

Villamos gépek

I.	Egyfázisú transzformátor	3
1.	A vasmag funkciói	3
2.	Növekedési törvények	4
3.	Felépítés: vasmag kialakítása (lemezelés, lépcsőzés), tekercselések (hengeres, tárcsás)	9
4.	Fő- és szórt fluxus értelmezése és minőségi erővonalképe	10
5.	Az indukált feszültség számítása, névleges munkapont meghatározása a mágnesezési görbén, feszültség-átvitel	11
6.	Az ideális transzformátor	13
7.	Pozitív irányrendszer	15
8.	Feszültség-egyenlet, viszonylagos egységek	16
9.	A mágneses Ohm-törvény	18
10.	A gerjesztési törvény értelmezése/alkalmazása transzformátor vasmagjában	18
11.	A feszültség-kényszer és hatása a főfluxusra	19
12.	Áram-átvitel, a paraméterek redukálása	19
13.	Gerjesztés- és teljesítmény-invariancia	20
14.	A gerjesztések egyensúlyának törvénye	21
15.	Térelméleti helyettesítő kapcsolás, az indukált feszültség aktív és passzív leképezése	22
16.	A vasvesztés és modellezése a helyettesítő kapcsolásban	24
17.	Egyszerűsített helyettesítő kapcsolások	24
18.	A szórási erőter modellezése, T- és P-kapcsolások	26
19.	Üresjárási és terhelési gerjesztés-viszonyok, a gerjesztések (áramok) fazorábrája	26
20.	Üresjárási, rövidzárási és terhelési állapot, fazorábrák	27
21.	A szekunder feszültség változása	28
22.	A rövidzárási impedancia és a rövidzárási feszültség fogalma, számítása és százalékos értéke	29
23.	A főfluxus hirtelen és állandósult rövidzárársban	29
II.	Háromfázisú transzformátor	30
1.	Felépítése, állandósult üzeme	30
2.	Helyettesítő kapcsolás	31
3.	Egyenlőtlen terhelés	31
4.	Kapcsolások, óraszám	32
5.	Különleges transzformátorok	35
a)	Feszültség- és áramváltó	35
b)	Takarék-kapcsolású transzformátorok	36
III.	Forgó mozgás létesítése	37
1.	Villamos gépek mágneses mezői	37
a)	Állandó, lüktető és forgó mezők	37
b)	Forgó mező létrehozása többfázisú tekercsrendszerrel	38
2.	Szinuszos indukált feszültség létrehozása	39
a)	Szinuszos mezőeloszlás létrehozása.	39

b)	Indukált feszültség számítása.	41
c)	Tekercselés és tekercselési tényező.	42
IV.	Szinkron gépek: A háromfázisú szinkron gép	47
1.	Működési elve	47
2.	Felépítése	50
3.	Jellegzetes tulajdonságai	51
4.	Az állandósult nyomaték kialakulásának feltétele. A szinkron fordulatszám	51
5.	Hengeres forgórészű háromfázisú szinkrongép	52
a)	A pólus-, az armatura- és az indukált feszültség fogalma és számítása, feszültségegyenlet	52
b)	Az armatura-, a szórási és a szinkron reaktancia fogalma, a szórási reaktancia komponensei	53
c)	A helyettesítő kapcsolás származtatása; Thevenin- és Norton-kapcsolás	53
d)	Fázorábra szerkesztése	54
e)	A nyomaték és a felvett/leadott teljesítmény számítása, a terhelési szög fogalma	54
6.	Kiálló pólusú háromfázisú szinkrongép	55
a)	A hossz- és keresztirányú szinkron reaktancia fogalma	55
b)	Fázorábra szerkesztése	55
7.	Hengeres forgórészű háromfázisú szinkrongép	56
a)	Terhelésvétel	56
b)	Áram-munkadiagram	57
c)	Statikus stabilitás; a szinkronozó nyomaték	57
V.	Aszinkron gépek: A háromfázisú aszinkron gép	58
1.	Működési elve	58
2.	Felépítése. Csúszógyűrűs és kalickás forgórész	58
3.	Jellegzetes tulajdonságai	59
4.	Az állandósult nyomaték kialakulásának feltétele	59
5.	A szlip és a szlipfrekvencia fogalma és számítása	60
6.	A gerjesztések egyensúlyának törvénye	61
7.	Feszültség- és áramáttétel számítása. Impedanciák redukálása	61
8.	A forgórész indukált feszültségének és szórási reaktanciájának számítása	62
9.	A forgórész feszültség-egyenlete, frekvencia-transzformáció az állórészre	62
10.	Helyettesítő kapcsolás	63
a)	A paraméterek viszonylagos értékei	63
b)	Származtatása	63
c)	A mechanikai ellenállás fogalma és számítása.	63
11.	Energiamérleg motoros, generátoros és féküzemre vonatkozóan.	64
12.	Teljesítmények és a nyomaték számítása.	64
13.	Áram-munkadiagram	65
a)	Származtatása.	65
b)	Jellegzetes pontjai.	65
c)	Üzemállapotok azonosítása.	66

d) Teljesítmények leolvasása.	66
14. Nyomatéki jelleggörbe	67
15. Indítási viszonyok	69
VI. Egyenáramú gépek	71
1. A kommutátor	71
2. Az egyenáramú gép felépítése és működése	71
a) Felépítés	71
b) Mágneskör	72
c) A pólusmező	72
d) Az armatura-reakció	73
e) Az indukált feszültség és számítása	73
f) A nyomaték és számítása	75
g) A helyettesítő kapcsolás	75
3. Üzemeltetési alapok	76
a) Kapcsolási módok.	76
b) Egyenáramú motorok jelleggörbéi.	76
c) Külső gerjesztésű egyenáramú motorok jelleggörbéi.	77

I. Egyfázisú transzformátor

1. A vasmag funkciói

SuperTech

Egyfázisú transzformátorok: Működési elv

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

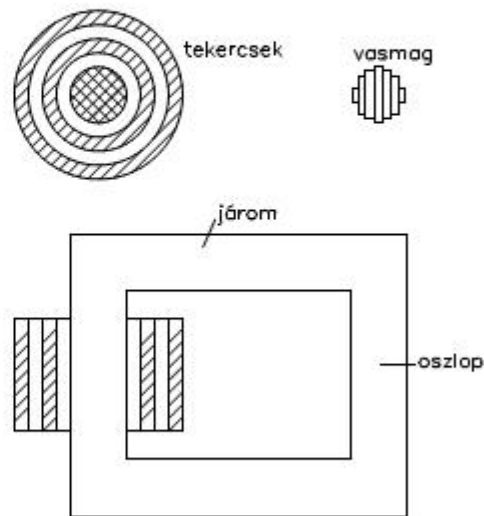
Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VIK, 2015 tavasz

Egyfázisú transzformátorok: A vasmag

A vasmag az alábbi feladatokat látja el:

1. Elősegíti, hogy a szükséges mágneses indukciót minél **kisebb gerjesztő (mágnesező) áram** hozza létre.
2. Elősegíti a **mágneses fluxus** előírt útvonalra történő terelését.
3. A vasveszteség csökkentése érdekében **lemezelt**.
4. A kör keresztmetszet minél jobb közelítése érdekében **lépcsőzött**.



2. Növekedési törvények

Növekedési törvények

$$S \sim U \quad \times \quad I \sim L^4$$

$$\Phi = \overset{\uparrow}{\text{B}} \overset{\uparrow}{\text{A}} \quad I = \overset{\uparrow}{\text{J}} \overset{\uparrow}{\text{A}}$$

○ IGÉNYBEVÉTEL

□ GEOMETRIA

a transzformátorok mágneses és villamos igénybevételei, a mágneses fluxus és a villamos áramerősség a geometriai méretekkel, L , négyzetesen változnak, így a transzformátor névleges teljesítménye, S , a geometriai méretek negyedik hatványával arányos.

Növekedési törvények

A teljesítménnyel a lineáris méretek csak

$$L \sim \sqrt[4]{S}$$

arányban nőnek.

A G súly és a villamos gépek azzal arányos
Á ára arányos a köbtartalommal, tehát:

$$G \sim A \sim L^3 \sim S^{\frac{3}{4}}$$

SuperTech

Növekedési törvények

A térfogat azonban a méretek harmadik
hatványával arányos:

$$V \sim L^3$$

Ezért a fajlagos mutató, a , az egységteljesít-
mény-súly és az egységteljesítmény-ár

$$a = \frac{V}{S} \sim \frac{1}{L} = \frac{1}{\sqrt[4]{S}}$$

növekvő egységteljesítménnyel csökken.

Növekedési törvények, Példa

Legyen két transzformátor névleges teljesítményeinek aránya:

$$S_{n1}/S_{n2} = 10$$

Ekkor:

$$\frac{a_1}{a_2} = \sqrt[4]{\frac{S_{n2}}{S_{n1}}} = \frac{1}{\sqrt[4]{10}} = 0,56$$

Azaz a nagyobb, esetünkben tízszeres teljesítményű transzformátor fajlagos ára 44%-kal kisebb.

Növekedési törvények

A **vas- és a rézveszteségek** és a mágneses meddő teljesítmény egyaránt a súllyal arányosak, így azok is a teljesítménynek csak a $\frac{3}{4}$ -dik hatványával nőnek:

$$P_{vas} \sim S^{\frac{3}{4}} \quad P_{tek} \sim S^{\frac{3}{4}} \quad Q_{mágn} \sim S^{\frac{3}{4}}$$

Így a teljesítmény növekedésével **a hatásfok is javul** az egységár csökkenése mellett.

A **teljesítményre vonatkoztatott viszonylagos értékeik** ismét a teljesítmény negyedik gyökével fordítottan arányosak:

$$p_{vas} = \frac{P_{vas}}{S} \sim \frac{1}{\sqrt[4]{S}} \quad p_{tek} = \frac{P_{tek}}{S} \sim \frac{1}{\sqrt[4]{S}} \quad q_{mágn} = \frac{Q_{mágn}}{S} \sim \frac{1}{\sqrt[4]{S}}$$

Növekedési törvények

A **viszonylagos ellenállás** számszerűen a százalékos tekercsveszteséggel egyenlő:

$$R = \rho \frac{l}{A} \sim \frac{1}{L} \quad \text{miatt}$$

$$r = \frac{R}{Z_n} = R \cdot \frac{I_n}{U_n} = \frac{R \cdot I_n^2}{U_n I_n} \sim \frac{1}{L} \cdot \frac{(L^2)^2}{L^4} \sim \frac{1}{L}$$

azaz

$$r \sim \frac{1}{\sqrt[4]{S}}$$

Növekedési törvények

A **reaktancia** a mágneses vezetéssel arányos, így a szórási reaktancia viszonylagos értéke:

$$\Lambda = \mu \frac{A}{l} \sim L \quad \text{miatt}$$

$$x_s = \frac{X_s}{Z_n} = X_s \cdot \frac{I_n}{U_n} = \frac{X_s \cdot I_n^2}{U_n I_n} \sim L \cdot \frac{(L^2)^2}{L^4} \sim L$$

azaz

$$x_s \sim \sqrt[4]{S}$$

nő a teljesítménnyel, ez **jó** (zárlatkorlátozás)

Növekedési törvények

A **hűtőfelület** viszont csak a lineáris méret négyzetével nő, így a viszonylagos hűtőfelület:

$$f_{huto} \sim \frac{F_{huto}}{S} \sim \frac{L^2}{L^4} \sim \frac{1}{L^2}$$

azaz

$$f_{huto} \sim \frac{1}{\sqrt{S}}$$

Tehát növekvő egységteljesítménnyel egyre intenzívebb hűtés szükséges!!

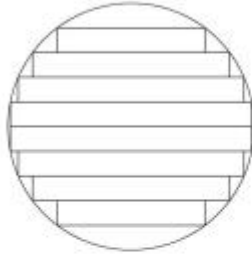
Növekedési törvények

Előnyös tehát nagyobb egységteljesítményű transzformátorokat gyártani.

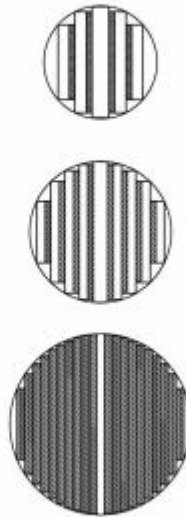
Megemlítendő, hogy a fenti gondolatmenet villamos forgógépekre is érvényes.

3. Felépítés: vasmag kialakítása (lemezelés, lépcsőzés), tekercselések (hengeres, tárcsás)

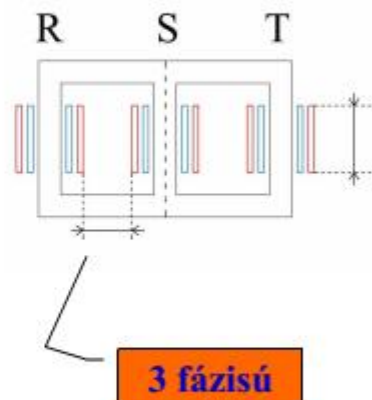
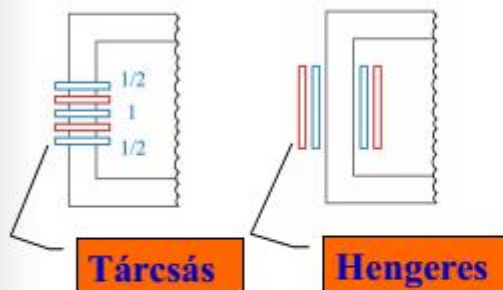
Oszlop szerkezet



- $k_g = \frac{\sum A_{\text{lépcső},i}}{A_{\text{körülírt}}}$
- $k_v = \frac{\sum A_{\text{vas},k}}{\sum A_{\text{lépcső}}}$
- $A_{\text{vas}} = k_v k_g A_o$



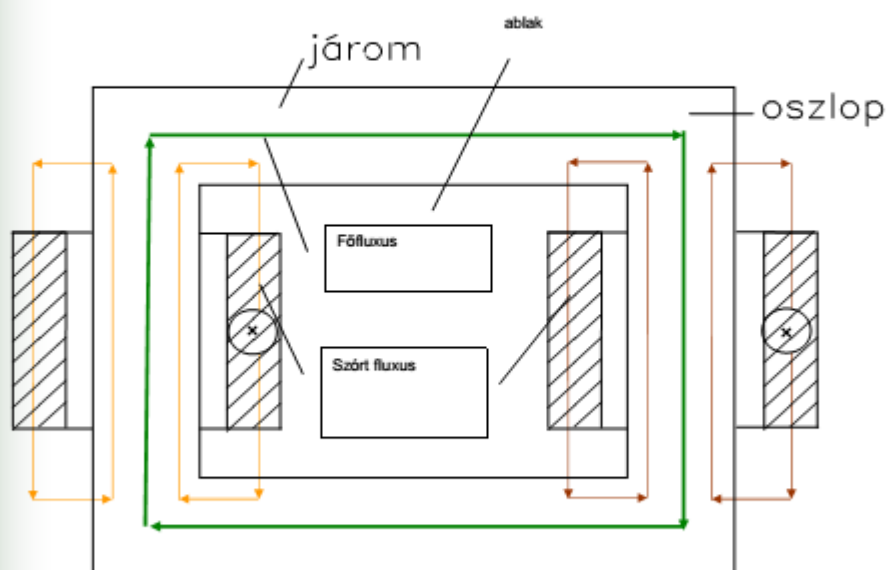
Tárcsás és hengeres tekercselés



4. Fő- és szórt fluxus értelmezése és minőségi erővonalképe

Egyfázisú transzformátorok: Fő- és szórt fluxus

SuperTech

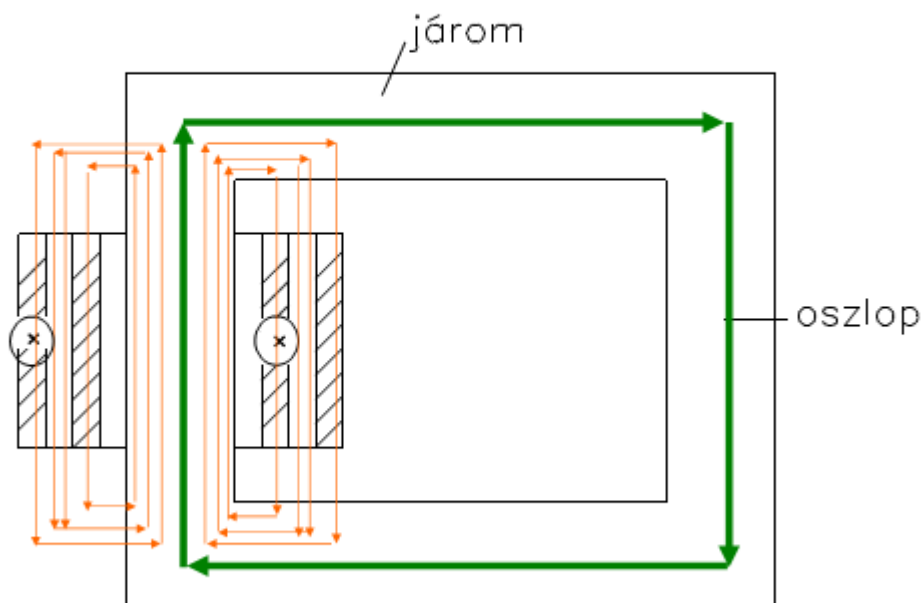


Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

Egyfázisú transzformátorok: Fő- és szórt fluxus

SuperTech



Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

5. Az indukált feszültség számítása, névleges munkapont meghatározása a mágnesezési görbén, feszültség-áttétel

Egyfázisú transzformátorok: Az indukált feszültség számítása

A transzformátor feszültség-egyenlete:

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

A főfluxus teljes komplex időfüggvénye:

$$\overline{\Phi}_m = \hat{\Phi}_m e^{j\omega t} = \underbrace{\Phi_m e^{j\varphi_\Phi}} e^{j\omega t}$$

Ezzel:

Komplex amplitúdó

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

Egyfázisú transzformátorok: Az indukált feszültség számítása

Az időfüggvények elhagyásával állandósult állapotban az indukált feszültség fazora kifejezhető a hálózati körfrekvencia, $\omega=2\pi f$, ahol f a hálózati frekvencia, a primer és szekunder menetszámok, N_1 és N_2 , valamint a főfluxus csúcsértéke, Φ_m segítségével:

$$\hat{U}_{1i,\max} = j\omega N_1 \hat{\Phi}_m \quad \hat{U}_{2i,\max} = j\omega N_2 \hat{\Phi}_m$$

$$\frac{U_{1i,m}}{U_{2i,m}} = \frac{N_1}{N_2} = n = \text{menetszám - áttétel}$$

$\neq$ feszültség - áttétel

Egyfázisú transzformátorok: Az indukált feszültség számítása

Az indukált feszültség effektív értékét az alábbi összefüggés szerint számíthatjuk:

$$U_{i,eff} = 4,44 f N_1 \Phi_m \rightarrow \bar{U} \quad \text{fazor}$$

$$U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} \quad \text{csak ha szinuszos!}$$

Fenti képletet az oszlopindukcióval kifejezve kapjuk:

$$U_{i,eff} = 4,44 f N B_o A_v$$

B_o az oszlopindukció csúcserőssége, $A_v = k_g k_v A_o$

A_v a vaskeresztmetszet, k_g a geometriai, k_v pedig a vaskitöltési tényezőt

A_o a vasmag köré írható kör keresztmetszete.

Egyfázisú transzformátorok: Az indukált feszültség számítása

Megjegyzések:

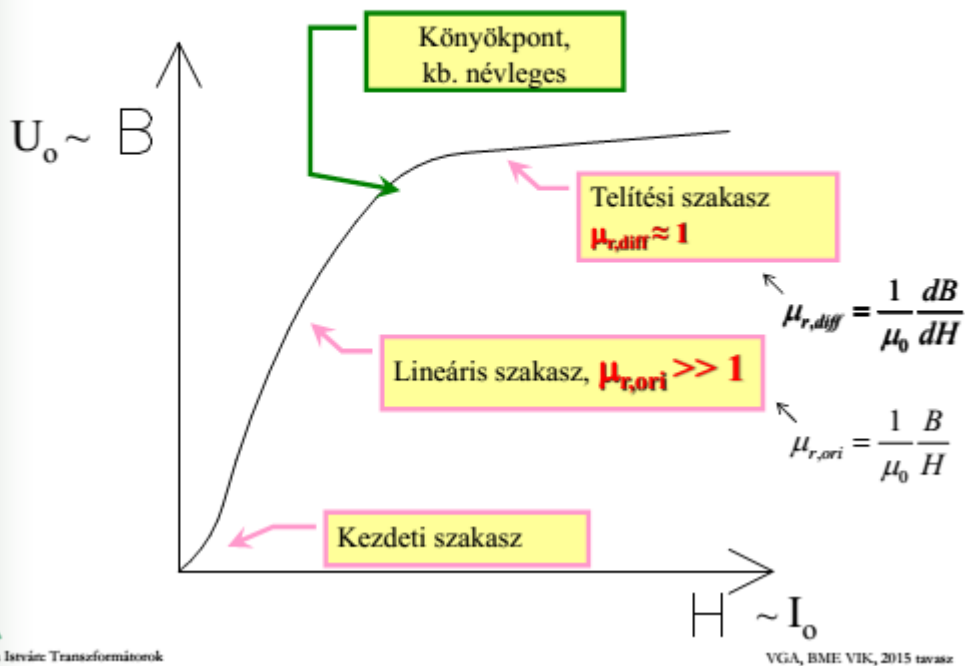
1. $U_{i, eff}$ **EFFEKTÍV** érték
 Φ_m vagy $B_{o, m}$ **CSÚCS**érték

Nem ellentmondás:

$U_{i, eff}$ a villamos teljesítmény számításához,
 Φ_m vagy $B_{o, m}$ a mágneses kör méretezésének számításához szükséges.

