

Tartalom

1. A VILLAMOS ENERGIA-ÁTALAKÍTÁS ÁLTALÁNOS ELVEI ÉS TÖRVÉNYEI	3
1.1 A VILLAMOS ENERGIAÁTALAKÍTÁS FOLYAMATA	3
1.2 A VILLAMOS ENERGIA ELŐNYEI MÁS ENERGIAFAJTÁKKAL SZEMBEN	3
1.3 A VILLAMOS ENERGIA-ÁTALAKÍTÓK OSZTÁLYOZÁSA	4
1.4 A VILLAMOS GÉPEK ELŐNYEI	5
1.5 A VILLAMOS GÉPEK TÖRVÉNYEI	6
1.6 A VILLAMOS GÉPEK FELHASZNÁLÁSA	6
1.7 HELYES-E A "VILLAMOS" GÉP ELNEVEZÉS?	6
1.8 A VILLAMOS ENERGIA-ÁTALAKÍTÓKKAL KAPCSOLATOS ÁLTALÁNOS KÉRDÉSEK ÉS FELADATOK	7
2. TRANSZFOMÁTOROK	9
2.1 MI A TRANSZFORMÁTOR?	9
2.2 JELLEGZETESSÉGEIK	9
2.3 EGYFÁZISÚ TRANSZFORMÁTOROK	10
2.3.1 MŰKÖDÉSI ELV, HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁS	10
2.3.2 A VASMAG	11
2.3.3 TEKERCSELÉS	11
2.3.4 AZ INDUKÁLT FESZÜLTÉG SZÁMÍTÁSA	12
2.3.5 AZ IDEÁLIS TRANSZFORMÁTOR	12
2.3.6 AZ IDEÁLIS TRANSZFORMÁTOR KIKÜSZÖBÖLÉSE	14
2.3.7 A TRANSZFORMÁTOR FAZORÁBRÁJA	18
2.3.8 A TRANSZFORMÁTOR ÜZEME	19
2.4 HÁROMFÁZISÚ TRANSZFORMÁTOROK	21
2.4.1 MŰKÖDÉSI ELV	21
2.4.2 KAPCSOLÁSOK	22
3. FORGÓ MOZGÁS LÉTESÍTÉSE.	24
3.1 NYOMATÉK LÉTESÍTÉSE	24
3.2 VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ TEKERCSELÉS	24

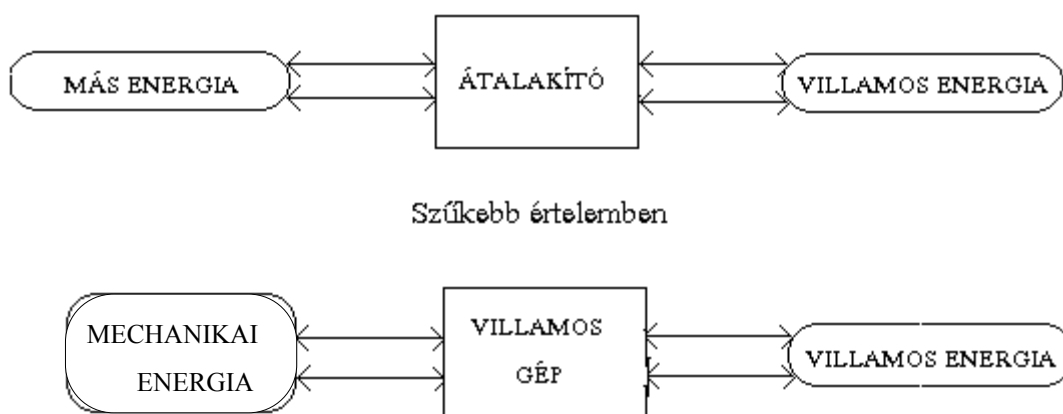
3.3 AZ INDUKCIÓVEKTOR ÉRTELMEZÉSE	25
3.4 MEZŐTÍPUSOK	27
3.4.1 ÁLLANDÓ (ÁLLÓ) MEZŐ	27
3.4.2 LÜKTETŐ MEZŐ	27
3.4.3 FORGÓ MEZŐ	28
3.4.4 A FORGÓ MEZŐ TULAJDONSÁGAI	30
3.5 SZÍNUSZOS MEZŐELOSLÁS LÉTREHOZÁSA	31
3.5.1 A GERJESZTÉSI TÖRVÉNY ALKALMAZÁSA	31
3.5.2 A TEKERCSELÉSI TÉNYEZŐ	32
3.5.3 AZ INDUKÁLT FESZÜLTÉG SZÁMÍTÁSA	32
4. SZINKRON GÉPEK	34
4.1 A MŰKÖDÉS ELVE	34
4.2 HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁS	34
4.3 FÁZORÁBRA	37
4.4 SZINKRONOZÁS	37
4.5 TERHELÉSFELVÉTEL	38
4.6 A NYOMATÉK ÉS A TELJESÍTMÉNY	39
4.7 A SZINKRON GÉP STABILITÁSA	39
5. ASZINKRON GÉPEK	41
5.1 AZ INDUKCIÓS SZABÁLYZÓ	41
5.2 AZ ASZINKRON GÉP MŰKÖDÉSE	43
5.3 A HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁS	43
5.4 AZ ENERGIAMÉRLEG	44
5.5 A KÖRDIAGRAM	45
5.6 A NYOMATÉKI GÖRBE	46
5.7 ÜZEMI VISZONYOK	47
5.7.1 INDÍTÁS	47
5.7.2 A FORDULATSZÁM VÁLTOZTATÁSA	50
6. EGYENÁRAMÚ GÉPEK	51
6.1 A FELADAT KITŰZÉSE	51
6.2 AZ INDUKÁLT FESZÜLTÉG SZÁMÍTÁSA	52
6.3 A NYOMATÉK SZÁMÍTÁSA:	53

6.4 A HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁS	53
6.5 TEKERCSELÉSEK	54
6.5.1 ALAPTÍPUSOK:	54
6.5.2 PÁRHUZAMOS ÁGAK	55
6.6 AZ ARMATURA - VISSZAHATÁS	55
6.7 FELÉPÍTÉS	56
6.8 KAPCSOLÁSOK (GERJESZTÉSI MÓDOK)	57
6.9 EGYENÁRAMÚ MOTOROK JELLEGGÖRBÉI	57

1.A villamos energia–átalakítás általános elvei és törvényei

1.1A villamos energiaátalakítás folyamata

Legáltalánosabb felfogásban a vizsgálatunk tárgyai olyan átalakítók, amelyekben az energiaátalakítás folyamata az alábbi sémával szemléltethető:



FONTOS: A nyilak kétirányúak, mert az energiaátalakítás **mindkét irányban** megvalósítható **egyetlen** energiaátalakító segítségével.

A fenti ábrán bemutatott folyamatokat részletezzük a továbbiakban.

1.2A villamos energia előnyei más energiatípusokkal szemben

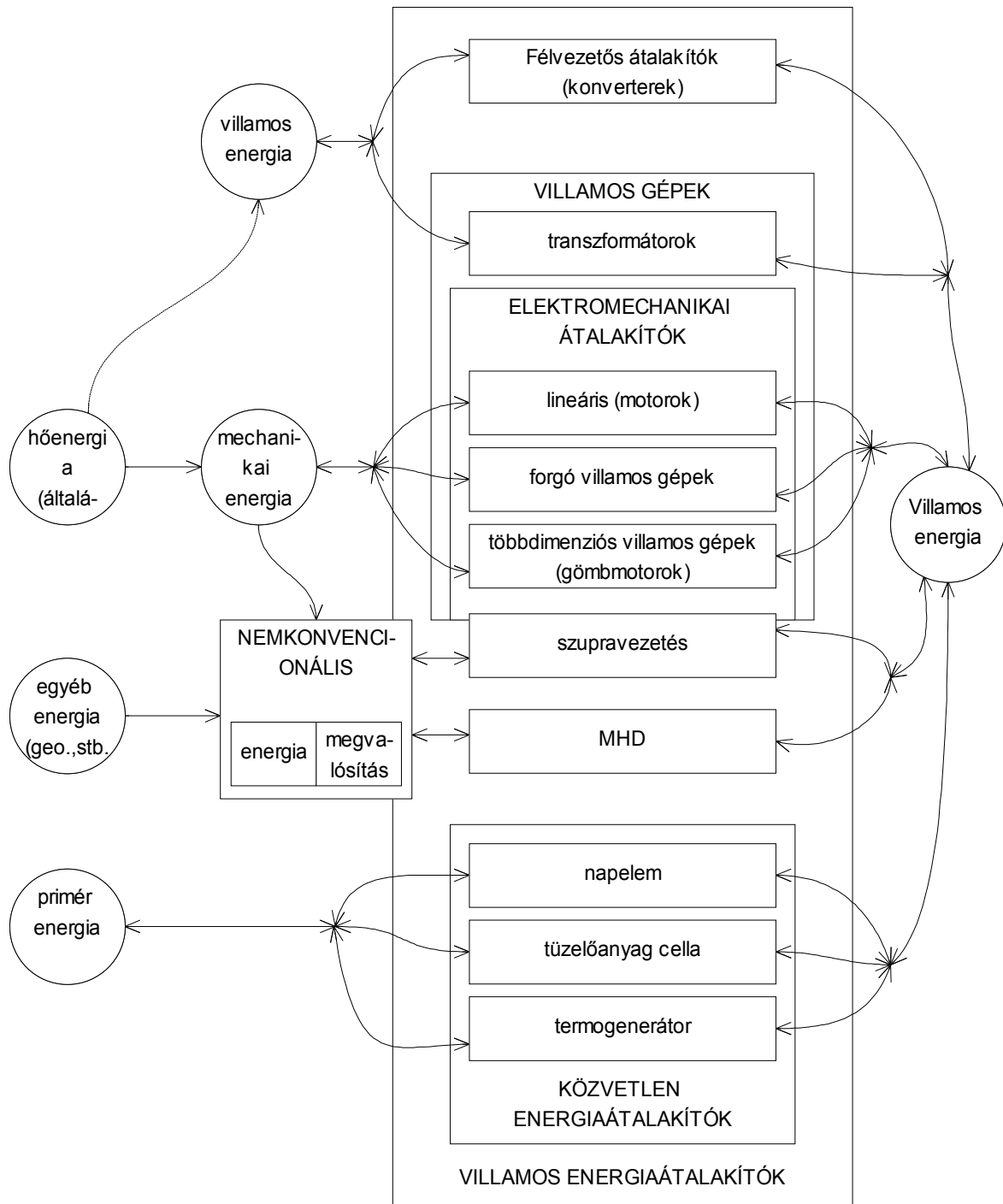
- 1 Tiszta, környezetkímélő a felhasználónál majdnem mindig; termelése azonban veszélyeztetheti a környezetet.
- 2 Könnyű átalakíthatóság például a transzformátor segítségével a feszültség és az áram viszonylag könnyen változtatható.

