

Villamos energetika

BMEVIVEAB01

3. előadás – Hálózati elemek modellezése, transzformátorok

Dr. Ladányi József egyetemi docens
BME-VIK - Villamos Energetika Tanszék
Villamos Művek és Energiaátalakítók Csoport
Email: ladanyi.jozsef@vet.bme.hu
Tel.: +36 70 573 5027
V1. ép. IV. em. 411. szoba



Feltételezések

- Állandósult állapot (50 Hz, fázorok használata)
- Szimmetrikus üzem (minden feszültség és áram szimmetrikus)
 - Generátorok
 - Fogyasztók
 - Hálózati elemek

Tisztázandó:

- Valóság – egyvonalas séma – 3f – pozitív sorrend („1f”)
- „Névleges” adatok jelentése?
 - Vonali feszültség
 - 3f teljesítmény
 - Számítás „egyfázisú” mennyiségekkel

Zárlati teljesítmény

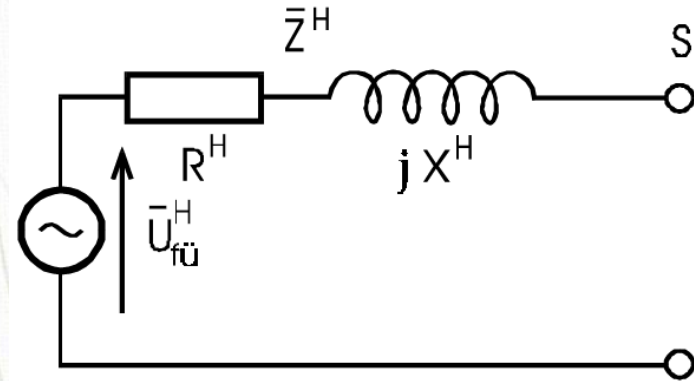
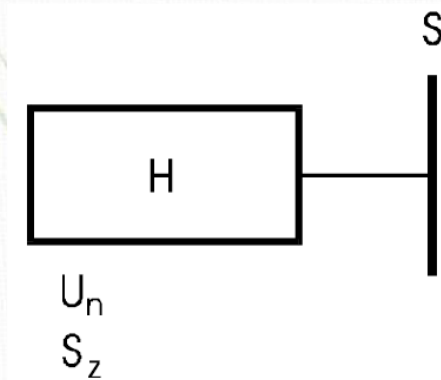
- Fiktív mennyiség:

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

- Hálózat „erősségét” jellemző mennyiség
- Thevenin-helyettesítő képhez:

$$Z^H = \frac{U_n^2}{S_z}$$

Mögöttes hálózat (véges zárl.telj.)



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

$$Z^H = \frac{U_n^2}{S_z}$$

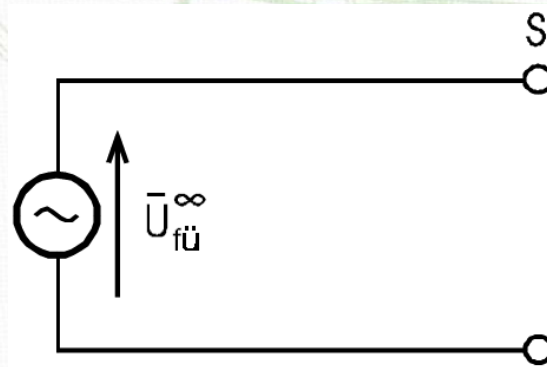
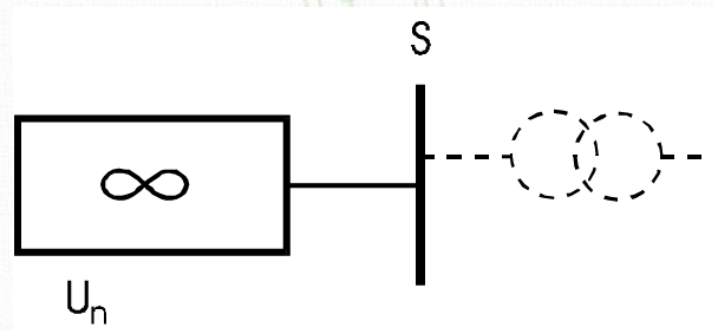
- Feladat:

$$U_n = 120 \text{ kV}, S_z = 1200 \text{ MVA}, R/X = 0.1$$

(jX helyett: R+jX a helyettesítő vázlatban!)

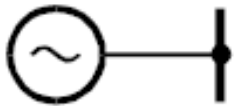
„Mögöttes hálózat”

- Végtelen zárlati teljesítmény (S_z)

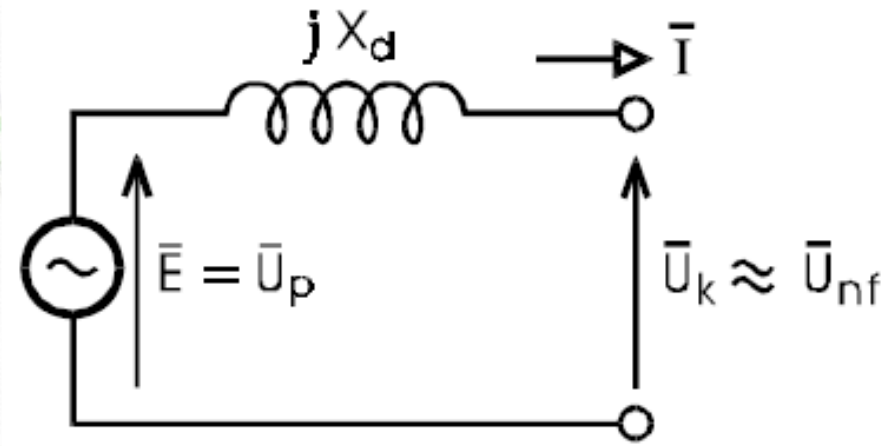


Szinkrongenerátor

- Kvázistacioner állapot



$U_n(kV)$ $S_n(MVA)$ $\varepsilon_d(\%)$

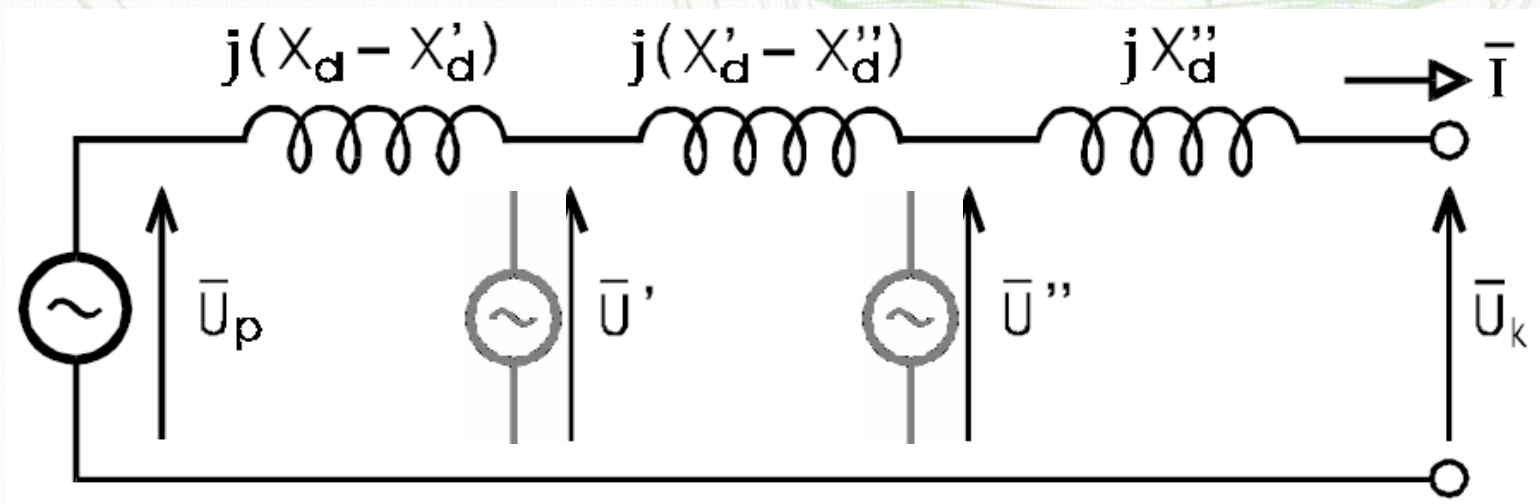


$$\varepsilon_d = 100 \frac{I_n \cdot X_d}{U_n / \sqrt{3}} (\%) \quad : \quad 100..200\%$$

$$X_d = \frac{\varepsilon_d}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{\varepsilon_d}{100} \frac{U_n^2}{S_n} (\Omega) \quad \text{Szinkronreaktancia}$$

