

Transzformátorok

Egyfázisú transzformátor

- felépítése, állandósult üzeme.
- fő- és szórt fluxusok.
- indukált feszültség számítása.
- helyettesítő kapcsolás.
- feszültség-kényszer.
- gerjesztés- és teljesítmény-invariancia.
- paraméterek redukálása.
- üresjárási, rövidzárási és terhelési állapot.
- fázorábra.
- a szekunder feszültség változása.

Háromfázisú transzformátor

- felépítése, állandósult üzeme.
- **helyettesítő kapcsolás. ????**
- egyenlőtlen terhelés.
- kapcsolások, óraszám.

Különleges transzformátorok

- feszültség- és áramváltó.
- takarékkapcsolású transzformátorok.

Villamos gépek mágneses mezői

- Állandó, lüktető és forgó mezők.
- A mechanikusan forgatott mező.
- A mezőgörbe alakja. Gerjesztési görbe szerkesztése.
- Forgó mező létrehozása többfázisú tekercsrendszerrel.
- A forgómező tulajdonságai.
- Frekvencia-feltétel.

Váltakozóáramú tekercselések

- Váltakozóáramú villamos gépek koncentrált és elosztott tekercseléseinek kialakítása.
- Szinuszos mezőeloszlás létrehozása.
- Indukált feszültség számítása.
- Tekercselési tényezők.
 - A sávtényező
 - Lépésrövidítés, horonyferdítés

Erő- illetve nyomatékképzés elektromechanikai átalakítókban #1

- Egyoldalról gerjesztett gép energiaviszonyai. A mágneses energia és koenergia.
- Energiaviszonyok az állandó fluxus és az állandó áram kényszere esetén.
- Nyomaték számítása a mágneses energiából illetve koenergiából.
- Kéttetekrcses gép pillanatnyi nyomatéka az ön- és kölcsönös induktivitásokkal kifejezve.
- Átlagos nyomaték képzésének feltétele kéttetekrcses gépekben.
- Nyomatékképzés többfázisú gépekben. A frekvencia-feltétel.
- Járulékos illetve lüktető nyomatékok keletkezésének okai.

Mágneses terek és körök

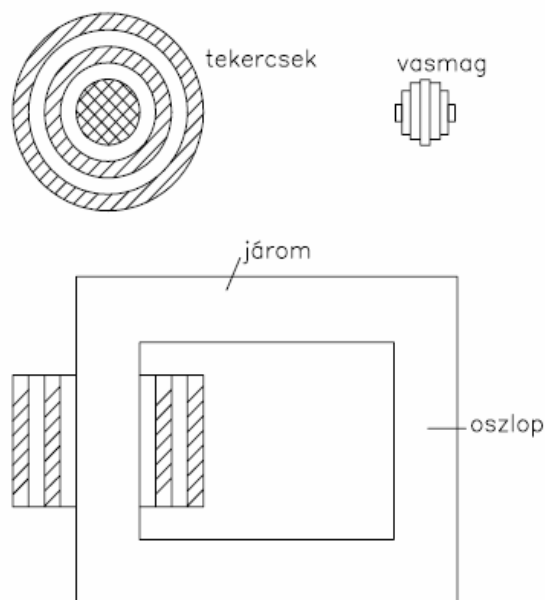
- A gerjesztési törvény értelmezése
- Villamos és mágneses körök analógiája
- A mágnesezési görbe
- Mágneses kör légréssel
- Az induktivitás számítása

Kidolgozás

Transzformátorok

Egyfázisú transzformátor

- felépítése, állandósult üzeme.



A transzformátorok aktív részei: atekercsek és a vasmag. A transzformátor sematikus rajza látható az alábbi ábrán.

A transzformátor vasmagos kölcsönös induktivitás. A cél a két tekercs minél tökéletesebb csatolása azaz a minél nagyobb kölcsönös fluxus (az un. főfluxus) és a legkisebb a csatolásban részt nem vevő fluxusok (az un. szórt fluxusok) kialakítása. Ezt a vasmaggal és azzal érjük el, hogy a két tekercs egymást körülveszi.

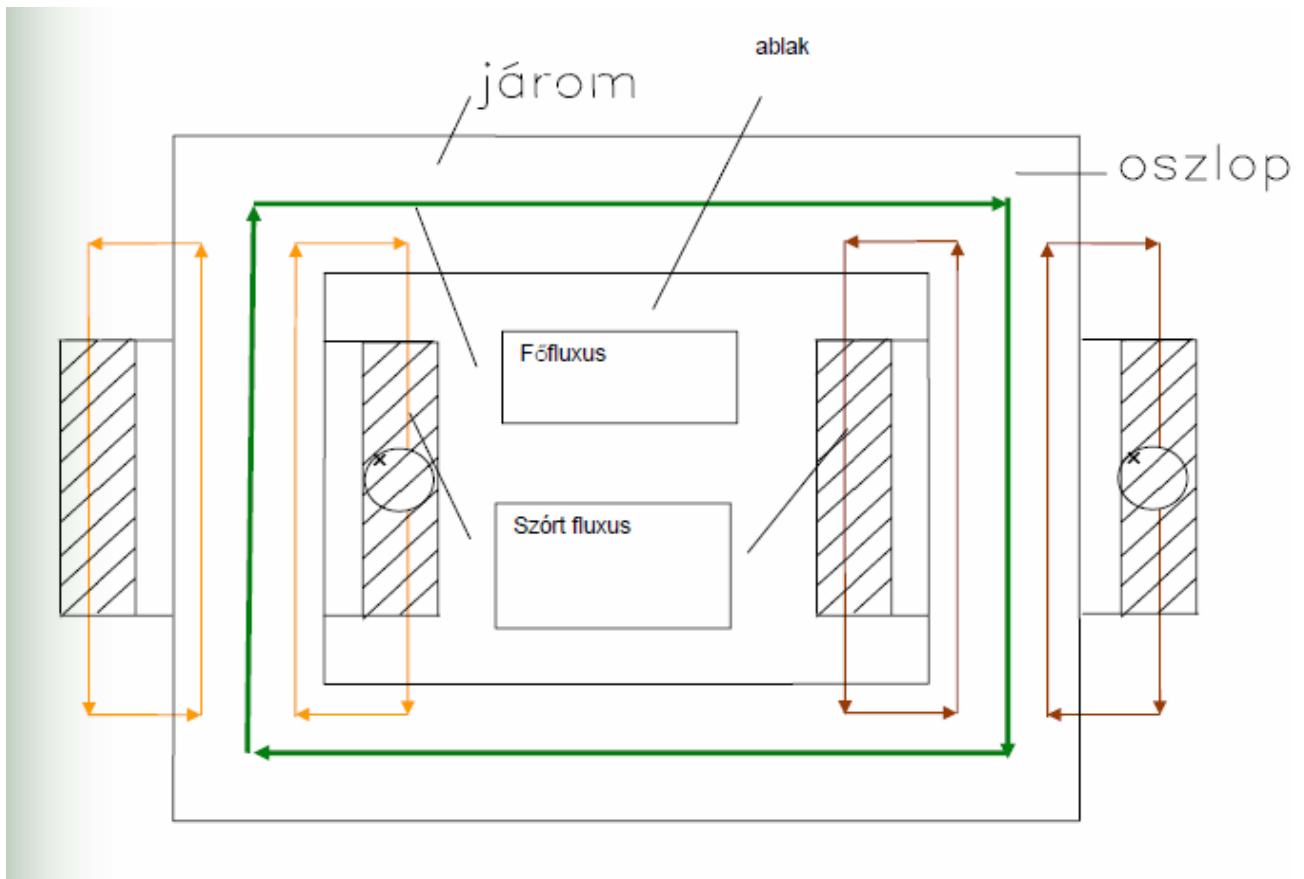
Erőátviteli, kisfrekvenciás, normál üzemi - elsősorban állandósult állapotbeli - vizsgálatokra alkalmas, egyszerű, koncentrált paraméterű helyettesítő (modellező) áramkört kívánunk kialakítani, és pedig a szuperpozíció érdekében lineáris, azaz állandó paraméterű - és galvanikus csatolású - kapcsolást. Így elhanyagoljuk a tekercsek menet- és földkapacitásait és lineáris vasmagot tételezünk fel. Utóbbi a feszültségkényszerrel nyert gyakorlatilag állandó fluxus révén - ezt látni fogjuk

- normál üzemben megengedhető közelítés. Fluxusaink ϕ / N úgynevezett egyenértékű menetfluxusok. További közelítéseket menet közben látunk.

- fő- és szórt fluxusok.

Tápláljuk először a transzformátorunk primer tekercsét üresjárásban, azaz nyitott szekunder kapcsolattal. A kialakuló bonyolult fluxusképét a fluxusvonalak hatásai szerint - kissé önkényesen - két részfluxusra bonthatjuk. A vasmagban haladó mindkét tekercssel kapcsolódó hasznos fluxus létesíti az energiaátvitelt ezért azt főfluxusnak - vagy mágnesező fluxusnak - nevezzük és ϕ -vel, jelöljük. **Mivel a vas permeabilitása a levegőének kb. 1000-szerese a főfluxus sokkal nagyobb mint a levegőben záródó néhány százalékot kitevő szórt fluxus, a primer tekercs ϕ s1 szórt fluxusa.** Az alábbi ábrán rajzolt fluxusképek szimbólikusak, vázlatosak. Ha a transzformátorra terhelést - fogyasztókat - kapcsolunk akkor a szekunder tekercsben is folyik áram. Ekkor ott is megjelenik a ϕ s2 szekunder szórt fluxus. A főfluxust a két tekercs eredő gerjesztése hozza létre.

A tekercsek ellenállásai ill. szórt fluxusai nem vesznek részt az energiaátvitelben.



- indukált feszültség számítása.**

A tekercsek indukált feszültségeinek

$$\overline{U}_{i1m} = N_1 \frac{d\overline{\phi}_m}{dt} \quad \overline{U}_{i2m} = N_2 \frac{d\overline{\phi}_m}{dt}$$

számításakor a főfluxus

$$\overline{\phi}_m = \overline{\phi}_m e^{j\omega t} = \phi_m e^{j\phi} e^{j\omega t}$$

teljes időfüggvényével kell számítanunk

$$\overline{U}_{i1m} = j\omega N_1 \overline{\phi}_m e^{j\omega t} \quad \overline{U}_{i2m} = j\omega N_2 \overline{\phi}_m e^{j\omega t}$$

majd az időfüggvényt itt is elhagyjuk:

$$\overline{U}_{i1m} = j\omega N_1 \overline{\phi}_m \quad \overline{U}_{i2m} = j\omega N_2 \overline{\phi}_m$$

Hányadosuk a menetszám áttétel

$$n = \frac{U_{1im}}{U_{2im}} = \frac{N_1}{N_2}$$

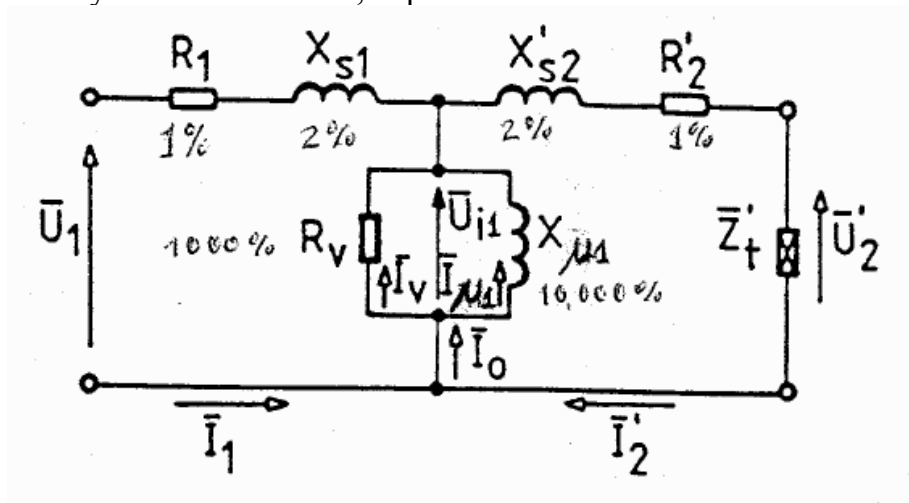
A primer indukált feszültség effektív értéke

$$U_{li} = \frac{U_{ilm}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f_1 N_1 \phi_m \quad U_{li} = 4,44 f_1 N_1 \phi_m$$

Fontos, sokszor alkalmazott, kifejezést nyertünk. ϕ_m a főfluxus maximális értéke.

