsrészre esik.

4.1.5.2. Mérőtranszformátorok

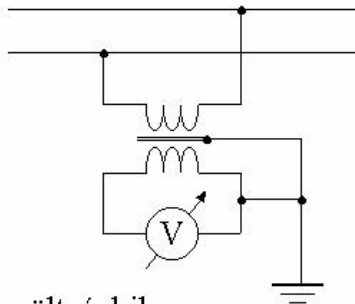
Nagy váltakozó feszültségek és áramok mérésére alkalmas különleges transzformátorok. Segítségükkel lehet a nagy feszültséget és áramot közvetlenül mérhető értékre csökkenteni.

4.1.5.2.1. Feszültségváltó

A feszültségváltó a nagy váltakozófeszültséget alakítja át közvetlenül mérhető értékre, általában 100V-ra. Működése egy üresjárásban dolgozó transzformátoréhoz hasonlít. A primer tekercset a mérendő nagyfeszültségű hálózatra kapcsolják, míg a szekunder tekercsre kötik a feszültségmérőt. A feszültségváltó legfontosabb jellemzője az áttétel pontossága és a leképzés hűsége. Ideális esetben:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

A feszültség abszolút értékek közötti eltérést a primer feszültségre vonatkoztatva kapjuk az ún. áttételi hibát, míg a fáziseltérés esetén az ún. szöghibát.



feszültséghiba:

$$h = \frac{aU_2 - U_1}{U_1} 100\% \\ (0,1 \dots 3)\%$$

szöghiba:

$$\delta = (4 \dots 40)^\circ$$

94. ábra

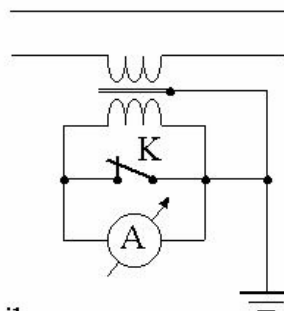
Fontos: A feszültségváltó szekunder kapcsait nem szabad rövidre zárn!

4.1.5.2.2. Áramváltó

Az áramváltó a nagy váltakozóáramot alakítja át közvetlenül mérhető értékre, általában 1 vagy 5A-ra. Működése kissé eltér a hagyományos transzformátorétól. A primer tekercset a mérendő nagy áram útjába sorosan kötik, míg a szekunder tekercsre kötik az árammérőt. A primer és a szekunder oldali gerjesztések egyensúlya alapján:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

Az áramváltó esetén is a legfontosabb jellemző az áttétel pontossága és a leképzés hűsége.



áramhiba:

$$h = \frac{I_2/a - I_1}{I_1} 100\% \\ (0,1 \dots 10)\%$$

szöghiba:

$$\delta = (6 \dots 60)^\circ$$

95. ábra

A mérési célú áramváltók jellemző értékei:

$$I_2 = 5A (1A)$$

$$I_1 = 5; 20; 50 ; 200 ; 500 ; 2000 A \dots$$