2. A mágneses kört a mágnesezési jelleggörbével jellemezzük, ami a mágneses térerősség és a mágneses indukció közötti kapcsolatot írja le az alábbi ábra szerint. Láthatjuk, hogy a jelleggörbe nemlineáris, telítődő, továbbá hiszterézises, ez utóbbit az ábrán nem tüntettük fel.
3. A képletben szereplő állandó, $4,44 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}$ csak szinuszos esetben!

Egyfázisú transzformátorok: Az indukált feszültség számítása



6. Az ideális transzformátor

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor

Vizsgálati módszerünk: Gépeink, így a transzformátor is bonyolult háromdimenziós térbeli elrendezések. Ezért **modellezzük** azokat, azaz vizsgálatainknak megfelelő elhanyagolásokkal, közelítésekkel kialakított áramkörre egyszerűsítjük őket és abban gondolkodunk.

Erőátviteli, kisméretű, 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.

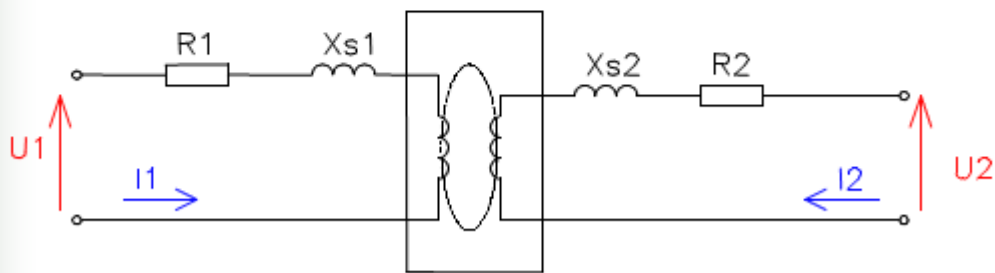
Fluxusaink Ψ/N úgynevezett **egyenértékű menetfluxusok**. További közelítéseket menet közben látunk.

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor

A transzformátor és minden más villamos gép villamos jellemzői számításának megkönnyítése érdekében az átalakítókat villamos helyettesítő kapcsolásaikkal szoktuk „helyettesíteni”, modellezni.

A helyettesítő kapcsolat származtatását több lépésben mutatjuk be.

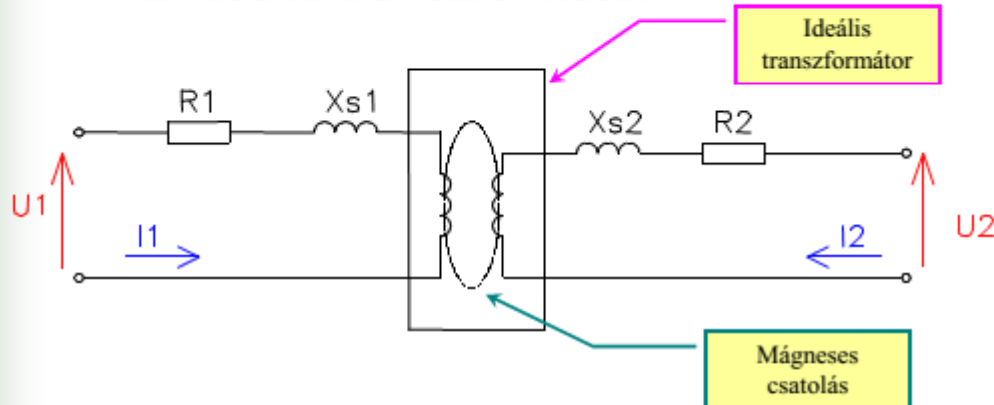
Először a tekercsek közötti mágneses csatolás kiküszöbölését mutatjuk be.



Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VIK, 2015 tavasz

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor



A téglalapon belül lévő transzformátor „ideális”, minden ohmos és induktív komponenst „kívülre” viszünk, mintha ezek az elemek az ideális transzformátorral sorba volnának kötve.

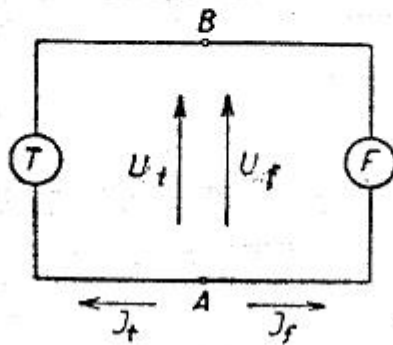
Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VIK, 2015 tavasz

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor

Az egyenletek felírásához *pozitív irányrendszer* választása is szükséges. Mi az ún. **fogyasztói pozitív** irányrendszert használjuk, amelyben a felvett teljesítmények előjele pozitív.

Az ábra szimbolikus T termelő és F fogyasztó kétpólusa mindegyikében mind az áram mind a feszültség pozitív irányát egyformán A-tól B felé választjuk

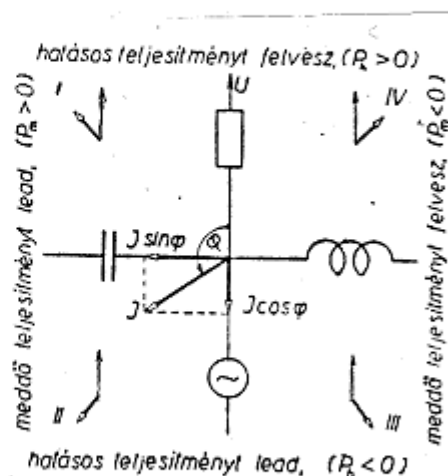


7. Pozitív irányrendszer

Egyfázisú transzformátorok: Fogyasztói pozitív irányrendszer

A választott irányrendszerrel

- a felvett **hatásos** teljesítmény **pozitív** előjelű, a leadott negatív.
- **A meddőket mégse eszerint tekintjük!**
- a kondenzátor **"leadott(!)"** meddő teljesítménye pozitív,
- az induktivitás **"felvett(!)"** meddő teljesítménye negatív előjelű.



Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor

A komplex effektív értékekkel kifejezve a transzformátor feszültség-egyenlete:

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1,i}$$

$$\bar{U}_2 = R_2 \bar{I}_2 + jX_{s2} \bar{I}_2 + \bar{U}_{2,i}$$

Az egyenletek jól mutatják a fogyasztói pozitív irányrendszer választásának előnyét: az egyenletek szimmetrikusak, ugyanolyan alakúak mindkét tekercsre.

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor

Az egyes komponensek nagyságrendjét sokszor *relatív egységekben*, *százalékosan*, *p.u.* szokás megadni.

Ehhez szükséges a *névleges impedancia* fogalma:

$$Z_{1,n} \Big|_{\text{fázis!}} = \frac{U_{1,n}}{I_{1,n}} \Big|_{\text{fázis!}}$$

A feszültségegyenletet átírjuk relatív egységekbe, amelyeket kisbetűvel jelöljük:

$$\frac{\bar{U}_1}{U_{1,n}} = \frac{R_1 \bar{I}_1}{U_{1,n}} + j \frac{X_{s1} \bar{I}_1}{U_{1,n}} + \frac{\bar{U}_{1,i}}{U_{1,n}}$$

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor

A tekercsellenálláson eső feszültség viszonylagos értéke:

$$\frac{R_1 \bar{I}_1}{U_{1,n}} \frac{I_{1,n}}{I_{1,n}} = \frac{R_1}{Z_{1,n}} \frac{\bar{I}_1}{I_{1,n}} = r_1 \bar{i}_1$$

Könnyen belátható, hogy a névleges (áramhoz tartozó) tekercsveszteség viszonylagos értéke éppen a tekercsellenállás viszonylagos értékével egyezik meg:

$$p_{1,tek} = \frac{P_{1,tek}}{S_n} = \frac{R I_{1,n}^2}{S_n} = \frac{R_1 I_{1,n}}{U_{1,n}} \frac{I_{1,n}}{I_{1,n}} = \frac{R_1}{Z_{1,n}} \frac{I_{1,n}}{I_{1,n}} = r_1$$

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor

Hasonló átalakításokkal kapjuk a feszültség-egyenlet viszonylagos egységeiben kifejezett alakját:

$$\bar{u}_1 = r_1 \bar{i}_1 + j x_{s,1} \bar{i}_1 + \bar{u}_{i,1}$$

$$\bar{u}_2 = r_2 \bar{i}_2 + j x_{s,2} \bar{i}_2 + \bar{u}_{i,2}$$

Mivel

$$u_1 = 1$$

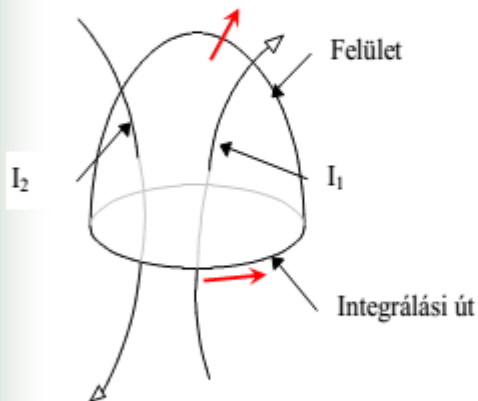
$$r_1 \approx r_2 \approx 1 \dots 2\%, \text{ ennek oka : } p_{t,1} \approx p_{t,2} \quad \text{azonos melegedés!!}$$

$$x_{s,1} \approx x_{s,2} \approx 2 \dots 5\%, \text{ elméletileg általában nem választhatóak szét}$$

$$\text{így: } u_{i,1} \approx u_1 = 1$$

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor kiküszöbölése

A mágneses Ohm-törvény



Fluxus = Mágneses
vezetőképesség ×
Gerjesztés

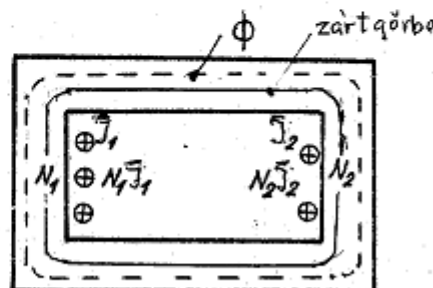
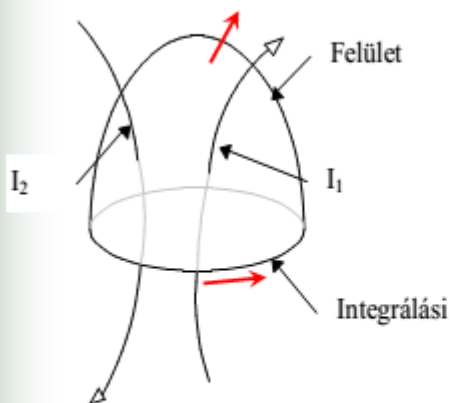
$$\Phi = \Lambda \Theta$$

$$\Theta = \sum_k I_k,$$

A tekercsfluxus:

$$\Psi = N \Phi$$

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor kiküszöbölése



10. A gerjesztési törvény értelmezése/alkalmazása transzformátor vasmagjában

$N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 = N_1 \cdot I_{1,0}$ [\[2\]](#) Ez a transzformátor gerjesztési egyenlete.
(Wikipédia)

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor kiküszöbölése

Tehát: A feszültség-kényszer miatt a transzformátor eredő gerjesztése a terhelési állapottól közel függetlenül

$$\overline{\Theta}_{eredő} \approx \overline{\dot{a}ll} = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$$

Vagyis: Bármelyik áram „**kicserélhető**”, helyettesíthető, ha a helyettesítő tekercs menetszámát úgy választjuk meg, hogy:

$$N_i I_i = N'_i I'_i$$

Használjuk fel, hogy $\frac{U_{1,i}}{U_{2,i}} = n$

12. Áram-áttétel, a paraméterek redukálása

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor kiküszöbölése

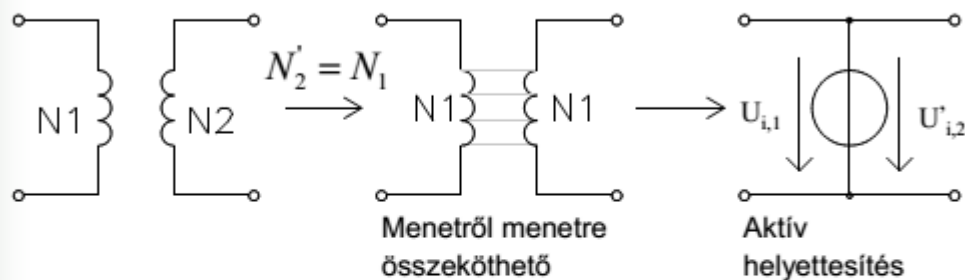
Ezekkel:

$$N_2 I_2 = N_1 \frac{N_2}{N_1} I_2 = N_1 \frac{1}{n} I_2 = N_1 \left(\frac{I_2}{n} \right) = N_1 I'_2$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{n}$$

Következmény: az N_2 menetszámú tekercs helyettesíthető N_1 menetszámú tekercssel úgy, hogy **az eredeti és a helyettesítő tekercs gerjesztései azonosak.**

Egyfázisú transzformátorok: 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?

Egyfázisú transzformátorok: Az ideális transzformátor kiküszöbölése

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:

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

Egyfázisú transzformátorok: A gerjesztések egyensúlyának törvénye

A gerjesztések invarianciájának felhasználásával:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_{m,1} &= N_1 \Lambda_m (\bar{I}_1 N_1 + \bar{I}_2 N_2) = N_1 \Lambda_{m,1} (\bar{I}_1 N_1 + \bar{I}_2' N_1) = \\ &= \underbrace{N_1^2 \Lambda_{m,1}}_{L_{m,1}} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2') = L_{m,1} \underbrace{(\bar{I}_1 + \bar{I}_2')}_{I_{m,1}} \quad N_2' = N_1\end{aligned}$$

Azaz: $\bar{\Psi}_{m,1} = L_{m,1} \bar{I}_{m,1}$

$$\bar{U}_{i,1} = j\omega_1 \bar{\Psi}_{m,1} = j\omega_1 \underbrace{L_{m,1}}_{X_{m,1}} \bar{I}_{m,1} = jX_{m,1} \bar{I}_{m,1}$$

Egyfázisú transzformátorok: A gerjesztések egyensúlyának törvénye

A feszültségkényszer miatt:

$$\bar{\Theta}_{eredő} \cong \bar{áll} \Rightarrow \bar{I}_{m,1} \approx \bar{áll}$$

Vagyis az eredő gerjesztés (a vasvesztés elhanyagolásával) a primer mágnesező gerjesztéssel egyezik meg.

Így: $\bar{I}_{m,1} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2' \cong \bar{áll}$

A vasvesztéset is figyelembe véve:

$$\bar{\Theta}_1 + \bar{\Theta}_2 \approx \bar{áll} = \bar{\Theta}_{1,üj} \Rightarrow \approx \bar{0}$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' \approx \bar{áll} = \bar{I}_{1,üj} \Rightarrow \approx \bar{0}$$

**Mert ha állandó, akkor
szekunder áram nélkül =
üresjárásban is közel ugyanaz**

Ez a gerjesztések egyensúlyának törvénye.

Egyfázisú transzformátorok: A gerjesztések egyensúlyának törvénye

A gerjesztések egyensúlyának törvénye.

$$\overline{\Theta}_1 + \overline{\Theta}_2 \approx \overline{\text{áll}} = \overline{\Theta}_{1,üj} \Rightarrow \approx 0$$

$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2' \approx \overline{\text{áll}} = \overline{I}_{1,üj} \Rightarrow \approx 0$$

A transzformátor - primer oldali - **mágnesező árama**, amely az **üresen járó - nyitott szekunderű - transzformátor vasmagjában ugyanakkora főfluxust hoz létre mint terheléskor a primer és szekunder tekercsek - azok gerjesztései - együtt.**

Az oszlopfluxus/indukció közel állandó.

15. Térelméleti helyettesítő kapcsolás, az indukált feszültség aktív és passzív leképezése

Egyfázisú transzformátorok: Térelméleti helyettesítő kapcsolás

Lineáris esetben a $\Phi = \Lambda \Theta = \Lambda N I$

mágneses ohm törvénnyel az ön- ill. kölcsönös induktivitás ismert kifejezéseire juthatunk:

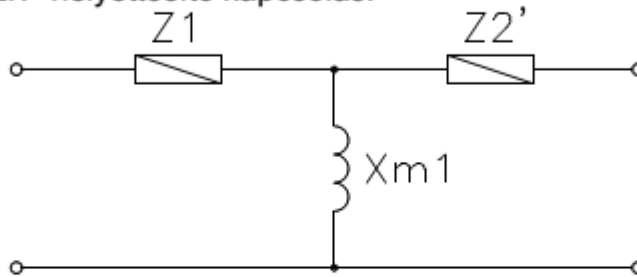
$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{N\Lambda NI}{I}, \quad L = N^2 \Lambda$$

$$M = \frac{\psi_2}{I_1} = \frac{N_2\phi}{I_1} = \frac{N_2\Lambda N_1 I_1}{I_1}, \quad M = N_1 N_2 \Lambda$$

Bevezetjük az $\omega L_{m,1} = X_{m,1}$ **mágnesező reaktanciát.**

Egyfázisú transzformátorok: Térelméleti helyettesítő kapcsolás

A „passzív” helyettesítő kapcsolás:



Ez a kapcsolás még nem teljes, mert vasveszteség is keletkezik. A vasveszteségek közel arányosak az oszlopindukció, és ezzel az indukált feszültség négyzetével:

$$P_{vas} \propto B_{o,m}^2 \propto U_i^2$$

SuperTech

Egyfázisú transzformátorok: Térelméleti helyettesítő kapcsolás

Közelítésként mind a hiszterézis, mind az örvényáram fajlagos vasveszteség összetevőt az indukció négyzetével arányosnak lehet tekinteni:

$$p_{\bar{o}} \sim k_{\bar{o}} \Delta^2 f^2 B_m^2, \quad p_h \sim k_h f B_m^2$$

Itt Δ a lemezvastagság. Az **f=áll.** megkötésnek megfelelően így

$$P_v = P_{\bar{o}} + P_h \approx c_1 B_{o,m}^2 = c_2 \Phi_m^2 = c_3 u_{i1}^2$$

A transzformátorokban alkalmazott szilíciummentes, hidegen hengerelt lemezek veszteségi és mágnesezési tulajdonságai a **hengerlésre merőleges irányban rosszak**. Ezért el kell kerülni az indukcióvonalak ilyen irányú haladását így a lemezcsoomag összeszorítását átmenő csavarok helyett külső bandázssal, az oszlop-járom találkozásokat ferde illesztéssel készítik.

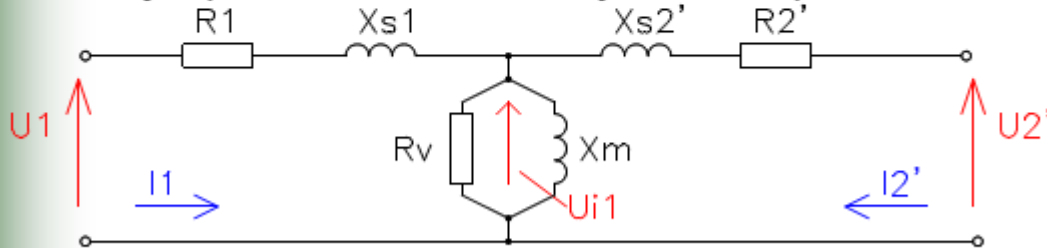
A tekercsek nagykeresztmetszetű vezetőiben a szórt fluxus okozta **áramkiszorítást** elemi szálakra bontással és a szálak helycseréjével csökkentik

Egyfázisú transzformátorok: Térelméleti helyettesítő kapcsolás

Tudjuk, hogy $U_{i,1} \propto X_{m,1} \rightarrow R_v \parallel X_{m,1}$

vagyis a vasveszteséget képviselő ellenállás „természetes” helye az X_m főmezőreaktanciával párhuzamos ágba található.