- helyettesítő kapcsolás.

Az $\omega L_{\mu 1} = X_{\mu 1}$ mágnesező reaktancia bevezetésével már felrajzolhatjuk a transzformátor helyettesítő áramkört, kapcsolását.



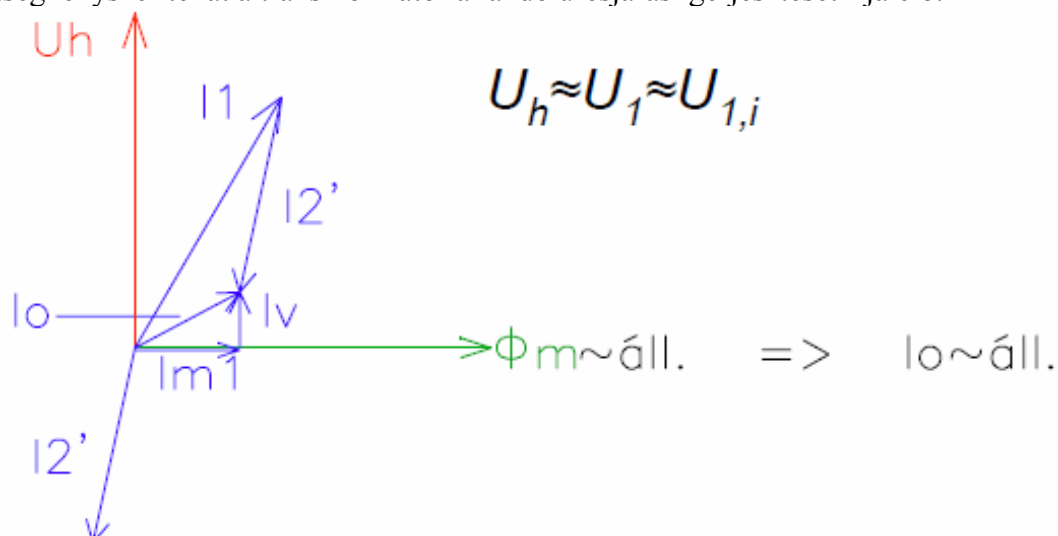
A vasvesztés közelítőleg az indukció négyzetével, azaz a főfluxus

így az indukált feszültség négyzetével arányos $P_{vas} = U_{li}^2 / R_v$ így az ellenállás nagysága

$$R_v = \frac{U_{li}^2}{P_{vas}}$$

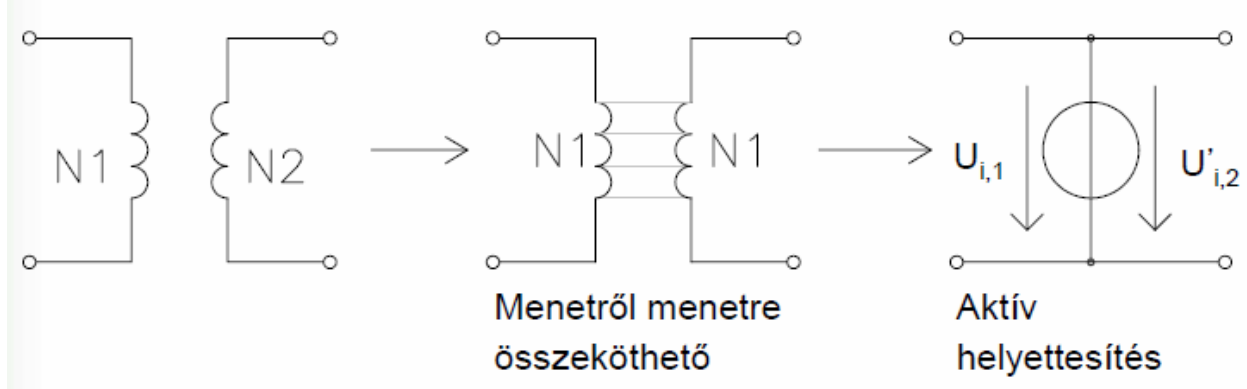
- feszültség-kényszer.

Az állandó $U_{1,i}$ indukálásához állandó Φ_m főfluxus szükséges, annak létesítéséhez pedig állandó $I_{l,o}$ üresjárási áram ill. állandó $\Theta_{l,o} = N I_{l,o}$ üresjárási gerjesztés. Az $U_h = \text{áll}$ hálózati feszültségkényszer tehát a transzformátor állandó üresjárási gerjesztését írja elő.



- gerjesztés- és teljesítmény-invariancia.

Az ideális transzformátor kiküszöbölése



1. Következtetés: az ideális transzformátor kiküszöbölését a **gerjesztések invarianciája** = változatlansága mellett oldottuk meg. Ezzel a változtatással azonban a paraméterek is módosulnak. Milyen feltételt szabunk a paraméterek változására?

2. Következtetés: energiaátviteli transzformátort vizsgálunk, ezért célszerű az a választás a paraméterek változására, hogy a *teljesítmény* is *invariáns* legyen.

Ez teljesül:

$$S_2 = U_2 I_2 = (n U_2) \left(\frac{I_2}{n} \right) = U'_2 \cdot I'_2$$

Hasonlóan: $P_{t,2} = R_2 I_2^2 = R_2 \left(\frac{I_2}{n} \right)^2 n^2 = n^2 R_2 (I'_2)^2 = R'_2 (I'_2)^2$

Láthatóan:

$$R'_2 = n^2 R_2$$

$$X'_s = n^2 X_s$$

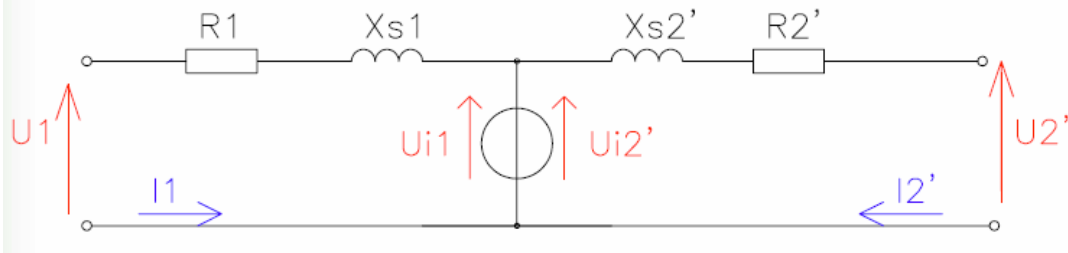
Általában:

$$Z'_2 = n^2 Z_2$$

Az új változókkal a feszültség-egyenlet:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{i,1} \\ \bar{U}_2' &= R_2' \bar{I}_2' + jX_{s2}' \bar{I}_2' + \bar{U}_{i,2}'\end{aligned} \quad \bar{U}_{i,1} = \bar{U}_{i,2}'$$

Vagyis az „aktív” helyettesítő kapcsolás:



- paraméterek redukálása.

Szerintem ez majdnem az előző, de ????

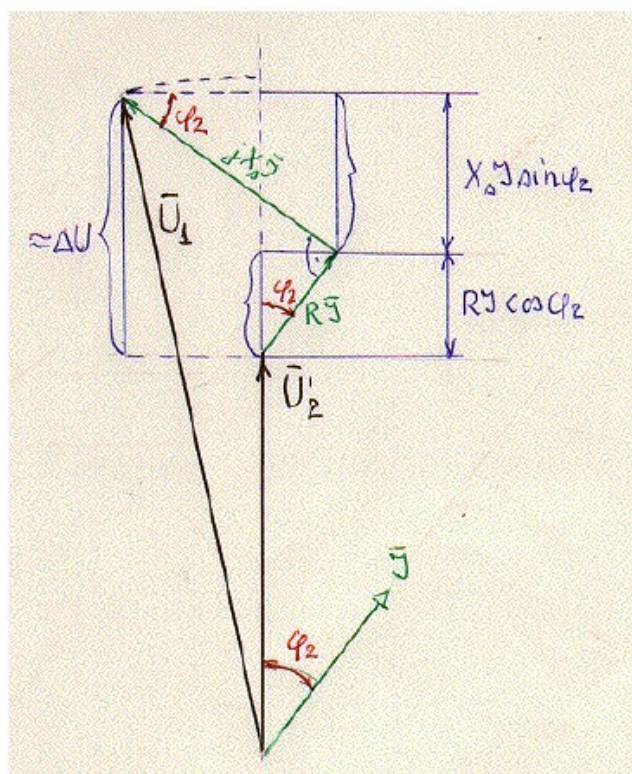
- üresjárási, rövidzárási és terhelési állapot.

A transzformátor **feszültségváltozása** - ami induktív terheléskor feszültségesés - a transzformátor szekunder kapocsfeszültségének megváltozása a terhelés hatására, azaz **az üresjárási $U_{2,0}$ és terhelési U_2 szekunder kapocsfeszültségek nagyságainak különbsége az üresjárási értékre vonatkoztatva:**

$$\frac{\Delta U}{U_{2,0}} = \frac{U_{2,0} - U_2}{U_{2,0}}$$

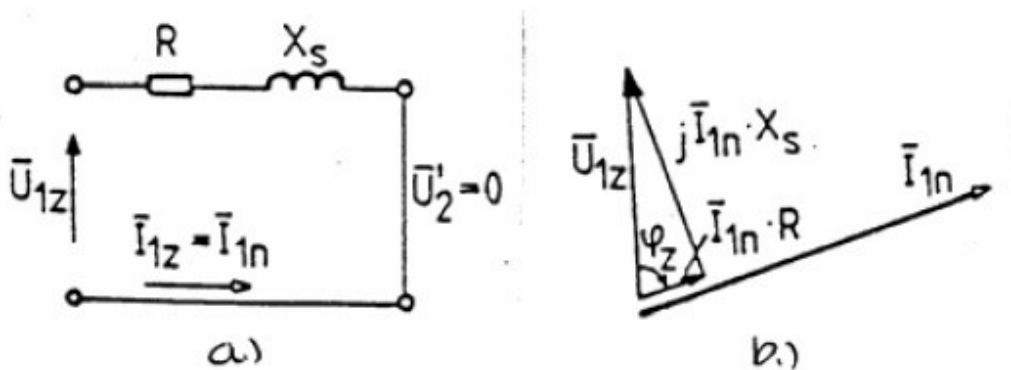
A szekunder feszültségeket a primerre redukálva az névleges értékkel

$$\frac{\Delta U}{U_{1,n}} = \frac{U_{1,n} - U_2'}{U_{1,n}}$$



A transzformátor rövidzárási állapota

Megkülönböztetjük az üzemi és a mérési rövidzárast. Előbbinél a névleges primer feszültségre kapcsolt transzformátor szekunderjének rövidzárásakor, ha a transzformátor névleges feszültségesése 5%, akkor 20-szoros állandósult áram keletkezik 400-szoros erő- és hőhatással. Ezt még megelőzi egy nagyobb átmeneti áramcsúcs. Az üzemi rövidzárlattal nem foglalkozunk. A zárlati mérés segítségével a transzformátorok egyik alapvető jellemzője, a **drop** határozható meg. A mérési rövidzárlathoz tartozó helyettesítő kapcsolás a) és a vektorábra b):



Mérési rövidzáráskor az a) ábra szerint a rövidrezárt transzformátor primer feszültségét addig növeljük, míg abban a névleges áram folyik. Ennek a feszültségnek a névleges értékre vonatkoztatott - rendszerint százalékban megadott - értéket nevezzük a transzformátor rövidzárási feszültségének vagy dropjának:

$$\frac{\bar{U}_{1,z}}{U_{1,n}} = \frac{\bar{I}_{1,n} R}{U_{1,n}} + j \frac{\bar{I}_{1,n} X_s}{U_{1,n}}$$

A bevezetett jelölésekkel: $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_R + j \varepsilon_X$

$$|\bar{\varepsilon}| = \varepsilon = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_X^2} = \text{DROP}$$

Az ε -nal jelölt drop tehát nem más, mint a transzformátor rövidzárási feszültségesése százalékos (viszonylagos) értékben megadva. Szokásos nagysága a transzformátor terhelésétől függően 5–15%; nagyobb névleges teljesítményhez általában nagyobb drop tartozik a zárlati áramok korlátozása érdekében. A drop a transzformátor fontos jellemzője. Megszabja a rövidzárlati áram nagyságát, az előbbiek szerint a feszültségesést és a transzformátorok párhuzamos kapcsolásakor is szerepe van.