Megemlítendő, hogy a transzformátort magyar mérnökök találták fel:
Déry Miksa, Bláthy Ottó Titusz és Zipernowsky Károly.

- 3 “Könnyű” és nagyon kis veszteségű szállítás
nagyfeszültségű távvezetékek és kábelek segítségével.
- 4 100%-ot megközelítő energetikai hatásfok
A 100% hatásfok elvileg is lehetséges
gyakorlati megvalósítása a szupravezetők segítségével lehetséges.

1.3A villamos energia-átalakítók osztályozása

A villamos energia-átalakítókat az alábbi ábrán látható osztályokba soroljuk. Az ábrán azt is feltüntettük, hogy az egyes energia-átalakítók milyen energiát alakítanak át villamos energiává.



1.4A villamos gépek előnyei

1. Kompakt: egységnyi súlyra/térfogatra vett teljesítmény/nyomaték viszonylag nagy.
2. Változatos kivitel, sokcélú felhasználás.

1.5A villamos gépek törvényei

1. TÖRVÉNY

A villamos gépekben az energiaáramlás iránya megfordítható. Egy és ugyanazon gép, például forgógép, motorként és generátorként is üzemelhet. Ezt nevezzük a villamos gép motoros illetve generátoros üzemének vagy üzemállapotának.

2. TÖRVÉNY

Az energiaátalakítás hatásfoka elvileg elérheti a 100%-os hatásfokot. A gyakorlatban a 100% hatásfok nem valósítható meg, de nagyon megközelíthető. Például nagy teljesítményű transzformátorok és erőművi generátorok hatásfoka elérheti, sőt egyes esetekben meg is haladhatja a 99,5 % értéket.

3. TÖRVÉNY

Az átalakító működése két, egymáshoz képest nyugalomban lévő: mágneses vagy villamos mező kölcsönhatásán alapszik. A gyakorlatban túlnyomó többségben a mágneses terek kölcsönhatásán alapuló villamos energia-átalakítók terjedtek el.

1.6A villamos gépek felhasználása

Hol használják a villamos gépeket?

Az ipari és a háztartási környezetben csaknem mindenütt, az egészen kis, töredék watt teljesítményű gépektől kezdve a rendkívül nagy, több száz, sőt ezer megawatt teljesítményű egységekig.

A villamos energia-átalakítók nélkülözhetetlenek mind ma, mind pedig a jövőben az ipari és a háztartási környezetben egyaránt. Szükség van és szükség lesz a jövőben is rájuk az energia termelésében és a villamos energia mechanikai energiává való átalakításában. Az emberiség mindig igényelni fogja, hogy:

1. **A villamos energia rendelkezésre álljon** (generátorok segítségével);
2. **Objektumokat adott pályán mozgassunk** (motorok segítségével).

1.7Helyes-e a “villamos” gép elnevezés?

Az elnevezés a villamos gép kapcsai felől nézve helyes, amennyiben a kapcsokon villamos energia, illetve villamos teljesítmény jelenik meg. A villamos gépek „munkaközege” azonban, mint korábban említettük, általában a mágneses tér. A mágneses terek alkalmazásának oka Ennek okát egy számpélda segítségével világítjuk meg.

A gyakorlatban viszonylag könnyen előállítható $B=1$ T indukciójú mágneses tér energiasűrűsége, w_m

$$w_n = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = 4 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$$

Ha azonban villamos térben kívánunk energiát tárolni, akkor az elérhető energiasűrűség lényegesen kisebb. A gyakorlatban viszonylag könnyen előállítható villamos tér térerősségét 30 kV/cm értékűre választva az elektrosztatikus tér energiasűrűsége, w_e :

$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \quad \varepsilon_0 = 8,885 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$w_e = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{2} \cdot (3 \cdot 10^6)^2 = \frac{1}{2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9 \cdot 10^{12} \cong 40 \text{ J/m}^3$$

értékre adódik, Tehát a gyakorlati megvalósíthatóságot is figyelembe véve villamos térben közelítőleg 4 nagyságrenddel kevesebb energia tárolható, mint mágneses térben. Más szóval: ugyanannyi energia átalakításához mágneses tér helyett villamos teret használva közel négy nagyságrenddel nagyobb gépméretet tartoznának.

1.8A villamos energia-átalakítókkal kapcsolatos általános kérdések és feladatok

1. Transzformátorok.

Önálló vizsgálati probléma, mert a transzformátor villamos energiát alakít át villamos energiává.

2. Elektromechanikai átalakítók.

A fő kérdés: a **forgó mozgás létrehozása**. Erről szól a forgógépes rész.

2.1. Forgó mozgás létesítése lehetséges:

mechanikai forgatással;

álló tekercsrendszerrel.

2.2. A működési elv megvalósításához tartozó gépi konstrukció lényeges (alap) elemeinek megismerése.

2.3. A megvalósított gép üzeme.

A) Állandósult állapot figyelmünket a villamos gépek
állandósult állapotbeli viselkedésére koncentrálnunk.

Felteszünk azonban további kérdéseket is.

1. Kérdés Elérhető-e az állandósult állapot?

Erre a kérdésre a villamos gépek indítási lehetőségeinek és módozatainak vizsgálata ad választ.

2. Kérdés Fennmarad-e az állandósult állapot?

Erre a kérdésre a villamos gépek stabilitásvizsgálata ad választ.

3. Kérdés Mi történik, ha a felépítés és/vagy a táplálás szándékosan vagy valamilyen hiba miatt aszimmetrikus?

Erre a kérdésre a villamos gépek aszimmetrikus üzemviszonyainak vizsgálata ad választ. Szándékos aszimmetriára példa a háztartásokban széleskörűen alkalmazott egyfázisú villamos forgógép.

4. Kérdés Mi történik a táplálás/terhelés változásakor?

Erre a kérdésre a villamos gépek tranziens (villamos változás) és dinamikus (mechanikai változás) üzemviszonyainak vizsgálata ad választ.

B) Tranziens állapot—ezzel nem fogunk foglalkozni.

2. Transzfomátorok

2.1 Mi a transzformátor?

TRANSZ = ÁT }
FORMÁL = ALAKÍT } ÁTALAKÍTÓ

A transzformátor adott áramú és feszültségű teljesítményt más áramú és feszültségű teljesítménnyé alakít adott frekvencia mellett. Mi a figyelmünket az *energiaátviteli transzformátorokra* koncentráljuk.

A transzformátorok alkalmazásának okai:

Termelés–szállítás–felhasználás feszültség-és áramszintje más-és más.

Termelés: generátorok feszültség-szintje 10 kV nagyságrendű. Ez a szint várhatóan növelhető például szupravezetős generátorok kifejlesztésével és alkalmazásával.

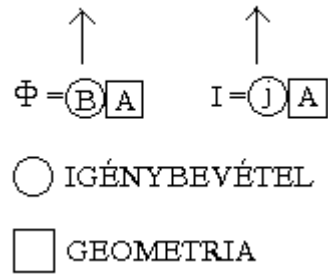
Szállítás: a szállítási veszteségek csökkentése az áramerősség csökkentésével érhető el. Ehhez azonban a feszültség szint növelése szükséges.

Felhasználás: a fogyasztó védelme viszonylag kis feszültségek alkalmazását engedi meg.

2.2 Jellegzetességeik

1. Az energiaátviteli transzformátorok *feszültség-transzformátorok*, azaz feszültség kényszer hatása alatt üzemelnek.
2. Fázisszám: háromfázisú rendszerek terjedtek el. Az egységeket vagy három egyfázisú, vagy egy háromfázisú transzformátorból alakítják ki.
3. Növekedési törvények: tendenciaszerű összefüggés van érvényben a transzformátorok egység teljesítménye és méretei között. Mivel 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 ,

$$S \sim L^4$$



A térfogat azonban a méretek harmadik hatványával arányos:

$$V \sim L^3$$

ezért a fajlagos mutató, \acute{a} , az egységteljesítmény térfogata,

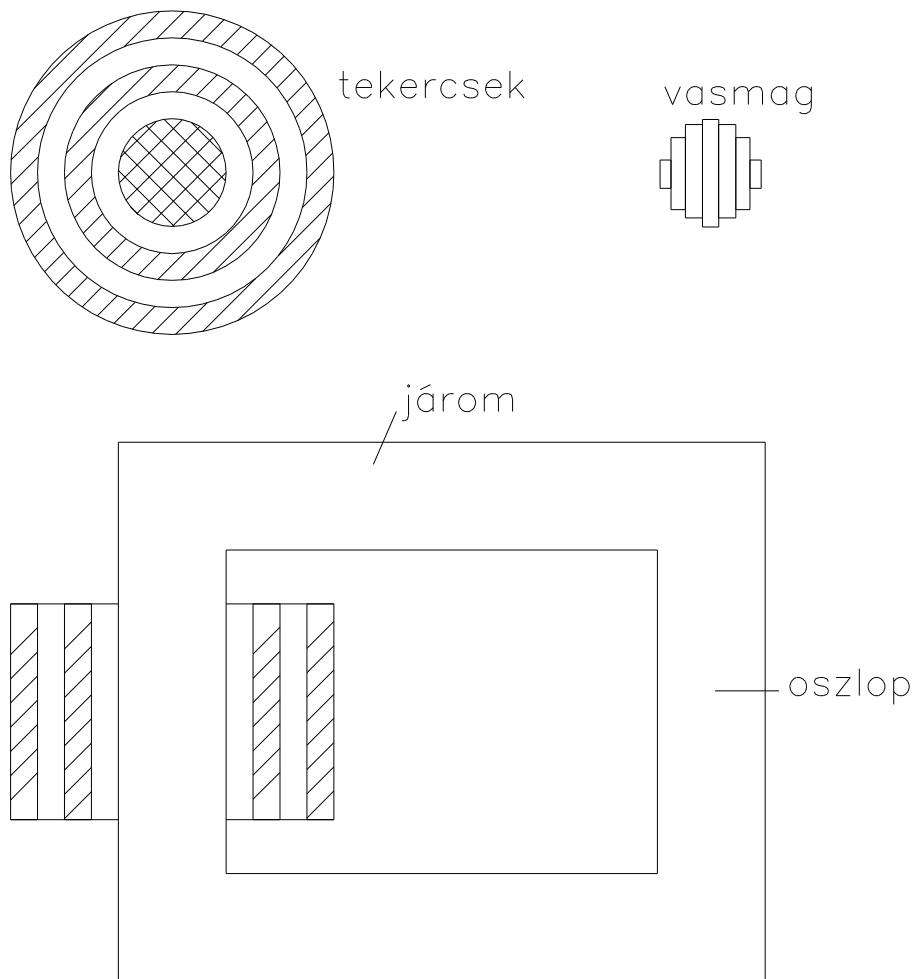
$$\acute{a} = \frac{V}{S} \sim \frac{1}{L} = \frac{1}{\sqrt[3]{S}}$$

növekvő egységteljesítménnyel csökken. Előnyös tehát nagyobb egységteljesítményű transzformátorokat gyártani. Megemlítendő, hogy a fenti gondolatmenet villamos forgógépekre is érvényes.

2.3Egyfázisú transzformátorok

2.3.1Működési elv, helyettesítő kapcsolás

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



2.3.2A 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*.

2.3.3Tekerceslés

1. A Legegyszerűbb az ábrán is látható hengeres tekerceslés.
2. A tekercsek egymásba vannak tolva, a két tekercs közötti szoros csatolás végett.
3. Kívül van a nagyfeszültségű, belül kisfeszültségű tekercs, mert így könnyebb a szigetelés megoldása.

2.3.4 Az indukált feszültség számítása

Állandósult állapotban az indukált feszültség fázora 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, Φ_m segítségével:

$$\bar{U}_{1i} = j\omega N_1 \bar{\Phi}_m$$

$$\bar{U}_{2i} = j\omega N_2 \bar{\Phi}_m$$

$$\frac{\bar{U}_{1i}}{\bar{U}_{2i}} = \frac{N_1}{N_2} = n = \text{menetszám - áttétel} \neq \text{feszültség - áttétel}$$

$$U_{ieff} = \frac{U_{imax}}{\sqrt{2}} \quad \text{Csak ha szinuszos!}$$

Az indukált feszültség effektív értékét az alábbi összefüggés szerint számíthatjuk:

$$U_{ieff} = 4,44 f N_1 \Phi_m$$

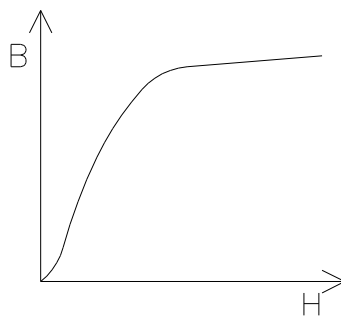
Megjegyzések:

1. U_{ieff} EFFEKTÍV érték
 Φ_m CSÚCSérték

Nem ellentmondás: U_{ieff} a villamos teljesítmény számításához szükséges;

Φ_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.

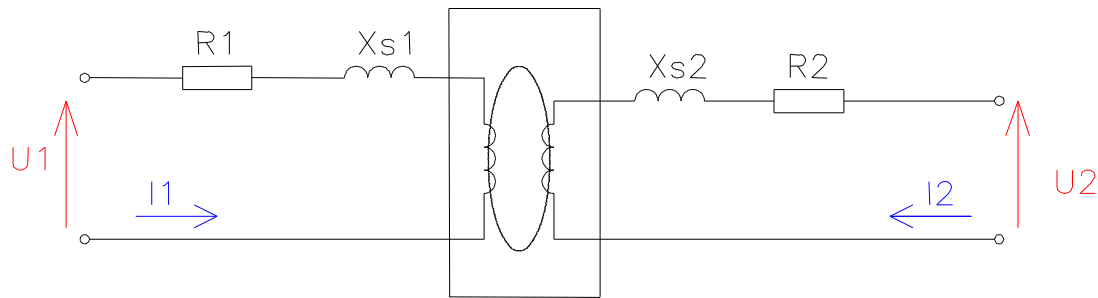


3. A képletben szereplő állandó, $4,44 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}$ csak szinuszos esetben!

2.3.5 Az ideális transzformátor

A transzformátor, és minden más villamos gép villamos jellemzői számításának megkönnyítése érdekében az átalakítókat villamos helyettesítő kapcsolásaikkal szoktuk

„helyettesíteni”. A helyettesítő kapcsolás származtatását több lépésben mutatjuk be. Először a tekercsek közötti mágneses csatolás kiküszöbölését mutatjuk be.



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

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

Az ideális transzformátor feszültség-egyenlete:

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

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

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

Megjegyzések

1. Az egyes komponensek nagyságrendjét általában *relatív egységekben*, százalékosan szokás megadni. Ehhez szükséges a *névtelen impedancia* fogalma:

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

A feszültségegyenletet átírjuk relatív egységekbe, amiket kis betűkkel jelölünk:

$$\frac{U_1}{U_{1n}} = \frac{R_1 I_1}{U_{1n}} + j \frac{X_{s1} I_1}{U_{1n}} + \frac{U_{1i}}{U_{1n}}$$

$$u_1 = r_1 + jx_{s1} i_1 + u_{1i}$$

$$u_1 = 1$$

$$r_1 \sim 1 \dots 2\%$$

$$x_{s1} \sim 2 \dots 5\%$$

Mivel a soros feszültségesések kicsik, így az indukált feszültség közelítőleg állandó:

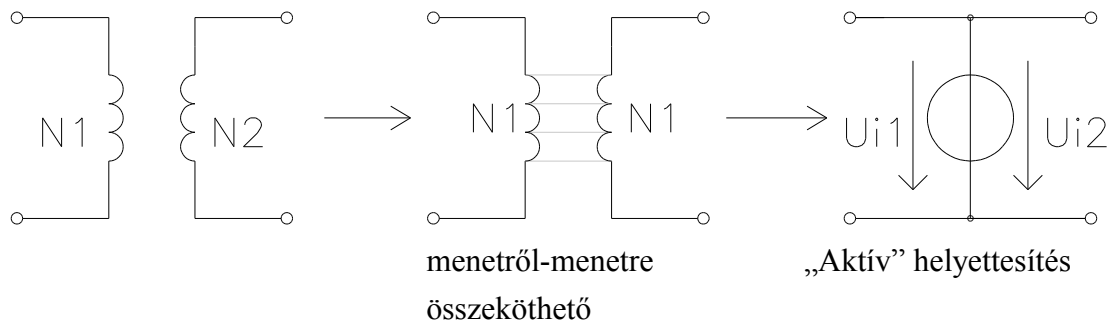
$$u_{1i} \approx 1$$

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.



1. Következtetés: az ideális transzformátor kiküszöbölését a *gerjesztések invarianciája* = változatlansága mellett oldottuk meg.

Ezzel a változtatással azonban a paraméterek is módosulnak. Milyen feltételt szabjunk a paraméterek változására?

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

Ez teljesül, hiszen

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

Hasonlóan, például:

$$P_{t2} = R_2 I_2^2 = R_2 \left(\frac{I_2}{n} \right)^2 n^2 = n^2 R_2 (I_2')^2 = R_2' (I_2')^2,$$

Láthatóan:

$$R_2' = n^2 R_2$$

$$X_s' = n^2 X_s$$

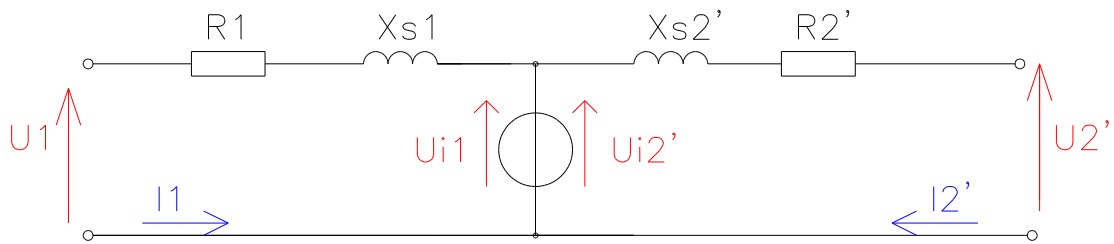
Általában:

$$Z_2' = n^2 Z_2$$

Az új változókkal a feszültség-egyenlet:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{i1} \\ \bar{U}_2' &= R_2' \bar{I}_2' + jX_{s2} \bar{I}_2' + \bar{U}_{i2}' \end{aligned} \quad \bar{U}_{i1} = \bar{U}_{i2}'$$

Vagyis az „aktív” helyettesítő kapcsolás:



Sokszor kényelmesebb a „passzív” kapcsolás, amelyben az aktív feszültségforrások helyett „passzív”, induktivitásokon eső feszültségeket használunk.