Szinkrongenerátor

- Tranziens (átmeneti) állapot

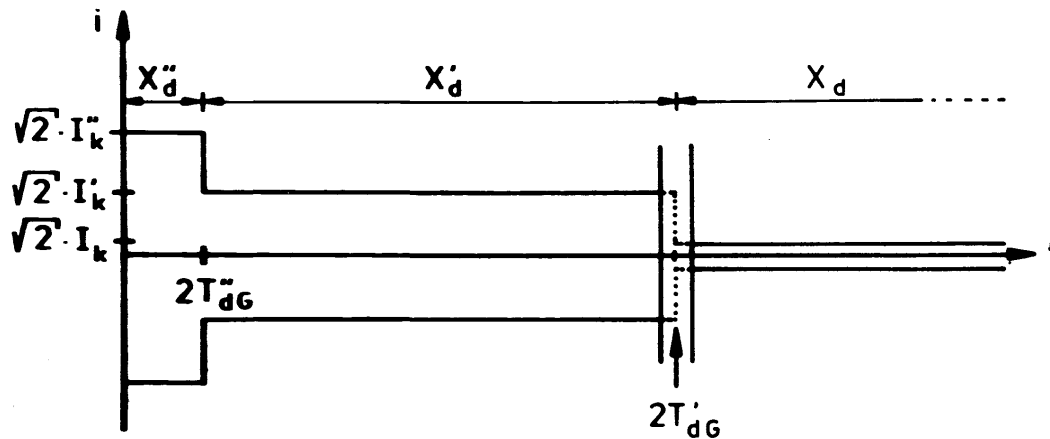


$$\varepsilon'_d = 15..30\%$$

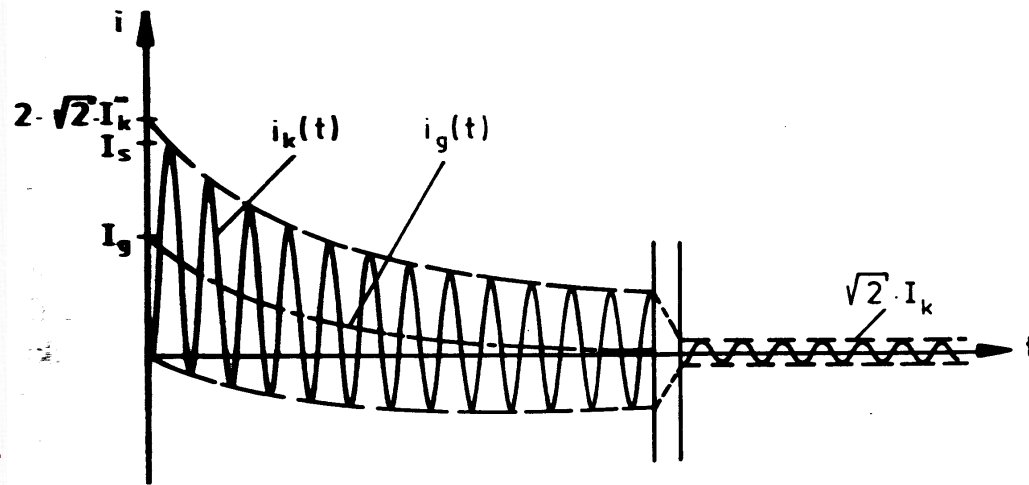
$$\varepsilon''_d = 8..20\%$$

Szinkrongenerátor

- Tranziens állapot



Schematischer Verlauf der Einhüllenden (ohne Gleichglied)

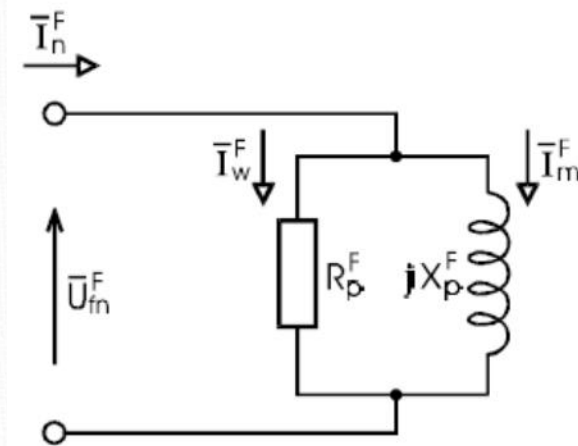
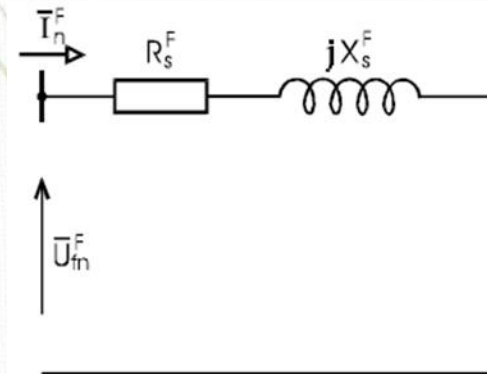


$$T''_{dG} = 0.02 \dots 0.05 \text{ s}$$

$$T'_{dG} = 0.5 \dots 1.8 \text{ s}$$

Fogyasztó

Impedanciatartó:



$U_n, S_n, \cos\varphi$

$$I_n^F = \frac{S_n^F}{\sqrt{3}U_n^F}$$

$$Z_n^F = \frac{U_n^{F2}}{S_n^F}$$

$$R_S^R = Z_n^F \cos\varphi_n^F;$$

$$X_S^R = Z_n^F \sin\varphi_n^F$$

$$P_n^F = S_n^F \cos\varphi_n^F$$

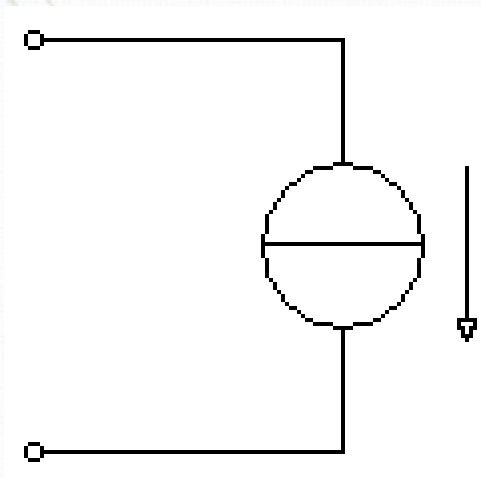
$$Q_n^F = S_n^F \sin\varphi_n^F$$

$$R_p^F = \frac{(U_n^F)^2}{P_n^F};$$

$$X_p^F = \frac{(U_n^F)^2}{Q_n^F}$$

Fogyasztó

- Áramtartó



$U_n, S_n, \cos \varphi$

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}$$

Induktív:

$$\bar{I}_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} (\cos \varphi - j \sin \varphi)$$

Kapacitív:

$$\bar{I}_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

Fogyasztó

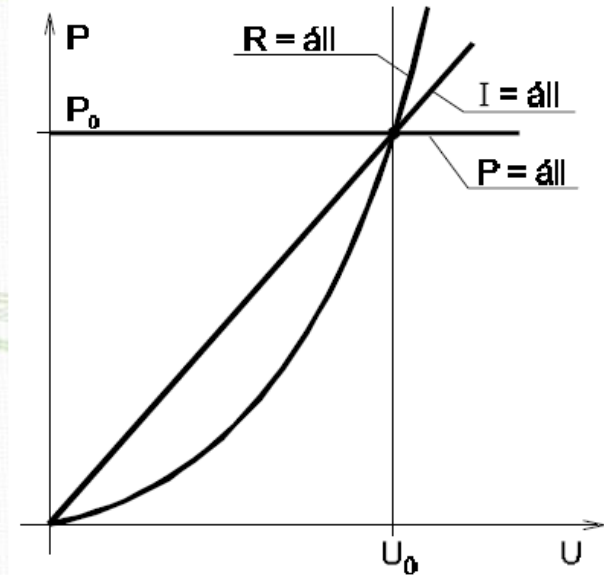
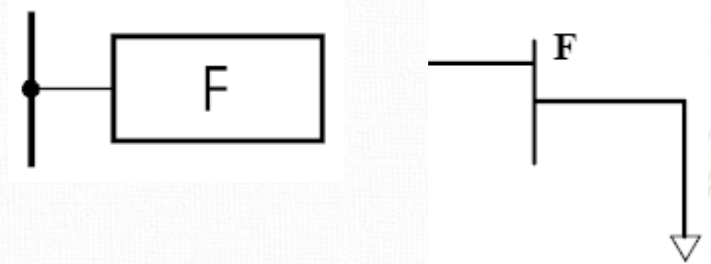
- Teljesítménytartó
 - Megoldáshoz iteráció szükséges

- Általános:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{k_{pu}} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{k_{pf}}$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{k_{qu}} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{k_{qf}}$$

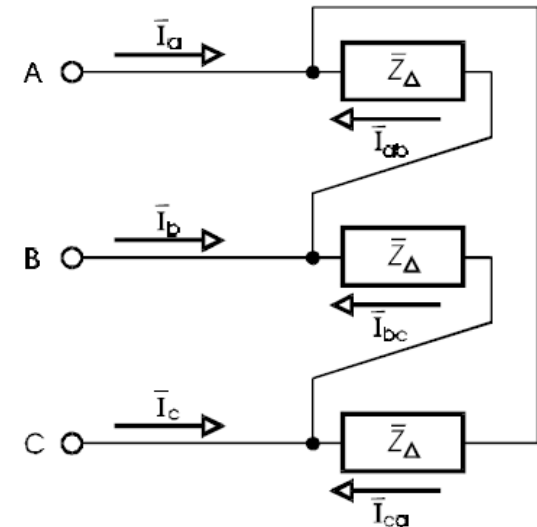
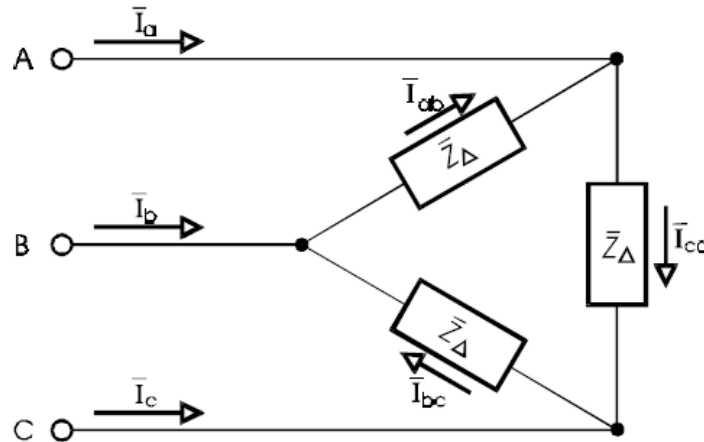
	ΔU	Δf
P-re	$k_{pu} \approx 1$	$k_{pf} \approx 1$
Q-ra	$k_{qu} \approx 3-8$	$k_{qf} < 0$



...hasonlóan Q-ra...