- **fázorábra.**

Erőátviteli hálózataink állandó feszültségű és állandó frekvenciájú rendszerek. Ez transzformátoraink és váltakozó áramú gépeink működését, vizsgálatát alapvetően befolyásolja.

Az

$$U_{hál} = U_1 = áll \quad (f_{hál} = áll.)$$

alapvető kényszer hatását jól követhetjük a transzformátor fázorábráján, amelyet a helyettesítő kapcsolás alapján rajzolhatunk fel.

Induljunk ki üresjárásból. Ekkor a primer impedancián a kis

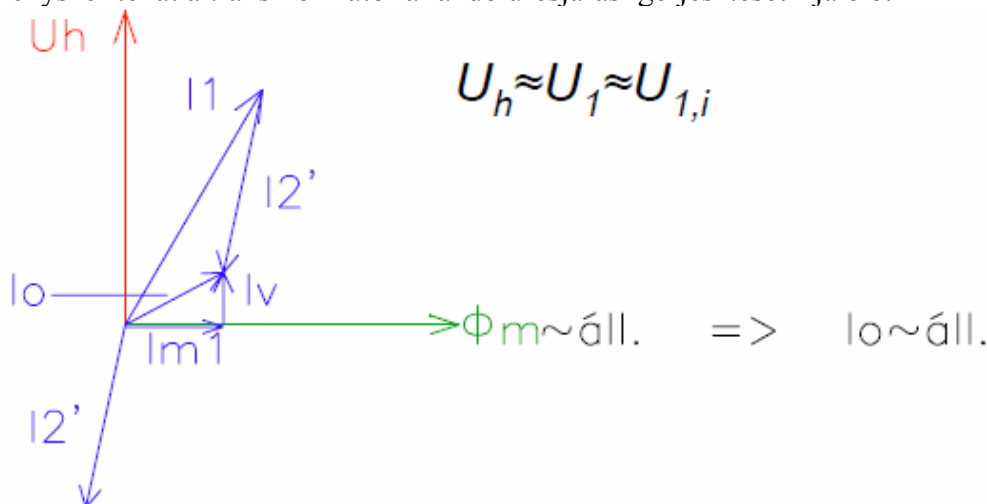
$$I_{1,0} \approx 0,1 \cdot I_{1,n}$$

üresjárási áram nagyon kis feszültségesést hoz létre így:

$$\bar{U}_1 \approx \bar{U}_{1,i} \approx áll$$

Mindjárt megjegyezzük, hogy a primer feszültségesés terheléskor is csak néhány százalék, így ez az összefüggés jó közelítéssel akkor is érvényes.

Az állandó $U_{1,i}$ indukálásához állandó Φ_m főfluxus szükséges, annak létesítéséhez pedig állandó $I_{1,0}$ üresjárási áram ill. állandó $\Theta_{1,0} = N I_{1,0}$ üresjárási gerjesztés. Az $U_h = áll$ hálózati feszültségekényszer tehát a transzformátor állandó üresjárási gerjesztését írja elő.



Terheljük most a transzformátort, azaz kapcsoljunk a szekunderére - pl. induktív jellegű - fogyasztót. Az a terhelésnek "ki van szolgáltatva", ugyanis a gyakorlatilag állandó szekunder indukált feszültség és a Z_t terhelő impedancia megszabja a szekunder áram nagyságát és fázisszögét.

Helyettesítő vázlatunkban:

$$\bar{I}'_2 = -\bar{U}'_2 / \bar{Z}_t = \bar{U}'_{2i} / (\bar{Z}'_2 + \bar{Z}'_t)$$

Megjelenik az I_2 szekunder terhelő áram. Hogyan reagál erre a primer oldal?

Az üresjárási gerjesztés nem változhat, így a primer gerjesztésnek - ezzel a primer áramnak - nagyságra és fázisszögére úgy kell beállni, a transzformátornak mindig olyan primer áramot kell a hálózathoz felvenni, hogy teljesüljön az

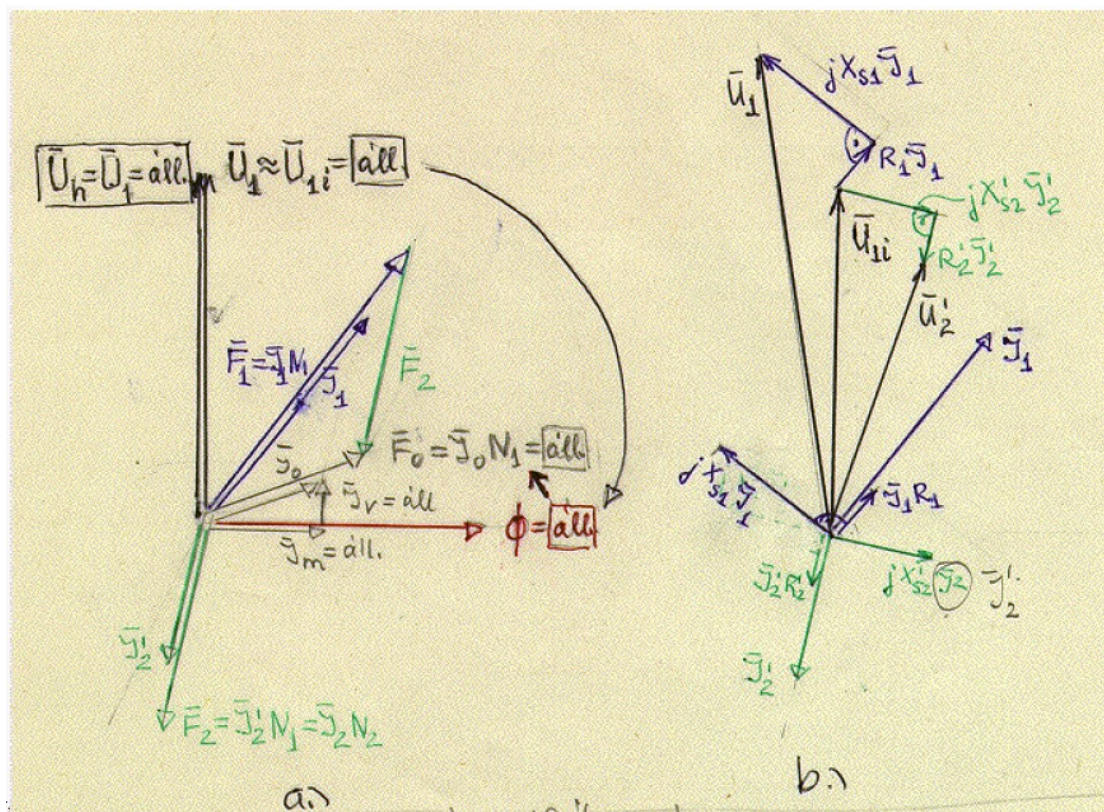
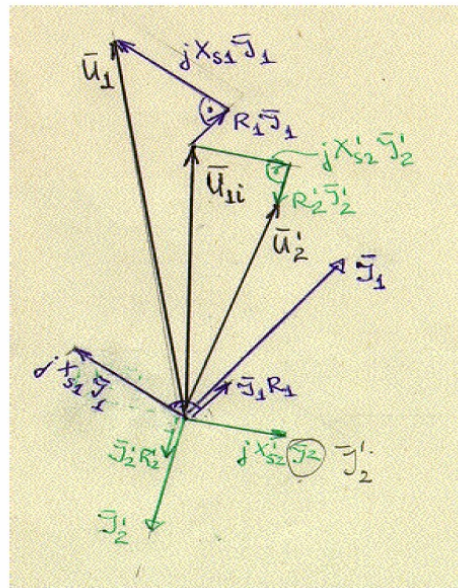
$$N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_{1,0} = áll, \quad (\bar{\Theta}_1 + \bar{\Theta}_2 = \bar{\Theta}_{1,0})$$

Mind az $\bar{I}_1$ mind az $\bar{I}'_2$ áram
ohmos és szórási
feszültség-esést hoz
létre. Fazorábrákat
ezekkel egészítettük ki.

Feltettük hogy az $\bar{U}_{1,i} = \bar{U}'_{2,i}$
 $\bar{I}_1$ és $\bar{I}'_2$
fazorokat ismerjük.

Az ábra rajztechnikai
okokból **hamis**, a
valóságos feszültség-
esések

2-3%-ot tesznek ki.

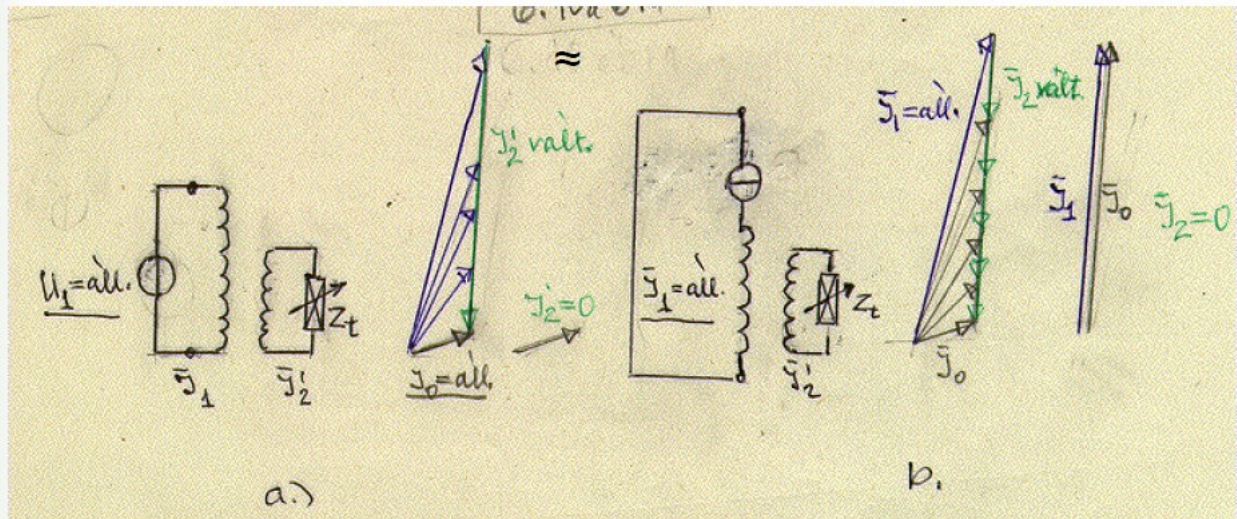


Fazorábra: üresjárás (a) és terhelés (b)

(a) Feszültség- és (b) áramtranszformátor

Az **első** esetben az $\bar{I}_0 = \text{áll}$ kényszer következtében a két áram változása a gerjesztések egyensúlya törvény szerint "összehangolt".

A **második** esetben az $\bar{I}_1 = \text{áll.}$ kényszer következtében $\bar{I}'_2 = 0$ -hoz $\bar{I}_1 = \bar{I}_0$ azaz pl. 20-szoros üresjárási áram és az ahhoz tartozó - a



- a szekunder feszültség változása.