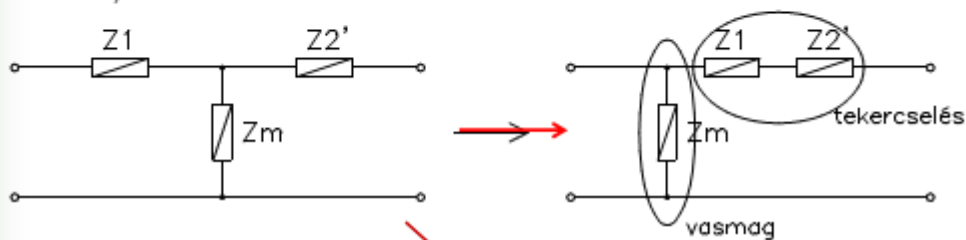
A teljes passzív, térelméleti helyettesítő kapcsolás:



17. Egyszerűsített helyettesítő kapcsolások

Egyfázisú transzformátorok: Egyszerűsített helyettesítő kapcsolások

a) $U_{1,i} \approx U_1$

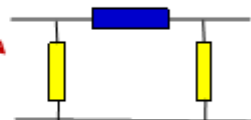


Különválasztva szerepelnek a vasmagra és a tekercselésre jellemző áramköri elemek.

Ezek mérése is igen egyszerű:

Vasmag: üresjárás

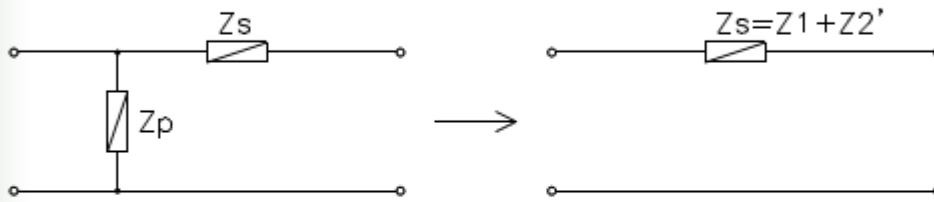
Tekercselés: rövidzárás



E két mérés alapján tetszőleges terhelési állapot is számíthatóvá válik.

Egyfázisú transzformátorok: Egyszerűsített helyettesítő kapcsolások

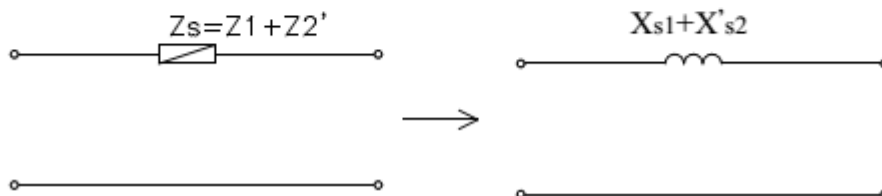
b) $Z_p \gg Z_1, Z_2$



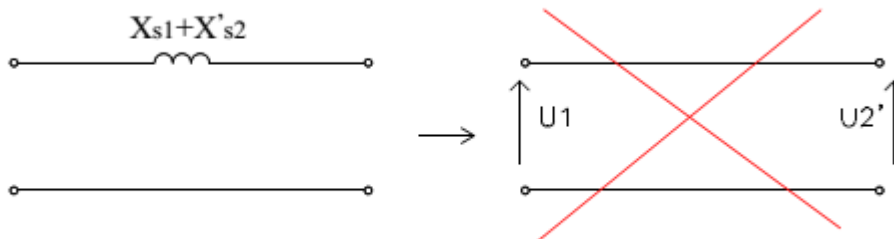
Az üresjárási áram és a vasvesztesség az üzem számításakor sokszor elhanyagolható; ha nem fontos a hatásfok számítása, ezt az egyszerűsítést szokás választani.

Egyfázisú transzformátorok: Egyszerűsített helyettesítő kapcsolások

c) $r_1, r_2' < X_{s1}, X_{s2}'$

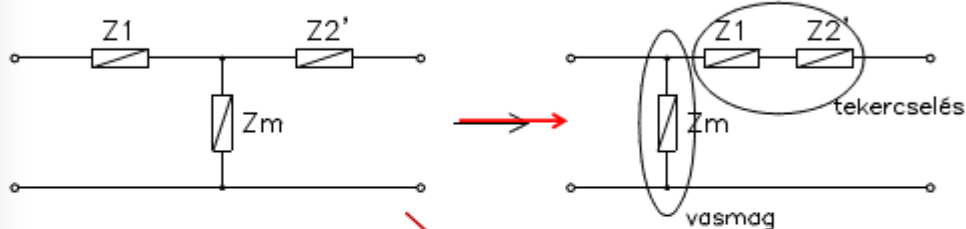


d) Ideális, veszteség- és szórásmentes transzformátor:



Egyfázisú transzformátorok: Egyszerűsített helyettesítő kapcsolások

a) $U_{1,i} \approx U_1$

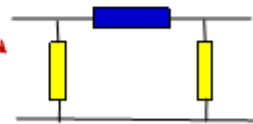


Különválasztva szerepelnek a vasmagra és a tekercselésre jellemző áramköri elemek.

Ezek mérése is igen egyszerű:

Vasmag: üresjárás

Tekercselés: rövidzárás



E két mérés alapján tetszőleges terhelési állapot is számíthatóvá válik.

19. Üresjárási és terhelési gerjesztés-viszonyok, a gerjesztések (áramok) fazorábrája

Egyfázisú transzformátorok: Fazorábra

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

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

alapvető kényszer hatását jól követhetjük a transzformátor fazorábráján, amelyet a helyettesítő kapcsolat 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:

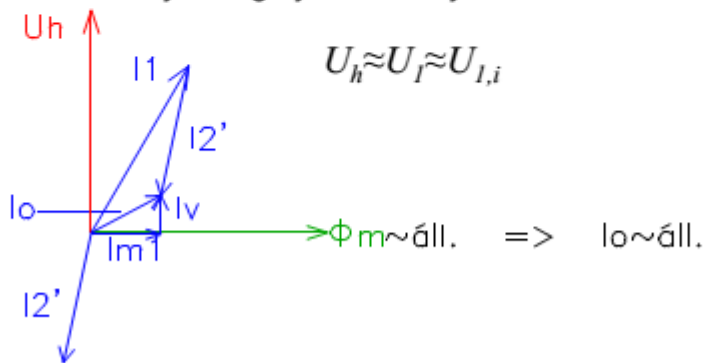
$$\overline{U}_1 \approx \overline{U}_{1,i} \approx \text{áll}$$

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

Egyfázisú transzformátorok: Fázorábra

Az állandó $U_{1,i}$ indukálásához állandó Φ_m főfluxus szükséges, annak létesítéséhez pedig állandó $I_{1,o}$ üresjárási áram ill. állandó $\Theta_{1,o} = N_1 I_{1,o}$ üresjárási gerjesztés.

Az $U_h = \text{áll}$ hálózati feszültségkényszer tehát a transzformátor állandó üresjárási gerjesztését írja elő.



Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

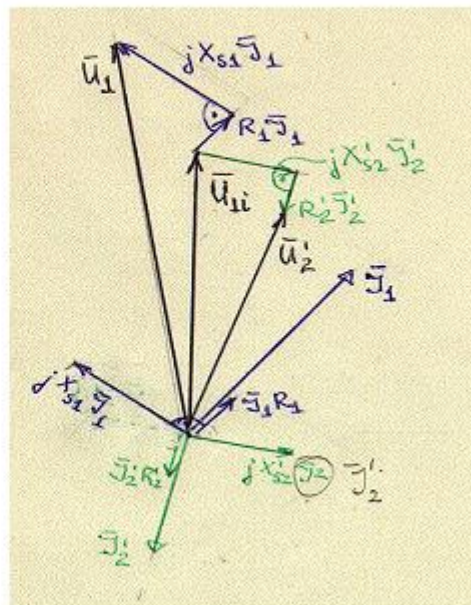
20. Üresjárási, rövidzárási és terhelési állapot, fázorábrák

Egyfázisú transzformátorok: Fázorábra

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

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

Az ábra rajztechnikai okokból **hamis**, a valóságos feszültség-esések **2-3%-ot tesznek ki.**



Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

Egyfázisú transzformátorok: Fázorábra

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

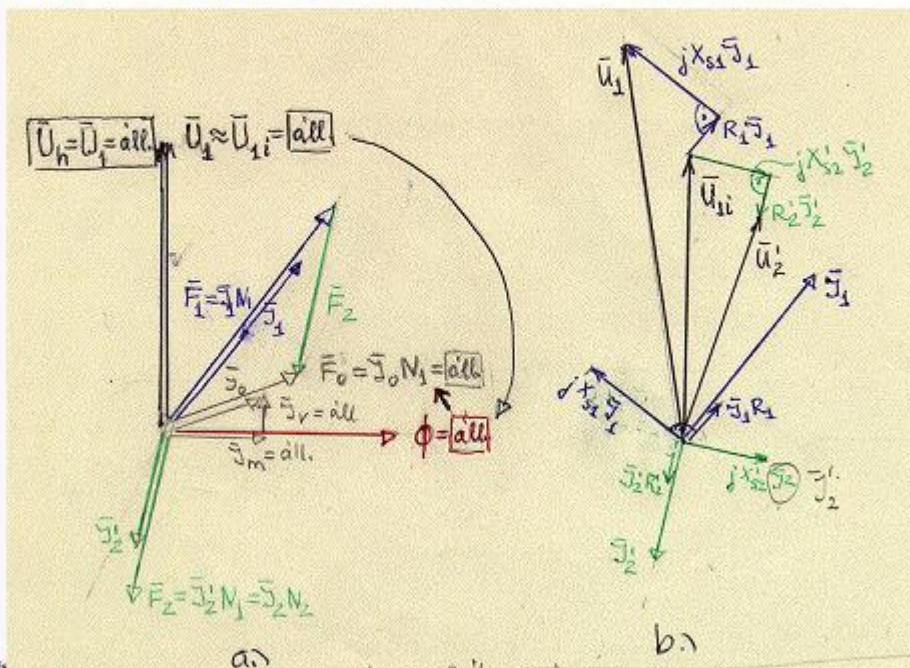
Megjelenik az $\bar{I}'_2$ szekunder terhelő áram. Hogyan reagál erre a primer oldal?

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

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

21. A szekunder feszültség változása

Egyfázisú transzformátorok: Fázorábra: üresjárási (a) és terhelés (b)



22. A rövidzárási impedancia és a rövidzárási feszültség fogalma, számítása és százalékos értéke

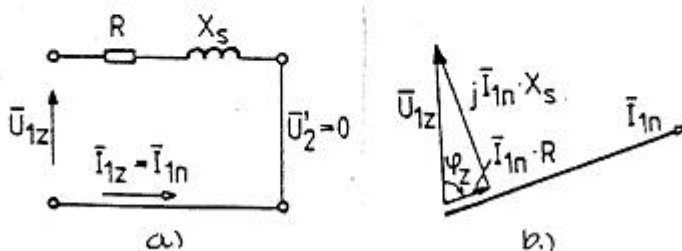
SuperTech

Egyfázisú transzformátorok: 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):



Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

SuperTech

Egyfázisú transzformátorok: A transzformátor rövidzárási állapota

Mérési rövidzáraskor 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 előbbieket szerint a feszültségesést és a transzformátorok párhuzamos kapcsolásakor is szerepe van.

Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

23. A főfluxus hirtelen és állandósult rövidzárási állapotban

II. Háromfázisú transzformátor

1. Felépítése, állandósult üzeme

Háromfázisú transzformátorok: Működési elv

SuperTech

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.

Háromfázisú transzformátorok: Működési elv

SuperTech

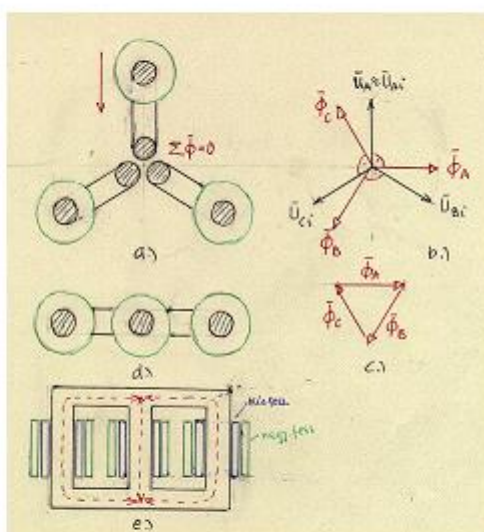
A használatos **magtípus** levezáraztatásához helyezzünk el három lánc típusu egyfázisú egységet szimmetrikusan, a).

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 $\sum \bar{\phi}_k = \bar{0}$

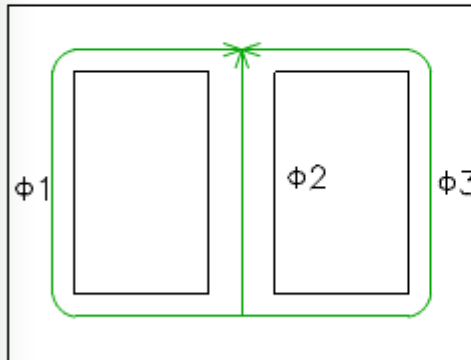
Az a) ábra középső oszlopa így fluxusmentes és elhagyható.

Az egyik oszlopot a másik kettő közé betolva a d) és e) ábrákon a használatos aszimmetrikus magtípusú háromfázisú transzformátort látjuk.



Háromfázisú transzformátorok: Működési elv

A középső oszlop rövidebb mágnesútja annak kisebb üresjárási áramát igényli, így az a háromfázisú üresjárási áramrendszer aszimmetriáját idézi elő.



A feszültség-kényszer miatt

$$\bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi}_3$$

A mágnesezési úthosszak:

$$l_2 < l_1 \text{ és } l_3$$

így :

$$\bar{\Theta}_2 < \bar{\Theta}_1 \text{ és } \bar{\Theta}_3$$

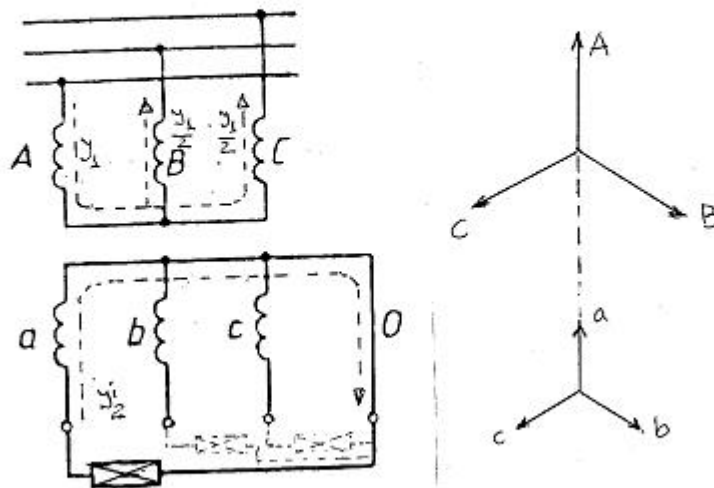
Ennek hatásait a továbbiakban elhanyagoljuk.

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások

A háromfázisú transzformátorok fázistekercseit **csillagba** vagy **deltába** vagy - csak a szekunder oldalon és kizárólag négyvezetékes kommunális fogyasztóknál - **zég-zugba** kapcsolják. A kapcsoljelölések cseréjével elméletileg **1296** változat lehetséges, de a gyakorlatban csak néhányat alkalmaznak.

Problémát elsősorban az egyfázisú kommunális fogyasztók (lakások, irodák, stb.) okoznak. A kivezetett csillagponttal ún. négyvezetékes rendszert nyerünk (l. ábra a következő dián) és az egyes fogyasztókat a nullavezeték és egy fázisok közé kapcsolják. A fázisokat az egyes utcák, házak között elosztják. Az egyes fázisok fogyasztói csoportjai nem egyformán terhelik a hálózatot, így aszimmetrikus terheléseloszlás jön létre, ami bajok forrása.

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások



Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások

A csillag-csillag kapcsolásában tételezzük fel az aszimmetria szélső, legrosszabb és legáttekinthetőbb esetét, amikor csak egy fázisban van terhelés. (A másik kettőben mindenki nyaral.)

Látható, hogy a B és C fázisokban csak a primer oldalon folyik áram. Így az üresjárási gerjesztés elhanyagolásával $N_1 \bar{I}_1 = -N_2 \bar{I}_2$ -ből nyerhető kifejezésben $N_2 \bar{I}_2 = 0$, így ezeken az oszlopokon $N_1(\bar{I}_1/2)$ kiegyenlítettlen gerjesztés jelenik meg.

Dr. Vajda István: Transzformátorok

VGA, BME VTK, 2015 tavasz

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások

Kimutatható, hogy ilyen kiegyenlítettlen gerjesztés jelenik meg az A oszlopon is és mindhárom oszlop kiegyenlítettlen gerjesztése azonos fázisú. Az azonos fázisú gerjesztések három azonos irányú $\vec{\Phi}_0$ fluxust (un. zérussorrendű fluxusokat) hoznak létre és azok három 90°-ra siető egyfázisú feszültséget indukálnak.

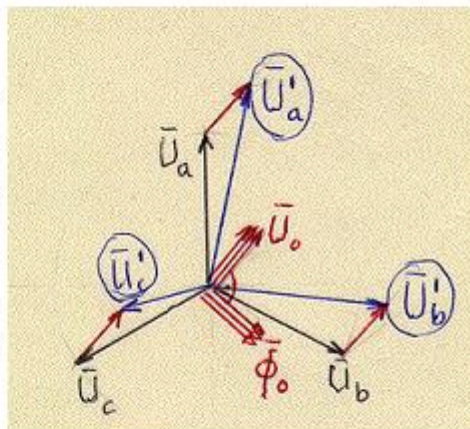
Ezeket az egyfázisú feszültségeket a transzformátor $\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ szimmetrikus szekunder feszültség rendszeréhez hozzáadva (lásd ábra) teljesen aszimmetrikus $\bar{U}'_a, \bar{U}'_b, \bar{U}'_c$ kapocsfeszültség-rendszert nyerünk, ami a fogyasztók szempontjából megengedhetetlen (pl. megnövelt feszültségnél az égők kiégnek, a csökkentnél alig világítanak).

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások

Aszimmetrikus terheléskor a vasmag oszlopain kiegyenlítettlen 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:



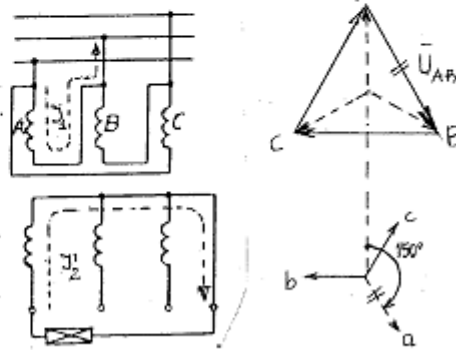
Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások

Háromszög-csillag kapcsolás

Az ábrán látható, hogy a primer fázisáram úgy folyik vissza a hálózatba, hogy másik fázistekercsen nem megy keresztül. Így **kiegyenlítettlen oszlopgerjesztések nem keletkeznek**.

A primer oldali delta kapcsolás tehát megoldotta a problémánkat. A primer háromszög kis teljesítmény és nagy primer feszültség esetén előnytelen, mert sokmenetű primer tekercset kell készíteni drága, vékony vezetéből. Készítése is drága.

Ilyenkor pl. a szekunder oldali **zég-zug kapcsolás** lehet a megoldás, bár a hálózati mérnökök, ha lehet, kerülnek.