Csillag-delta átalakítás

- Szimmetrikus:



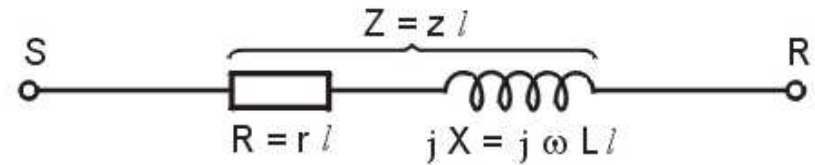
$$I_{\Delta} = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

$$Z_{\Delta} = \frac{U_v}{I_{\Delta}} = \frac{U_v}{I/\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}U_f}{I/\sqrt{3}} = 3 \frac{U_f}{I} = 3Z_Y$$

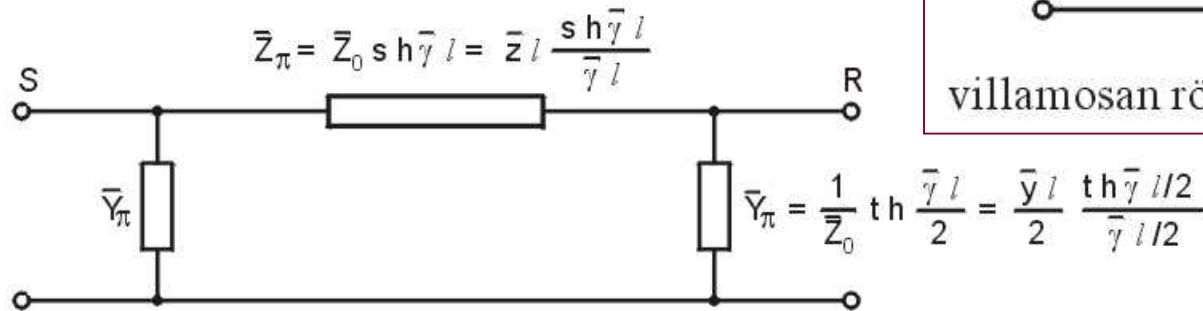
- Általában:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \quad Z_1 = \frac{Z_{31} Z_{12}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

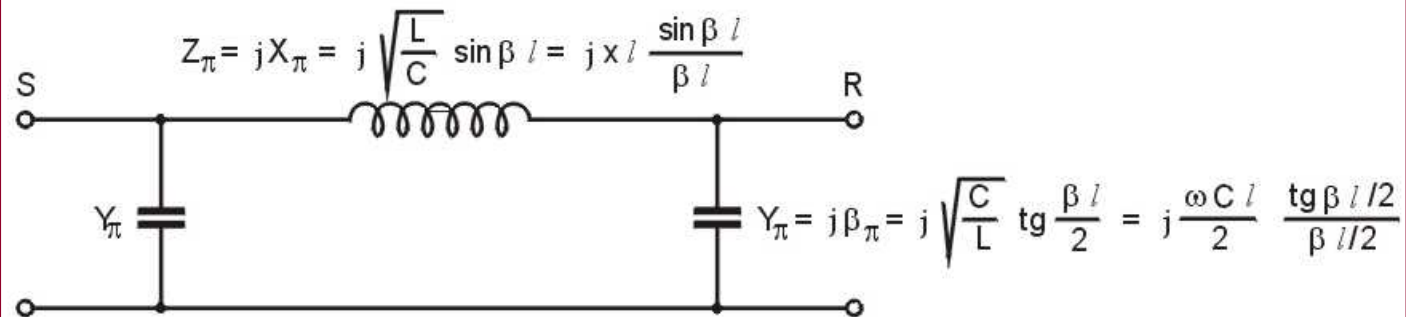
Távvezeték modellek



villamosan rövid vezeték

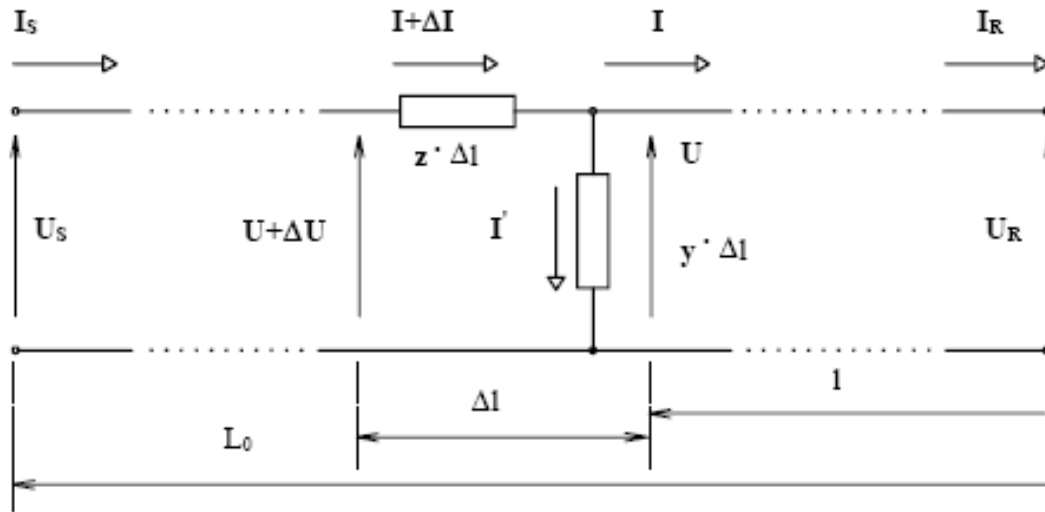


b, villamosan hosszú vezeték



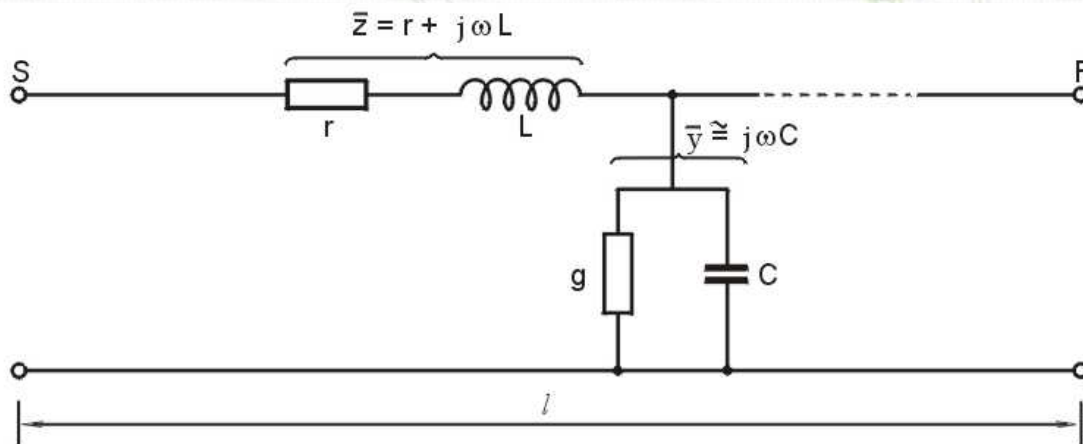
c, villamosan hosszú veszteségmentes vezeték

(Távvezeték)



$$\bar{z} = \frac{Z}{\Delta l} = r + jx \quad (\Omega / km)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{Z' \cdot \Delta l} = g + jb \quad \left(\frac{1}{\Omega km} \right)$$



a, hosszegységre vonatkozó soros és sönt paraméterek

2020. 03. 19.

$$\frac{d^2 U}{dl^2} - \gamma^2 U = 0$$

$$\frac{d^2 I}{dl^2} - \gamma^2 I = 0$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\mathbf{zy}} \quad (1 / km)$$

(Távvezeték)

- Megoldás:

$$\mathbf{U}_S = \mathbf{U}_R \cdot \text{ch}(\gamma \cdot L_0) + \mathbf{I}_R \cdot \mathbf{Z}_0 \cdot \text{sh}(\gamma \cdot L_0) \quad [\text{V}]$$

$$\mathbf{I}_S = \frac{\mathbf{U}_R}{\mathbf{Z}_0} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot L_0) + \mathbf{I}_R \cdot \text{ch}(\gamma \cdot L_0) \quad [\text{A}]$$

$$\bar{\mathbf{Z}}_0 = \sqrt{\frac{r + jx}{g + jb}} = \sqrt{\frac{\mathbf{z}}{\mathbf{y}}} \quad (\Omega)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{(rg - xb) + j(xg + rb)} = \alpha + j\beta \quad (1/\text{km})$$

(Távvezeték)

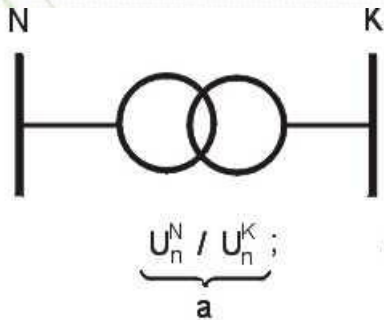
- Közelítések

$$\bar{Z}_0 \approx \sqrt{\frac{r + j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{\left(1 - j \frac{r}{\omega L}\right)}$$

$$\bar{\gamma} \approx j\omega \sqrt{LC} \sqrt{\left(1 - j \frac{r}{\omega L}\right)}$$

Feszültség Un kV	Vezeték		Elosztott paraméterek				Hullámparaméterek			
	A mm ²	D m	r Ω/km	x=ωL Ω/km	r / x -	ωC μS/km	Z ₀ Ω	∠Z fok	α 10 ⁻³ 1/km	β 10 ⁻³ rad/km
20	95	1.70	0.36	0.387	0,93	3.00	396	-24.9	0.501	1.077
120	250	5.75	0.117	0.404	0,29	2.81	379	-8.24	0.154	1.065
400	3x500	15.80	0.0195	0.3036	0,064	3.71	286	-1.84	0.0341	1.061

Transzformátor



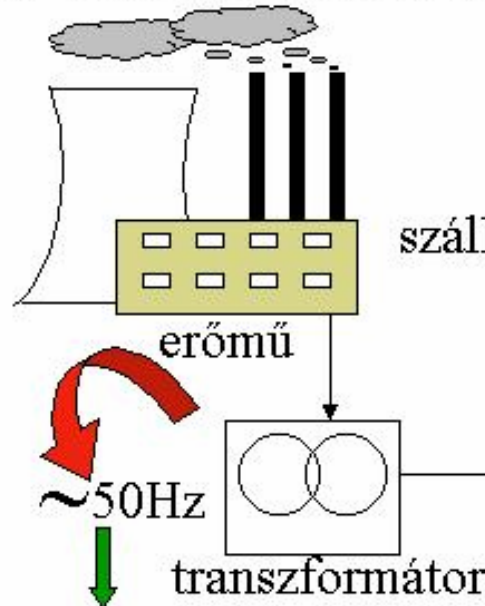
NF/NF, NF/Köf: 8-12% ind.,
Köf/kif: 4,5-5,6% ($\epsilon_r=2,7-1,1\%$)

U_n^N / U_n^K ; S_n ; $\epsilon (\epsilon_r)$; kapcsolás ; p óraszám

Közép/kisfeszültségű transzformátor	Nagy/középfeszültségű transzformátor	Nagy/nagyfeszültségű transzformátor
16 kVA, 160 kVA, 1600 kVA	16 MVA	160 MVA
25 kVA, 250 kVA	25 MVA	250 MVA
40 kVA, 400 kVA	40 MVA	
		500 MVA
63 kVA, 630 kVA	63 MVA	
100 kVA, 1000 kVA		

Transzformátorok

A transzformátornak a villamosenergia átvitelében van fontos szerepe.