A transzformátor feszültségváltozása

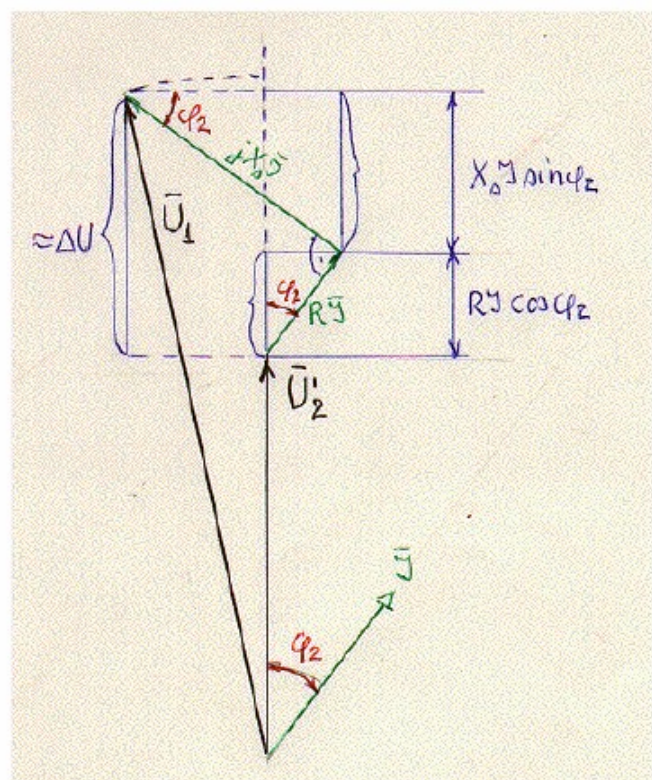
A transzformátor **feszültségváltozása**

- ami induktív terheléskor feszültségesés - a transzformátor szekunder kapocsfeszültségének megváltozása a terhelés hatására, azaz az **üresjárási** $U_{2,0}$ és **terhelési** U_2 **szekunder kapocsfeszültségek nagyságainak különbsége az üresjárási értékre vonatkoztatva:**

$$\frac{\Delta U}{U_{2,0}} = \frac{U_{2,0} - U_2}{U_{2,0}}$$

A szekunder feszültségeket a primerre redukálva az névleges értékkel

$$\frac{\Delta U}{U_{1,n}} = \frac{U_{1,n} - U'_2}{U_{1,n}}$$



Ha a közepes vetítést merőlegessel közelítjük:

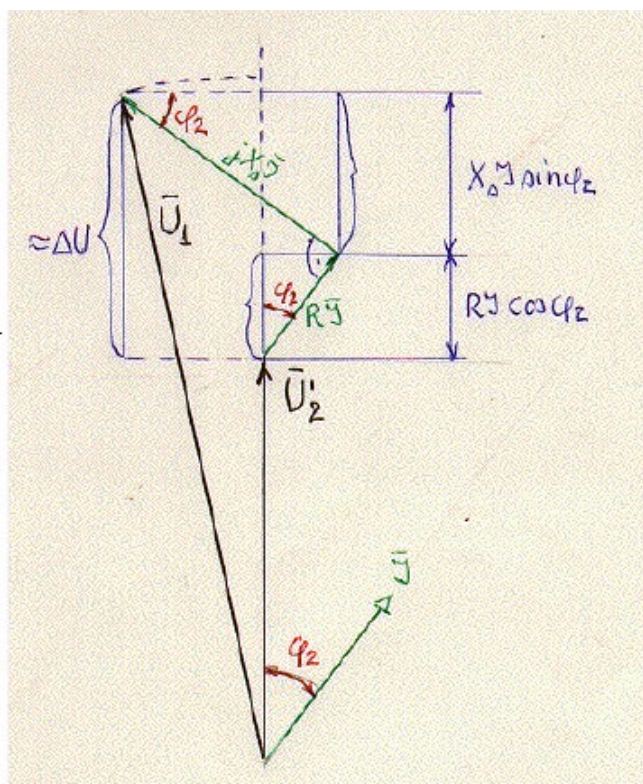
$$\Delta U = U_{1,n} - U'_2 \approx IR \cos \varphi_2 + IX_s \sin \varphi_2$$

Relatív egységekben:

$$\frac{\Delta U}{U_{1,n}} = I \left(\frac{R}{U_{1,n}} \cos \varphi_2 + \frac{X_s}{U_{1,n}} \sin \varphi_2 \right) \cdot \frac{I_{1,n}}{I_{1,n}}$$

Átrendezve:

$$\frac{\overbrace{\Delta U}^{\varepsilon}}{U_{1,n}} = \frac{\overbrace{I}^{\alpha}}{I_{1,n}} \left[\frac{\overbrace{I_{1,n} R}^{\varepsilon_R}}{U_{1,n}} \cos \varphi_2 + \frac{\overbrace{I_{1,n} X_s}^{\varepsilon_X}}{U_{1,n}} \sin \varphi_2 \right]$$

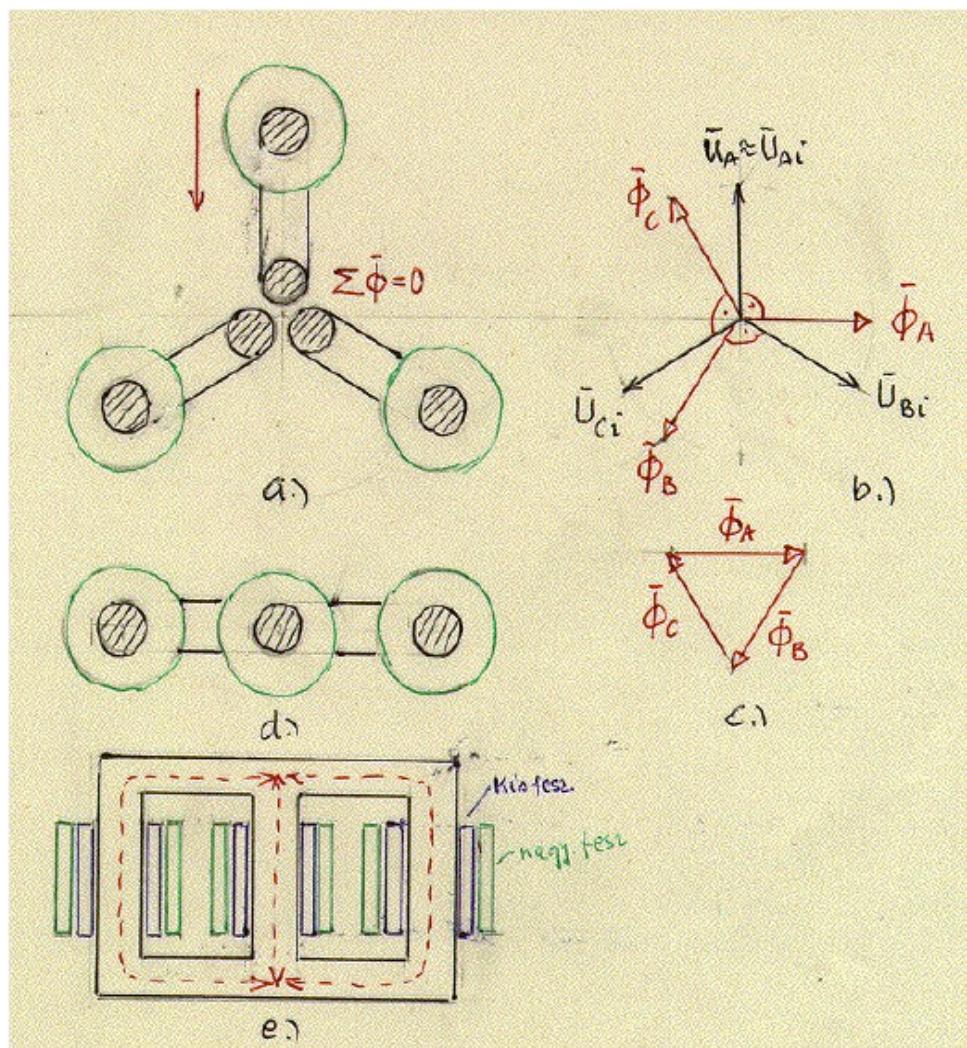


Háromfázisú transzformátor

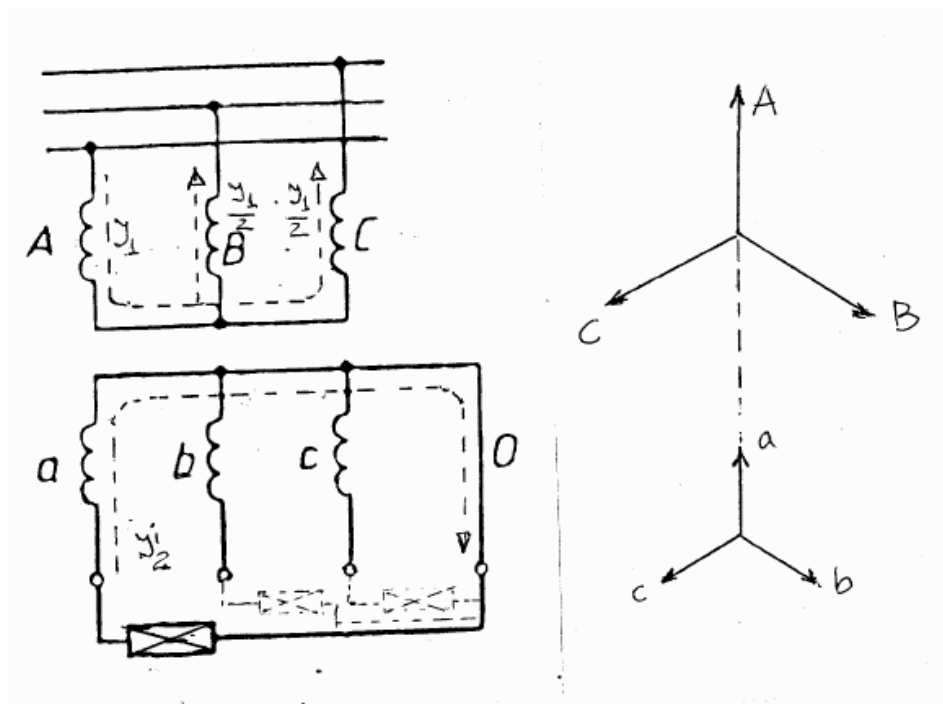
- felépítése, állandósult üzeme

Háromfázisú transzformátort legegyszerűbben úgy nyerünk ha 3 darab egyfázisú transzformátor primer és szekunder tekercseit láncoljuk pl. csillagba vagy háromszögbe kapcsoljuk. Hiba esetén ilyenkor elég egy egyfázisú transzformátort cserélni illetve nagy teljesítménynél a szállíthatóság írhatja elő a három különálló gépet. Mindjárt látjuk, hogy a háromfázisú egység olcsóbb ezért Európában, nálunk is, többnyire ezt alkalmazzák.

A használatos **magtípus** leszármaztatásához helyezzünk el három lánc típusu egyfázisú egységet szimmetrikusan, a). A b) ábrán a hálózat szimmetrikus háromfázisú feszültségrendszerét, az azzal gyakorlatilag egyező indukált feszültségrendszert és az utóbbihoz 90°-kal késő fluxus-rendszert rajzoltunk. A c) ábrán látható, hogy $\sum \Phi_k = 0$. Az a) ábra középső oszlopa így fluxusmentes és elhagyható. Az egyik oszlopot a másik kettő közé betolva a d) és e) ábrákon a használatos aszimmetrikus magtípusú háromfázisú transzformátort látjuk.