2.3.6.2 Teljes és egyszerűsített helyettesítő kapcsolások

Ismét használjuk fel a GERJESZTÉSEK INVARIANCIAJÁT:

$$\begin{aligned} \Psi_{m1} &= N_1 \Lambda_m (\bar{I}_1 N_1 + \bar{I}_2 N_2) = N_1 \Lambda_m (\bar{I}_1 N_1 + I_2' N_1) = \\ &= \underbrace{N_1^2 \Lambda_m}_{L_{m1}} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2') = L_{m1} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2') \end{aligned}$$

Azaz:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{m1} &= L_{m1} \bar{I}_{m1} \\ \bar{U}_{i1} &= j\omega \bar{\Psi}_{m1} = j\omega \underbrace{L_{m1}}_{X_{m1}} \bar{I}_{m1} = jX_{m1} \bar{I}_{m1} \end{aligned}$$

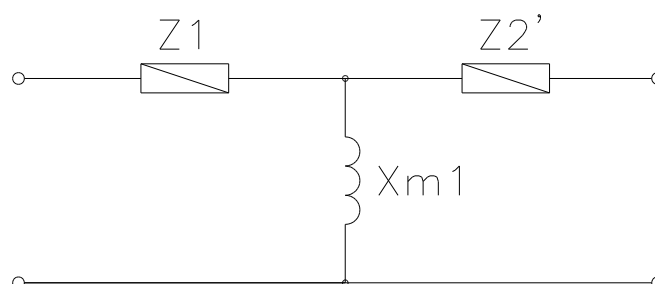
És: Mivel a feszültségkényszer miatt

$$\bar{F} \cong \text{áll} \Rightarrow \bar{I}_{m1} \cong \text{áll}$$

Ezért: $\bar{I}_{m1} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2' \cong \text{áll}$

Ez a gerjesztések egyensúlyának törvénye.

A „passzív” helyettesítő kapcsolás:

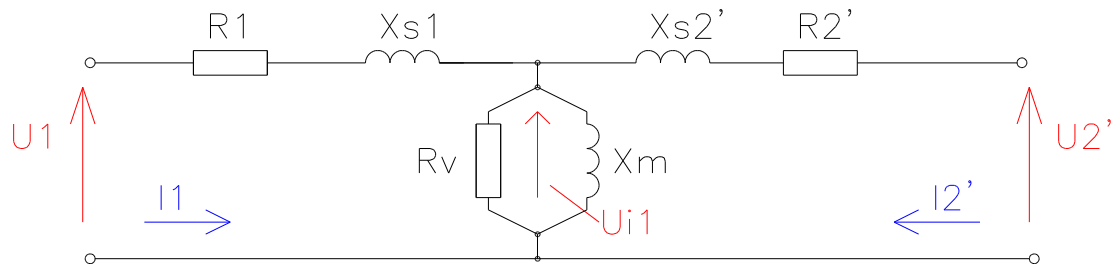


Ez a kapcsolás még nem teljes, mert vasvesztések is keletkeznek. A vasvesztések közel arányosak az oszlopindukció, és ezzel az indukált feszültség négyzetével:

$$P_{\text{vas}} \sim B_0^2 \sim U_1^2$$

Tudjuk, hogy $U_i \propto X_{m1} \rightarrow R_v \parallel X_{m1}$, vagyis a vasveszteséget képviselő ellenállás „természetes” helye az X_m főmezőreaktanciával párhuzamos ágba található.

A TELJES PASSZÍV HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁS



A helyettesítés:

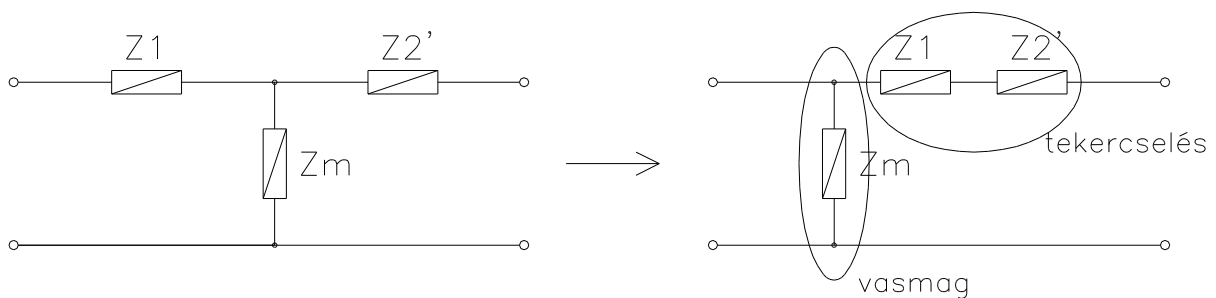
1. TÉRELMÉLETI;
 2. GERJESZTÉS
 3. TELJESÍTMÉNY
 4. Érvényes a GERJESZTÉSEK EGYENSÚLYÁNAK TÖRVÉNYE.
- } INVARIÁNS;

Hiányosság:

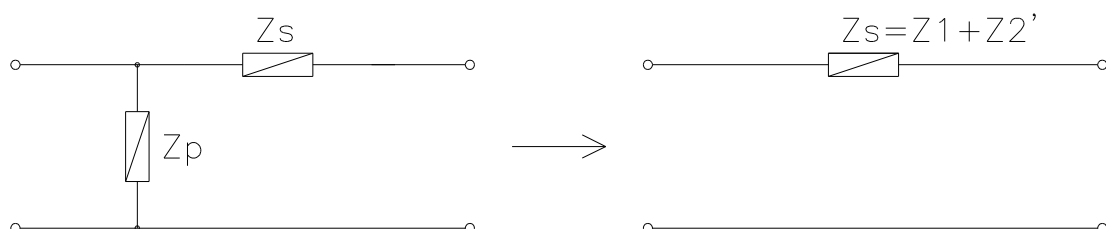
Az egyik fő hiányosság, hogy X_{s1} és X'_{s2} külön, szétválasztva szerepel, noha a szórások általában nem választhatók szét külön primer és külön szekunder szórásokra.

Milyen egyszerűsítések szokásosak?

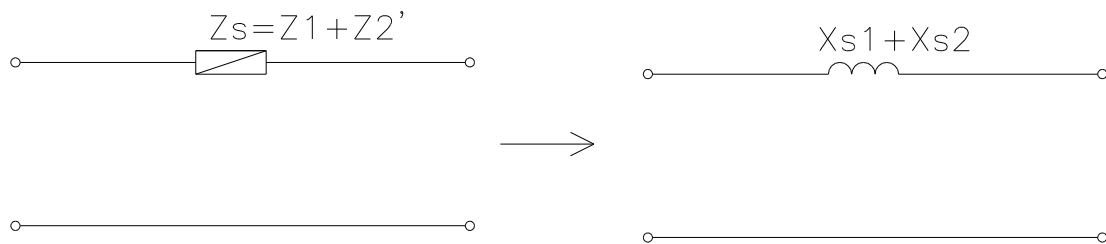
a) $U_i \approx U_{i1}$



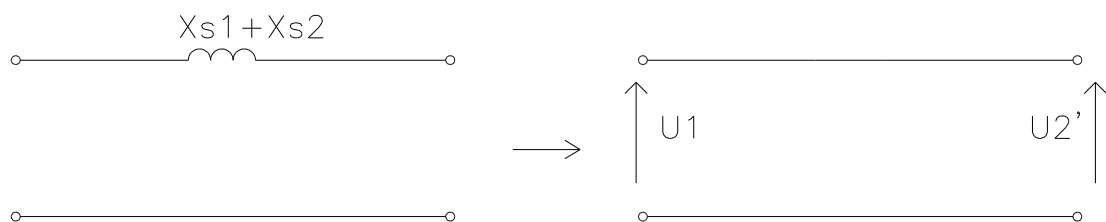
b) $Z_p \gg Z_1, Z_2$



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



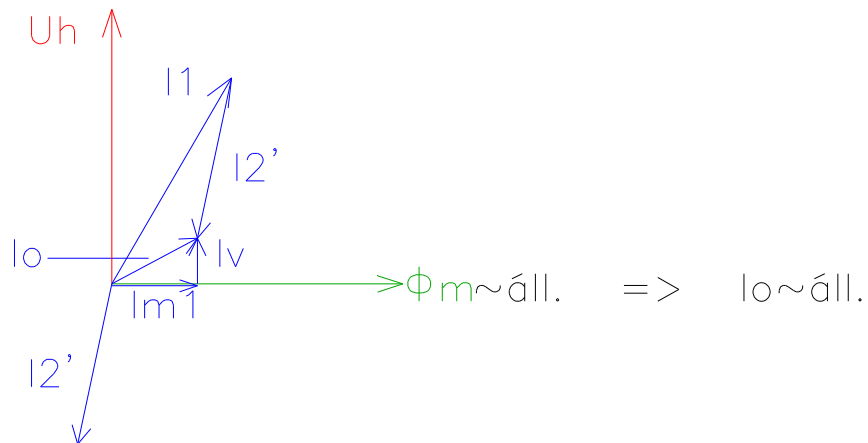
d) Ideális, veszteség- és szórásmentes transzformátor:



2.3.7A transzformátor fázorábrája

$U_h = \text{áll.} = U_1 \Rightarrow U_{i1} \cong \text{áll.}$ FESZÜLTSEGGÉNYYSZER

Az alábbi ábra az ábrázolás megkönnyítése érdekében **nem** méretarányos, a feszültségesések vektorai a valóságban sokkal kisebbek.



Gerjesztések egyensúlya

$$\bar{I}_1 N_1 + \bar{I}_2 N_2 = F_0 = \bar{I}_0 N_1 \cong \text{áll}$$

Szokásos közelítés:

$F_0 \approx 0$, amivel

$$\bar{F}_1 \cong -\bar{F}_2$$

$$\bar{I}_1 N_1 = -\bar{I}_2 N_2$$

hasonló törvényszerűség érvényesül az aszinkron gépeknél is.

2.3.8A transzformátor üzeme

- a) A transzformátor mint feszültségforrás

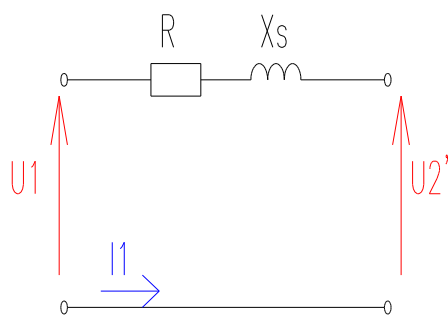
A kérdés: a szekunder feszültség változása.

