

$$Q = CU$$

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

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:

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

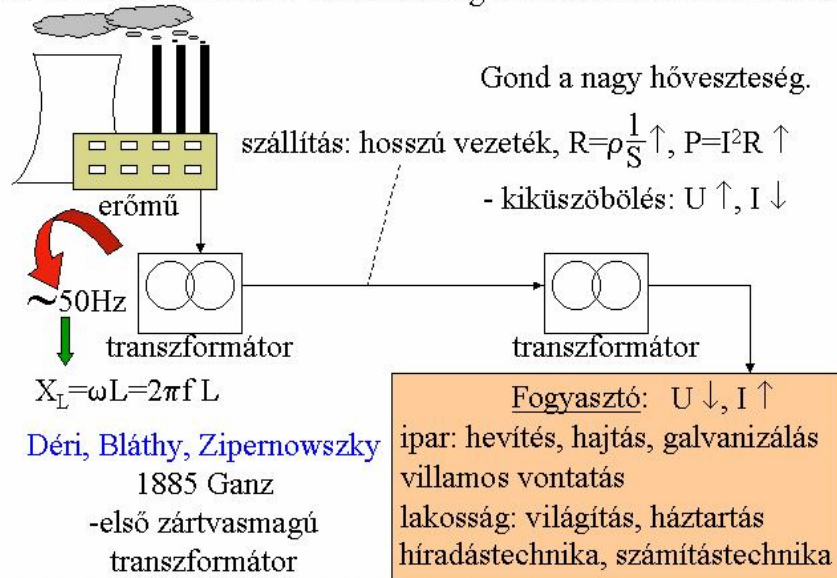
## 4. Villamos gépek

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

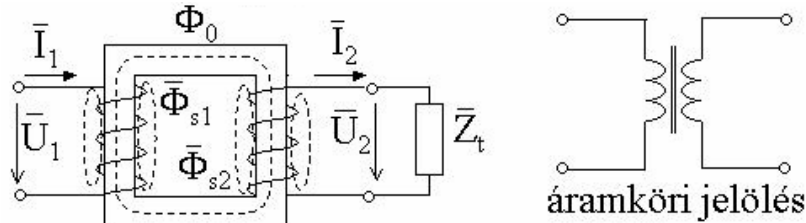
A transzformátorok működését az egyfázisú transzformátorok esetén vizsgáljuk. A transzformátorok működési elve a Faraday féle indukción alapszik, azaz:

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

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 (vasveszteség = örvényáramú + hiszterézis veszteség). A vasmag kialakítása szerint létezik

- mag
- láncszem
- köpeny

típusú transzformátor.



81. ábra

A fenti ábrában  $\Phi_0$  az ún. főfluxus,  $\Phi_{s1}$  és  $\Phi_{s2}$  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:

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

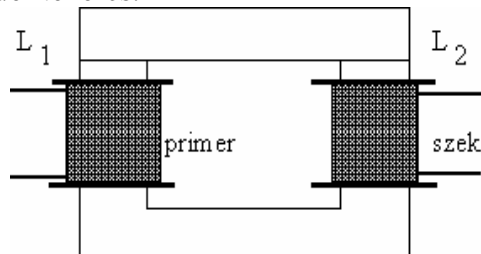
$$a_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_{i2}}{U_{i1}} = \frac{1}{a_u} = \frac{1}{a}$$

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

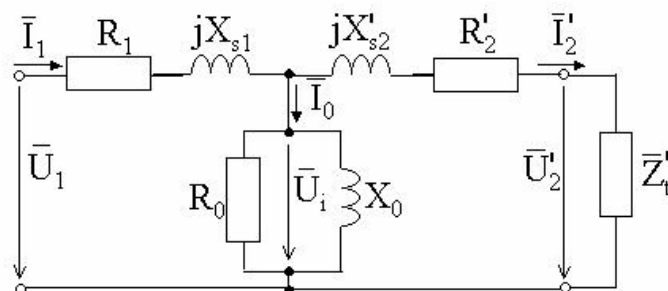
Az alábbi ábra a hagyományos, két tekercses transzformátorok kialakítását mutatja, külön oszlopon helyezkedik el a primer és a szekunder tekercs.