VGA, BME VIK, 2015 tavasz

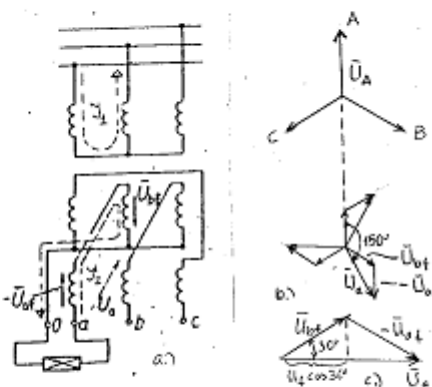
Dr. Vajda István: Transzformátorok

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások

Csillag-zég-zug kapcsolás

Minden szekunder tekercset két féltekercsre osztunk és azokat az 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 féltekercsfeszültségek között 60° -os fáziseltolás rontja, az eredő feszültségek és a részfeszültségek összegének (ez szabja meg a menetszámot) aránya ugyanis a c) - vízszintesen rajzolt - ábrából leolvashatóan:

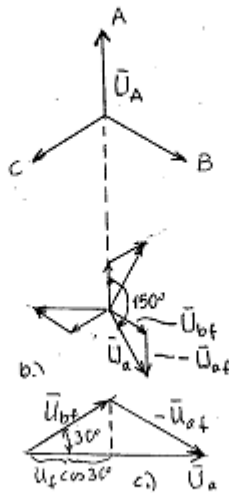
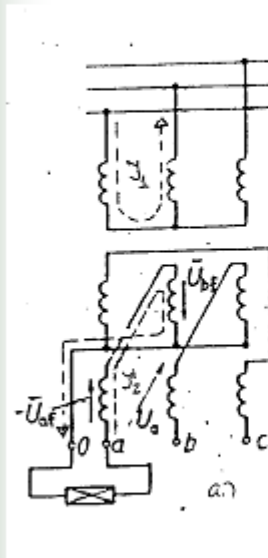


$$\frac{U_a}{\sum U_{fel}} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86$$

VGA, BME VIK, 2015 tavasz

Dr. Vajda István: Transzformátorok

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolások



$$\frac{U_a}{\sum U_{fel}} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86$$

A b) ábrából láthatóan az primer U_A és az U_a szekunder feszültség között fáziseltolás van; az ábra kapocsjeleivel ez 150° .

Háromfázisú transzformátorok: Kapcsolási jelek

A bemutatott kapcsolásoknál a primer és szekunder fázisfeszültségek között fázisszög eltérés van. A szimmetria viszonyokból kitűnik, hogy a fáziseltolás csak 30° többszöröse lehet, ezért az óraszám lappal jellemzik.

A szögnek megfelelő óra az ún. jelölőszám. Így egy kapcsolat jele a primer kapcsolat nagybetűjétől a szekunder kisbetűjéig és a jelölőszámból áll. A bemutatott kapcsolások sorrendjében ezek rendre:

$$Yy_0, Dy_5, Yz_5$$

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.

5. Különleges transzformátorok

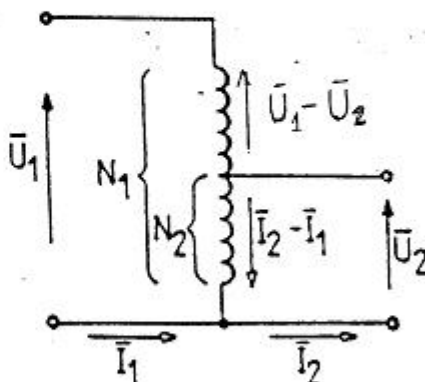
a) Feszültség- és áramváltó

Takarékkapcsolású transzformátorok

Az ábrából láthatóan a takarékkapcsolású transzformátor 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.



Takarékkapcsolású transzformátorok

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

A közös rész belső teljesítménye:

$$S_{b,közös} = U_2(I_2 - I_1) = U_2I_2 - U_2I_1$$

a külső részé:

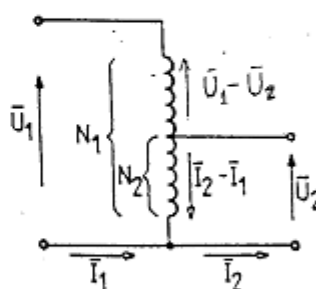
$$S_{b,külső} = I_1(U_1 - U_2) = I_1U_1 - U_2I_1$$

ugyanennyi, hiszen: $U_2I_2 \approx U_1I_1$

A belső és az átvitt teljesítmény aránya

$$S_{b,külső} = S_{b,közös} \quad \frac{S_b}{S_{átmenő}} = \frac{U_2(I_2 - I_1)}{U_2I_2} = 1 - \frac{1}{n}$$

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



Takarékkapcsolású transzformátorok

A takaréktanszformátor hátrányai:

1. A primer és a szekunder közötti un. főszigetelés hiánya.
2. Rövidzáráskor a primer feszültség a rendszerint kis menetszámú tekercsrészre esik.

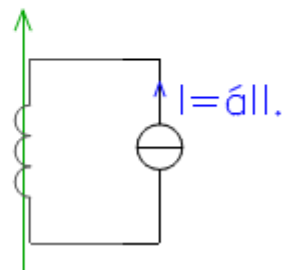
III. Forgó mozgás létesítése

1. Villamos gépek mágneses mezője

a) Állandó, lüktető és forgó mezők

Mezőtípusok: állandó mező

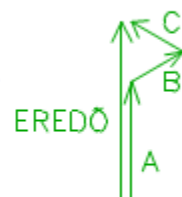
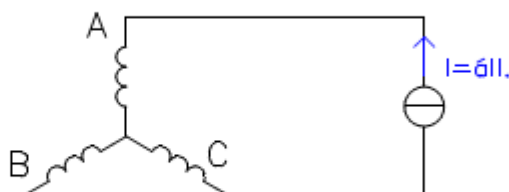
a) **Egy** tekercs
egyenárammal gerjesztve.



b) **Több** tekercs, **térben**
háromfázisúan elhelyezve és
egyenárammal gerjesztve.

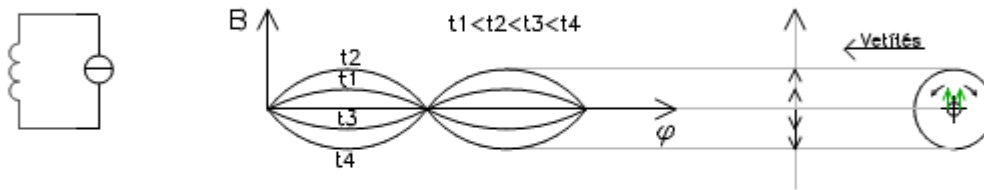
$$B_{\text{eredő}} = 1,5 \times B_A,$$

ez is állandó



Mezőtípusok: lüktető mező

- Egy tekercs, egyfázisú **váltakozó árammal** gerjesztve.



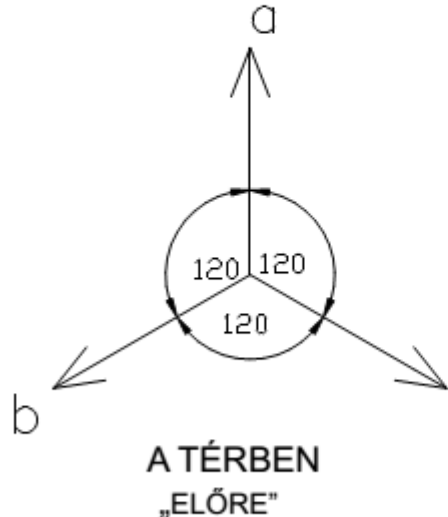
- A lüktetőmező **térbeli állóhullám**, lineáris esetben összetehető két forgó mezőből.
- **FERRARIS TÉTELE**: a lüktető mező felbontható két, egymással ellentétes irányban, azonos szögsebességgel forgó mezőre, amelyek amplitúdója (hossza) a lüktető mező amplitúdójának fele.

b) Forgó mező létrehozása többfázisú tekercsrendszerrel

Mezőtípusok: forgó mező

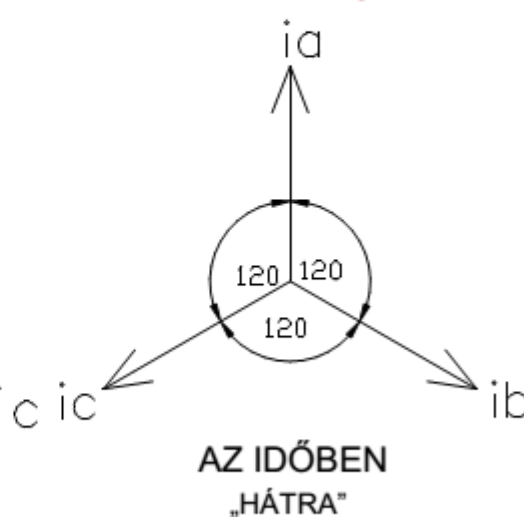
TEKERCSEK **TENGELYEI**

A **TÉRBEN**



A TEKERCSEK **ÁRAMAI**

AZ **IDŐBEN**

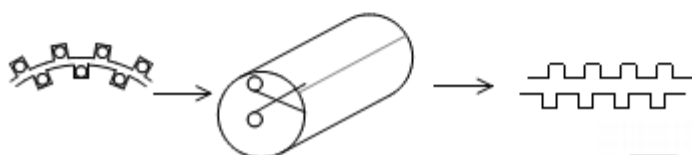


2. Szinuszos indukált feszültség létrehozása

a) Szinuszos mezőeloszlás létrehozása.

Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

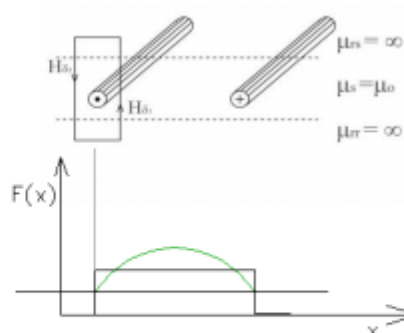
- A számítás egyszerűsítése érdekében a hengeres álló- és forgórészt egy képzeletbeli ollóval a hengerpalást-felület egyik alkotója mentén felvágjuk, és a síkban kiterítjük.



- Alkalmazzuk a gerjesztési törvényt!

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}, \text{ ebből}$$

$$\sum_i U_{mag,i} = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_k I_k = \theta$$



Prof. Vajda István: Forgómező, indukált fesz, mezőtípusok

VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

- A légrésen, valamint az álló- és forgórész-vastesten át záródó integrálási útvonalakat felvéve, és

$$\sum_i U_{mag,i} = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_k I_k = \theta$$

- elhanyagolva a vastestre eső mágneses feszültségeket ($\mu_{vas} = \infty$ közelítés), kapjuk

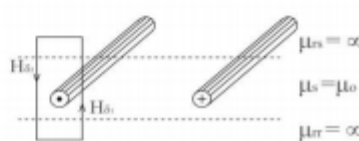
- a gerjesztés kerület menti eloszlását, esetünkben egy ún. **lépcsős görbét**.

- A pólusonkénti és fázisonkénti horonyszám:

$$q = \frac{Z}{2pm}$$

- Léteznek:

- $q = \text{egész}$
- $q = \text{tört}$



Prof. Vajda István: Forgómező, indukált fesz, mezőtípusok

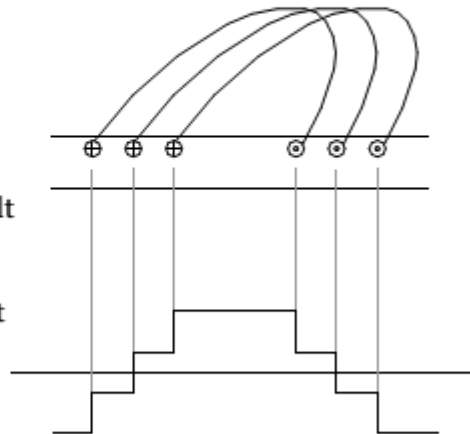
VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

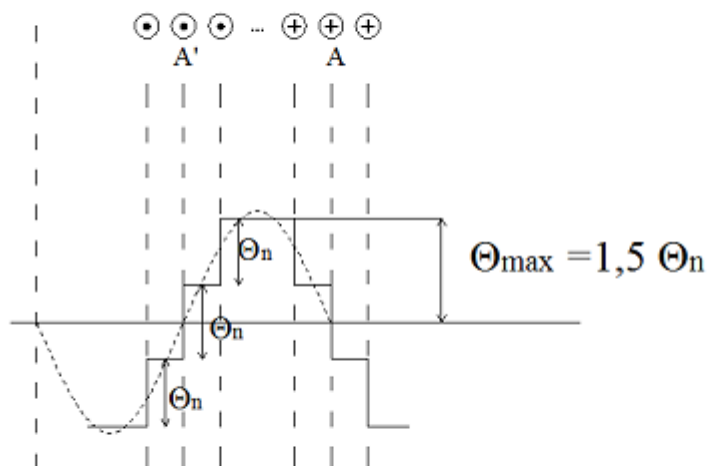
- Mi történik $q > 1$ választás esetén?
- **Mező:**
 - Szinuszosabb térbeli eloszlás
- **Indukált feszültség:**
 - Kisebb, mert az egyes tekercsoldalakban fázisban eltolt feszültségek indukálódnak, amelyek vektorösszege kisebb, mint a részfeszültségek abszolút értékeinek összege (a fázisfeszültség nagysága).

Előnyös

Hátrányos

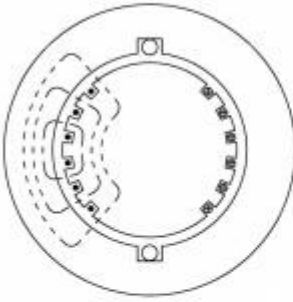


Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

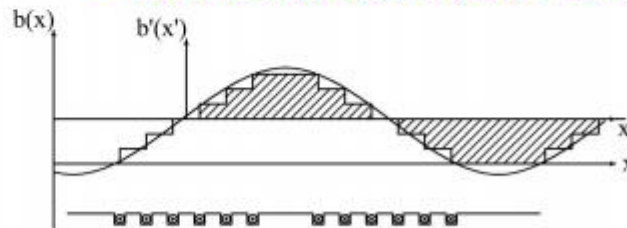


Elég jó szinusz!

Szinuszos mezőeloszlás létrehozása



- Ha a szerkesztés kezdetén **rosszul vettük fel a zérus tengelyt, fura** ábrákat kaphatunk, például tűnhet úgy,
 - mintha csak egy pólusa lenne a gépnek
 - Az északi és a déli pólusok fluxusai nem egyeznének.
- Ne hagyjuk magunkat megtéveszteni!
- **Ezen könnyű segíteni, lásd az ábrát.**



b) Indukált feszültség számítása.

Az indukált feszültség számítása

$$N_1 = \frac{z_1}{2} \quad \begin{array}{l} N_1 = \text{menetszám/fázis} \\ z_1 = \text{összes sorbakötött vezetős szám/fázis,} \\ z_h = z_1 / Z \end{array}$$

$$U_i(t) = b(x) l_i \cdot v \cdot z_1 \quad \textbf{Mozgási indukálás}$$

$$U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} B_{max} \cdot l_i \cdot v \cdot z_1$$

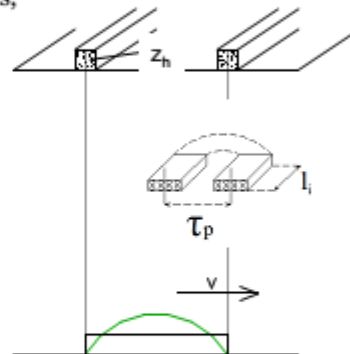
$$B_{köz} = \frac{2}{\pi} B_{max} \quad \text{szinuszos esetben!}$$

$$v = R\omega_0 = \frac{p \cdot \tau_p}{\pi} \cdot \omega_0 = \frac{\tau_p}{\pi} \omega_0 p = \frac{\tau_p}{\pi} \cdot \omega_1$$

$$U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\pi}{2} B_{köz} \right) \cdot l_i \cdot \left(\frac{\tau_p}{\pi} \cdot 2\pi f_1 \right) (2N_1) = 4,44 f_1 N_1 B_{köz} l_i \tau_p = 4,44 f_1 N_1 \Phi_{max}$$

Ha $q \neq 1$

$$U_{1eff} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \xi_1 \Phi_{max}$$



Az indukált feszültség számítása

$$U_{i,fázis\ eff} = 4 \cdot 1,11 \cdot \frac{B_{\delta,köz} \cdot \tau_p}{\Phi_{max}} \cdot N_{1,eff} \cdot f_1$$

$$U_{i,f,eff} = 4,44 \cdot \Phi_{max} \cdot N_{1,eff} f_1 =$$

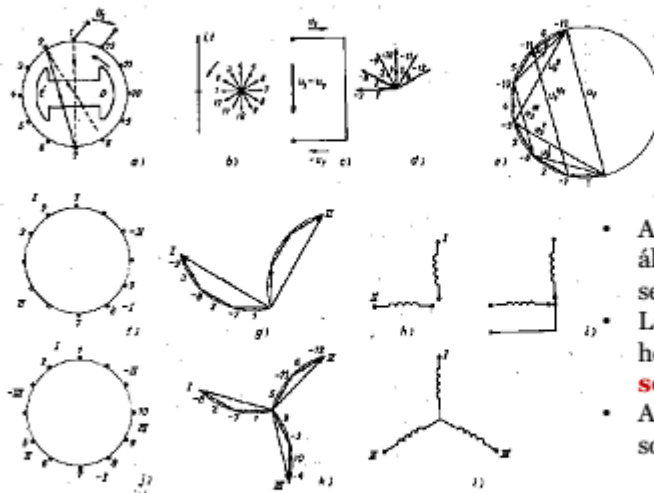
$$U_{i,f,eff} = 4,44 \cdot f_1 \Psi_{max}$$

Pontosan ugyanaz, mint
transzformátoroknál a nyugalmi indukálással!

c) Tekercselés és tekercselési tényező.

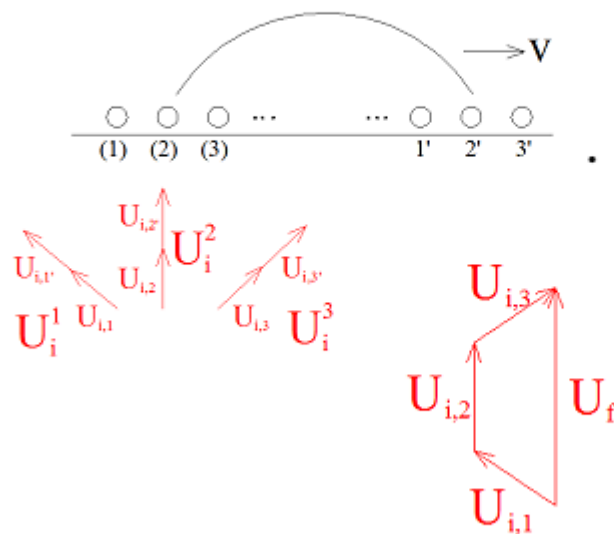
i. Elosztott tekercselés és elosztási tényező

Elosztott tekercselés tervezése



- A tekercselések tervezését általában a **horonycsillag** segítségével végezzük.
- Látható, hogy **ugyanazon** horonycsillagból kiindulva **sokféle** tekercselés alakítható ki
- A fázisszám is többféle lehet, sorról-sorra:
 - Egy
 - Két
 - Háromfázisú

Az elosztási tényező számítása



- A különböző – általában szomszédos – hornyokban elhelyezett tekercsoldalakban
 - azonos nagyságú, de
 - fázisban eltérő feszültségek indukálódnak.
- A fázisszögek a horonyosztás egész számú többszörösei.

$$\alpha_h = \frac{2 \cdot \pi}{Z}$$

$$\alpha_{v,h} = p\alpha_h$$

$$p_n = np$$

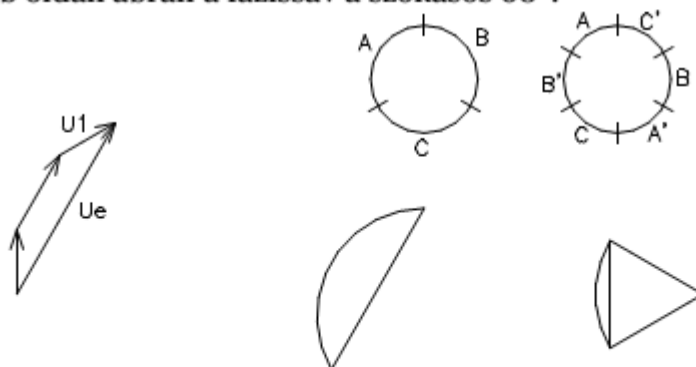
$$\alpha_{n,v,h} = np\alpha_h$$

Prof. Vajda István: Forgómező, indukált fesz. mezőtípusok

VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

Az elosztási tényező $q \rightarrow \infty$, $n = 1$

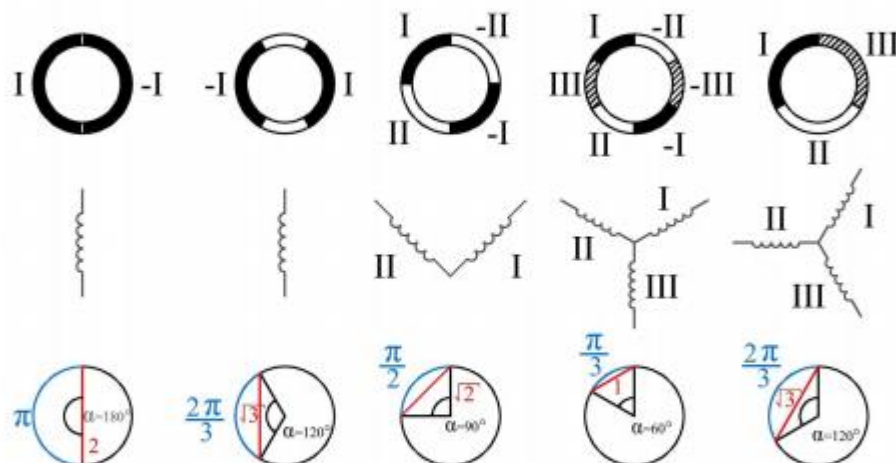
- A **bal** oldali ábra mutatja az eredő indukált feszültség szerkesztését $q=3$ esetén.
- A **középső** és a **jobb** oldali ábra $q \rightarrow \infty$ feltételezéssel készült.
- A középső ábrán a fázissáv szélessége 120° (nem szokásos), míg a jobb oldali ábrán a fázissáv a szokásos 60° .