- b) A transzformátor zárlati viszonyai

Megkülönböztetendő: mérési és üzemi zárlat.

2.3.8.1A transzformátor feszültségváltozása

A szekunder feszültség meghatározható az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján:

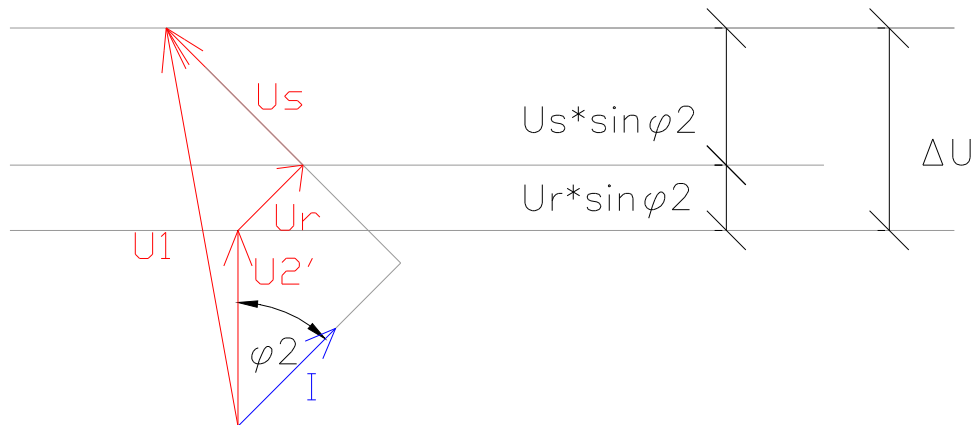


$$R = R_1 + R_2'$$

$$X_s = X_{s1} + X_{s2}'$$

$$I = I_1 = -I_2'$$

A feszültség változását leíró egyenletek a vektorábra alapján:



$$\Delta \bar{U} = \bar{U}_1 - \bar{U}_2$$

$$|\Delta \bar{U}| = \Delta U = IR \cos \varphi_2 + IX_s \sin \varphi_2$$

ahol ΔU a feszültségváltozás, φ a fázisszög.

Relatív egységekben:

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

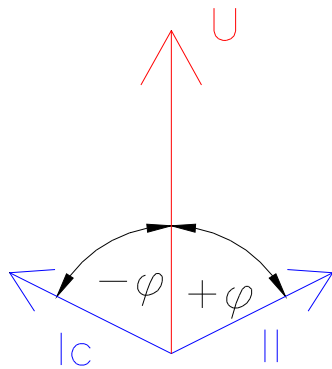
$$\frac{\Delta u}{\varepsilon} = \left(\frac{I}{I_{1n}} \right) \left[\frac{R}{Z_{1n}} \cos \varphi_2 + \frac{X_s}{Z_{1n}} \sin \varphi_2 \right]$$

$$\frac{R}{Z_{1n}} = \varepsilon_R \quad \frac{X_s}{Z_{1n}} = \varepsilon_x$$

$$\varepsilon = \alpha (\varepsilon_R \cos \varphi_2 + \varepsilon_x \sin \varphi_2)$$

Megállapíthatjuk, hogy a feszültségváltozás függ:

- 1 a terheléstől (I)
- 2 a terhelés jellegétől (cosφ); kapacitív terhelésnél a feszültség nőhet is.



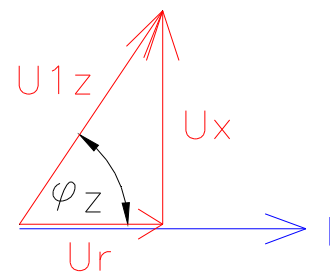
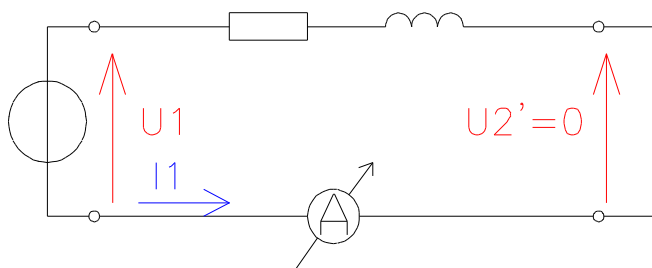
$\varepsilon < 0$ a feszültség NŐ

$\varepsilon > 0$ a feszültség CSÖKKEN

2.3.8.2A transzformátor zárlata

Mint korábban mondtuk, megkülönböztetünk *üzemi* és *mérési* zárlatot. Az üzemi zárlat kérdéseivel nem foglalkozunk. A zárlati mérés segítségével a transzformátorok egyik alapvető jellemzője, a *drop* határozható meg.

A mérési rövidzárlathoz tartozó helyettesítő kapcsolás és a vektorábra:



$$U_{1z} = I_{1n} R_1 + j I_{1n} X_s$$

$$U_{1z} = I_{1n} + j I_{1n} X_s$$

A feszültségváltozás számításához hasonló módon:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_R + j\varepsilon_X$$

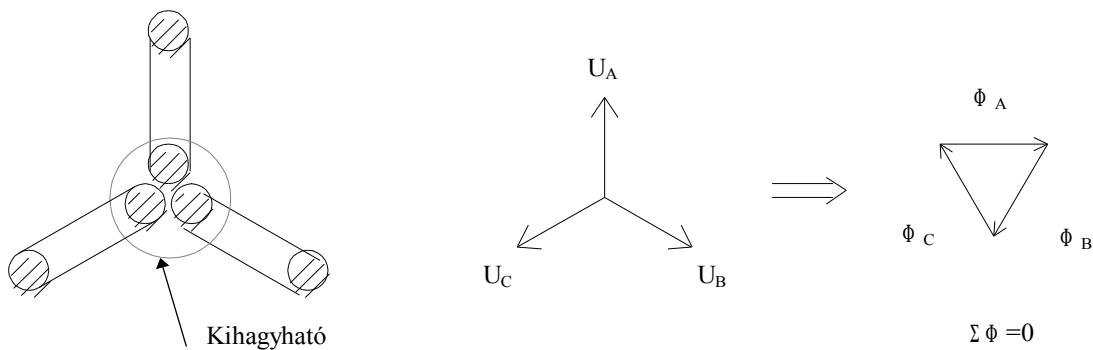
$$|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_X^2} = \text{DROP}$$

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.

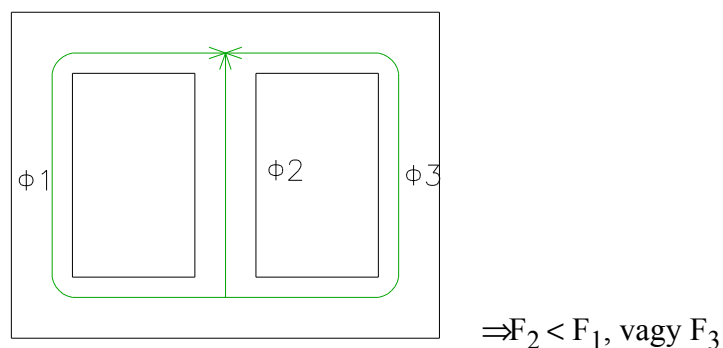
2.4 Háromfázisú transzformátorok

2.4.1 Működési elv

Az alábbi ábra a háromfázisú transzformátor származtatását mutatja három egyfázisú egységből kiindulva. Az elrendezés teljesen szimmetrikus, így a fluxusok vektorösszege zérus. Ez azonban azt is jelenti, hogy a középső oszlop elhagyható, hiszen abban nincs fluxus.



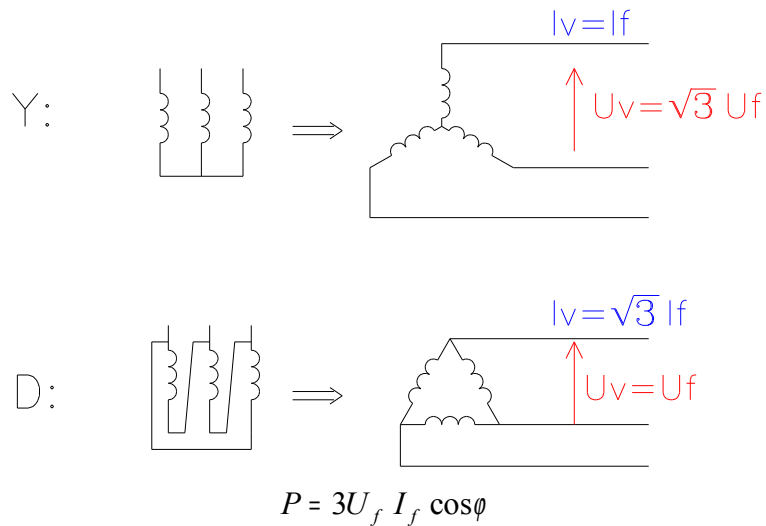
Így jutunk a háromfázisú transzformátorok szokásos felépítéséhez. Magtípusú transzformátor sematikus rajza látható az alábbi ábrán. Látható, hogy a középső oszlop rövidebb, így kisebb mágnesező áramot (gerjesztést) igényel.



2.4.2 Kapcsolások

A háromfázisú transzformátorok tekercseit csillagba, deltába vagy zeg–zug kapcsolásban alkalmazzák.