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

$R_0$ : vasveszteséget 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.  $R'_2 = a^2 R_2$ )

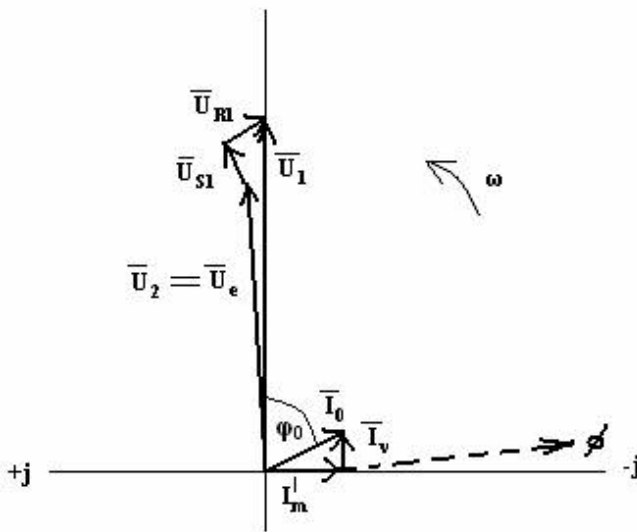
A helyettesítő képben szereplő mennyiségek egymáshoz viszonyított aránya a következő:

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

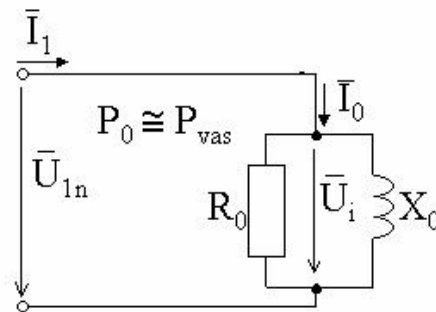
Vizsgáljuk meg a transzformátorok működését különböző üzemállapotban: üresjárásban, névleges terhelésnél és rövidzár esetén.

### 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
- $\varphi_0$ : 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:

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

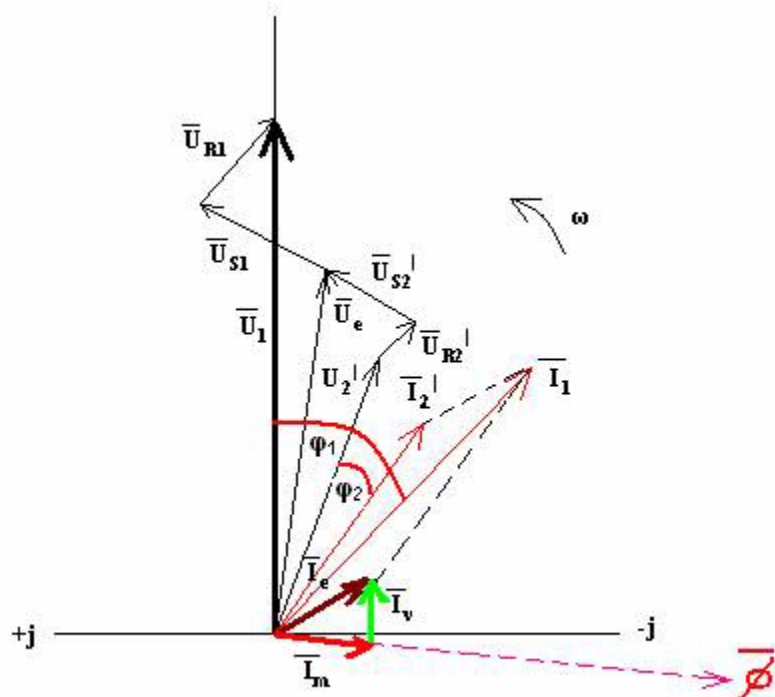
A redukált szekunder kapocsfeszültség:

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

Rövidebben jelölve:

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

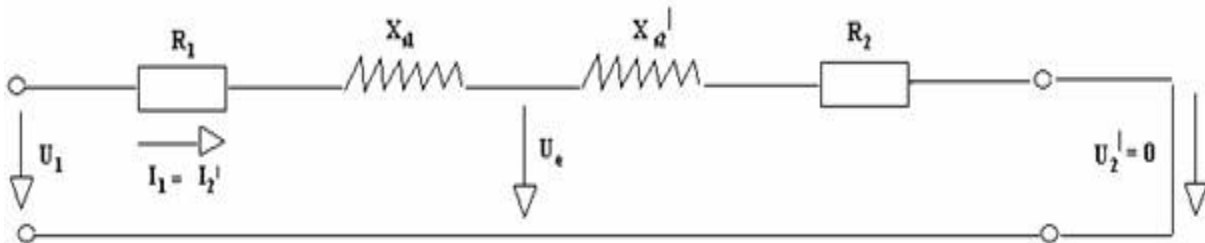
Névtelen terhelés esetén az érvényes vektorábra a fentiek alapján az alábbi ábrán látható:



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:

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

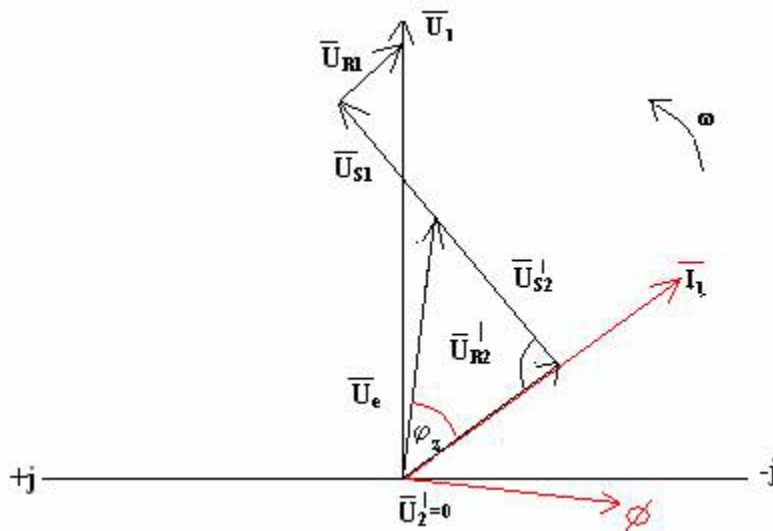
$$I_{1rz} \approx I_{1n} 10 \div 30$$

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

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

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

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:

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

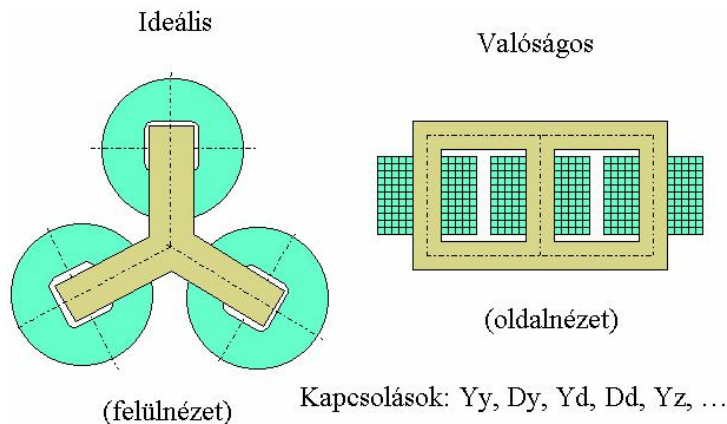
A drop kiszámításával a transzformátor maximális terhelési értékét lehet meghatározni.

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.

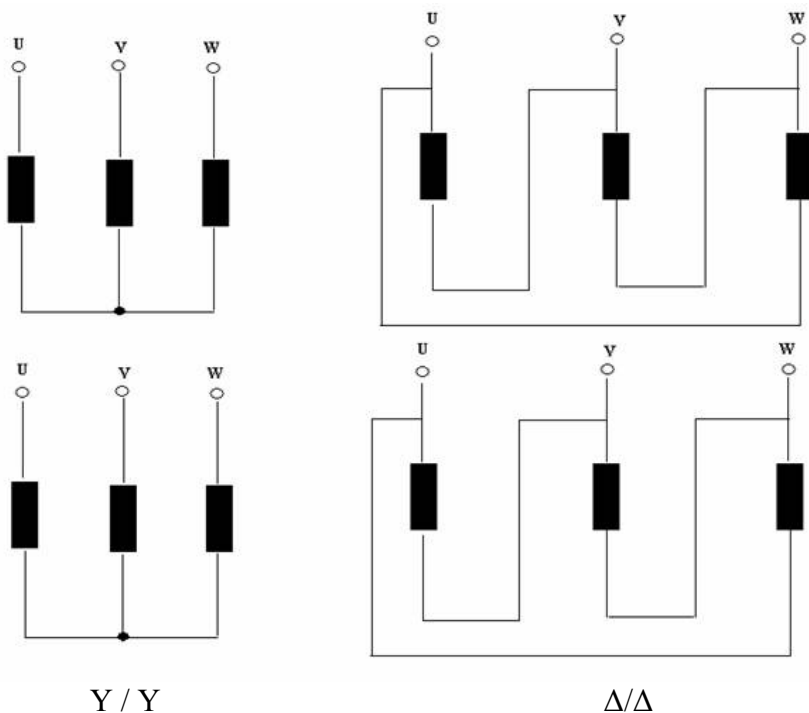
Amennyiben egy transzformátor terhelését növelni kívánjuk, akkor figyelembe kell venni a dropot, mert a kis drop értékű transzformátor túlterhelődik, melegszik és tönkremegy. Ezért általában a transzformátorokat úgy méretezik, hogy még maximális terhelés esetén is legyen 10-20% -os tartaléka.