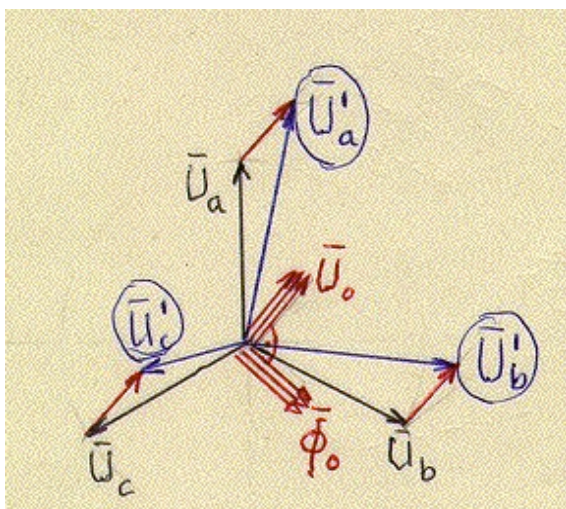
- helyettesítő kapcsolás.
- egyenlőtlen terhelés.



$$N1I1 + N2I2 = N1I0 = \dot{A} \cdot I1 (F1 + F2 = F0) \quad (6-24)$$

A 6.18. ábra csillag-csillag kapcsolásában tételezzük fel az aszimmetria szélső, legrosszabb és legáttekinthetőbb esetét, amikor csak egy fázisban van terhelés. (Másik kettőben mindenki nyaral.) Látható, hogy a B és C fázisokban csak a primer oldalon folyik áram. Így az üresjárási gerjesztés elhanyagolásával a (6-24)-ből nyerhető $N1I1 = -N2I2$ kifejezésben $N2I2 = 0$ így ezeken az oszlopokon $N1(I1 / 2)$ kiegyenlítő gerjesztés jelenik meg. Kimutatható, hogy ilyen kiegyenlítő gerjesztés jelenik meg az A oszlopon is és mindhárom oszlop kiegyenlítő gerjesztése azonos fázisú. Az azonos fázisú gerjesztések három azonos irányú Φ_0 fluxust (un. zérussorrendű fluxusokat) hoznak létre és azok három 90° -ra siető egyfázisú U_0 feszültséget indukálnak. Ezeket az egyfázisú feszültségeket a transzformátor U_a, U_b, U_c szimmetrikus szekunder feszültség rendszeréhez hozzáadva (6.19. ábra) teljesen aszimmetrikus U_a', U_b', U_c' kapocsfeszültségrendszert nyerünk, ami a fogyasztók szempontjából megengedhetetlen (pl. megnövelt feszültségnél az égők kiégnek, a csökkentnél alig világítanak).

6.19



Aszimmetrikus terheléskor vasmag oszlopokon kiegyenlítő gerjesztések jelennek meg, amelyek a szekunder kapocsfeszültség rendszer megengedhetetlen aszimmetriáját okozzák.

Megoldás: A gerjesztések egyensúlyának minden oszlopon fenn kell állnia.

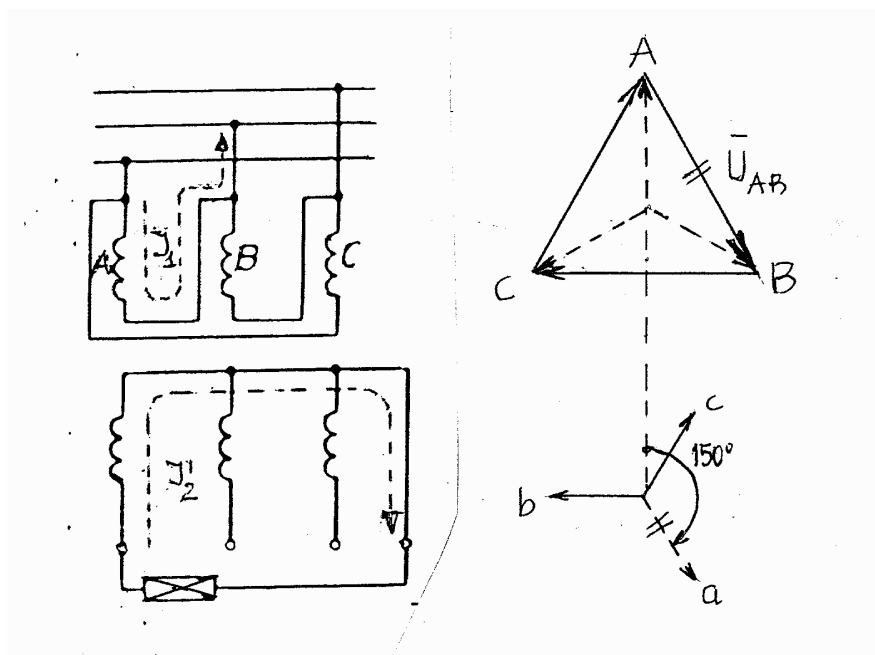
Ezt kétféle kapcsolással érhetjük el:

- Háromszög-csillag
- Csillag-zeg-zug

- kapcsolások, óraszám.

Háromszög-csillag

6.20.

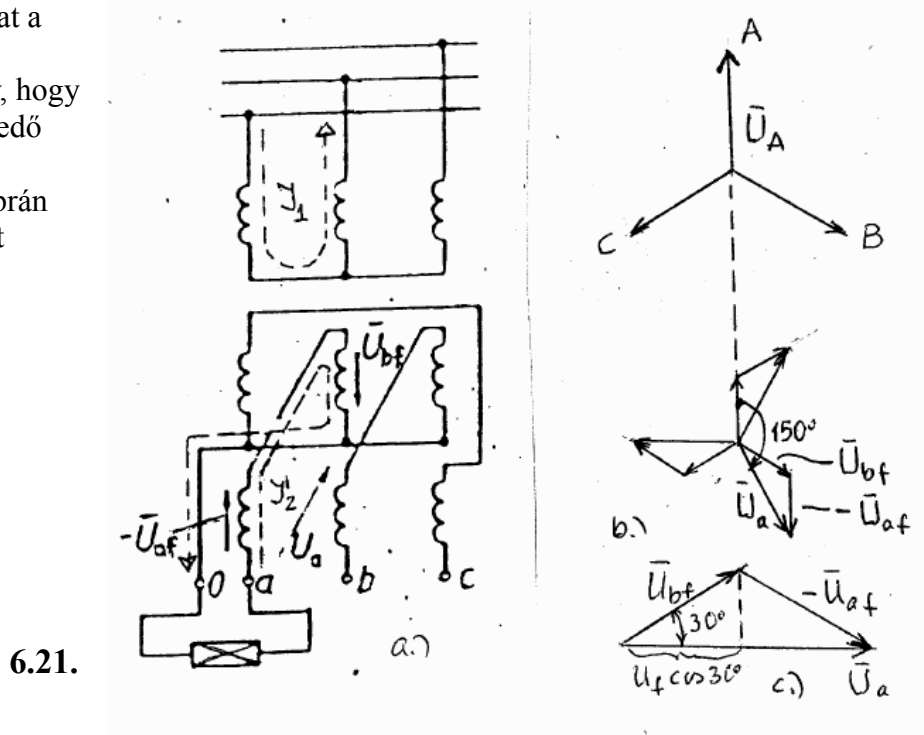


A 6.20. ábrán látható, hogy a primer fázisáram úgy folyik vissza a hálózatra, hogy másik fázistekercsen nem megy keresztül. Így kiegyenlítő gerjesztések nem keletkeznek.

Háromszög kapcsolásnál be szokás jelölni az egyenértékű csillag fázisfeszültségeit. Figyeljük meg, hogy az A-a fázisfeszültségek között 150° -os szögeltérés van. Ez 30° is lehetne ha a c fázist jelölnénk a-val. A primer oldali delta kapcsolás tehát megoldotta a problémánkat. A primer háromszög kis teljesítmény és nagy primer feszültség esetén előnytelen mert sok menetű primer tekercset kell készíteni drága vékony vezetéből. Készítése is drága. Ilyenkor pl. a szekunder oldali zeg-zug kapcsolás lehet a megoldás, bár a hálózati mérnökök, ha lehet, kerülnek.

Csillag-zeg-zug kapcsolás

Minden szekunder tekercset két féltekercsre osztunk és azokat a 6.21. ábra szerint kapcsoljuk össze úgy, hogy eltérő oszlopokon elhelyezkedő féltekercsek képezzenek egy fázist. Az ábrán látható, hogy emiatt mindkét oszlopon kiegyenlített gerjesztéseket találunk.



A szekunder fázistekercsek kihasználását a féltekercs-feszültségek között 60° -os fáziseltolás rontja, az eredő feszültségek és a részfeszültségek összegének (ez szabja meg a menetszámot) aránya ugyanis a 6.21c. - vízszintesen rajzolt - ábrából leolvashatóan

$$\frac{U_a}{\sum U_{\text{fél}}} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86 \quad (6-32)$$

A b. ábrából láthatóan az U_A primer és az U_a szekunder feszültség között fáziseltolás van; az ábra kapcsolási jeleivel ez 150° . Kapcsolási jelek: A 6.20., 6.21. ábrák kapcsolásainál a primer és szekunder fázisfeszültségek között fázisszög eltérés van. A szimmetria viszonyokból kitűnik, hogy e fáziseltolás csak 30° többszöröse lehet ezért az óraszám lappal jellemzik. A szögnek megfelelő óra az un. jelölőszám. Így egy kapcsolás jele a primer kapcsolás nagybetűjétől a szekunder kisbetűjéből és a jelölőszámból áll.

A 6.18., 6.20. és 6.21. ábrák jelei így rendre:

Yyo0, Dyo5, Yzo5

A kis o index a csillagpont kivezetést, a nulla (negyedik) vezetékét jelöli. A gyakorlatban elsősorban a 0 és 5 órajelű kapcsolásokat (részben a velük ellenfázisban levő 6 és 11-eseket) alkalmazzák.

Párhuzamosan csak olyan transzformátorokat lehet kapcsolni, amelyeknek a szekunder feszültségrendszere azonos nagyságú és fázishelyzetű fázisfeszültségekből áll.

Különleges transzformátorok

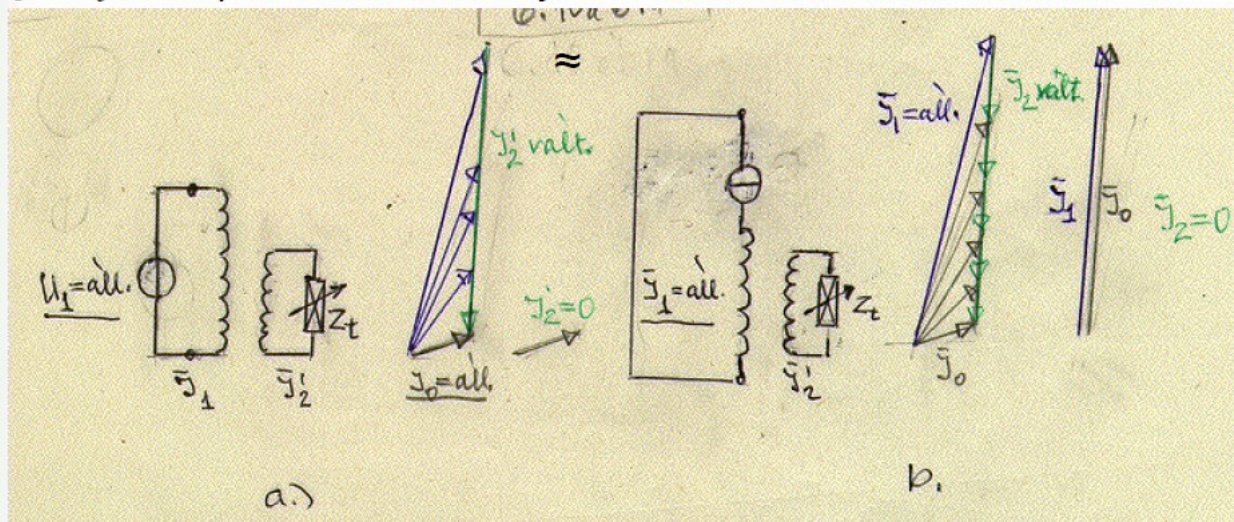
- feszültség- és áramváltó.

- A fázorábráknál is ott van:

(a) Feszültség- és (b) áramtranszformátor

Az **első** esetben az $\bar{I}_0 = \overline{\text{áll}}$ kényszer következtében a két áram változása a gerjesztések egyensúlya törvény szerint "összehangolt".