$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

Déri, Bláthy, Zipernowszky

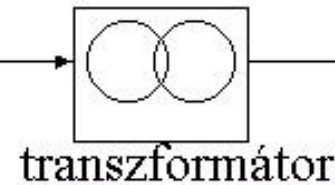
1885 Ganz

-első zártvasmagú
transzformátor

Gond a nagy hőveszteség.

szállítás: hosszú vezeték, $R = \rho \frac{l}{S} \uparrow$, $P = I^2 R \uparrow$

- kiküszöbölés: $U \uparrow$, $I \downarrow$



Fogyasztó: $U \downarrow$, $I \uparrow$

ipar: hevítés, hajtás, galvanizálás
villamos vontatás

lakosság: világítás, háztartás
híradástechnika, számítástechnika

Személygépkocsi – transzformátor analógia

- Mint Mérnöki mű (alkotás)
 - tervezési, gyártási, konstrukciós kérdések
- Mint Használati eszköz (villamos hálózati elem)
 - “Használati” leírás
 - Műszaki jellemzők (alkalmazás szempontjából fontos jellemzők)
 - Élettartam, meghibásodás
 - Karbantartás

A transzformátor, mint mérnöki konstrukció -1

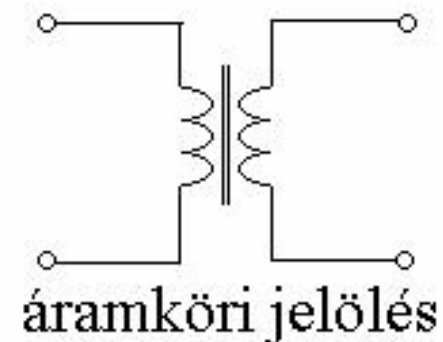
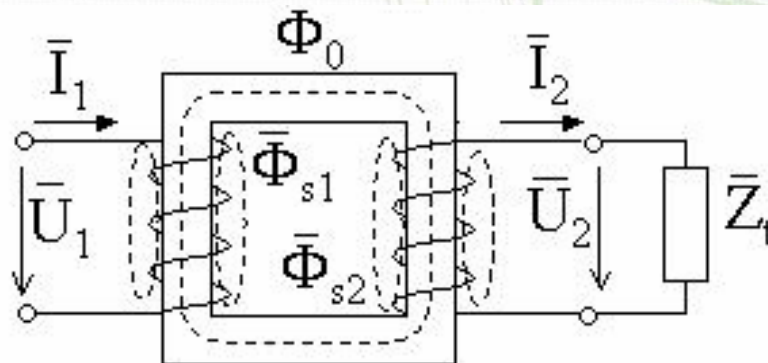
(Ebben a tárgyban részletesebben nem tárgyaljuk!)

- Tekercs
 - Réteges, tárcsás kialakítás
 - Soros/párhuzamos tekercs-elemek
 - Primer és szekunder galvanikusan független, vagy nem -> Autotranszformátor
- Szabályozási lehetőség: van/nincs
- Vasmag
 - 1F, 3F (3, 4, 5 oszlopos)
 - Köpeny típusú, mag típusú
- Szigetelés
 - Olaj, műgyanta, egyéb
- Mechanika
 - Zaj, rezgés (tekercs, vastest)
 - Dinamikus igénybevétel: bekapcsoláskor, zárlatkor
- Hűtés
 - ONAN vagy ONAF

A transzformátor, mint mérnöki konstrukció - 2

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 három fajta transzformátor létezik:

- mag
- láncszem
- köpeny

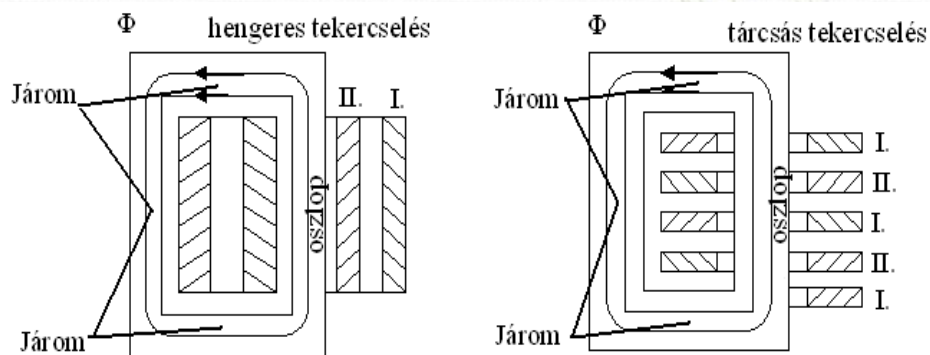


A fenti ábrában Φ_0 az ún. **főfluxus**, Φ_{s1} és Φ_{s2} a primer és szekunder tekercsen valamint a levegőn keresztül záródó ún. **primer és szekunder szórt fluxus**.

Az energiaáramlás szempontjából nézve **primer tekercsnek** nevezzük azt az oldalt, **ahova az energiát betápláljuk**. **Szekunder tekercs** az, **ahonnan az energiát elvezetjük** a fogyasztó/terhelés felé.

A transzformátor, mint mérnöki konstrukció - 3

Transzformátorok csoportosítása tekercselés szerint

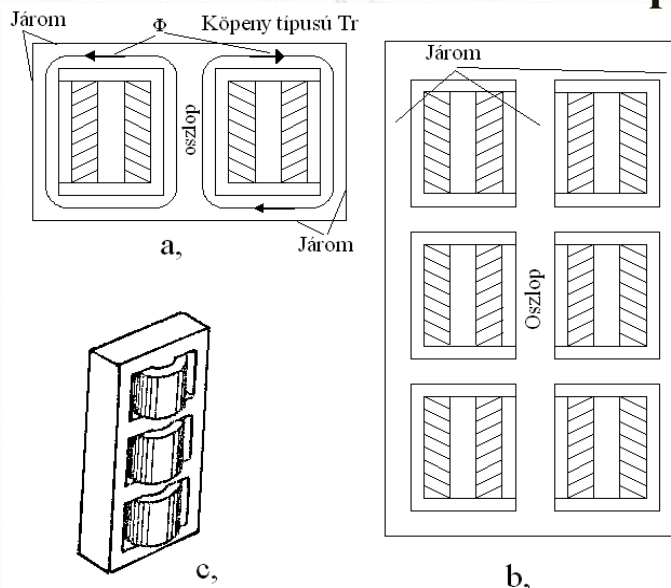


Láncszem típusú

A kisebb feszültségű tekercs belül, a nagyobb feszültségű kívül, szigetelési okokból.

A primer, és szekunder tekercset több tekercsrészre osztják fel és egymással sorba vannak kötve. (szórt fluxus csökkentésére)

Transzformátorok csoportosítása a mágneses kör kialakítása szerint

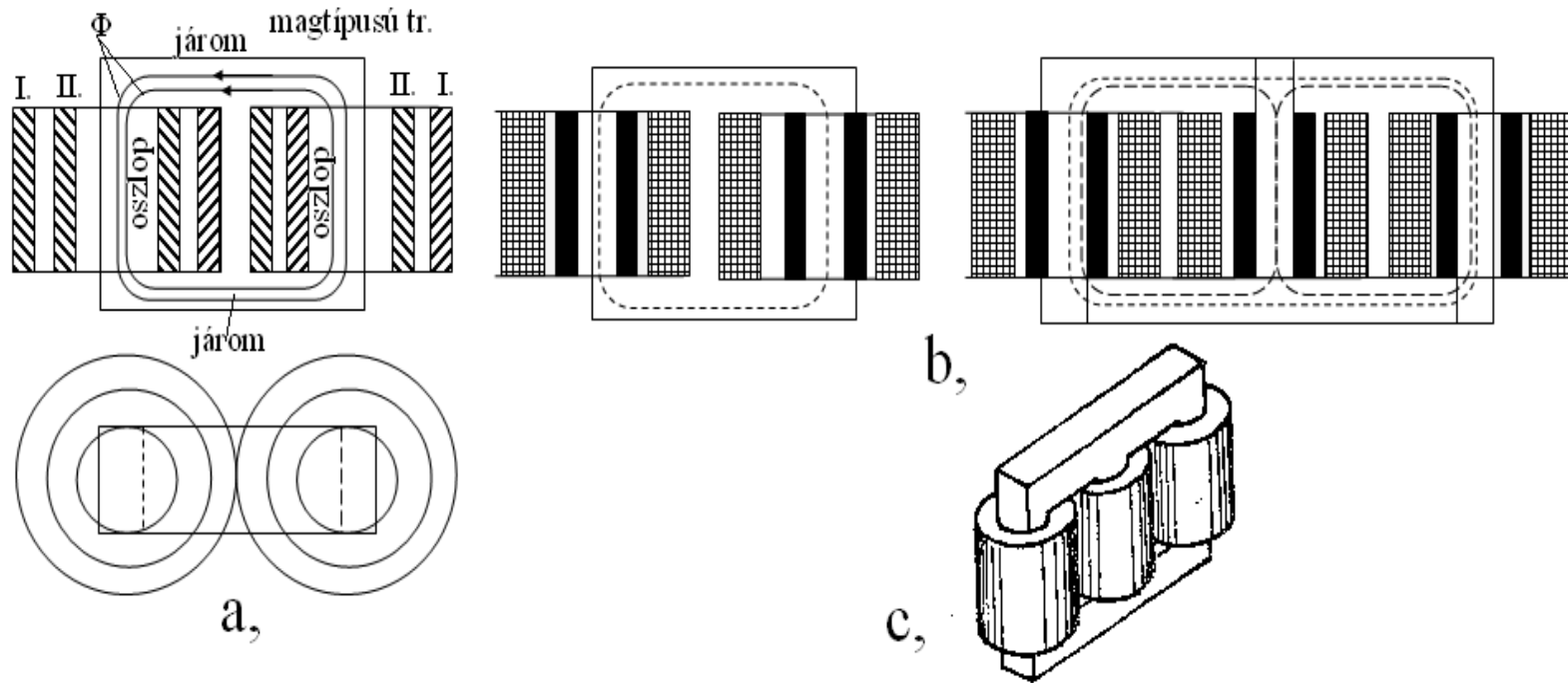


Köpeny típusú

A vasmagban a fluxus un. vasveszteséget okoz. Csökkentésére a vasmagot lemezekből készítik.