Prof. Vajda István: Forgómező, indukált fesz. mezőtípusok

VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

Az elosztási tényező, $q \rightarrow \infty, n = 1$



$$\xi_{e,1} = \frac{2}{\pi} = 0,637$$

$$\xi_{e,1,2/3} = \frac{2\sqrt{3}/2}{2\pi/3} = 0,828$$

$$\xi_{e,1,2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi/2} = 0,9$$

$$\xi_{e,1,3} = \frac{1}{\pi/3} = 0,955$$

$$\xi_{e,1,3,120^\circ} = 0,828$$

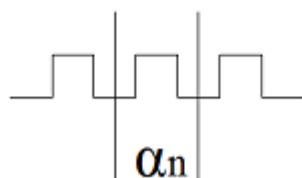
Prof. Vajda István: Forgóméző, indukált fesz. mezőtípusok

VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

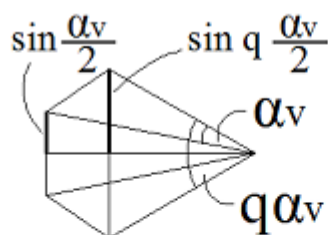
Az elosztási tényező, $q < \infty$

Véges horonyszám esetén

$$\alpha_{v,1} = p \cdot \alpha_g = p \cdot \alpha_h$$



$$\alpha_{v,n} = n \cdot \alpha_{v,1} = n \cdot p \cdot \alpha_{n,g}$$



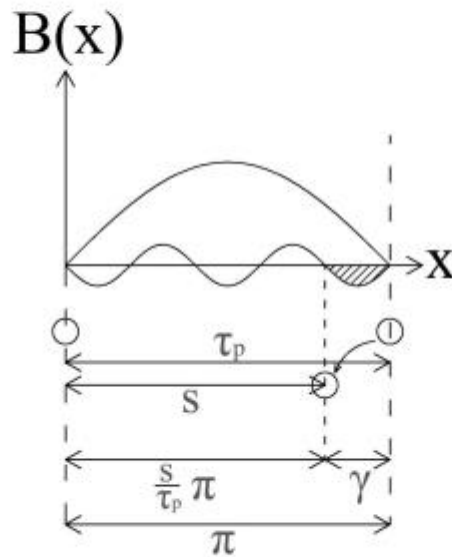
$$\xi_{e,1} = \frac{\sin q \frac{\alpha_v}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha_v}{2}}$$

$$\xi_{e,n} = \frac{\sin n \cdot q \frac{\alpha_v}{2}}{q \sin n \frac{\alpha_v}{2}}$$

Prof. Vajda István: Forgóméző, indukált fesz. mezőtípusok

VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

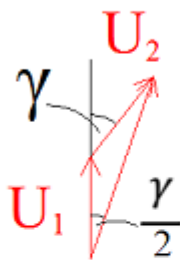
A húr- (lépésrövidítési) tényező számítása



Prof. Vajda István: Forgóműző, indukált fesz. mezőtípusok

VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

A húr- (lépésrövidítési) tényező számítása



$$\xi_{h,1} = \cos \frac{\gamma}{2} =$$

$$= \cos \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{s}{\tau_p} \pi \right)$$

$$= \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\xi_{h,1} = \sin \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}$$

$$\xi_{h,n} = \sin \left(n \frac{\pi}{2} \right) \sin n \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}$$

$$|\xi_{h,n}| = \sin n \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2}$$

Prof. Vajda István: Forgóműző, indukált fesz. mezőtípusok

VGA, VIK BSc, 2015 tavasz

A húr- (lépésrövidítési) tényező számítása

legyen

$$\frac{s}{\tau_p} = \frac{4}{5} \rightarrow \xi_{h,5} = \sin 5 \cdot \frac{4\pi}{5 \cdot 2} = 0$$

$$\frac{s}{\tau_p} = \frac{6}{7} \rightarrow \xi_{h,7} = \sin 7 \cdot \frac{6\pi}{7 \cdot 2} = 0$$

$$|\xi_{h,5}| \downarrow \left| \sin 5 \cdot \frac{5\pi}{6 \cdot 2} \right| = 0,26$$

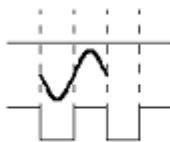
$$\frac{s}{\tau_p} = \frac{5}{6} \quad \downarrow \quad \left| \sin 7 \cdot \frac{5\pi}{6 \cdot 2} \right| = 0,26$$

iii. Horonyferdítés és ferdítési tényező alap- és felharmonikusokra

A horonyferdítési tényező számítása

A húrozás nem segít horonyharmonikusok csökkentésén.

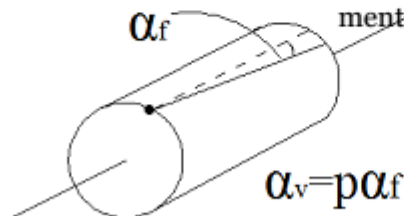
Mert: a horonyharmonikus alaphulláma horonyosztásnyi.



• **Gyakori** módszer a **horonyferdítés**.

• **Lényege:**

- egy rudat/tekercsoldalt infinitezimálisan kis szakaszokra osztunk a tengely mentén, így a
- horonyosztásnyi alap- vagy felharmonikus mezők által indukált feszültség a rúd mentén közel zérus lesz



- Ennek az alapmotívumnak sokféle egyéb variációja is létezik, mint
 - pl ÁM gépekben a **mágnesferdítés**.

A horonyferdítési tényező számítása

- A jelenség megfelel
 - a végtelen horonyszámú
 - elosztott tekercselés
 - esetének.

$$\xi_{e,\infty} = \frac{\sin \frac{b}{\tau_p} \frac{\pi}{2}}{\frac{b}{\tau_p} \frac{\pi}{2}} \rightarrow \xi_{f,1} = \frac{\sin \frac{\alpha_{f,v}}{2}}{\frac{\alpha_{f,v}}{2}}$$

$$\alpha_{v,n} = n \cdot \alpha_v \rightarrow \xi_{f,n} = \frac{\sin n \frac{\alpha_{f,v}}{2}}{n \cdot \frac{\alpha_{f,v}}{2}}$$

- Példa:
 $m=3$
 $q=3$
- Amiből:
 $\alpha_v = 10^\circ$

Az alapharmonikusra gyakorlatilag nincs hatása

De például az $n = 19$ felharmonikusra:

$$\xi_{f,1} = \frac{\sin 10^\circ}{10 \cdot \frac{\pi}{180}} = \frac{0,173}{0,174} \cong 1$$

$$\xi_{f,19} = \frac{\sin 19 \cdot 10^\circ}{19 \cdot 10 \cdot \frac{\pi}{180}} = -\frac{0,173}{3,3} = -0,052$$

IV. Szinkron gépek: A háromfázisú szinkron gép

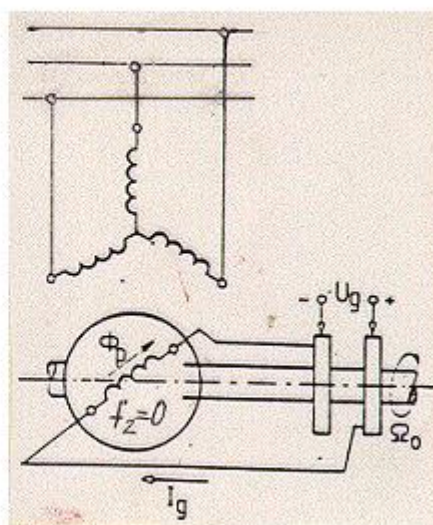
1. Működési elve

BME VET

A szinkron gép: működési elv

Láttuk, hogy váltakozóáramú gépeink működésének alapja két szinkron forgó forgómező, képletesen két összetapadt, együttfutó pólusrendszer. Tengelyeik között - a terhelő nyomaték hatására - szögeltérés, szögelfordulás előáll, de állandósult állapotban fordulatszám-eltérés nem lehetséges.

A szinkron gép állórészének a hálózatra kötött háromfázisú tekercselése a légrésben szinkron fordulatszámú forgómezőt hoz létre.



A szinkron gép: működési elv

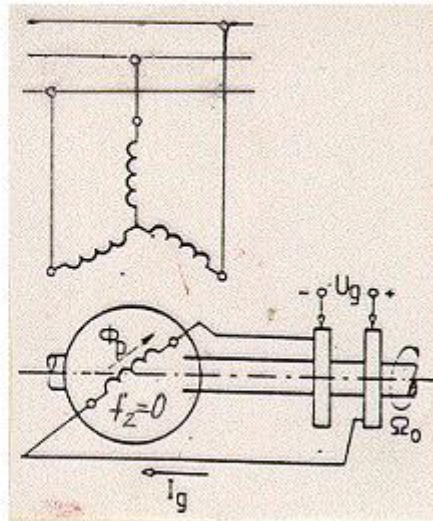
Az egyetlen forgórész tekercset egyenárammal tápláljuk. (lehet állandó mágneses.)

A forgórész mező így a forgórészhez képest áll, nyugalomban van (állandó mező), ahhoz rögzített, "hozzá van ragasztva":

$$f_r = 0 \rightarrow n_r = 0$$

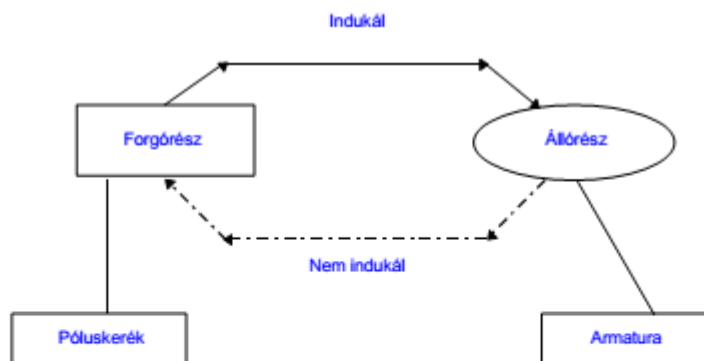
Ebből következik, hogy a forgórésznek az állórész mezővel együtt, azzal szinkron kell forognia

$$n = n_s = n_0 = n_1$$



A szinkron gép: működési elv

A szinkron gép állandósult, szimmetrikus állapotban UNILATERÁLIS = **indukálás csak egy irányban van**: a forgórész indukál az állórészbe.



A szinkron gép: működési elv

- A gép tehát csak egyetlen fordulatszámmal, az n_0 szinkron fordulatszámmal képes forogni. Ha fordulatszáma ettől eltér, tehát "kiesik" a szinkronizmusból, akkor üzemképtelenné válik.
- Minden **relatív fordulateltérés** alatt a teljes, zérus középtértékű nyomatékgörbét befutva **csak lengő nyomaték** keletkezik és **a gép a hálózatra nézve gyakorlatilag rövidzárlatot jelent.**
- A forgórész mező a forgó mező "legegyszerűbb" alakja, nevezhetnénk „forgatott forgó mezőnek”, mechanikailag forgatott mezőnek, miután egy állandó mező mechanikai forgatásával jött létre.
- Az elmondottakból következik, hogy **a szinkron gép nem tud indulni.** A **generátort** a hajtó gép - pl. a turbina - forgatja névleges fordulatra, a **motort** kalickával indukciós motorként vagy a tápláló inverter nulláról növekvő frekvenciájával kell a szinkron fordulat közelébe juttatni.
- A szinkron fordulat elérésekor mind a generátort, mind a motort - mint később látjuk - megfelelő módon kell a hálózatra kapcsolni, **szinkronizálni** kell.

A szinkron gép: működési elv

- A szinkron gép **lengőképessé**, lengésre hajlamos **rendszer**. Az indukció vonalak rugalmas gumiszalagokként viselkednek. Az aszinkron gép lengését a kalicka - a rövidrezárt szekunder - indukált áramai fékezik. Hasonló hatások szinkron gépben is fellépnek.
- Ugyanakkor mivel a forgórész áramok révén "saját" mágneses tere van - azt nem a hálózatból felvett áramkomponensnek kell létesíteni - a szinkron gép **képes meddő** - kapacitív meddő - **teljesítményt szolgáltatni**, azaz úgy viselkedni mint egy kondenzátor telep.
- Szokásos a rögzített pólusokkal ellátott forgórészt **póluskeréknek**, mezejét **pólusmezőnek** nevezni.
- Az állórész háromfázisú tekercselésének neve **armatúra tekercselés**, mezeje az **armatúra mező**. Armatúra tekercselésnek azt nevezzük, amelyben állandósult szimmetrikus állapotban feszültség indukálódik.
- A később megismerendő indukciós gépnél mindkét oldal ilyen így ott ez a megnevezés nem használatos.

A szinkron gép: működési elv

Bár az armatura- és a pólusmező a szinkron gép légrésében egyetlen **eredő** mezővé tevődik össze és csak ez mérhető, **azonban a két részmező** - az azokat létesítő áramok - **itt egymástól függetlenül változtathatnak célszerű a szinkron gépnél a két részmezőben gondolkodni.**

A szinkron gép elsősorban mint **áramszolgáltató nagy generátor** fontos. Míg az indukciós motor "hajtja a világ iparát", **belátható időn belül a villamos energia döntő részét továbbra is szinkron generátorok szolgáltatják.** A következőkben ezért általában a szinkron gép generátoros állandósult állapotát fogjuk vizsgálni.

A hajtógép gőz-, víz vagy gázturbina. A nagy **gőzturbinás generátorok 2-4 pólusúak**, a **vízturbinások gyakran nagy pólusszámúak, lassú fordulatszámúak.**

2. Felépítése

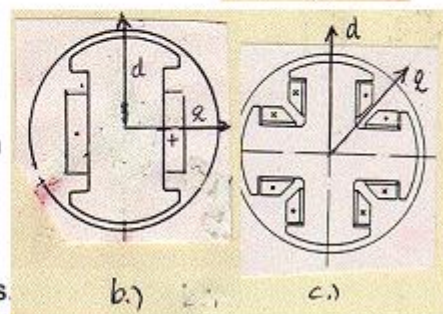
A szinkron gép: felépítés

Az **állórész** tekercselés háromfázisú, elviekben ugyanolyan, mint az indukciós gépeké.

Miután a vas igénybevétele a fogak telítődése miatt nem növelhető, a nagy gépek áramsűrűségét, **a kerületi áramot kell növelni**, amihez erőteljes hűtés: lég-, hidrogén- ill. vízhűtés szükséges. Az állórész lemezelt.

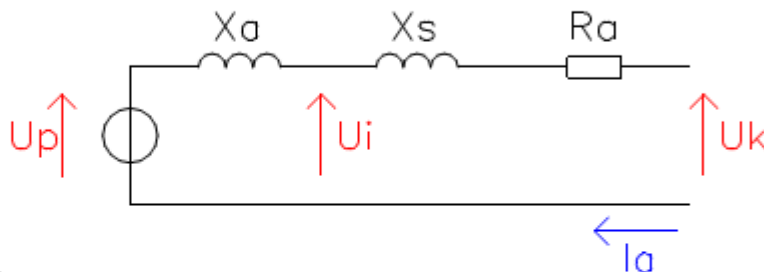
A **forgórész** két alaptípusa a **hengeres** és a **kiálló pólusú** változat az utóbbi az ábrán két és négy pólusú változatban (b és c.).

Szimmetrikus állandósult állapotban a forgórész **együtt** fut az állórész mezővel így abban indukálás, átmágnesezés nincs. Így, főleg a nagy röperő ellen, **a hengeres változat lehet tömör.**



Helyettesítő kapcsolás

A feszültség-egyenlethez tartozó helyettesítő kapcsolás:



Megjegyzések:

1. A vasvesztést elhanyagolva: állandósult szimmetrikus állapotban csak az állórészben keletkezik vasvesztés.
Nagy gépeknél: $\eta \rightarrow 100\%$ így $P_{\text{vas}} \approx 0$, $P_{\text{mech}} \approx 0$
2. A növekedési törvények miatt, ha P nő, r_a csökken, $R_a \approx 0$ a szokásos elhanyagolás
3. A gépben egyetlen mező van, ez hozza létre az indukált feszültséget.
4. $X_d = X_a + X_s$ SZINKRON REAKTANCIA

4. Az állandósult nyomaték kialakulásának feltétele. A szinkron fordulatszám

Nyomaték és teljesítmény

Feltétel: $\Sigma P_{\text{veszt}} = 0 \Rightarrow R_a = 0$ $X_d = X_a + X_s$

azaz

$$P_{\text{mech}} \approx P_{\text{légrés}} \approx P_{\text{hálózat}} \approx 3U_k I_a \cos \varphi$$

A vektorábra felhasználásával az alábbi összefüggéseket kapjuk:

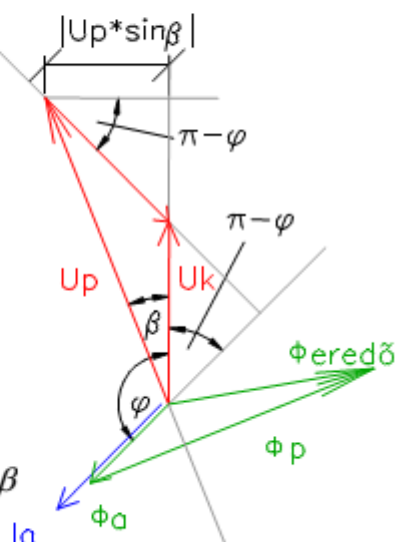
$$|U_p \sin \beta| = |X_d I_a \cos(\pi - \varphi)|$$

amiből:

$$I_a \cos \varphi = \frac{U_p}{X_d} \sin \beta$$

A teljesítmény

$$P_{\text{mech}} = P_h = 3U_k I_a \cos \varphi = 3U_k \frac{U_p}{X_d} \sin \beta$$

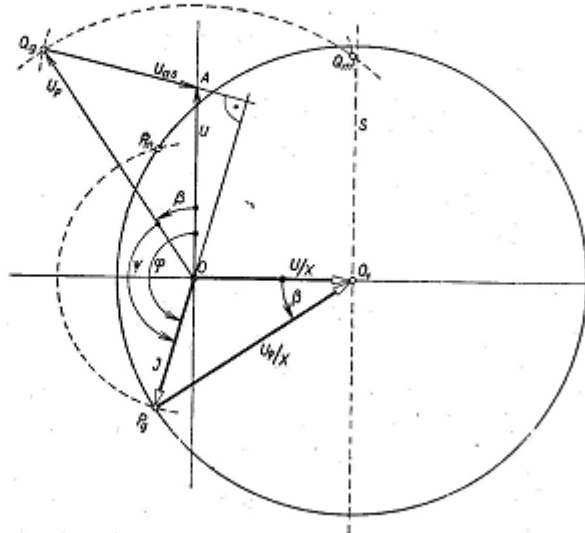


Hengeres forgórészű szinkron gép árammunkadiagramja (kördiagram)

BME VET

$$U_k = U_p + jX_d I_a$$

$$I_a = \frac{U_k}{jX_d} - \frac{U_p}{jX_d}$$



22

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VTK, 2015 tavasz

- a) A pólus-, az armatura- és az indukált feszültség fogalma és számítása, feszültségegyenlet

BME VET

Szinkron gép helyettesítő kapcsolása

A mágneses tér „modellje”: kétmezős elmélet, mert a két mező többé-kevésbé függetlenül változtatható.

A **pólusfeszültség** az ismert módon:

$$U_p = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 \xi_1 N_1 \Phi_{p,\max}$$

ez „aktív” (feszültségforrás).

Az **armatura-feszültség**:

$$U_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 \xi_1 N_1 \underbrace{\Phi_a}_{\Psi_a}$$

ez indukált feszültség, de feszültségesésként vesszük figyelembe

11

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VTK, 2015 tavasz

- b) Az armatura-, a szórási és a szinkron reaktancia fogalma, a szórási reaktancia komponensei

Az armatura reaktancia

A transzformátorhoz hasonlóan: aktív: U_i
passzív: X_m

$$U_a = 2\pi f_1 \times \frac{\Psi_a}{\sqrt{2}} \times \left(\frac{I_a}{I_a} \right) = 2\pi f_1 \times \frac{\Psi_a}{\sqrt{2} \times I_a} \times I_a = 2\pi f_1 L_a I_{a(eff)}$$

azaz $\bar{U}_a = jX_a \bar{I}_a$, ahol X_a az *armatura-reaktancia*.