A **második** esetben az $\bar{I}_1 = \text{áll.}$ kényszer következtében $\bar{I}_2' = 0$ -hoz $\bar{I}_1 = \bar{I}_0$ azaz pl. 20-szoros üresjárás áram és az ahhoz tartozó - a



Feszültség- és áramtranszformátor:

A 6.11a. ill. b. ábrákon feszültség- ill. áramtranszformátor kapcsolását valamint I_2' és I_1 terhelésfüggő változását rajzoltuk fel Z_t állandó fázisszögét feltételezve.

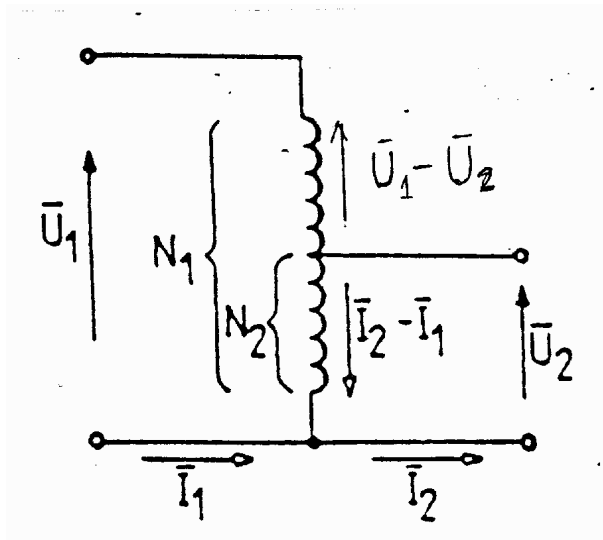
Az $I_0 = \text{áll.}$ kényszer következtében az első esetben a két áram változása a gerjesztések egyensúlya törvény szerint "összehangolt". A második esetben az $I_1 = \text{áll.}$ kényszer következtében $I_2' = 0$ -hoz $I_2' = I_1$ azaz pl. 20-szoros üresjárás áram és az ahhoz tartozó - a telítést figyelembe véve is - nagy fluxus tartozik, káros hatásaival.

- **takarék-kapcsolású transzformátorok.**

A 6.22. ábrából láthatóan a takaréktanszformátor valójában a szekunder

oldalon megcsapolt tekercs. (A szemléletesség érdekében a szekunder áram pozitív irányát megfordítottuk.) Egyik - "szekunder" - szakaszában kisebb áram folyik, a másikra kisebb feszültség esik így kevesebb anyagból készül tehát olcsóbb. A gépek méretét és így árát a látszólagos teljesítmény szabja meg. A tekercs méreteire az áram, a vasmagéra a feszültség - a fluxus révén - a mérvadó.

6.22.



Az anyagmegtakarítás mértékét a belső és az átmenő látszólagos teljesítmények aránya jellemzi.

A közös rész belső teljesítménye

$$S_b = U_2 (I_2 - I_1) = U_2 I_2 - U_2 I_1 \quad (6-33)$$

a külső részé

$$S_b = I_1 (U_2 - U_1) = I_1 U_1 - U_2 I_1$$

ugyanennyi hiszen $U_2 I_2 \approx U_1 I_1$.

A belső és az átvitt teljesítmény aránya

$$\frac{S_b}{S_{\text{átmenő}}} = \frac{U_2 (I_2 - I_1)}{U_2 I_2} = 1 - \frac{1}{n} \quad (6-34)$$

Tehát különösen nagy a megtakarítás az egyhez közel álló kis áttételeknél.

A takaréktaszformátor hátrányai:

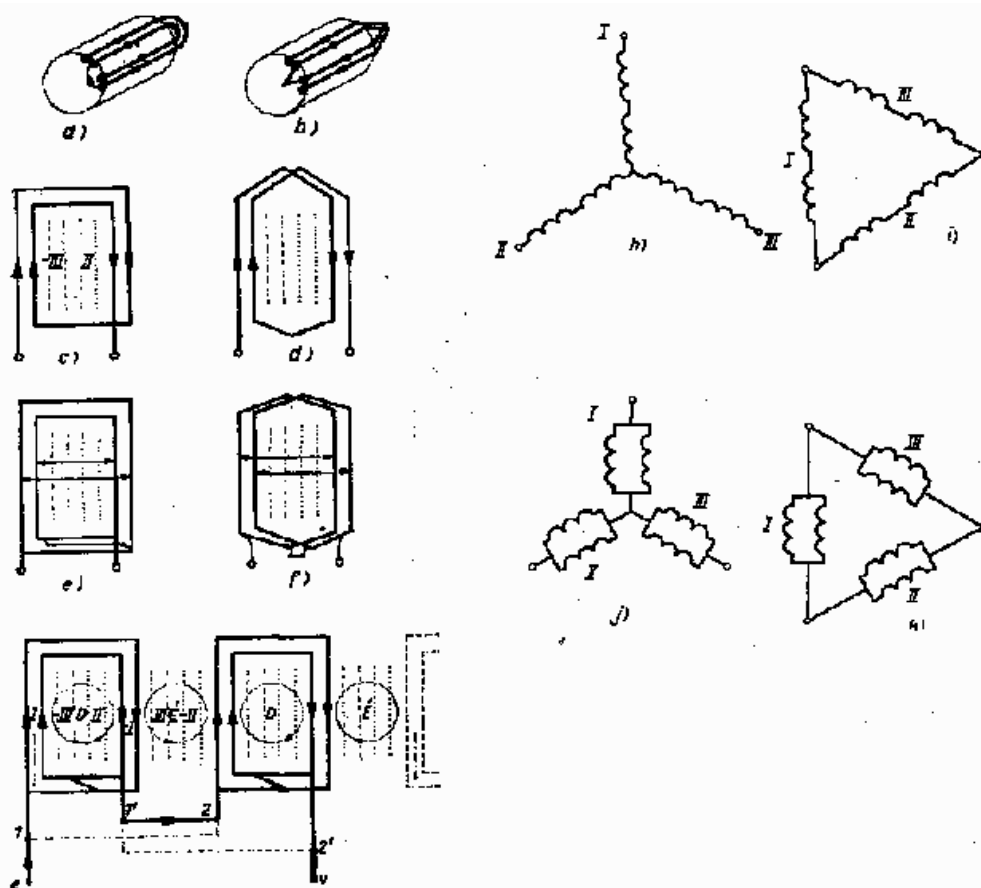
1. A primer és a szekunder közötti un. földszigetelés hiánya.
2. Rövidzáráskor a primer feszültség a rendszerint kis $N_1 - N_2$ menetszámú tekercsrészre esik.

Váltakozóáramú tekercselések

- Váltakozóáramú villamos gépek koncentrált és elosztott tekercseléseinek kialakítása.

Induljunk ki ismét olyan hengeres forgórészről, amelynek egyetlen egy- vagy többmenetes tekercse van. A tekercs legyen átmérős, ami azt jelenti, hogy a tekercs két oldala villamosan 180° -ra helyezkedik el, azaz kétpólusú gépen az átmérőn. Négypólusú gépben a tekercs szélessége éppen pólusosztásnyi, azaz egynegyed kerületnyi.

A gép jobb kihasználása és jobb mezőgörbe elérése céljából - mint láttuk - több tekercset kell elhelyezni. Ezek elhelyezésére két lehetőség van: 1. Radiális irányban: így jutunk a **koncentrált** tekercselésre. 2. A kerület mentén: így kapjuk az **elosztott** tekercselést. A koncentrált tekercselés mezőgörbét - mint bemutattuk - a légrés kialakításával kell javítani. Az elosztott tekercselést a koncentráltból képzeletben úgy is származtathatjuk, hogy az előbbi meneteit a kerület mentén egymás mellé kiterítjük.

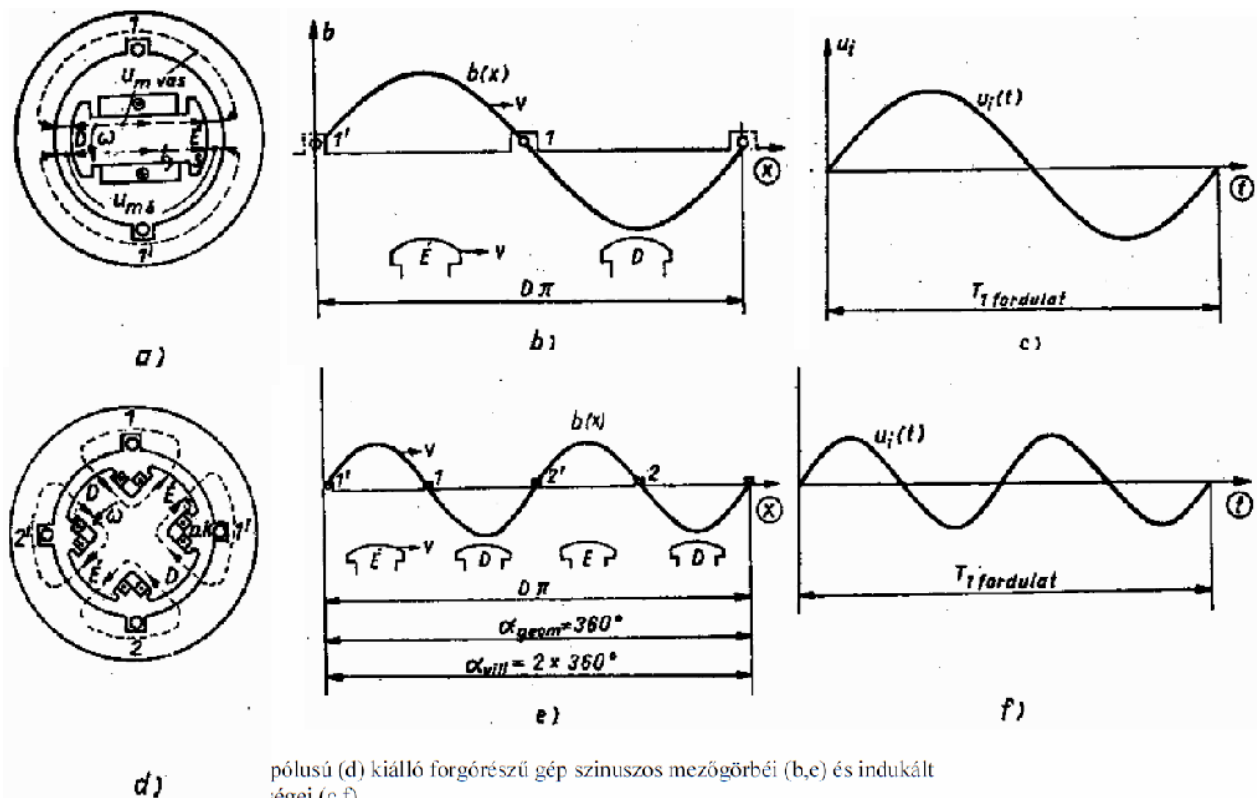


Egyszeri elolvasásra:

Tegyük most fel, hogy háromfázisú négypólusú tekercselést kell kialakítani. Az egy fázissávban elhelyezkedő hornyok számát válasszuk kettőre! Ekkor a kerületet a négy pólusnak megfelelően négy részre kell osztani, és minden negyed kerületen a három fázisnak megfelelően hat-hat hornyot kell elhelyezni. Az 1. fázishoz tartozó két szomszédos pólus alatt elhelyezkedő négy vezető az 1.5a ábrán látjuk. Egy kiragadott pillanatban az áramok irányai a berajzoltak. A vezetők összekötésének módjával, tehát a homlokfelület előtt elhelyezkedő, a hornyokban fekvő vezetőket összekötő vezető szakaszoknak, az ún. *tekercsfejeknek* sokféle kialakításával itt nem foglalkozunk, de azok alakja a hornyokban fekvő vezetők áram eloszlási képe szempontjából közömbös is. **A hornyokban elhelyezkedő vezetőket a tekercsfejekkel úgy kell összekötni, úgy kell azokból tekercseket alkotni, hogy a vezetők feszültségei folytonos nyílfolyamban adódjanak össze.** Erre két lehetőség van. Az a ábra szerinti összekötéskor **koncentrikus**, a b ábrán **egyenlő szélességű** tekercseket kapunk. A c-f kiterített ábrákon egy, ill. többmenetű tekercseket látunk. Két-két összetartozó fázissáv vezetői így egy tekercscsoportot alkotnak. Egy tekercscsoporton belül a tekercseket az egyenlőtlen árameloszlás elkerülésére ritkán kötik párhuzamosan. Kétpólusú gépben egy fázishoz egy tekercscsoport, többpólusú gépben annyi tekercscsoport tartozik, amennyi a póluspárok száma. Különleges tekercselésekben egy-egy fázissávot is több tekercscsoportra bonthatnak. A normális többpólusú kivitelben a teljes fázistekercselés kialakításakor az egy fázishoz tartozó tekercs csoportokat köthetjük sorba, párhuzamosan vagy vegyesen. A g ábrán a soros kapcsolást kihúzott, a párhuzamos kapcsolást szaggatott vonallal jelöltük. Az ábrába be nem rajzolt - csak a hornyokkal jelzett - másik két fázis tekercscsoportjainak kialakítása és azok összekötése hasonló módon történik. Több sorba kapcsolt tekercscsoportot szokás a tekercselés ágának nevezni. Ekkor a fázisokat a kívánt módon összekötött ágakból képezik, vagy maga a fázis egy ág.