Az oszlop végein két járom kétfelé zárja a mágneses kört. 1-1 járom a főfluxus felét vezeti, ezért keresztmetszete feleakkora, mint a láncszem típusúnál.

A transzformátor, mint mérnöki konstrukció - 4



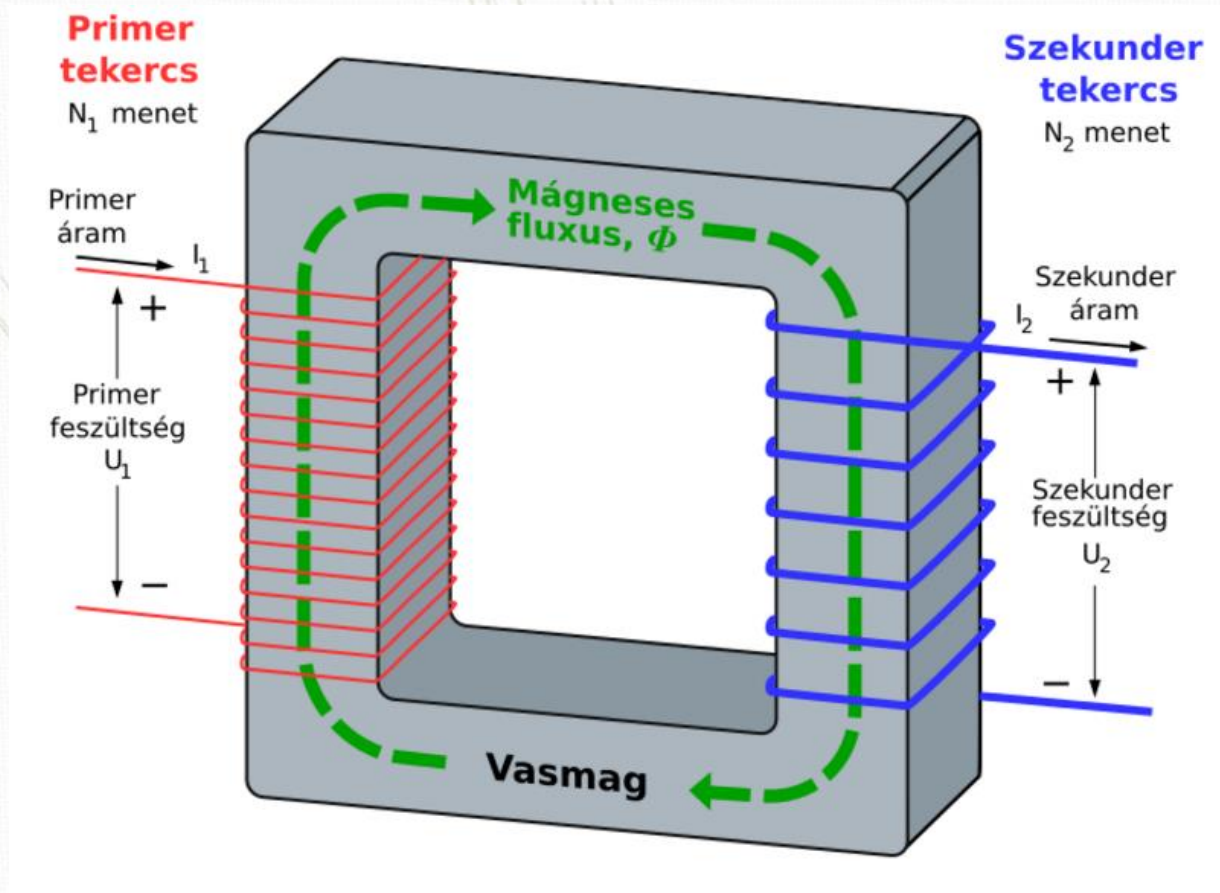
Ma legáltalánosabban **mag típusú transzformátor** használatos. Két oszlopa van. Mind a **primer**, mind a **szekunder tekercset** **megfelelően** a két oszlopon helyezkednek el. A vasmag kb. ugyanakkora, mint a láncszem típusúnál. A **tekercseknek kisebb a közepes átmérője**, ezért **kisebb a menethossza**, **kisebb** tehát a tekercsek **ohmos ellenállása**. Így **kevesebb a tekercsveszteség** és **kisebb a beépítendő tekercsanyag** /réz vagy alumínium/ mennyisége is.

A transzformátor, mint villamos hálózati elem

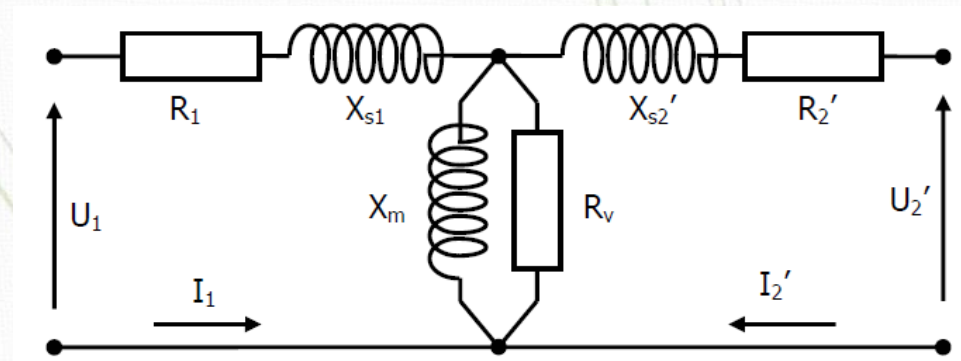
(ebből a szempontból tárgyaljuk részletesebben)

- A villamos hálózatokban betöltött szerepe
 - Energiaátvivő elem két, különböző feszültségű hálózat között
 - Tekercsteljesítmény vs átmenő teljesítmény
 - Átviteli vesztesége minimális
- Szabályozó elem
 - Feszültség– meddő ($U - Q$) szabályozás
 - Menetszám-áttétel változtatás
 - Tercier fojtótekercs beiktatási lehetőség
 - Hatásos teljesítmény áramlás szabályozása
 - Soros szabályzó (Magyarországon most kezdődik)
- Számítási modell
 - Normál üzemi és zárlati viszonyok leképezése
 - Szimmetrikus üzemállapot, egyfázisú (pozitív sorrendű) modell
 - Nem szimmetrikus (zárlat!) állapotban (pozitív és zérus sorrendű áramokkal szembeni eltérő viselkedése fontos lesz – *későbbi előadás!*)

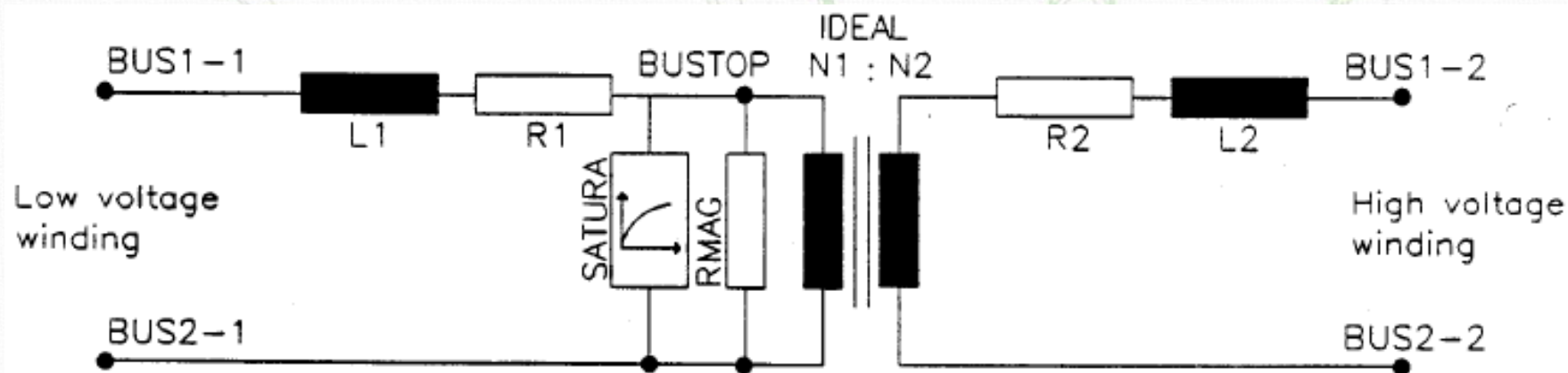
Egyfázisú transzformátor



Egyfázisú transzformátor helyettesítő kép



R_2-X_2 a primer oldalra redukálva



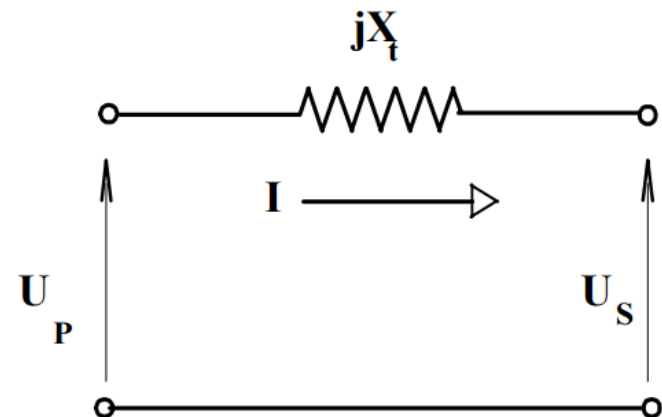
$R-X$ a valós feszültszinten (nincs redukálás)

Transzformátor adatok a villamos hálózati modellhez



További adatok:

- Kapcsolási csoport, óraszám
- Üresjárási áram
- Üresjárás veszteség
- Rövidzárási veszteség



Pozitív sorrendű helyettesítő kép

Drop vagy százalékos rövidzárási feszültség

A **drop** vagy **százalékos rövidzárási feszültség** az erőátviteli transzformátorok adattáblájáról leolvasható fontos műszaki paraméter, értékét a gyártómű méréssel határozza meg.