A csillag– és a háromszögekapsolás kialakítása és jellemzői láthatók az alábbi ábrán:



$$P_Y = 3 \frac{U_Y}{\sqrt{3}} I_Y \cos\varphi$$

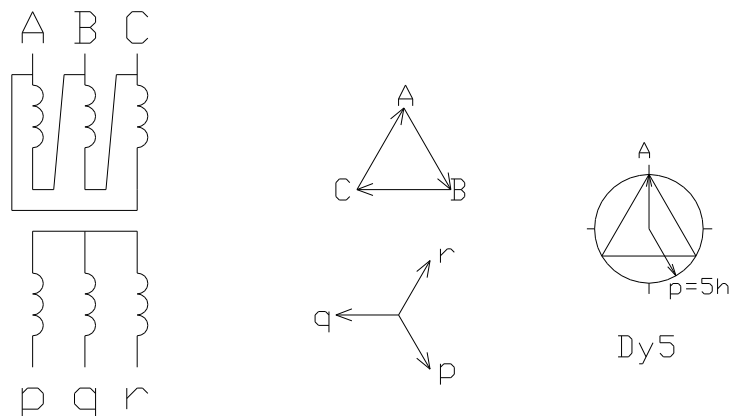
$$P_D = 3U_D \frac{I_D}{\sqrt{3}} \cos\varphi$$

$$P = \sqrt{3} U_v I_v \cos\varphi$$

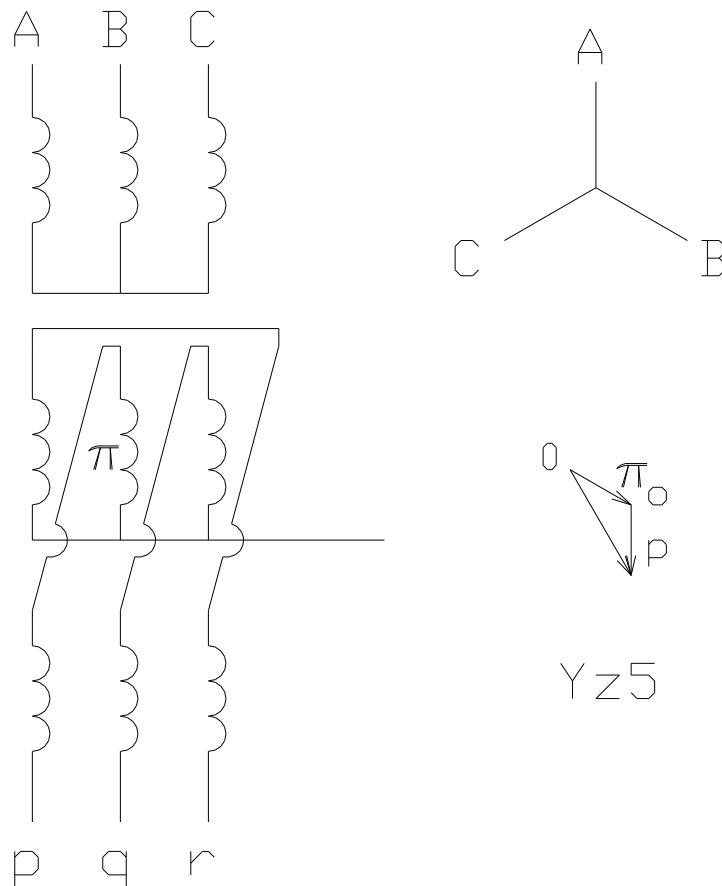
Fontos megjegyezni, hogy vonali mennyiségekkel kifejezve a háromfázisú teljesítmény képlete azonos a csillag– és a háromszög kapcsolás esetén egyaránt.

Jellegzetes tekercselési típusok és jelölésük:

Delta–csillag kapcsolás



Zeg–zug kapcsolás



A delta (vagy háromszög), illetve a zeg–zug kapcsolás csökkenti a terhelés aszimmetriájából származó káros következményeket.

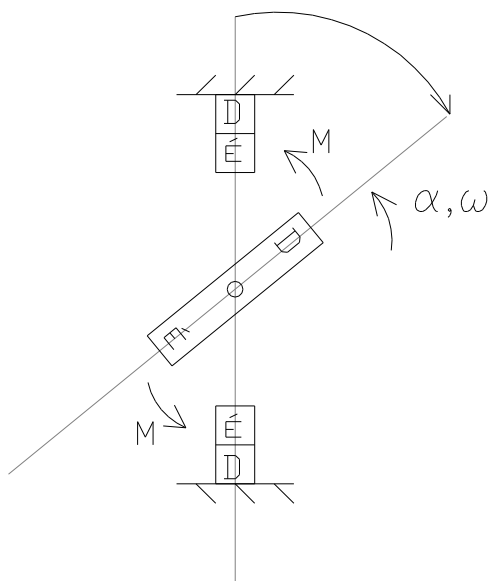
A megfelelő primer és szekunder feszültségek vektorai közötti fáziseltérést jelöli az *óraszám*. A fáziseltérés 30° egész számú többszöröse lehet csak. Ha például a nagyfeszültségű tekercs feszültségvektora a képzeletbeli óralapon a 12 órára mutat, akkor a kisfeszültségű tekercs feszültségvektora valamelyik egész órára fog mutatni. Fentebbi példáinkban 5 órára, ami $5 \times 30^\circ = 150^\circ$ szögeltérésnek felel meg.

3. Forgó mozgás létesítése.

Az 5. fejezetben a villamosenergia-átalakítók működésével fogunk megismerkedni. Látni fogjuk, hogy a villamos forgógépekben a mágneses teret a forgó mozgás létesítésére fogjuk használni. Ezért ebben a fejezetben azokat az ismereteket foglaljuk össze, amelyek a mágneses tér és a forgó mozgás kapcsolatát mutatják be.

3.1 Nyomaték létesítése

Két állandó mágnes vagy gerjesztett tekercs egymásra hatása azonos pólusszám esetén:



Az elrendezés

HETEROPOLÁRIS (váltakozó pólusú).

A két mágnes közötti nyomaték

$$M \sim \sin \alpha$$

arányos a mágnesek tengelyei közötti szög szinuszával.

Következtetés:

$$M = \text{áll eléréséhez} \quad \alpha = \text{áll szükséges.}$$

Ez úgy érhető el, hogy mindkét mágnes: vagy *áll*, vagy azonos szögsebességgel *forog*. Ez utóbbi esetet

úgy is szoktuk jellemezni, hogy a mágnesek *relatív nyugalomban* vannak.

A SZOKÁSOS MEGOLDÁS:

az egyik (álló vagy forgó) tekercsrendszer

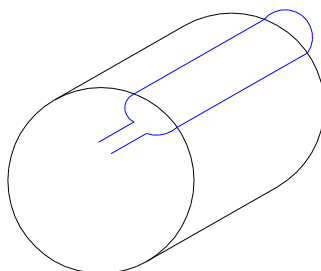
áramait \Rightarrow mágneses terét

a másik (forgó vagy álló) tekercsrendszer hozza létre

3.2 Váltakozó áramú tekercselés

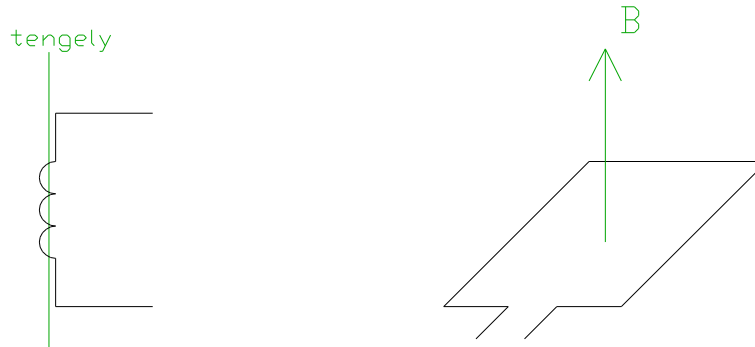
A váltakozóáramú tekercselések mindig *heteropoláris* felépítésűek.

A tekercsek elhelyezése:



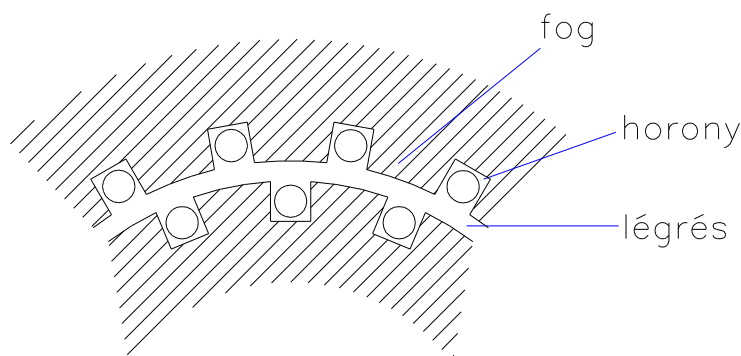
A tekercsoldalakat a hengeres álló- vagy forgórész palástfelületén helyezzük el. A tekercsoldalakat a henger egyik homlokoldalán tekercsfejek segítségével kötjük össze így jönnek létre a menetek, illetve a sokmenetű tekercsek.

A tekercsek szimbolikus jelölése:



A tekercsek tengelye egybeesik a tekercsek mágneses tengelyével, azaz a tekercsekben folyó áramok által létesített mágneses tér (indukció) térbeli irányával. Az áramok és az általuk létesített mágneses tér irányát a *jobbcsavar szabály* segítségével határozhatjuk meg.

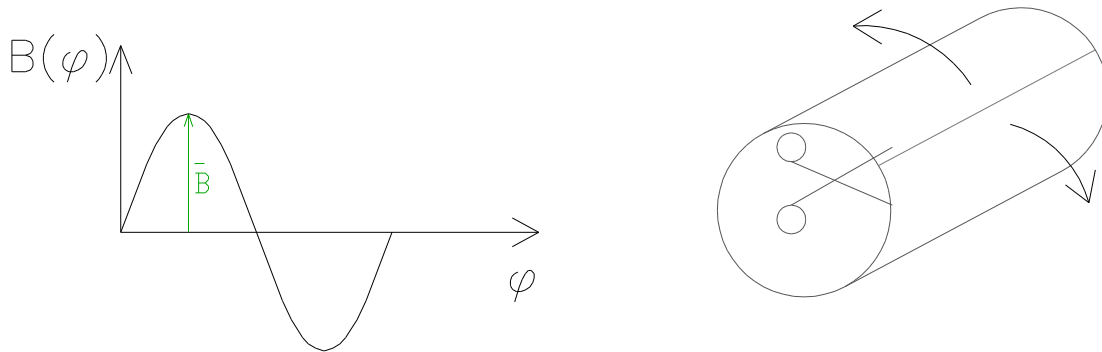
A tekercsoldalak rögzítésére szolgálnak a *fogak* és a *hornyok*:



A tekercsek hornyokban történő elhelyezéssel csökkenthető az álló- és a forgórész közötti *légrés*.