Az egyes fázisokat ezután általában *csillagba* vagy *háromszögbe* kapcsolják. Kivételesen ezek kombinációja is előfordul. A h,i,j,k ábrákon soros csillag-, soros háromszög-, párhuzamos csillag- és párhuzamos háromszöghkapcsolást látunk. Itt az egyes tekercsjelek az egyes tekercscsoportokat vagy ágakat jelképezik. Az 1.5. ábra, és az előzőekben elmondottak egyúttal a háromfázisú tekercselések tervezésének főbb lépéseit is érzékeltetik. A vezetőkbl - tekercsoldalokból - tekercseket, a tekercsekből tekercs csoportokat, majd ezekből a tekercselés ágait képezik. Az ágakból alakítják ki az egyes fázisokat, majd a fázisok láncolásával a teljes háromfázisú tekercselést.

- Szinuszos mezőeloszlás létrehozása.



pólusú (d) kiálló forgórészű gép szinuszos mezőgörbéi (b,e) és indukált
feszültségei (c,f)

A légrés adott helyén az indukció nagyságát a közrefogott gerjesztés és az út mágneses ellenállása szabja meg. A kívánt *szinuszos* térbeli mezőeloszlás elérésére így két lehetőség adódik, állandó gerjesztés és változó légrés vagy állandó légrés és változó közrefogott gerjesztés. A kiálló pólusú változatban minden erővonal a *teljes* pólusgerjesztést körül fogja (1.a és d ábrát), így a légrésnek kell kb. a kívánt indukcióeloszlásnak megfelelően változnia, a szélek felé nőnie.

Állandó fordulatszám, tehát állandó v kerületi sebesség és így állandó ω szögsebesség esetén az egyenretű állórésztekercs két, a papír síkjára merőleges l hatásos hosszúságú vezetőjében a

$$b(x) = B \sin x$$

szinuszos *térbeli* indukcióeloszlás az $x = \omega t$ összefüggésnek megfelelően

$$u_1(t) = 2b(x)lv = B \sin \omega t * 2lv$$

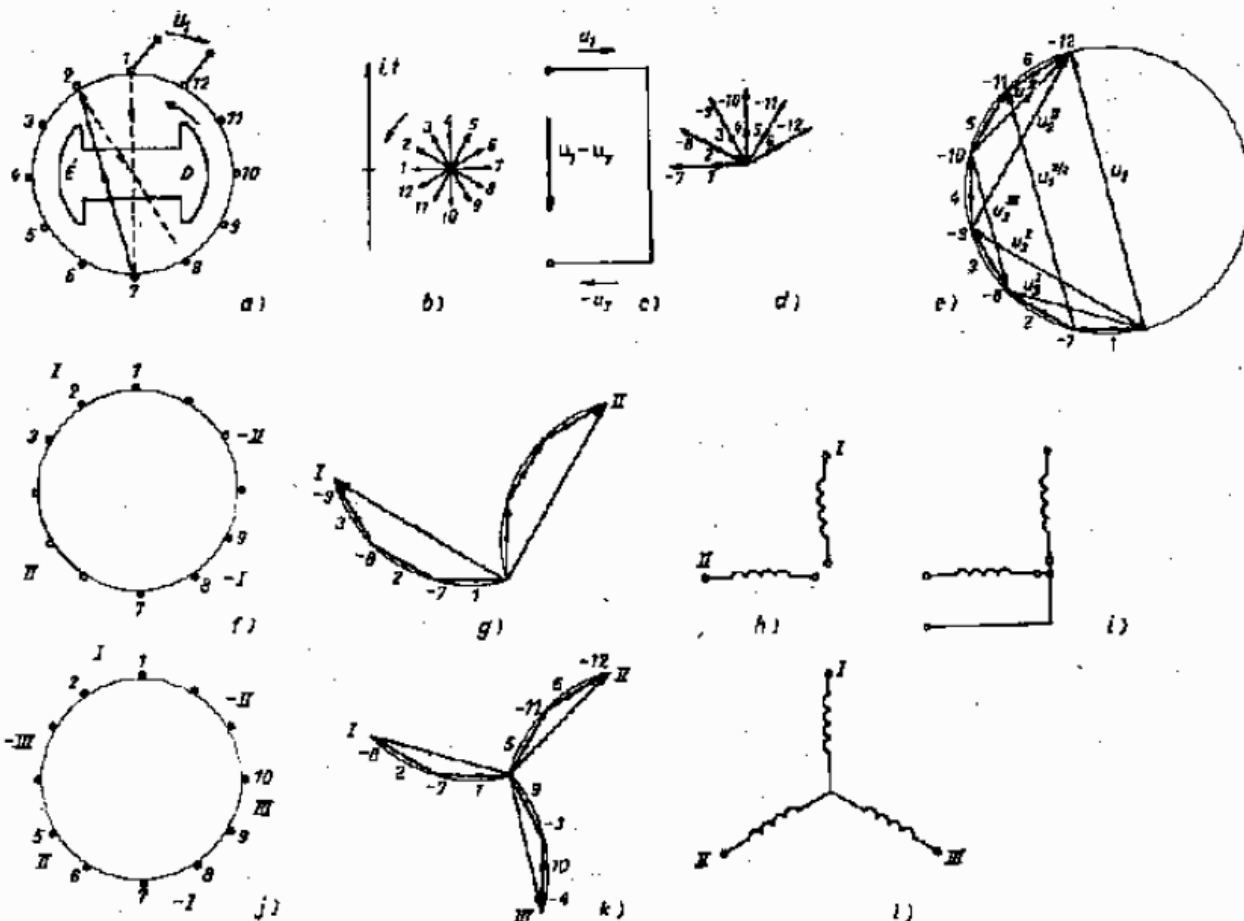
időben szinuszosan változó feszültséget indukál. A *térben* szinuszos eloszlású egyenletes sebességgel haladó mezőt az álló vezető *időben* szinuszosan változóan „látja”.

- Indukált feszültség számítása.

Ez az előzőhöz:

Ez összefüggés különösen jól érzékelhető az 1.1b ábra kiterített vázlatán, ahol az egy alkotójánál felvágott hengerpalástot síkban kiterítettük és a papír síkjára merőlegesen helyeztük el. Miközben a $b(x)$ indukcióhullám elhalad a vizsgált állórész vezető előtt, annak $u_i(t)$ indukált feszültsége a mezőgörbe térbeli eloszlását időben lemásolja (c ábra).

Ez inkább az ide tartozó:



1.3 ábra: Váltakozóáramú tekercselések indukált feszültsége. Egyfázisú tekercselés (a) feszültségcsillaga (b,d) és feszültségshöge (e). Két (f-i) és háromfázisú (j-l) tekercselés fázisfeszültségei.

Az egyes vezetőkben szinuszos feszültségeket indukál a póluskerék mezeje, így azok diagramvektorokkal, fázorokkal jellemezhetők. A kiragadott pillanatban az 1 vezetőkben **indukált feszültség** pillanatértéke zérus - és negatív félhulláma következik - így függőleges időtengelyt választva annak vektorát vízszintesen és balfelé mutatóan kell felrajzolni (b ábra). A 2 vezetők 1-hez képest a kerület mentén $360^\circ/12=30^\circ$ -kal a forgásirányban eltolva helyezkedik el. A póluskerék mezejének azonos helyei ennek megfelelően időben 30° -kal később érik el azt, így indukált feszültsége a 30° -os térbeli előreforgatásnak megfelelően időben 30° -kal késik, így azonos nagyságú vektorát 1-hez képest 30° -kal hátraforgatva kell felrajzolni.

• Tekercselési tényezők.

• A sávtényező

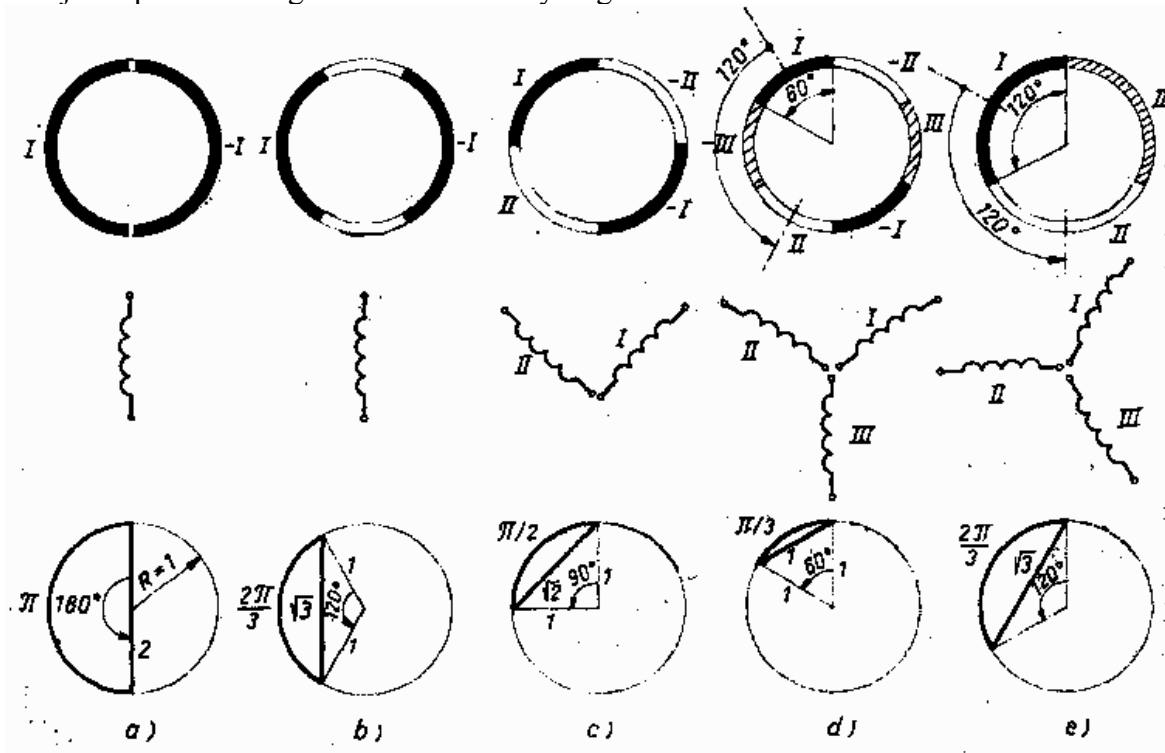
Ha az összes feszültségvektort felrajzoljuk, akkor a vezetők 1.3b feszültség csillagát kapjuk. A szemben fekvő vezetők meneteket képeznek, amelyeknek feszültségei összeadódnak. Az 1 és 7 vezetőkől alkotott menet kapcsain így az 1 és 7 feszültségek összege mérhető (c ábra). A d ábrán az egyes menetek feszültség csillagát látjuk. Ha most az 1—7, 2—8... 6—12 meneteket sorbakötjük, akkor azok feszültségvektorait egymás után kell fűzni. Így a teljes tekercselés eredő feszültsége, amelyet az 1 és 12 vezetőkhez csatlakozó kapcsokon mérhetünk, az e vektorsokszög $U_1=U_e$ **eredője lesz**. A vektoros összegezés következtében az U_1 eredő feszültségvektor jelentősen kisebb a részfeszültségek algebrai összegénél, ΣU -nál. A kettő hányadosa az eloszlási (elosztási) vagy sáv **tekercselési tényező**:

$$\xi_e = \frac{U_e}{\Sigma U} \quad (1-3)$$

Az 1.3e ábra sokszöge jól közelíthető a köré írt körrel - ez a közelítés a hornyok számának növekedésével egyre javul - és ekkor az eloszlási tekercselési tényező jó közelítéssel az **egységsugarú kör húrjának és ívének viszonya**:

$$\xi_e \approx \frac{\text{húr}}{\text{ív}} \quad (1-3a)$$

Ez a kifejezés pontosan végtelen számú horonyra igaz.