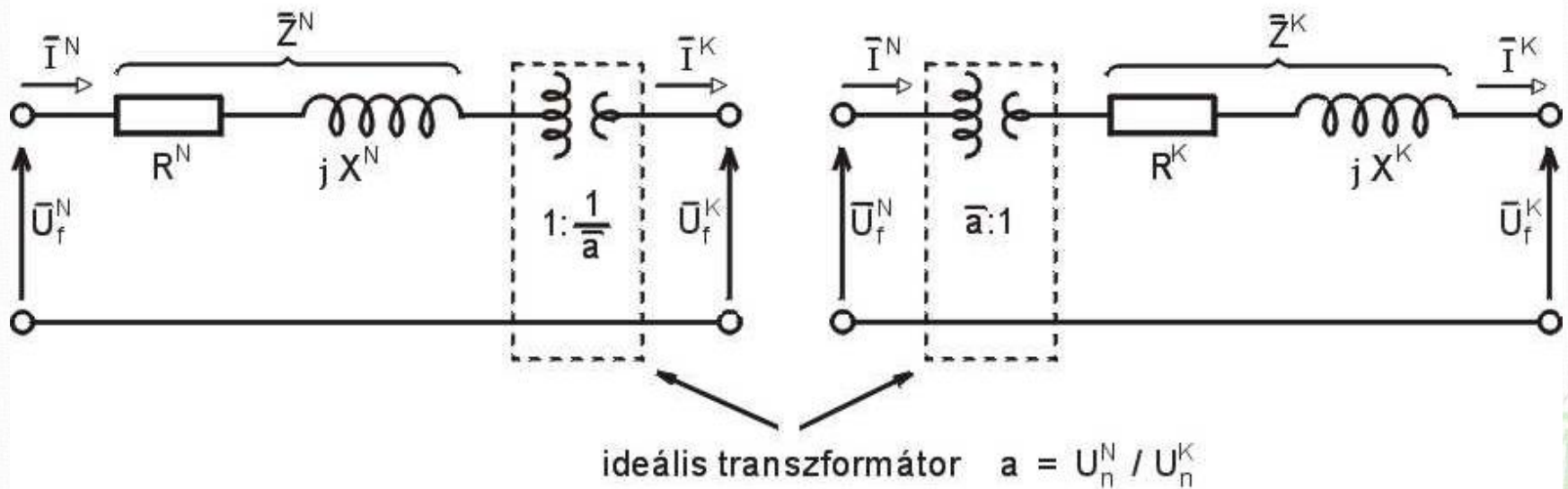
A transzformátor szekunder kapcsait rövidre zárva, azt a **primer feszültséget**, amelynél a primer tekercsben a névleges primer áram (I_{1n}) folyik, rövidzárási feszültségnek nevezzük:

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

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**:

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

Transzformátor paramétere

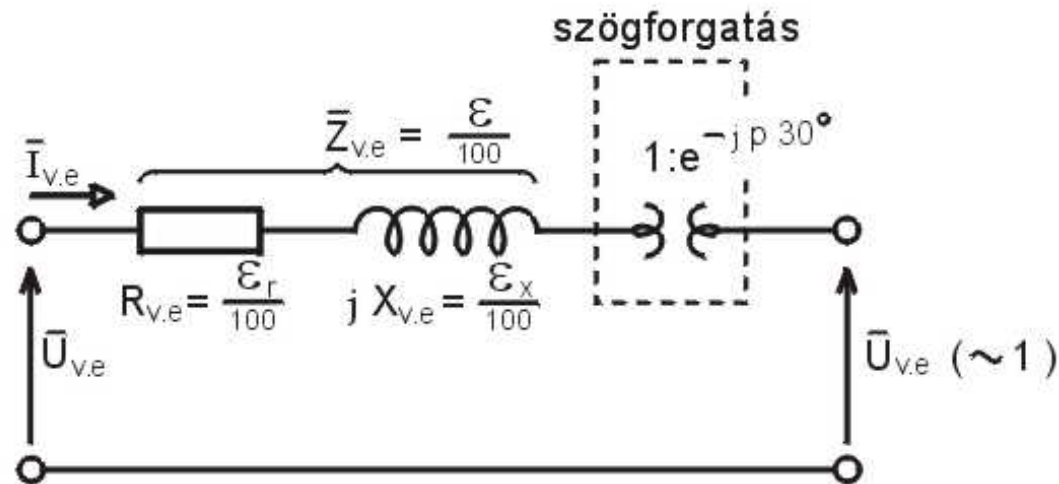


b / 1, nagyobb feszültségű szintra

b / 2, kisebb feszültségű szintra

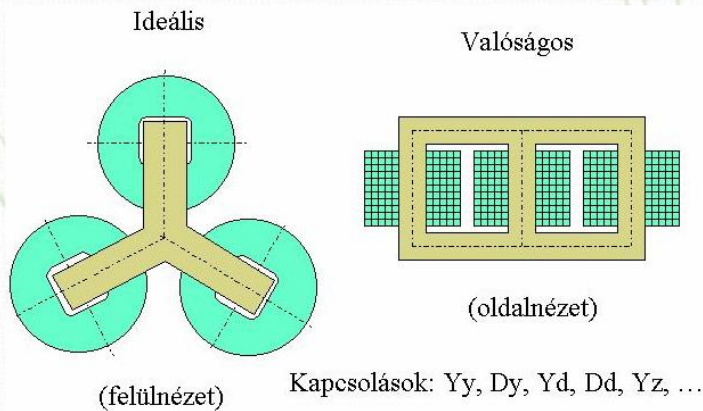
b, dimenzionális értékek

Transzformátor paramétere

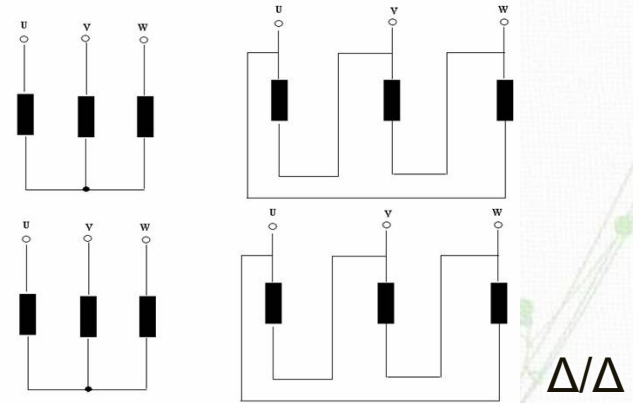


c, viszonylagos egységben megadott értékek
(teljesítmény alap a transzformátor névleges teljesítménye.)

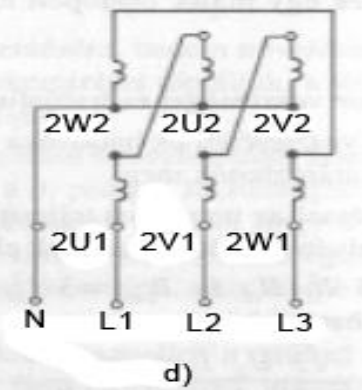
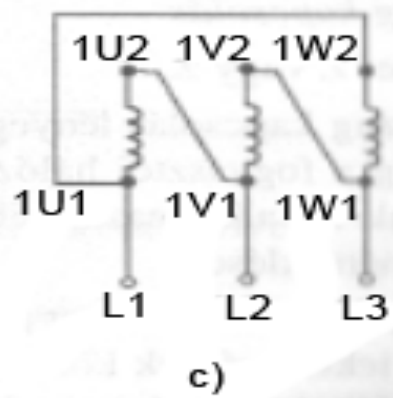
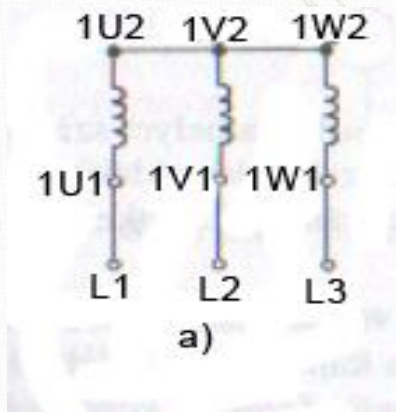
Háromfázisú transzformátorok - 1



Y / Y

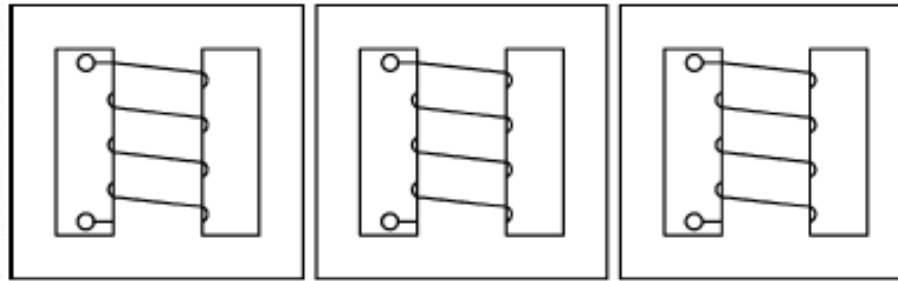


A három fázistekercs kapcsolható háromszögbe (delta), csillagba és ún. zezzugba.

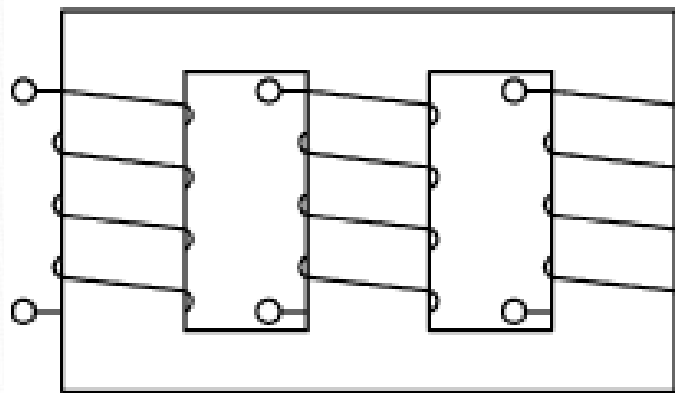


A gyakorlatban előforduló kapcsolások: csillag-csillag, csillag-zezug, csillag-háromszög és háromszög-csillag.