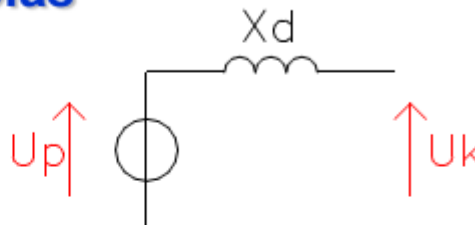
Ehhez járulnak a szórások, amelyekkel a feszültség-egyenlet: $\bar{U}_k = \bar{U}_p + jX_a \bar{I}_a + jX_s \bar{I}_a + R_a \bar{I}_a$

Itt is a fogyasztói pozitív irányrendszer van érvényben.

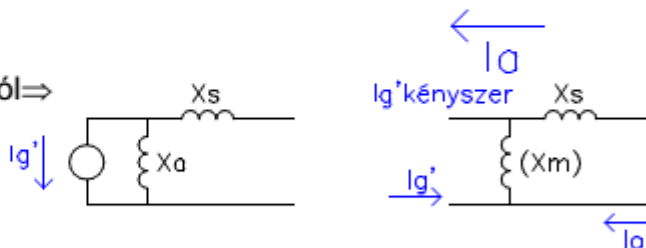
- c) A helyettesítő kapcsolás származtatása; Thevenin- és Norton-kapcsolás

Helyettesítő kapcsolás

A hengeres forgórészű szinkron gép egyszerűsített helyettesítő kapcsolása:



Thevenin kapcsolásból $\Rightarrow$ Norton kapcsolás kapható az ismert átalakítással:



A helyettesítő kapcsolás szemléletesen mutatja, hogy (a transzformátorok és az aszinkron gépek esetétől eltérően) szinkron gépek esetén **nem** a gerjesztések egyensúlya törvénye vezérli a működést.

Fazorábra

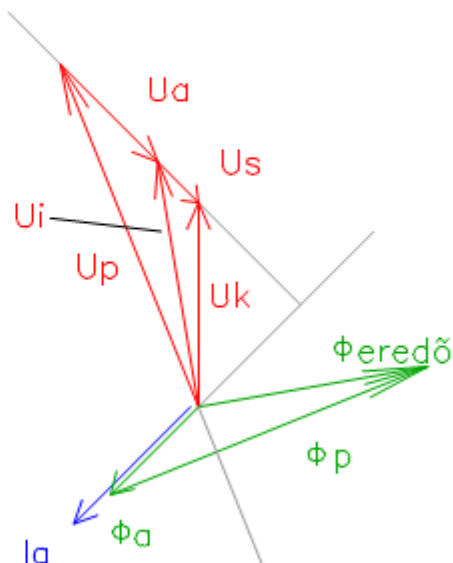
A feszültség-egyenlet alapján:

$$\bar{U}_p = \bar{U}_k - jX_s \bar{I}_a - jX_a \bar{I}_a = \bar{U}_k - \bar{U}_s - \bar{U}_a$$

$$\Phi_a \parallel I_a$$

$$\Phi_p \perp U_p$$

$$\Phi_{eredő} \perp U_i$$



e) A nyomaték és a felvett/leadott teljesítmény számítása, a terhelési szög fogalma

A nyomaték és teljesítmény

A teljesítmény:

$$P_{mech} = P_h = 3 U_k I_a \cos \varphi = 3 U_k \frac{U_p}{X_d} \sin \beta$$

β a terhelési szög

Megállapodás szerint:

$\beta > 0$ a motoros üzemállapotnak felel meg.

$\beta < 0$ generátoros üzemállapotnak felel meg.

A nyomaték képlete:

$$M = \frac{P_{mech}}{\Omega_0} = \frac{P_{mech}}{\omega_1 / p} = \frac{3p U_k U_p}{\omega_1 X_d} \sin \beta$$

ahol Ω_0 a forgórész (mechanikai) szögsebessége.

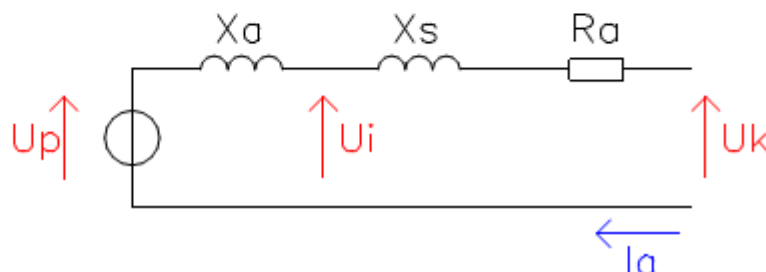
6. Kiálló pólusú háromfázisú szinkrongép

a) A hossz- és keresztirányú szinkron reaktancia fogalma

BME VET

Helyettesítő kapcsolat

A feszültség-egyenlethez tartozó helyettesítő kapcsolás:



Megjegyzések:

1. A vasvesztéséget elhanyagolva: állandósult szimmetrikus állapotban csak az állórészben keletkezik vasvesztés.
Nagy gépeknél: $\eta \rightarrow 100\%$ így $P_{\text{vas}} \approx 0$, $P_{\text{mech}} \approx 0$
2. A növekedési törvények miatt, ha P nő, r_a csökken, $R_a \approx 0$ a szokásos elhanyagolás
3. A gépben egyetlen mező van, ez hozza létre az indukált feszültséget.
4. $X_d = X_a + X_s$ SZINKRON REAKTANCIA

b) Fazorábra szerkesztése

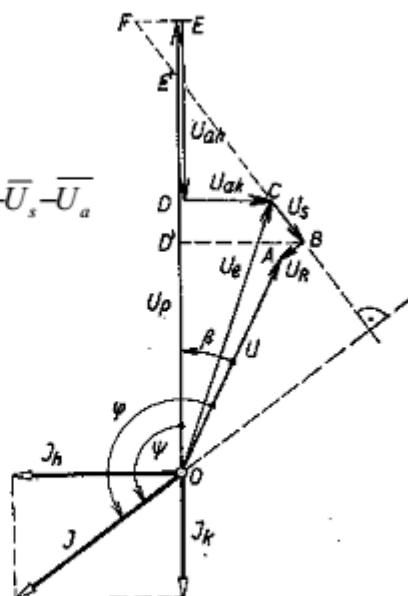
 RME_{VET}

Kiálló pólusú SzG – Vektorábra

$$\bar{U}_p = \bar{U}_k - jX_s \bar{I}_a - jX_{ad} \bar{I}_{ad} - jX_{ag} \bar{I}_{ag} = \bar{U}_k - \bar{U}_s - \bar{U}_a$$

$$P_{rel} = 3 U_k^2 \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\beta$$

$$M_{rel} = \frac{p}{\omega_1} P_{rel}$$



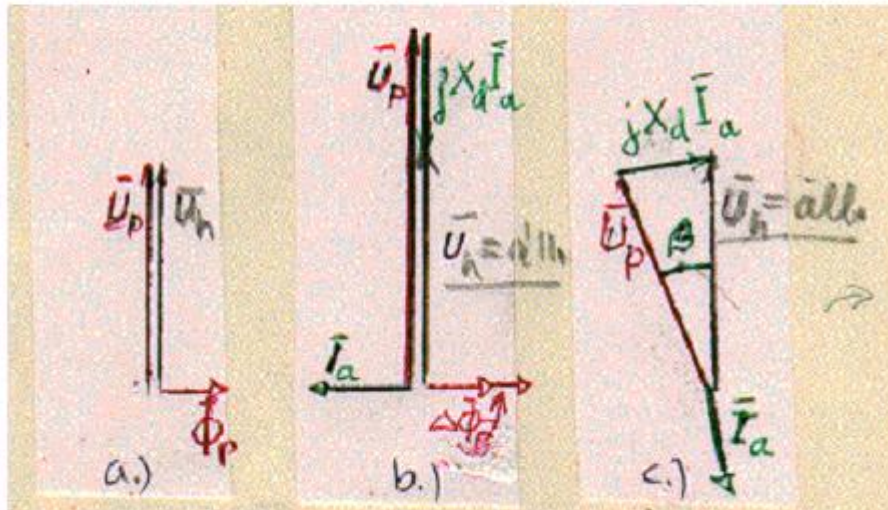
56. ábra. Kiálló pólusú túlgerjesztett generátor vektorábrája (l. a 64. ábrát is)

7. Hengeres forgórészű háromfázisú szinkrongép

a) Terhelésvétel

BME VET

Terhelésvétel



BME VET

Terhelésvétel

Ha a gerjesztő áram, a pólusfluxus, növelésével a pólusfeszültség nagyságát növeljük, akkor a b ábra szerint a megjelenő feszültségkülönbséghez tiszta kapacitív meddő áram, azaz meddő teljesítmény leadás tartozik.

Ha a turbina gőzbeömlésének növelésével a tengelyen kifejtett nyomatékkal a c. ábra szerint -t előre forgatjuk, akkor a megjelenő árammal közel tiszta hatásos teljesítmény leadást létesítünk.

A hatásos teljesítményt tehát a tengelyen a meddőt a forgórész egyenáramának változtatásával lehet módosítani.

Az elmondottakat energetikai megfontolások is alátámasztják.

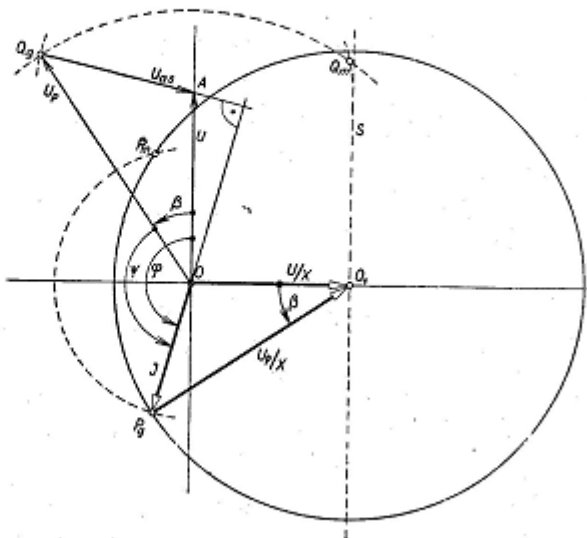
Miután az armatúra nem hat - indukálás révén - a pólusokra az energetikai folyamat, a mechanikai - villamos energiaátalakítás az armatúrában folyik le. A gerjesztő tekercselésbe betáplált villamos energia teljes egészében joule hővé alakul.

Hengeres forgórészű szinkron gép árammunkadiagramja (kördiagram)

BME VET

$$U_k = U_p + jX_d I_a$$

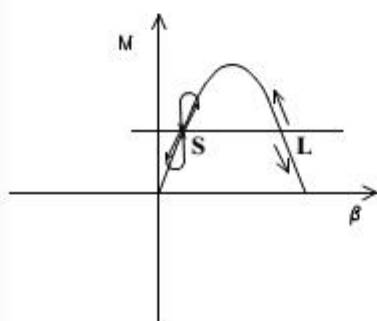
$$I_a = \frac{U_k}{jX_d} - \frac{U_p}{jX_d}$$



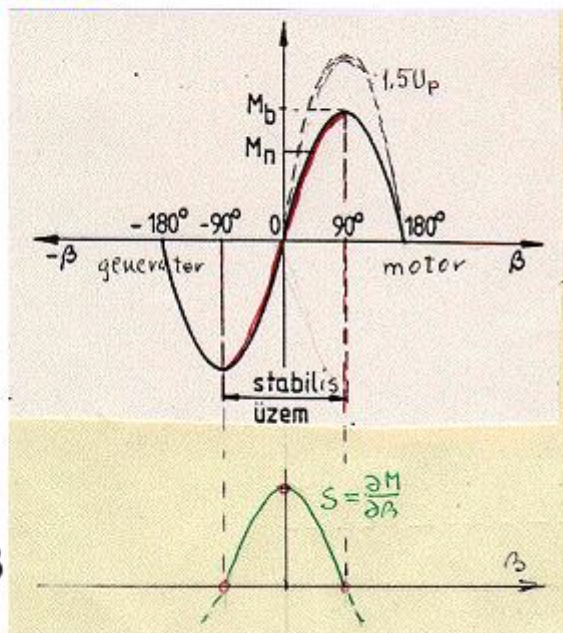
BME VET

Nyomaték és stabilitás

A szinkronozó nyomaték:



$$S = \frac{\partial M}{\partial \beta} = M_b \cos \beta$$



V. Aszinkron gépek: A háromfázisú aszinkron gép

1. Működési elve

Az aszinkron gép állórészén általában többfázisú tekercselés található, amely forgó mágneses mezőt hoz létre. A forgó mágneses tér erővonalai metszik a forgórész tekercselését, és abban feszültséget indukálnak. Mivel a tekercselés zárt, vagy rövidrezárt áramkört alkot, az abban indukálódott feszültség hatására a körben áram folyik. Lenz-törvénye értelmében az így indukált áram akadályozni igyekszik az őt létrehozó indukáló folyamatot, ezért a forgórész elfordul, így igyekező megakadályozni az erővonal metszést, és vele az indukciót. Természetesen a forgórész soha nem érheti el az állórész forgó mágneses mezőjének értékét, mivel akkor megszűnne az erővonal metszés. Ezt az elcsúszást nevezik szlipnek.

A szlip számítása: $s = (n_0 - n) / n_0$

(Wikipédia)

2. Felépítése. Csúszógyűrűs és kalickás forgórész

BME VET

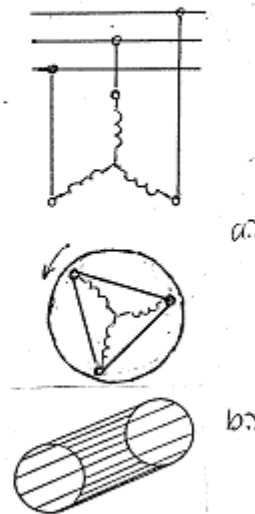
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Úgy mondják, hogy az indukciós motor hajtja a világ iparát. **Széleskörű alkalmazásának okai: egyszerűsége, robusztussága (ma egyre fontosabb) és olcsósága. Így az ipar mellett pl. a nagyvasúti vontatásban is széleskörűen alkalmazzák.**

A gép felépítésének alapelve az a ábrán látható. A **háromfázisú állórész** üzemben a hálózatra (a tápláló áramirányítóra) van kötve. A forgórész **tekercselt** (háromfázisú) vagy **kalickás** (b ábra). Üzem közben a forgórész mindig **rövidrezárt**. A tekercselt forgórész kapcsait indításkor külső ellenállások beiktatására csúszógyűrűkön kivezetik; e változat neve ezért: **csúszógyűrűs gép**.

A mókuskalicka alakú - rudakból és azokat két végükön összekötő, rövidrezáró gyűrűkből álló - **sokfázisú** $m_1 \neq m_2$ **kalickás forgórész** vizsgálatokra háromfázisú - **rövidrezárt - tekercseléssel helyettesíthető.**

Így $m_1 = m_2$!



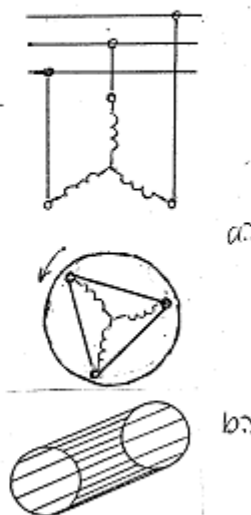
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

A motor feladata a **forgatás**. A forgómezőnek a forgórészszel - itt a forgórész áramokkal - **nyomatékot** kell létesíteni. Az aszinkron gép forgórészébe - galvanikusan - nem vezetünk áramot, ez a **rövidzáras** miatt nem is lehetséges. Hogyan jön hát létre a nyomaték?

Induljunk ki a forgórész nyugvó állapotából. Az állórész forgó mezeje a forgórész vezetőiben **indukálással** áramokat hoz létre. **Innen a gép egyik neve**. Az indukált forgórész áramok a forgómezővel Biot-Savart törvénye szerint kerületi erőket, **össességükben a forgórész nyomatékot (az indító nyomatékot) hozzák létre**.

A forgórész felgyorsul, majd a gép és a terhelés nyomatékainak egyensúlyánál beáll az állandósult egyensúlyi állapot. **Szinkron forgás nem lehetséges**, mert ekkor nincs forgórész indukálás.

A gép tehát **csak aszinkron üzemre képes**, innen ered a másik neve.



4. Az állandósult nyomaték kialakulásának feltétele

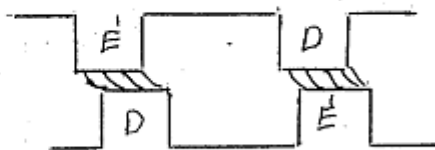
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

A **forgórész áramok** is létrehozhatnak egy forgó mezőt. A két mező a légrésben eredő mezővé egyesül, de **a nyomatékképzés szemléletes képét nyerjük ha azt két összetapadt pólusrendszer hatásának tekintjük**.

Az ábrán a két pólusrendszert állandó mágnesekkel érzékeltettük. Állandó nyomaték csak azok együttfutásakor, azonos fordulatszámok esetén lehetséges.

A terhelő nyomaték hatására közöttük szögelfordulás keletkezik - az erővonalak megnyúlnak - de fordulatszám-eltérés nem lehetséges, mert akkor csak zérus középértékű ún. lüktető nyomaték keletkezik.

E kép alapján az együttforgás feltétele az álló- és forgórész pólusszámok egyezése is.



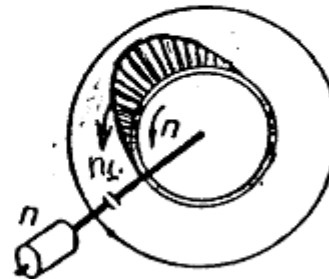
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Ha a forgórészt egy **segédgéppel** az állórész mezőétől **eltérő n fordulatszámmal** forgatjuk, akkor a forgórész nyitott kapcsain más frekvenciájú feszültségrendszert nyerünk, így a gép **frekvenciaváltó**.

Forgassuk a forgórészt először a mezővel **egyirányban**, de kisebb $n < n_1$ fordulatszámmal.

A mező indukcióvonalai ekkor a forgórészvezetők az $n_2 = n_1 - n$ **lemaradási**, vagy **csúszási**, angolból átvett szóval **szlip fordulatszám** szerint metszik.

A forgórész vezetők ezzel a fordulatszámmal „látják” a mezőt elhaladni.



7

A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Ennek n_1 -re vonatkoztatott, **viszonylagos** értékét nevezik csúszamlásnak vagy **szlipnek**

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = s$$

A forgórész- és állórész frekvenciák aránya:

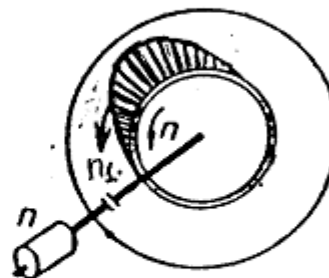
$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_2 p_2}{n_1 p_1} = \frac{n_2}{n_1} = s$$

mivel tudjuk, hogy az állórész és forgórész pólusszámának egyenlőnek kell lennie:

$$p_1 = p_2 = p$$

$$\text{Így: } f_2 = s f_1 \quad n_2 = s n_1$$

a **szlipfrekvencia**



8

6. A gerjesztések egyensúlyának törvénye

Aszinkron gépek

A forgórészen indukált feszültség:

$$\frac{U_{li}}{U_{2i}} = \frac{N_1 \xi_1}{N_2 \xi_2} = n_U$$

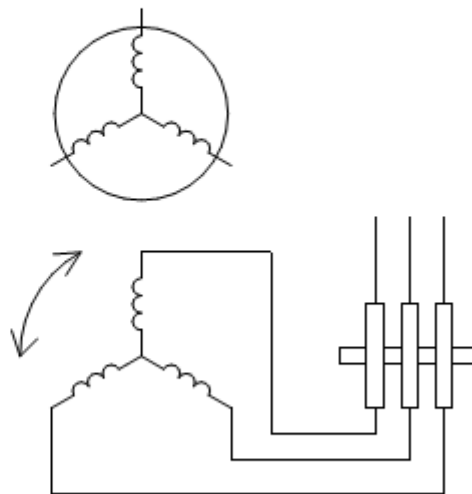
Érvényes a gerjesztések egyensúlyának törvénye:

$$\bar{\Theta}_1 + \bar{\Theta}_2 = \bar{\Theta}_m \approx \bar{\Theta}_0$$

Az álló- és forgórész fázisszám, m_s és m_r , eltérő is lehet.