1.4 ábra. Különböző fázisszámú váltakozóárainú tekercselések sávtényezői

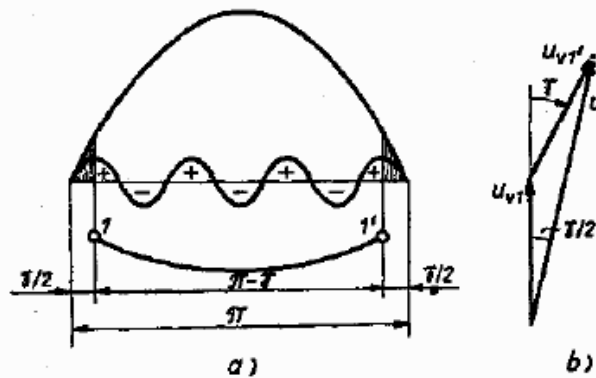
• Lépésrövidítés, horonyferdítés

Az eddigiekben feltettük, hogy tekercseink átmérősek, vagyis egy tekercs két oldala **villamosan 180°-ra** helyezkedik el. A térbeli felharmonikusok okozta mellékhatások csökkentésének egyik eszköze az ún. *lépésrövidítés*. Ekkor a tekercs két oldala 180°-nál kisebb távolságra helyezkedik el. Az 1.6. ábra egyheted pólusosztással rövidített tekercse által a hetedik felharmonikus térbeli indukció görbéből közrefogott pozitív és negatív félhullámok területei egyenlők. A tekercs hetedik harmonikus 1 tehát zérus, és így ez a harmonikus a tekercsben nem indukál feszültséget.

Ugyanakkor az alapharmonikus fluxusból is elvész a vonalkázott területtel jellemzett hányad. A két tekercs indukált feszültségeinek vektorai 180°-nál kisebb szöget zárnak be. A tekercselés kihasználtsága ez a félhullámok csökkentésének ára - az ún. *lépésrövidítési* vagy *húrozási tekercselési* tényezővel a tekercs eredő feszültségének (b ábra) és a két összetevő tekercsoldal feszültségösszegének egyenél kisebb viszonyszámával, a

$$\xi_h = \frac{U}{2U_v} = \frac{2U_v \cos \gamma/2}{2U_v} = \cos(\gamma/2) \quad (1-4)$$

arányban csökken.



1.6. ábra. Lépésválasztós tekercs (a) és feszültség vektorábrája (b)

A \$\xi_e\$ elosztási és \$\xi_h\$ lépésválasztós tekercselési tényezők szorzata a \$e h \xi = \xi \xi\$ (1-4a) eredő tekercselési tényező mutatja, hogy a vezetők kerületmenti eloszlásának és a tekercsek húrozásának következtében mennyivel csökken az indukált feszültség vektorainak eredője az egyes vezetőkben indukált feszültségek algebrai összegéhez képest.

Ha tehát egy átmérős menetben \$UN\$ feszültség indukálódik, s \$N'\$ a tekercselés meneteinek száma, akkor a teljes fázisfeszültség:

$$N U = \xi N' U$$

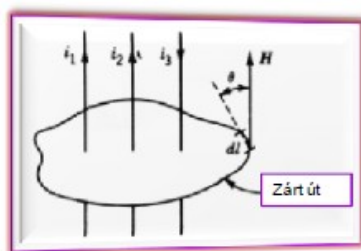
$$\text{Az } N = \xi N'$$

szorzatot *effektív* vagy *hatásos menetszámnak* hívják, és a továbbiakban - külön megjelölés nélkül - megállapodásszerűen menetszámon mindig ezt fogjuk érteni. Az egyes vezetőkben, ill. menetekben folyó áramok mágneses teret hoznak létre. Ha a mezőeloszlásoknak vagy gerjesztéseloszlásoknak csak a szinuszos alapharmonikusait vesszük figyelembe, akkor ezek a térbeli szinuszos eloszlások ugyan úgy vektorokkal ábrázolhatók és Ugyanúgy vektorosan összegeezhetők, mint az időben szinuszosan változó feszültségek. Az elmondottak tehát a tekercsek által létesített gerjesztésekre, ill. lineáris esetben az indukcióeloszlásokra is közvetlenül alkalmazhatók, és a tekercselési tényezőkkel az eredő gerjesztések vagy mezők az összetevőkből ugyanúgy számíthatók.

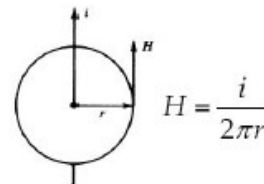
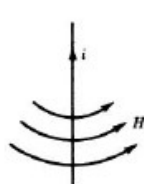
Mágneses terek és körök

- A gerjesztési törvény értelmezése

1. Ampere törvény (gerjesztési törvény)



$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \sum_{l_k} i_k$$



2. Permeabilitás fogalma: kapcsolat B és H mezők között

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$$

3. Ferromágneses anyagok relatív permeabilitása

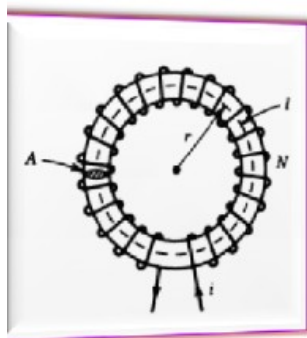
$$\mu_r \approx 2000 \dots 6000$$

4. A vákuum permeabilitása:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ henry / meter}$$

- Villamos és mágneses körök analógiája

Mágneses körök

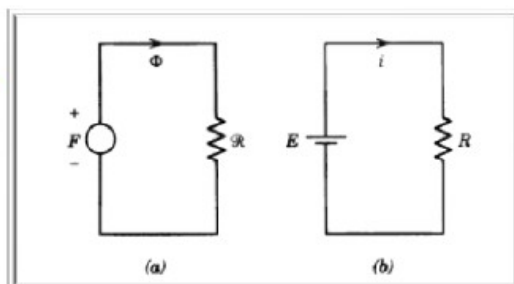


- toroid
- szórásokat elhanyagoljuk

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni$$

$$Hl = Ni$$

$$H2\pi r = Ni$$



- A gerjesztés (mmf)

$$F = Ni = Hl$$

- A mágneses fluxus

$$\Phi = \int B \, dA$$

$$\Phi = BA = \mu HA = \mu \frac{Ni}{l} A = \frac{F}{\mathfrak{R}}$$

- A mágneses ellenállás (reluktancia)

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{1}{P}$$

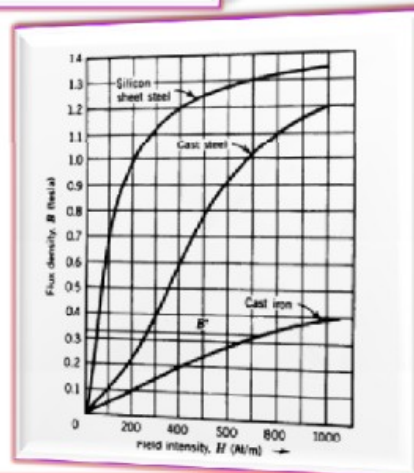
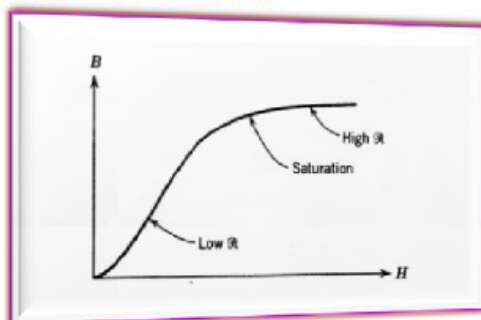
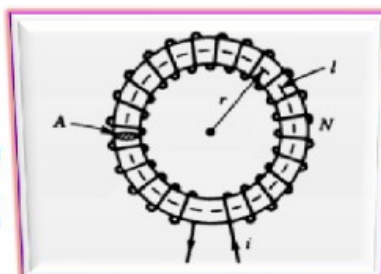
- A mágneses vezetőképesség (permeancia)

$$P$$

- A mágnesezési görbe

Mágnesezési görbe

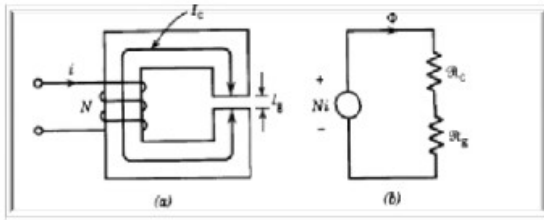
- Kis térerősség értékek esetén a mágneses fluxus (mágnesezési görbe) jó közelítéssel lineárisan változik
- Nagyobb térerősség értékek esetén a mágneses fluxus (mágnesezési görbe) változása nemlineáris – telítődő.



- Mágneses kör légréssel

Mágneses kör légréssel

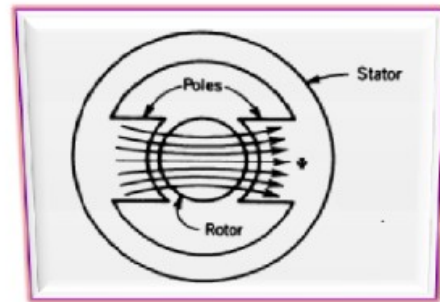
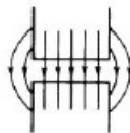
- A légrés gerjesztés-igénye sokkal nagyobb, mint a vasmagé



$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad R_g = \frac{l_g}{\mu_g A_g}$$

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g$$

- Kihajlással



$$B_c = \frac{\Phi_c}{A_c}$$

$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g}$$

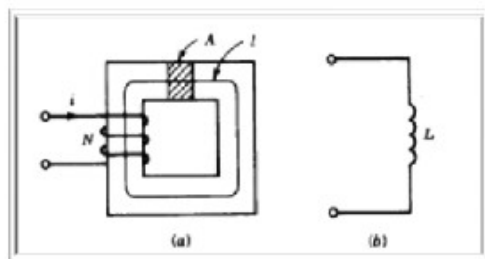
- Kihajlás nélkül $A_g = A_c$

$$B_g = B_c = \frac{\Phi}{A_c} \quad \Phi = \frac{Ni}{R_c + R_g}$$

- Az induktivitás számítása

Induktivitás

- A tekercset ideális áramköri elem képezi le (reprezentálja)



- A fluxus-kapcsolódás (tekercsfluxus) $\Psi = N\Phi$

- Az induktivitás $L = \frac{\Psi}{i}$

$$\begin{aligned} L &= \frac{N\Phi}{i} = \frac{NBA}{i} = \frac{N\mu HA}{i} \\ &= \frac{N\mu HA}{Hl/N} = \frac{N^2}{l/\mu A} = \frac{N^2}{R} \end{aligned}$$