3.3Az indukcióvektor értelmezése

Mindig arra törekszünk, hogy villamos gépeinkben a térbeli indukcióeloszlás, valamint a feszültségek és áramok időbeli jelalakja a legjobban közelítse a szinuszfüggvényt. A szinuszság követelménye abból az ismert villamosságtani törvényszerűségből származik, hogy a **többfázisú, szinuszos, kiegyenlített rendszerek villamos teljesítménye állandó.**

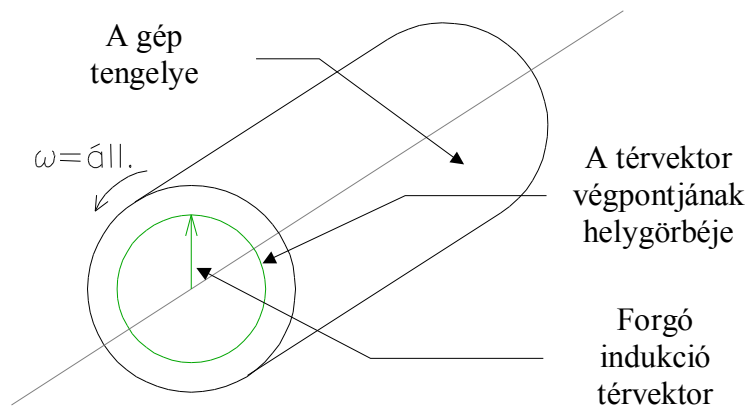


$$B(\varphi) = B_m \sin p\varphi$$

p = indukcióhullámok száma

a kerület (φ) mentén = PÓLUSSZÁM

Hogyan jellemezhető az indukció-vektorral a kerület mentén egyenletes sebességgel haladó hullám?

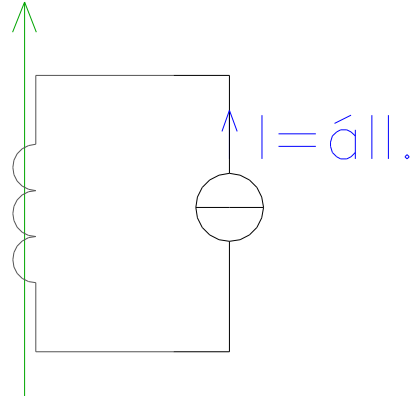


Következtetés: Ha a mágneses tér (indukció) kerület menti eloszlása szinuszos, valamint a többfázisú áramok időbeli változása (időfüggvénye) is szinuszos, akkor a villamos gép kapcsain leadott többfázisú villamos teljesítmény, illetve a villamos gép tengelyén leadott nyomaték (mechanikai teljesítmény) az időben állandó.

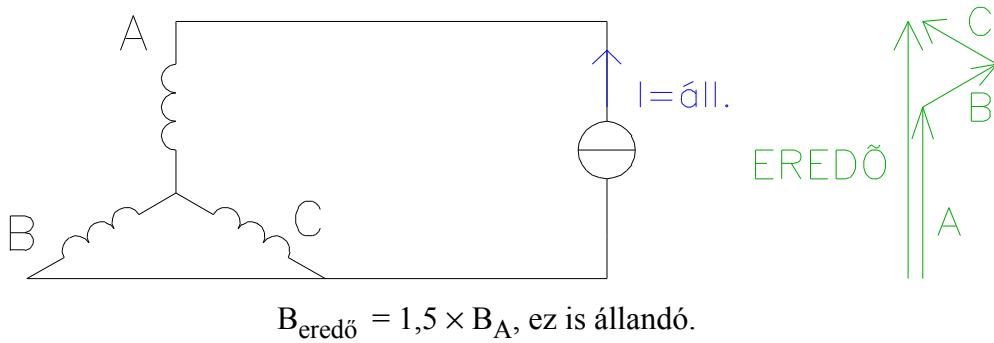
3.4 Mezőtípusok

3.4.1 Állandó (álló) mező

a) Egy tekercs egyenárammal gerjesztve.

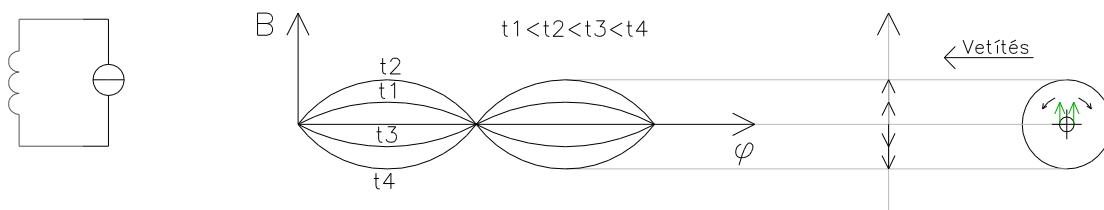


b) Több tekercs, térben háromfázisúan elhelyezve és egyenárammal gerjesztve.



3.4.2 Lüktető mező

Egy tekercs, egyfázisú váltakozóárammal 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.

3.4.3 Forgó mező

3.4.3.1A forgó mező létrehozása

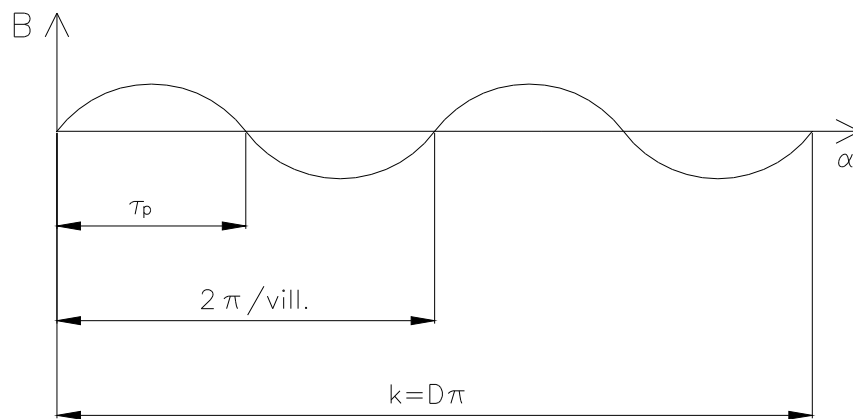
A forgómező létrehozásához:

Többfázisú tekercsrendszer



SZÜKSÉGES

Többfázisú áram (gerjesztés)rendszer



$2\pi / \text{geom.}$

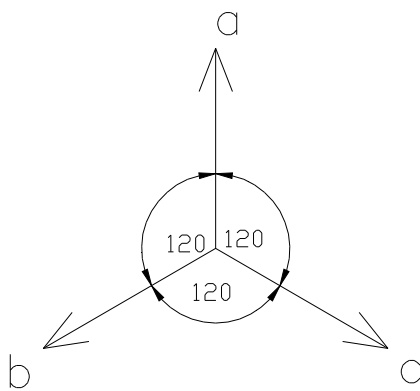
$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p}$$

pólusosztás

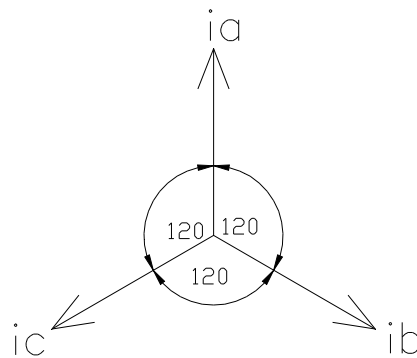
$$\alpha_v = p \alpha_g$$

a villamos és a geometriai szög kapcsolata

TEKERCSEK TENGELEVE
A TÉRBEN



A TEKERCSEK ÁRAMAI
AZ IDŐBEN



AMI A TÉRBEN "ELŐRE" VAN,

AZ AZ IDŐBEN "HÁTRA" VAN

3.4.3.2A forgó mező matematikai leírása

Az i -ik fázis indukcióhullámának kifejezése:

$$B_i = B_i(x, t) = B_i(t) \times T_i(x)$$

ahol $B_i(t)$ az időfüggvény, $T_i(x)$ a térbeli eloszlást leíró függvény.

Térbeli eloszlás:

$$T_a(x) = \cos\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - 0 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$T_b(x) = \cos\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - 1 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$T_c(x) = \cos\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - 2 \cdot \frac{2\pi}{3}\right)$$

Időfüggvények:

$$B_a(t) = B_m \cos\left(\omega_1 t - 0 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$b_b(t) = B_m \cos\left(\omega_1 t - 1 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$b_c(t) = B_m \cos\left(\omega_1 t - 2 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

EULER tétele:

$$\cos \alpha = \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2}$$

Az Euler-tétel felhasználásával, a részletszámításokat elhagyva:

$$B_{\text{eredő}}(x_1, t) = B_a(x_1, t) + B_b(x_1, t) + B_c(x_1, t)$$

HÁROM FÁZIS ESETÉN:

$$B_{\text{eredő}}(x_1, t) \Big|_3 = \frac{3}{2} B_m \cos\left(\omega_1 t - \frac{x}{\tau_p} \pi\right)$$

Tetszőleges m FÁZIS ESETÉN

$$B_{\text{eredő}}(x_1, t) \Big|_m = \frac{m}{2} B_m \cos\left(\omega_1 t - \frac{x}{\tau_p} \pi\right)$$

Az eredő mező amplitúdója általánosságban:

$$B_{e,\max} = \frac{m}{2} B_{1f,\max}$$

3.4.4A forgó mező tulajdonságai

I. Kerület mentén állandó szögsebességgel haladó hullám.

Ha $\omega_1 = \text{áll}$, akkor a maximum-hely:

$$\omega_1 t = \frac{x}{\tau_p} \pi \quad \omega_l \text{ a hálózati körfrekvencia}$$

$$x = R \omega_0 t$$

$$\tau_p = \frac{2R\pi}{2p} = \frac{R\pi}{p} \quad R \text{ a forgó- vagy állórész sugara}$$

$$\omega_1 t = \frac{R \omega_0 t}{\frac{R\pi}{p}} \pi$$

$$\omega_1 = p \omega_0$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p} \quad \omega_0 = \text{szinkron szögsebesség}$$