### 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.

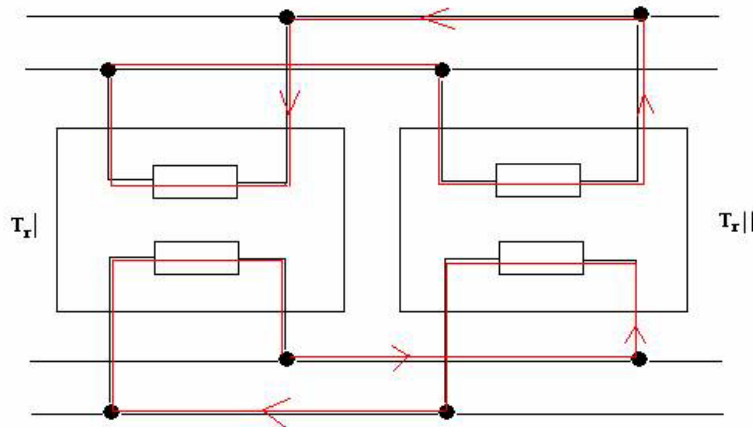
A primer fázis tekercsben a szükséges gerjesztő áramon kívül még a kiegyenlítő áram egy-egy harmada is folyik, melyek minden fázistekercsben azonos fázisúak. Ezek az áramok a szabályos (szimmetrikus) háromfázisú fluxuson felül minden oszlopban azonos fázisú fluxust gerjesztenek. A fluxusok azonos fázisa 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:**

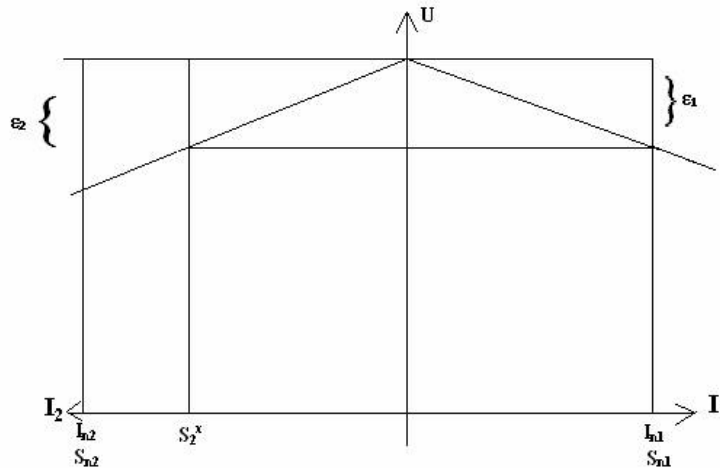
1. Primer és szekunder feszültségek megegyeznek, azonos az áttétel ( $a_1 = a_2$ )
2. Fázis feszültségek azonos fázisúak (kapcsolási csoport azonos)



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  $\varepsilon$ -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

$$\varepsilon_2 > \varepsilon_1$$

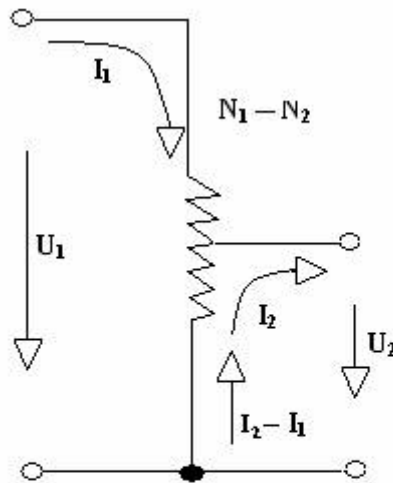
$$S_2^x = S_{n2} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

#### 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**

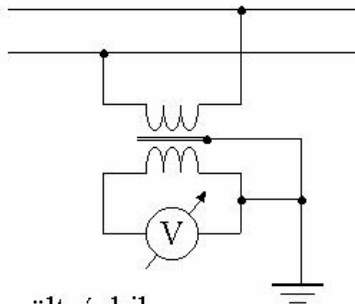
Nagy váltakozó feszültségek és áramok mérésére alkalmas különleges transzformátorok. Segítségükkel lehet a nagy feszültséget és áramot közvetlenül mérhető értékre csökkenteni.

**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:

$$\delta = (4 \dots 40)'$$

94. ábra

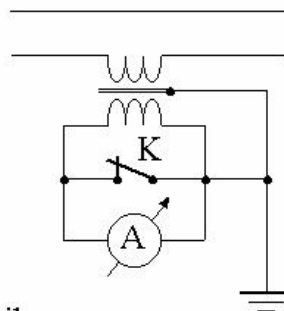
**Fontos: A feszültségváltó szekunder kapcsait nem szabad rövidre zárn!**

#### 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:

$$\delta = (6 \dots 60)'$$

95. ábra

A mérési célú áramváltók jellemző értékei:

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

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