Az alapharmonikusra vonatkozó gerjesztés-egyenlet:

$$\frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_1 + \frac{m_2}{2} \xi_2 N_2 \bar{I}_2 = \frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_{1, \bar{u}j}$$



Indexek:

1 = sztátor

2 = rotor

7. Feszültség- és áramátvitel számítása. Impedanciák redukálása

Aszinkron gépek

A gerjesztések egyensúlyának törvényéből:

$$\frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_1 + \frac{m_2}{2} \xi_2 N_2 \bar{I}_2 = \frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_{1, \bar{u}j}$$

$$\bar{I}_1 + \frac{m_2 N_2 \xi_2}{m_1 N_1 \xi_1} \bar{I}_2 = \bar{I}_{1, \bar{u}j} \quad n_I = \frac{m_1 N_1 \xi_1}{m_2 N_2 \xi_2}$$

Az impedanciák redukálása:

$$Z' = n_Z \times Z,$$

$$\text{ahol } n_Z = n_U \times n_I = \frac{m_1 (\xi_1 N_1)^2}{m_2 (\xi_2 N_2)^2}$$

8. A forgórész indukált feszültségének és szórási reaktanciájának számítása

Aszinkron gépek helyettesítő kapcsolása

Célunk, hogy **a helyettesítő kapcsolat nyugvó áramkör legyen**, tehát valamilyen módon "ki kell iktatni a forgást".

A forgórész indukált feszültsége:

$$U_{i,2} = 4,44 f_2 \xi_2 N_2 \Phi_m = s f_1 \xi_2 N_2 \Phi_m$$

$$U_{i,2} \Big|_{\text{álló helyzetben}} = 4,44 f_1 \xi_2 N_2 \Phi_m$$

$$U_{i,2}(s) = s U_{i,2}(f_1)$$

$$R_2 = \text{áll}$$

$$X_{s,2} = 2 \pi f_2 L_{s2} = s X_{s,2}(f_1)$$

Jelölés: $U_{i,2}(f_1) = U_{i,2}$
 $X_{s,2}(f_1) = X_{s,2}$

9. A forgórész feszültség-egyenlete, frekvencia-transzformáció az állórészre

Aszinkron gépek helyettesítő kapcsolása

A **feszültség-egyenlet** a szokásos alakban:

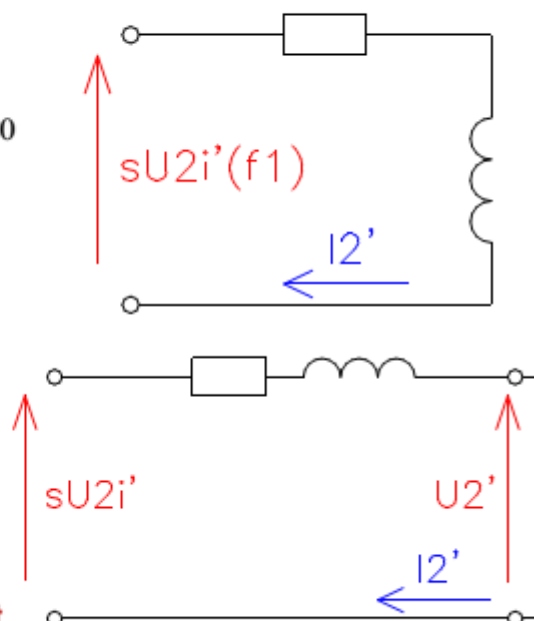
$$\bar{U}_2'(s) = s \bar{U}_{2i}' + R_2' \bar{I}_2' + j s X_{s2}' \bar{I}_2' = 0$$

A forgórész-mező az állórészmezővel MINDEN FORDULATSZÁMON EGYÜTT FOROG

a forgórészáramok az állórészről nézve MINDIG 50 Hz frekvenciájúnak látszanak.

Más szóval az aszinkron gép "elvégzi" az $f_2 \rightarrow f_1 = \frac{f_2}{s}$

frekvenciatranszformációt



10. Helyettesítő kapcsolás

- a) A paraméterek viszonylagos értékei
- b) Származtatása
- c) A mechanikai ellenállás fogalma és számítása.

BME VET

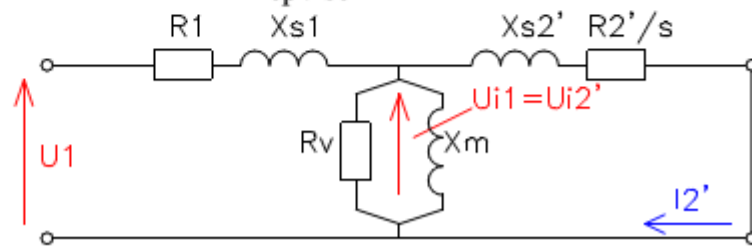
Aszinkron gépek helyettesítő kapcsolása

$$\bar{U}'_{i,2} + \frac{R'_2}{s} \bar{I}'_2 + jX'_{s2} \bar{I}'_2 = 0 \quad \bar{U}'_{i,2} = \bar{U}_{i,1}$$

Most már összeköthető a primer és a szekunder oldal a helyettesítő kapcsolatban, ahol:

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \frac{1-s}{s} = R'_2 + R'_m$$

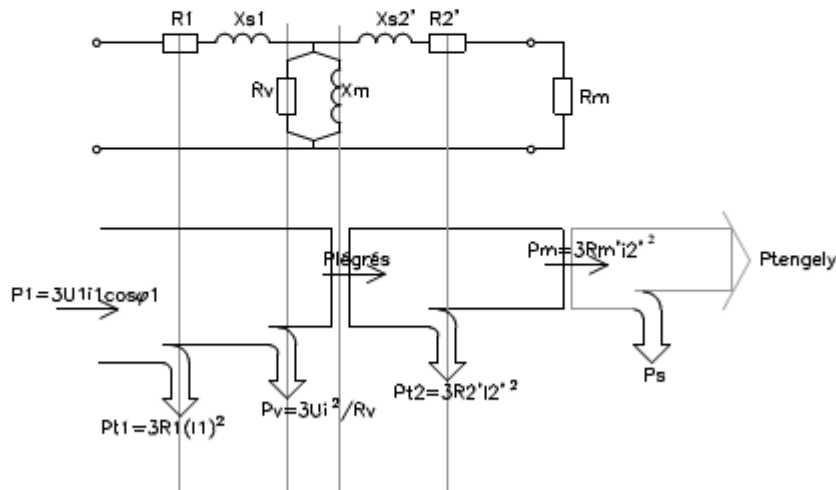
R'_m a „**mechanikai ellenállás**”,
a tengelyen leadott teljesítményt,
forgórész tekercsveszteséget
képviseli



Aszinkron gépek energiamérlege

$f_2 \approx 0$ miatt $P_{\text{vas}, 2} \approx 0$, vagyis normál üzemi viszonyok között a forgórész vasvesztéséget sokszor elhanyagoljuk.

Vigyázzunk: ez nem mindig tehető meg!



20

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VTK, 2015 tavasz

12. Teljesítmények és a nyomaték számítása.

Aszinkron gépek nyomatéka

A légrésen átadott teljesítmény: **légrésteljesítmény**

$$P_l = 3(R_2' / s) I_2'^2$$

$$P_m = (1 - s) P_l \Rightarrow$$

$$P_m = (1 - s) P_l$$

$P_{l,2} = 0$ esetén nincs P_l
és nincs M

A **nyomaték** a tengelyen:

$$M = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{(1-s) P_l}{(1-s) \Omega_0} = \frac{P_l}{\omega_1 / p} = p \frac{P_l}{\omega_1} = \frac{3}{\Omega_0} \frac{R_2'}{s} I_2'^2$$

21

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

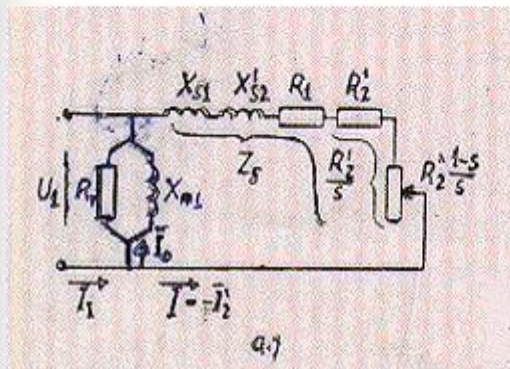
Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VTK, 2015 tavasz

13. Áram-munkadiagram

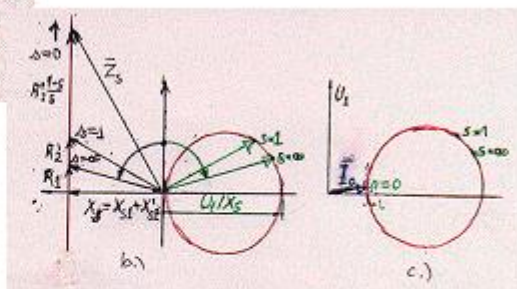
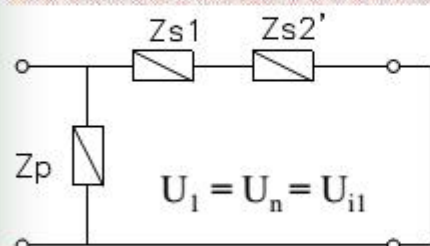
a) Származtatása.

BME VET

Kördiagram (áram-munkadiagram)



$$\bar{I}_1 = U_1 \bar{Y}_1 = U_1 \frac{1}{Z_1} = k \frac{1}{Z_1} e^{-j\varphi_z}$$



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

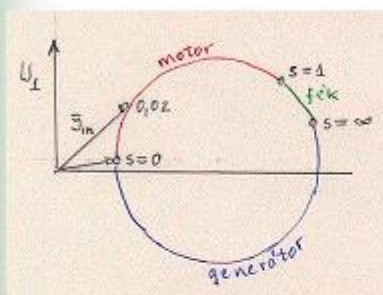
22

Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VIK, 2015 tavasz

b) Jellegzetes pontjai.

BME VET

Kördiagram (áram-munkadiagram)

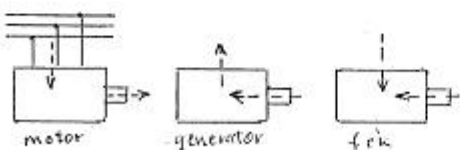


A kör átmérőjét egyedül az X_s szórási reaktancia határozza meg, az ellenállások a pontok helyét - így az $s=1$, $s=\infty$ - pontok helyét írják elő.

A kör nem "áramdiagram".

Az áramdiagram a kör és a szlipskála együtt.

A kis szlipű **üresjárási pont** és az **$s=0$ szinkron pont** - amelyet csak hajtó segédgéppel érhetünk el - nagyon közel esnek, így **gyakran nem különböztetjük meg őket.**



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

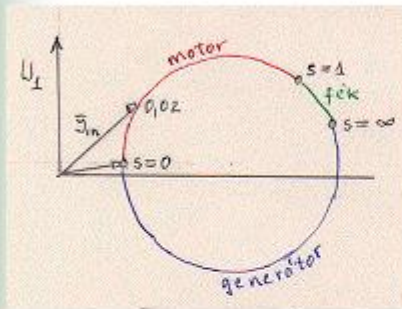
23

Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VIK, 2015 tavasz

c) Üzemállapotok azonosítása.

BME VET

Kördiagram (áram-munkadiagram)



Az $s=1$ pontot, amely a forgórész nyugvó, indulási helyzetének felel meg **"rövidzárási"** pontnak hívják mert R'_m így a helyettesítő kapcsolás rövidre van zárva.

A körátmérőt X_s , a pontok eloszlását, helyét az R -ek szabják meg.

A paraméter R'_2/s .

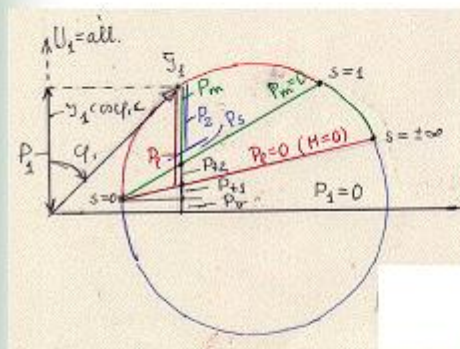
Legtöbbször $R'_2 = \text{állandó}$, ilyenkor a paraméter $1/s$. Így a paramétereloszlás az $s=0$ ponttól az $s=1$ -ig (és utána is) sűrűsödik.

Az áram mindig késik a feszültséghez képest, mivel a gép mágnesező áramát – a transzformátorokhoz hasonlóan – mindig a hálózat fedezi.

d) Teljesítmények leolvasása.

BME VET

Kördiagram (áram-munkadiagram)



A felvett primer teljesítményt a

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi = \text{áll} \times I_1 \cos \varphi$$

összefüggés értelmében I_1 hatásos összetevője, azaz a körpontnak a vízszintestől mért függőleges távolsága méri.

A vízszintes tengely a felvett teljesítmény zérus vonala.

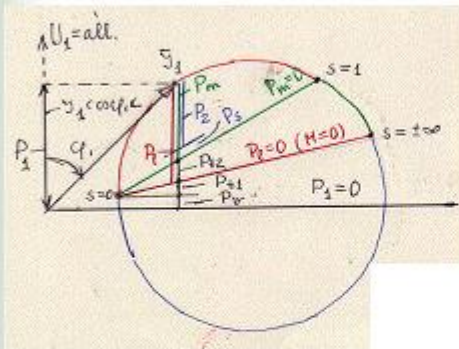
A többi teljesítmény is hasonlóan egyenesektől mérhető az ábrából láthatóan.

A P_1 **légrésteljesítmény** zérus vonala az $s=0$ ($I'_2 = 0$) és $s=\infty$ ($R'_2/s = 0$) pontokat köti össze.

Ez egyúttal a **nyomaték $M = 0$ zérusvonala** is.

A **mechanikai teljesítmény zérus vonala** az $s=0$ ($I'_2 = 0$) és az $s=1$ (álló helyzet) pontokat összekötő egyenes.

Kördiagram (áram-munkadiagram)



A P_s **súrlódási veszteség** erőteljesen függ a fordulatszámától, ezért annak P_m -mel párhuzamos rövid szakaszát csak a névleges pont környékén rajzoltuk meg.

$P_2 = P_m - P_s$ a **leadott teljesítmény**.

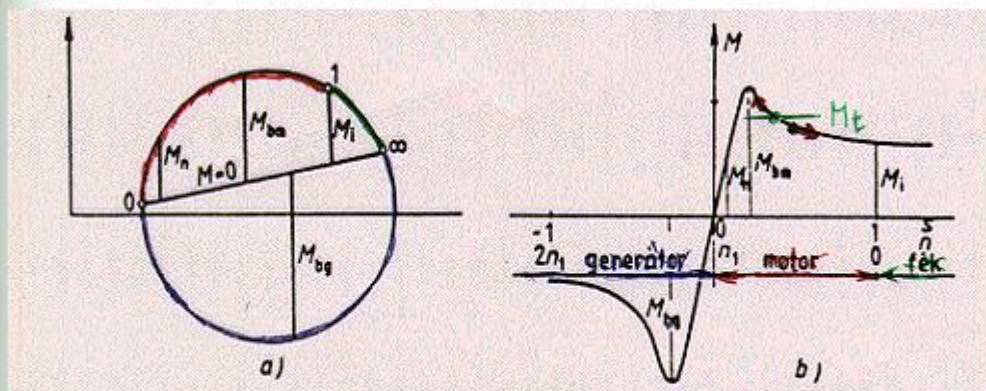
A P_v **vasveszteséget** az I_0 **üresjárási áram** hatásos összetevője jellemzi.

A **tekercsveszteségeket** a P_{t1} ill. a P_{t2} metszések szolgáltatják.

14. Nyomatéki jelleggörbe

i. Származtatása.

Nyomatéki jelleggörbe



Az $M(n)$ ill. $M(s)$ nyomatéki jelleggörbét a kördiagramból szerkeszthetjük ki.

A jellegzetes nyomaték értékeket az ábrán látjuk.

M_n a **névleges**, M_1 az **indító**, M_{bm} ill. M_{bg} a motoros ill. generátoros **maximális vagy billenő nyomaték**.

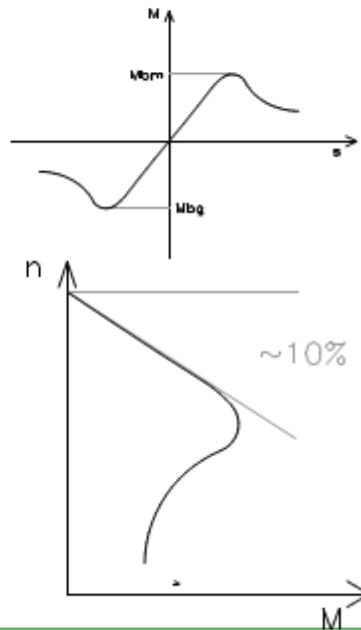
Utóbbi nevének magyarázata, hogy **a nyomatékgörbe statikusan stabilis és labilis szakaszait választja el.**

- ii. A billenőnyomaték és a billenő szlip fogalma.

Nyomatéki jelleggörbe

A gép által kifejtett legnagyobb nyomatékot **billenő nyomatéknak** nevezzük. Ideális esetben a billenő nyomaték motoros és generátoros üzemben azonos. A mindig keletkező veszteségek miatt a **generátoros billenő nyomaték nagyobb**, mint a motoros.

Az alsó ábrán újra felrajzoltuk a mechanikai jelleggörbét, annak megszokott alakjában, de kissé torzítva, nagyobb meredekséggel. Az ábra jól mutatja, hogy az üzemi tartományban az aszinkron gép fordulatszámtartó: **üresjárástól** (szinkron fordulatszámtól) a **névleges terhelésig a gép fordulatszáma csupán néhány százalékkal csökken**.

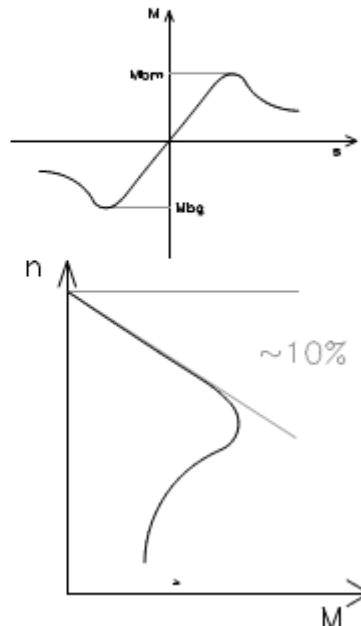


- iii. A Kloss-formula.

Nyomatéki jelleggörbe: Kloss formula

$$\frac{M}{M_b} = \frac{2}{\frac{s}{s_b} + \frac{s_b}{s}}$$

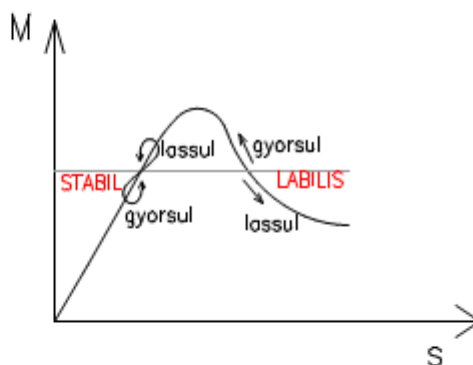
$$s_b = \frac{R'_2}{X_s}$$



Aszinkron gépek stabilitása

A jobb oldali ábra a *statikusan stabilis* és *labilis* tartományokat mutatja. A stabilitásvizsgálat teljesen hasonló a szinkron gépeknél bemutatottal.

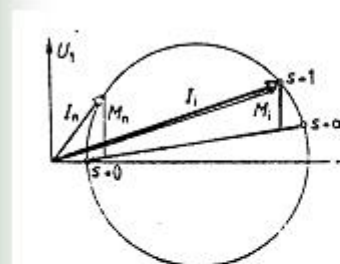
Az ábráról leolvasható, hogy az aszinkron gép **statikusan stabilis**, ha a szlip nem nagyobb a billenőnyomatékhoz tartozó billenőszlipnél, és statikusan **labilis**, ha a szlip nagyobb, mint a billenőszlip.



15. Indítási viszonyok

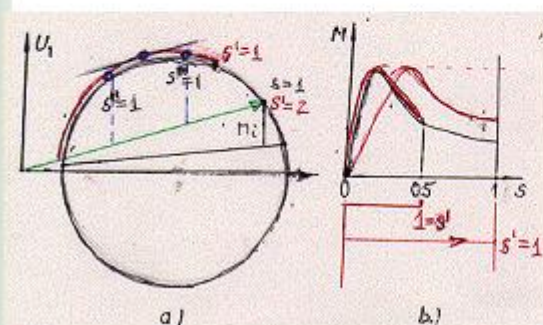
i. Indítási áram, indítási nyomaték.