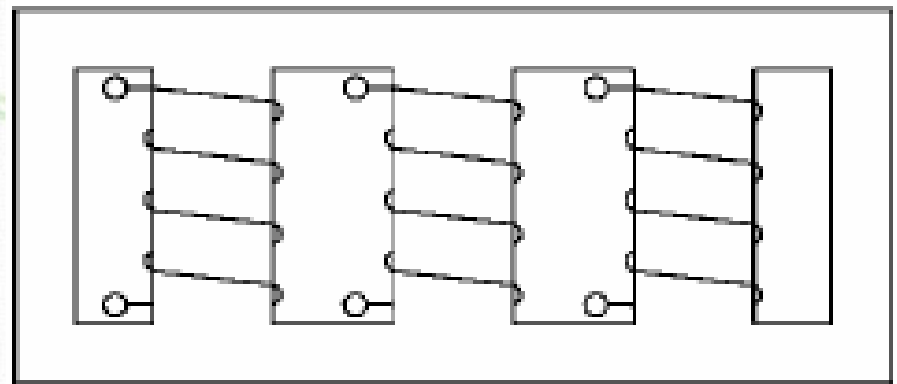
Háromfázisú transzformátorok - 2



Triplex (3 x 1 fázisú)



3 oszlopú vasmag



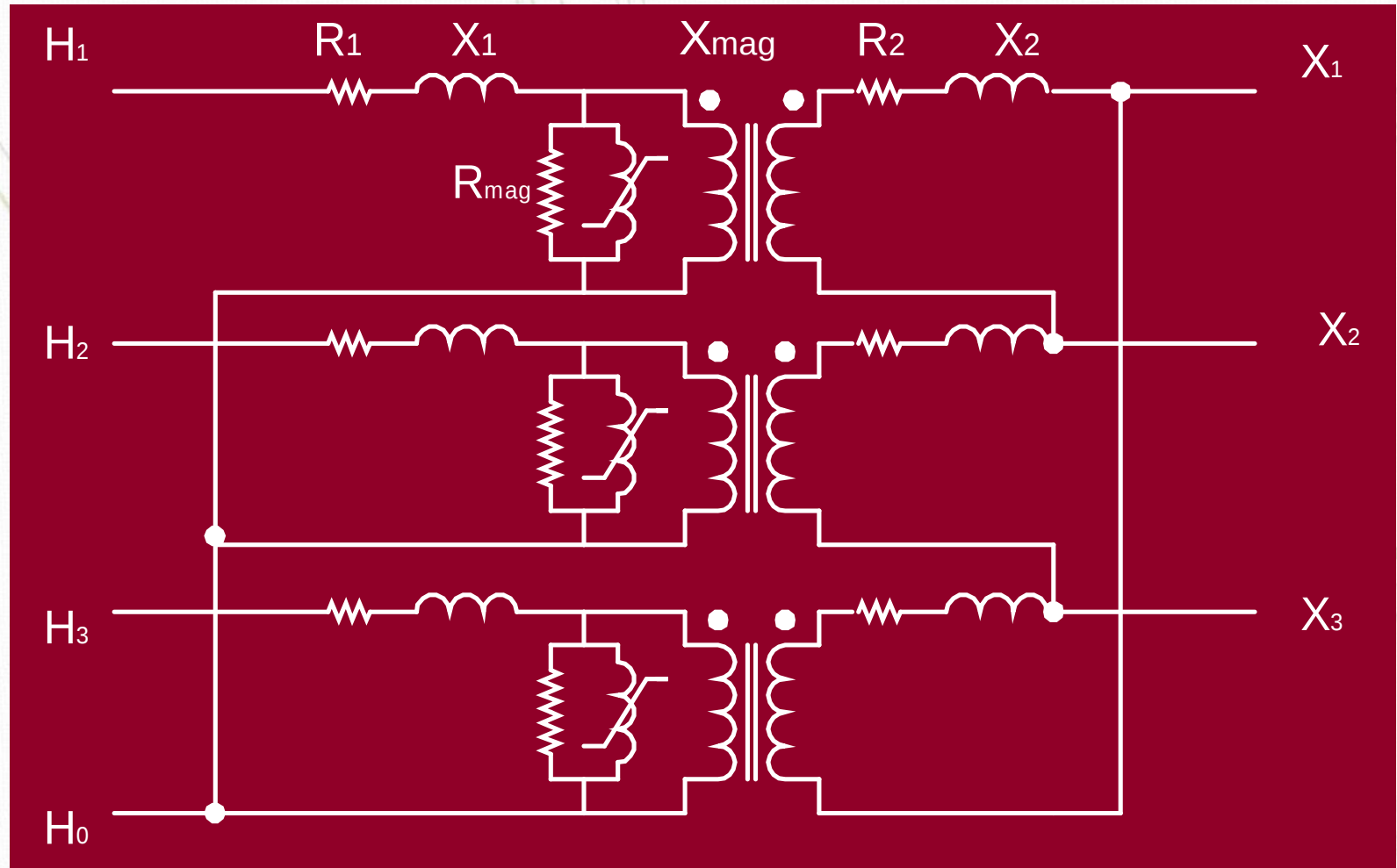
5 oszlopú vasmag

Háromfázisú transzformátorok - 3

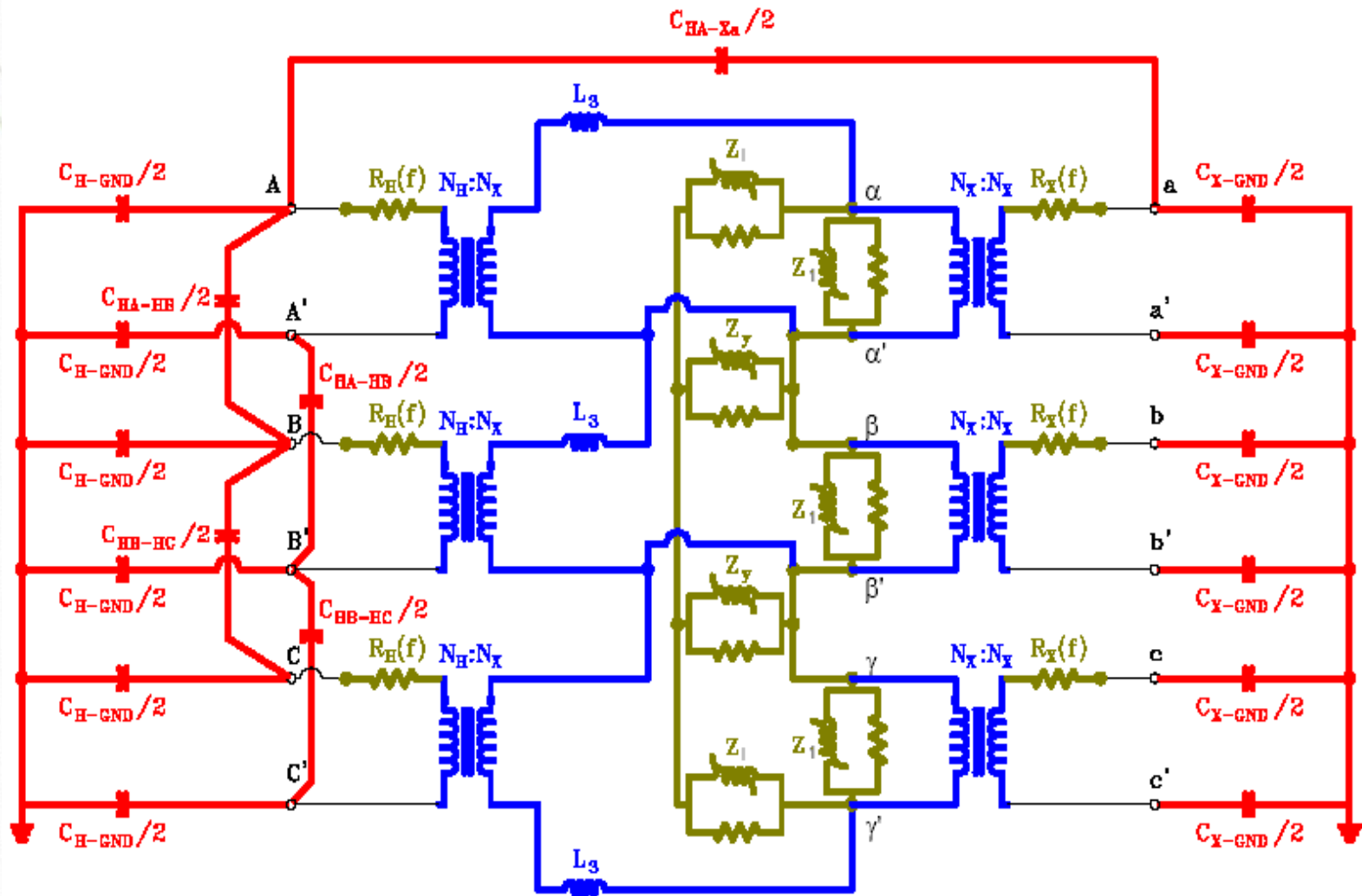
- Óraszám -

Könnyen belátható, hogy az egyes kapcsolások esetén a primer vonali feszültséghez képest a megfelelő szekunder vonali feszültség **eltérő fázisú lesz**. Például a **csillag-csillag kapcsolású transzformátor** nagyobb feszültségű oldalán a pozitív irányok ellentétesek a kisebb feszültségű oldal pozitív irányjaival (**a két feszültség éppen ellenfázisban van, azaz 180° -os a fáziseltérés**). Ha a **nagyobb vonali feszültséget az óra nagymutatójának**, a **kisebbet pedig a kismutatójának** képzeljük, akkor a nagymutató a 12-esre, a kismutató pedig a 6-osra mutat. Az energetikában az ilyen transzformátort **6 órásnak** mondják és a szabványos kapcsolási csoport jelölése: **Yy6**. (A nagybetű a nagyobb feszültségű oldalra, a kisbetű a kisebb feszültségűre vonatkozik.) Szokásos kapcsolási csoportok: **Yz5, Yd5, Yd11, Dy5**.

Háromfázisú, Y/d kapcsolású tr.



Tovább is lehet bonyolítani...De kell-e?



KöF/KiF oszlop transzformátor "állomás"

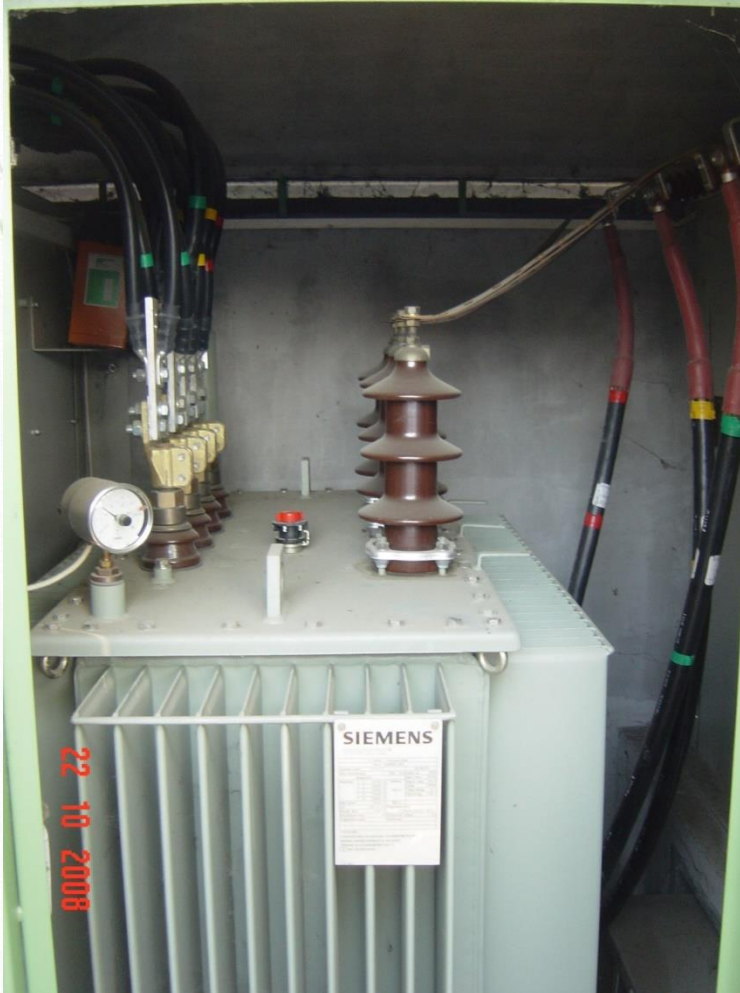
(20/0,4 kV)



KöF/KiF "betonházas" transzformátor állomás (20/0,4 kV)



KöF/KiF transzformátor



20/0,4 kV/kV, 630 kVA, 18/909 A/A (Hűtés: ONAN)

Transzformátorok a hálózatban



*“Gép” transzformátor
– erőművi blokk
(step-up)
transzformátor*



*NaF/KöF állomási
transzformátor (120/20 kV)*



*NaF/NaF állomási
transzformátor (400/120 kV)*

Alaphálózati autotranszformátor 400/120 kV (légmagos, tercier fojtótekerecs, hűtés: ONAF)



Transzformátor 400/120 kV



Connections			Equivalent circuit	Value of the zero-sequence reactance of the transformer, viewed from		
primary	secondary	tertiary		primary terminals 1	secondary terminals 2	tertiary terminals 3
				infinite	infinite	
				infinite	infinite	
				free flux infinite forced flux $X_{11} = 10 \text{ to } 15$ times X_{cc}	free flux infinite forced flux infinite	
				$X_{12} = X_{cc}$	$X_{12} = X_{cc}$	
				infinite	infinite	
				$X_{12} = X_{cc}$	infinite	
				infinite	infinite	
				infinite	$X_{22} = 1 \text{ p.c. at } S_n$	
				free flux infinite forced flux $X_{11} = 10 \text{ to } 15$ times X_{cc}	free flux infinite forced flux infinite	

*Transzformátor
zérus-sorrendű
helyettesítése:
2 tekercsű
transzformátor*

(most még nem kell!)

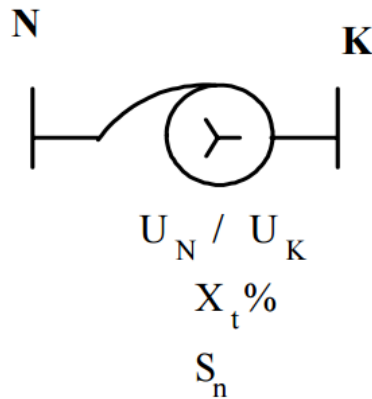
				free flux infinite forced flux $X_{11} = 10 \text{ to } 15$ times X_{12}	infinite	infinite
				$X_1 + X_2 = X_{12}$	$X_1 + X_2 = X_{12}$	infinite
				$X_1 + \frac{(X_2 + X_{02})(X_3 + X_{03})}{X_2 + X_3 + X_{02} + X_{03}}$	$X_2 + \frac{(X_1 + X_{01})(X_3 + X_{03})}{X_1 + X_3 + X_{01} + X_{03}}$	$X_3 + \frac{(X_1 + X_{01})(X_2 + X_{02})}{X_1 + X_2 + X_{01} + X_{02}}$
				$X_1 + \frac{X_2 X_3}{X_2 + X_3}$	infinite	infinite
				$X_1 + X_2 = X_{12}$	infinite	infinite
				$X_1 + \frac{X_2 (X_3 + X_{03})}{X_2 + X_3 + X_{03}}$	infinite	$X_3 + \frac{X_2 (X_1 + X_{01})}{X_1 + X_2 + X_{01}}$
				$X_1 + X_2 = X_{12}$	infinite	$X_{33} = 1 \text{ p.c. } S_n$

*Transzformátor
zérus-sorrendű
helyettesítése:
3 tekercsű
transzformátor*

*(most még
nem kell!)*

Különleges transzformátorok

Autotranszformátor (takarékos kapcsolású tr.)

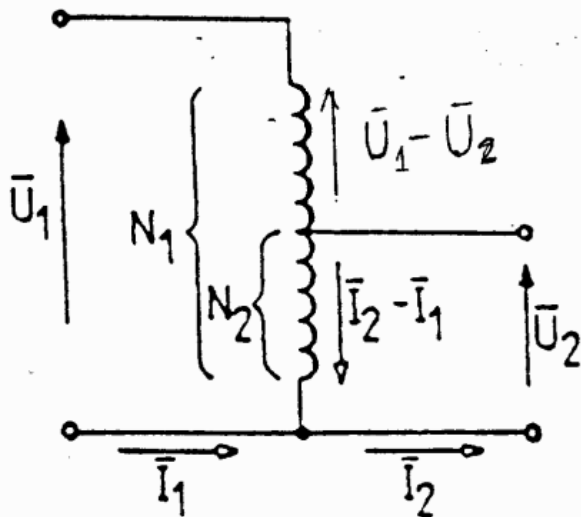


Előnye:

- Anyagtakarékos
(különösen nagy a megtakarítás egyhez közeli áttétel esetén)

Hátránya:

- Primer és szekunder oldal között nincs galvanikus leválasztás,
- Rövidzáráskor a primer fesz. a rendszerint kis N_1 - N_2 menetszámú tekercsrészre esik



Mérőtranszformátorok - 1

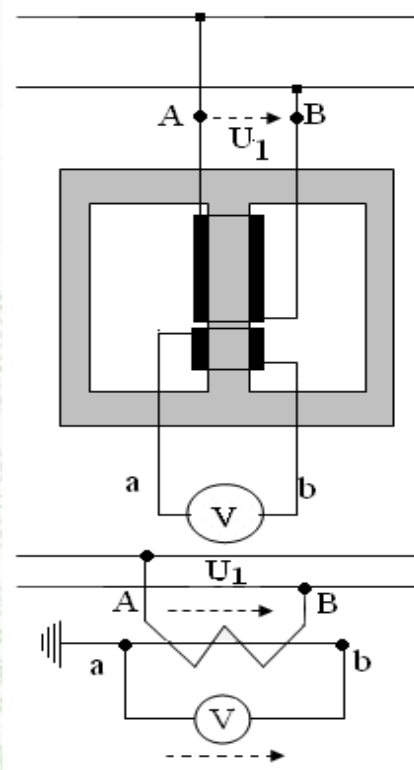
Feszültségváltó

A feszültségváltó a nagy váltakozó feszültséget 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**.

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

Fontos: A feszültségváltó szekunder kapcsait nem szabad rövidrezárni!



feszültséghiba:

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

szöghiba:

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

Mérőtranszformátorok - 2

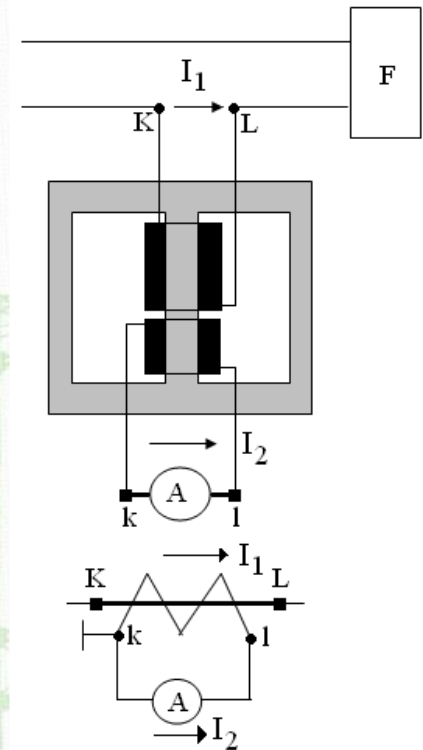
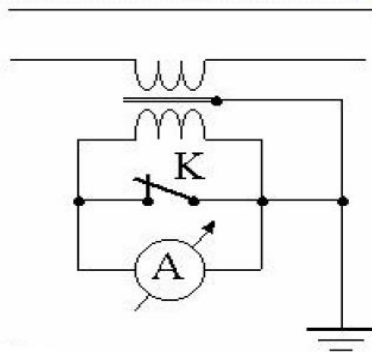
Áramváltó

Az áramváltó a nagy váltakozó áramot 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/mérőeszközt.

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

Fontos: Az áramváltó szekunder körét megszakítani nem szabad!



áramhiba:

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

szöghiba:

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

Köszönöm a figyelmet!