Indítás



A probléma:

Az indukciós motor **indítási árama nagy** (~5-10) ugyanakkor **indító nyomatéka kicsi**. Utóbbi a hajtott gép részére lehet elégtelen, előbbi - más problémák mellett - gyakran az áramszolgáltató nem engedélyezi.



Csúszógyűrűs gép

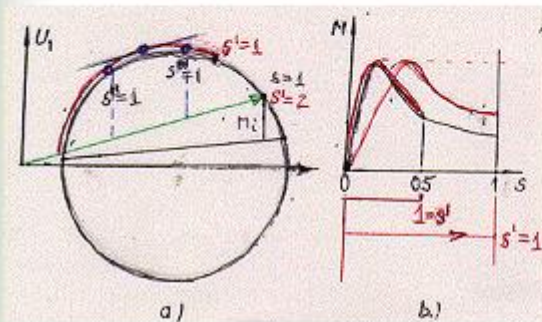
$$\frac{R_2'}{s} = \text{átl} = \frac{R_2' + R_k'}{s^*}$$

$$M_i^* = M_b \text{ ha}$$

$$s^* = 1$$

- ii. Csúszógyűrűs gépek indítása. Az indítóellenállás számítása.

Indítás: Csúszógyűrűs gép



$$\frac{R_2}{s_b} = \frac{R_2 + R_k}{1}$$

$$R_k = R_2 \left(\frac{1}{s_b} - 1 \right) = R_2 \left(\frac{1 - s_b}{s_b} \right)$$

$$\frac{R_2'}{s} = a l l = \frac{R_2' + R_k'}{s^*}$$

$$M_i^* = M_b \quad ha$$

$$s^* = 1$$

A billenőszlip általában:

 $s_b \cong 0,2 = 20\% \text{ körüli,}$

így közelítőleg

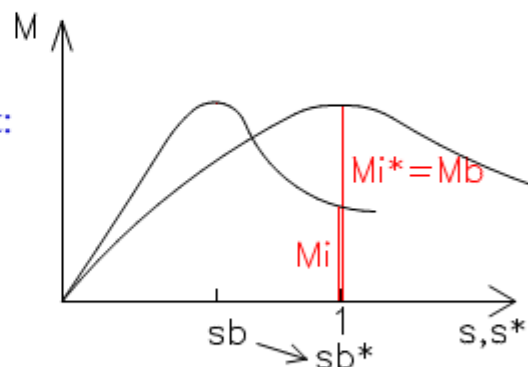
$$R_k = \frac{1-0,2}{0,2} R_2 = 4R_2$$

ellenállást kell a forgórész körbe beiktatni.

Indítás: Csúszógyűrűs gép

Az ellenállás beiktatása
módosítja a nyomatéki görbét:
Az indítónyomaték

nő
és a billenő nyomaték
állandó.

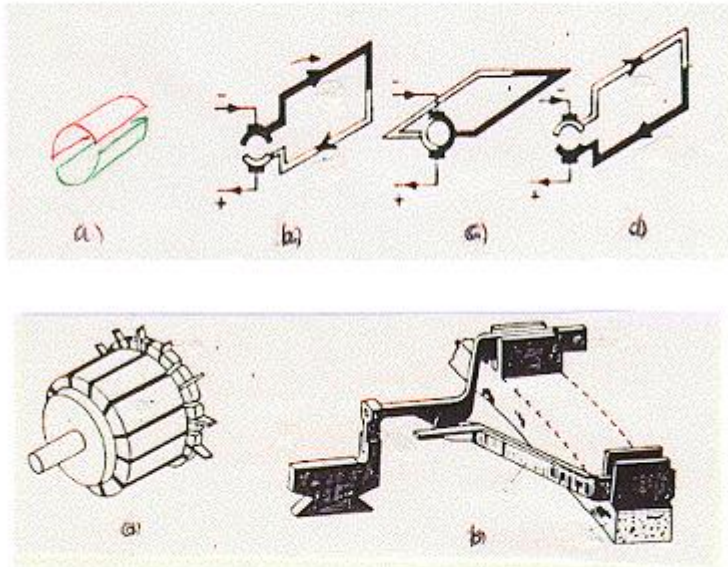


VI. Egyenáramú gépek

1. A kommutátor

BME VET

A kommutátor



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

6

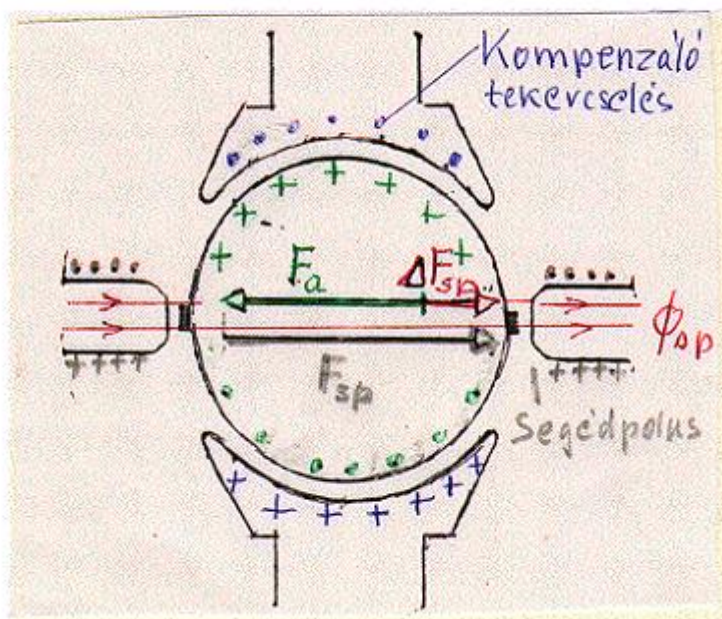
Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VTK, 2015 tavasz

2. Az egyenáramú gép felépítése és működése

a) Felépítés

BME VET

Segédpólus és kompenzáló tekercselés

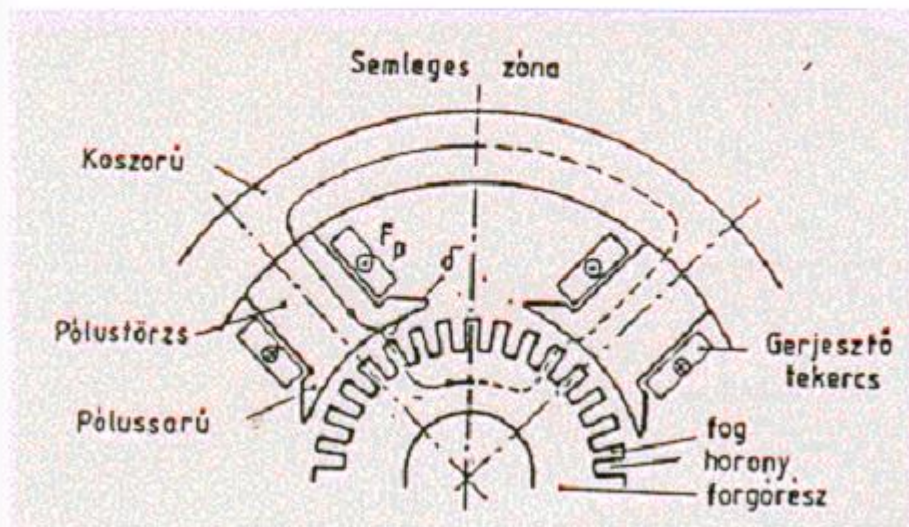


Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

5

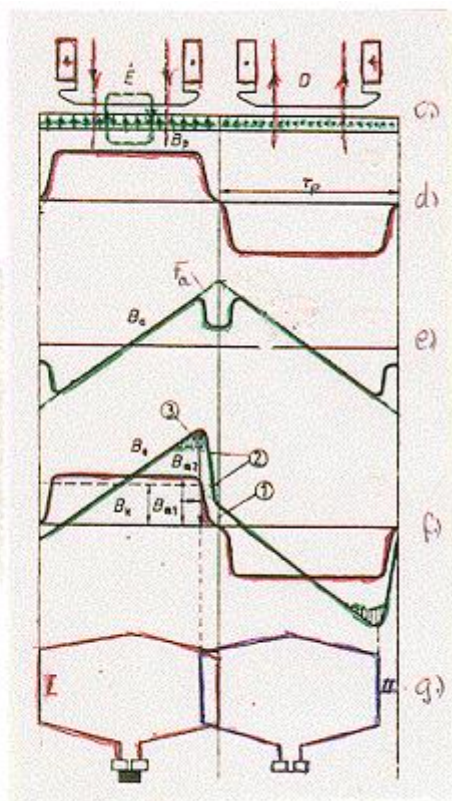
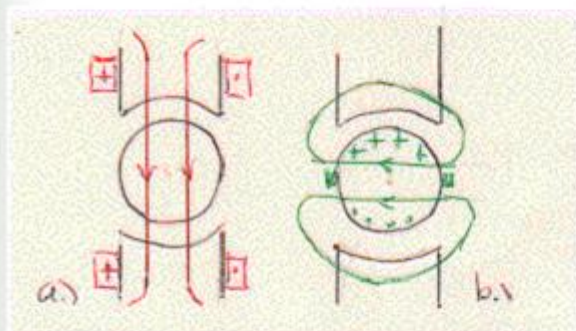
Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VTK, 2015 tavasz

Az egyenáramú gép mágnesköre

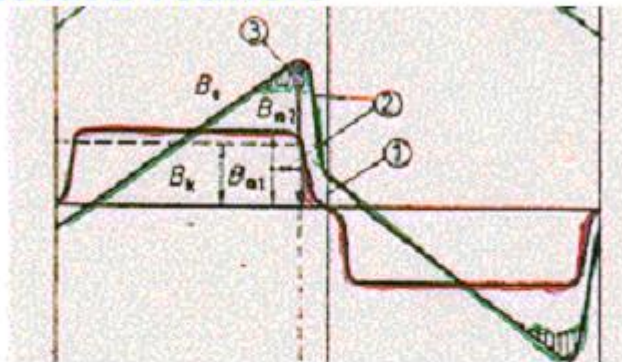


c) A pólusmező

A pólusmező és az armatura-reakció

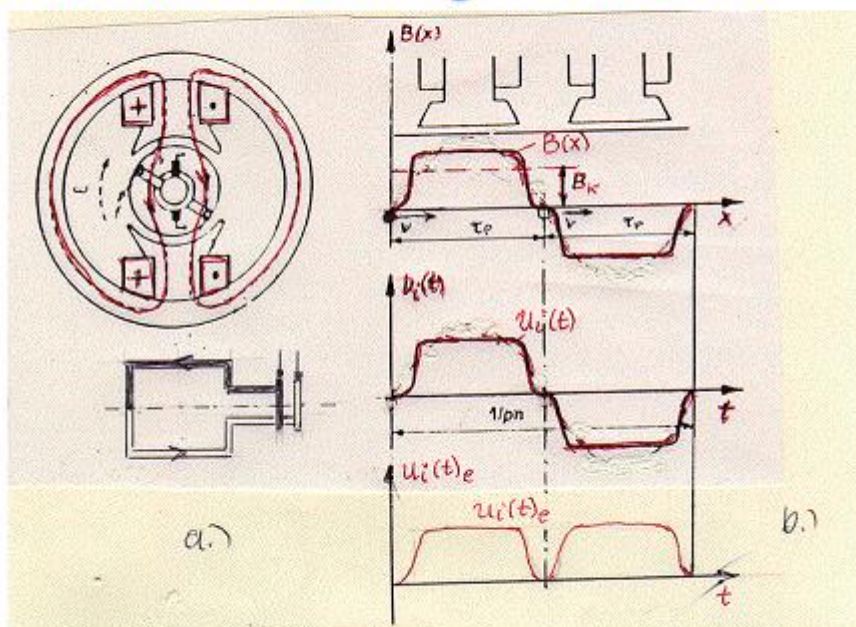


Az armatura-reakció

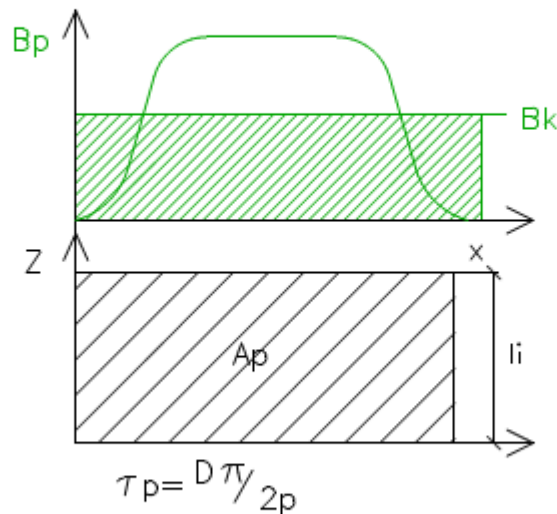


1. Az indukciómentes zóna: az un. **semleges zóna helye eltolódott**. (Ez az eltolódás armaturamezőfüggő, terhelésfüggő).
2. Az **indukció maximális értéke** az üresjárási állapothoz képest **megnőtt**, annak ellenére, hogy ha a telítés fluxuscsökkentő hatásától eltekintünk, akkor a gép fluxusa (a görbe alatti terület: a közepes indukció) változatlan (ugyanannyi területet adtunk hozzá, mint amennyit levontunk).
3. **A telítés miatt - a területvesztés révén - a gép fluxusa csökkent.**

Az indukált feszültség keletkezése



Az indukált feszültség számítása



Az ábra felső részén a pólusmező térbeli eloszlása, az alsó részén pedig a pólus méretei láthatók az armatura felületén.

Az indukált feszültség (számítás csak olvasni)

$$U_{i1(\text{vezető})} = B_k l_i v \quad v = D \pi n$$

v : az armatura kerületi sebessége

$$z_{\text{soros}} = \frac{z}{2a}$$

z : az összes sorbakötött vezető száma
 $2a$: a párhuzamos ágak száma

$$U_i = \frac{z}{2a} B_k \underbrace{l_i D \pi}_{A_p \times 2p} n = \frac{D \pi \cdot l_i}{A_p} (2p) n$$

$$= \frac{p}{a} z \Phi_a \cdot n = k_U \cdot \Phi_a \cdot n$$

$$U_i = k_U \cdot \Phi_a(I_g) \cdot n = \frac{k_U}{2\pi} \cdot \Phi_a(I_g) \cdot \omega \quad \frac{k_U}{2\pi} = k_M$$

A nyomaték (számítás csak olvasni)

A tekercsoldalra ható erő:

$$F_1 = B_k \cdot l_i \cdot I_{\text{ág}}$$

Az erőkar a sugár. Az összes vezetőre ható nyomatékot úgy kapjuk meg, hogy az egyetlen tekercsoldalra ható nyomatékot megszorozzuk a sorba kötött tekercsoldalak számával:

$$M = z \cdot \frac{D}{2} \cdot F_1 = z \cdot \frac{D}{2} \cdot B_k \cdot l_i \cdot \frac{I_a}{2a} = z \cdot \frac{D\pi}{2\pi} l_i \cdot B_k \cdot \frac{I_a}{2a} =$$

$$= \frac{z}{2\pi} \cdot \frac{1}{2a} \cdot A_p(2p) \cdot B_k \cdot I_a = \frac{z}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot \Phi_a \cdot I_a$$

$$M = k_M \cdot \Phi_a(I_g) \cdot I_a$$

Helyettesítő kapcsolása

$$U_i = k \cdot \Phi_a \cdot \omega \quad M = k \cdot \Phi_a \cdot I_a \quad k = k_M$$

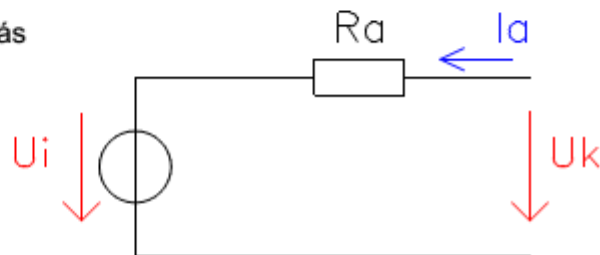
A gép működése viszonylag bonyolult, a helyettesítő kapcsolás azonban nagyon egyszerű:

a belső feszültségforrás az indukált feszültség, a belső ellenállás pedig az armatúrában keletkező veszteségeket képviselő ellenállás.

A motoros és a generátoros üzemre vonatkozó feszültség egyenletek egyszerűek és hasonlóak:

Motoros üzemállapotban a kapcsolófeszültség nagyobb, mint az indukált feszültség, míg

Generátoros üzemállapotban fordított a helyzet.



$$U_k = U_i \mp R_b \cdot I_a \quad \frac{G}{M}$$

3. Üzemtani alapok

a) Kapcsolási módok.

BME VET

Kapcsolási módok

Külső gerjesztés esetén a gerjesztő tekercset független áramforrás táplálja.

Párhuzamos vagy sönt gerjesztés esetén a gerjesztő tekercs az armatura tekercsével párhuzamosan,

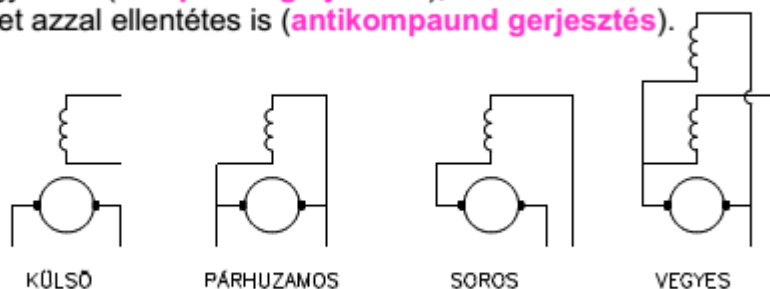
Soros gerjesztés esetén az armatura tekercsével sorosan kapcsolva.

Vegyes gerjesztés esetén a gép sönt és soros tekercsével egyaránt el van látva. A nagyobb gerjesztést a soros tekercs adja.

A sönttekercs gerjesztése a soros tekercs gerjesztésével

megegyezhet (**kompaund gerjesztés**),

de lehet azzal ellentétes is (**antikompaund gerjesztés**).



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

19

Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VIK, 2015 tavasz

b) Egyenáramú motorok jelleggörbéi.

BME VET

Egyenáramú motorok jelleggörbéi

Az egyenáramú motorokat még mai is nagyon széles körben alkalmazzák rendkívül kedvező és egyszerű szabályozási tulajdonságaik miatt. Az alábbi motoros jelleggörbéket szokás használni:

a) $n(I_a)$ **sebességi** jelleggörbe;

b) $M(I_a)$ **nyomatéki** jelleggörbe.

c) $n(M)$ **mechanikai** jelleggörbe.

A már megismert feszültség egyenletek alapján az egyes jelleggörbék egyszerűen származtathatók.

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

20

Villamos Gépek és Alkalmazások, BME VIK, 2015 tavasz

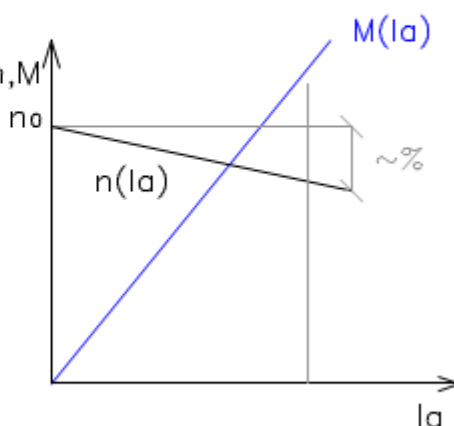
Külső gerjesztésű egyenáramú motorok

a) Sebességi jelleggörbe

$$U_k = U_i + R_a \cdot I_a = k_u \Phi_a \cdot n + I_a R_a$$

$$n = \frac{U_k - I_a R_a}{k_u \Phi_a} = \frac{U_k}{k_u \Phi_a} - \frac{R_a}{k_u \Phi_a} I_a = n(I_a)$$

$$n_0 = \frac{U_k}{k_u \Phi_a}$$



b) Nyomatéki jelleggörbe

$$M = k_M \Phi_a I_a \quad \Phi_a = \text{áll}$$

Külső gerjesztésű egyenáramú motorok

c) Mechanikai jelleggörbe

$$n = \frac{U_k - R_a I_a}{k_u \Phi_a} \quad I_a = \frac{M}{k_M \Phi_a}$$

$$n = \frac{U_k}{k_u \Phi_a} - \frac{R_a}{k_u k_M \Phi_a^2} M$$

$$\omega = \frac{U_k}{k \Phi_a} - \frac{R_a}{(k \Phi_a)^2} M$$