II. ω_0 nem függ a fázisszámtól

Az „m” és „n” fázisú rendszerek ekvivalensek, ha

$$\frac{m}{2} B_{m,\max} = \frac{n}{2} B_{n,\max}$$

LINEÁRIS ESETBEN

$$m N_m I_m = n N_n I_n$$

Ebből m/n állórész/forgórész fázisszám esetén

$$n_U = \frac{N_m}{N_n} \left(\frac{\xi_m}{\xi_n} \right) \rightarrow U_2' = n_U U_2$$

$$n_I = \frac{m N_m}{n N_n} \left(\frac{\xi_m}{\xi_n} \right) \rightarrow I_2' = \frac{I_2}{n_I}$$

ξ a tekercselési tényező (ld. 2. fejezet)

III. A nyomatékképzés feltétele az álló és a forgórész pólusszám egyezése.

A két mezőnek, B_{st} és B_{rot} relatív nyugalomban kell lennie:

$$\omega_{0,st} = \omega_{0,r}$$

⇓

$$P_{st} = P_{rot}$$

Ez a nyomatékképzés szükséges feltétele

„gerjesztett” tekercsrendszerekben.

$$\omega_{st}|_B = \omega_{rot}|_B + \omega_{mech}$$

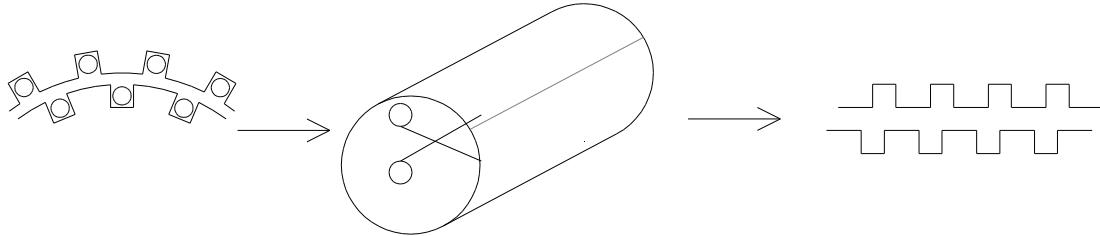
Ez az ún. **frekvencia-feltétel**,

ahol $\omega_{st}|_B$ a státor illetve $\omega_{rot}|_B$ a rotor mező szögsebessége a státorhoz illetve a rotorhoz képest.

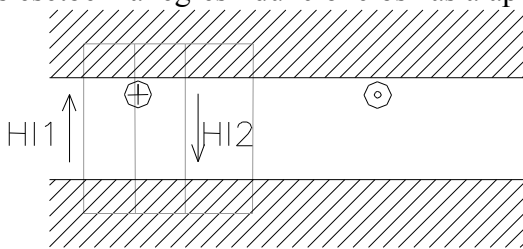
3.5 Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

3.5.1A gerjesztési törvény alkalmazása

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! A légrésen, valamint az álló- és forgórész-vastesten át záródó integrálási útvonalakat felvéve, és elhanyagolva a vastestre eső mágneses feszültségeket ($\mu_{vas} = \infty$ közelítés), kapjuk a gerjesztés kerület menti eloszlását., esetünkben egy ún. *lépcsős görbét*. A lépcsős görbe Fourier-sora adja meg a gerjesztéseloszlás, valamint–lineáris esetben–a légrésindukció–eloszlás alapharmonikusát és felharmonikusait.

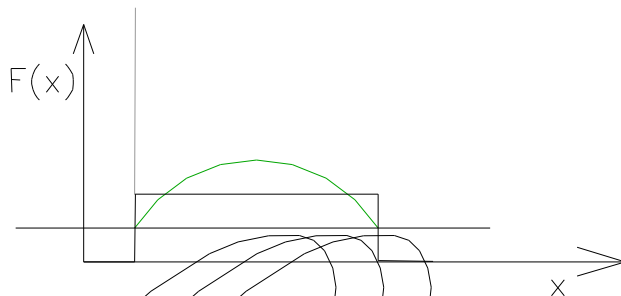


$$B_1 = \frac{4}{\pi} B_m,$$

az alapharmonikus indukció,

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

a fázisonkénti és pólusonkénti horonyszám.



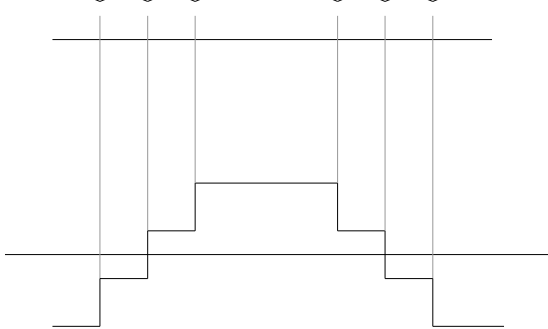
Mi történik $q > 1$ választás esetén?

MEZŐ

Színuszosabb térbeli eloszlás

Előnyös

INDUKÁLT FESZÜLTÉSÉ:



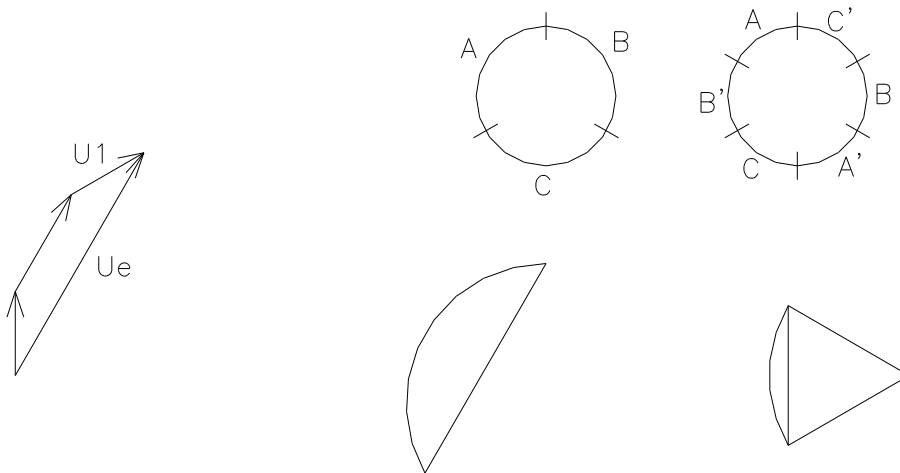
Kisebb, mert az egyes tekercsoldalokban fázisban eltoltségek indukálódnak, amelyek vektorösszege kisebb, mint a részfeszültségek abszolút értékeinek összege (a fázisfeszültség nagysága).

Hátrányos

3.5.2A tekercselési tényező

A bal oldali ábra mutatja az eredő indukált feszültség szerkesztését $q=3$ esetén.

A középső és a jobb oldali ábra $q=\infty$ feltételezéssel készült. A középső ábrán a fásissáv szélessége 120° (nem szokásos), míg a jobb oldali ábrán a fázissáv a szokásos 60° .



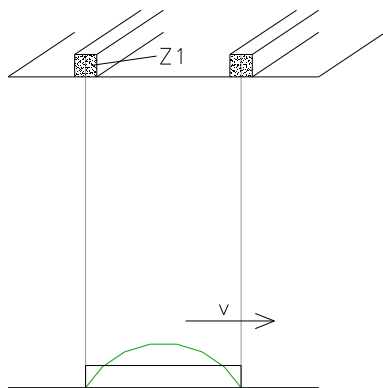
$$\xi_e = \frac{U_e}{\sum |U_1|}$$

$$\xi_e = \frac{\text{húr}}{\text{ív}}$$

$$\xi_e = \frac{\pi}{\frac{3}{1}} = \frac{\pi}{3}$$

Tehát a tekercselési tényező megmutatja, hogy a tekercselés elosztottsága következtében milyen mértékben csökken az (alapharmonikus) indukált feszültség.

3.5.3Az indukált feszültség számítása



$$N_1 = \frac{z_1}{2} \quad N = \text{menetszám, } z_1 = \text{hornyokénti vezetősáv}$$

$$U_1(t) = b(x) l_1 \cdot v \cdot z_1 \quad v = \text{kerületi sebesség}$$

$$U_{1\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} b_{\text{max}} \cdot l_1 \cdot v \cdot z_1$$

$$b_{\text{köz}} = \frac{2}{\pi} b_{\text{max}}$$

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

Ha $q = 1$

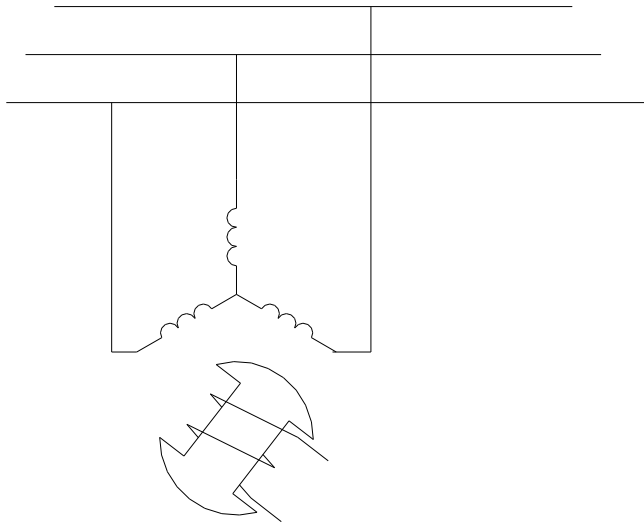
$$U_{1eff} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi_{\max}$$

Ha $q \neq 1$

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

4.Szinkron gépek

4.1A működés elve



A frekvenciafeltétel alapján:

$$f_2 = 0 \text{ (egyenáramú gerjesztés)}$$

⇓

$$\omega_{\text{rot}} = 0$$

Csak $n = n_0$ fordulatszámon működik, ekkor képes állandósult nyomatékot kifejteni. Ez a **szinkron** állapot.

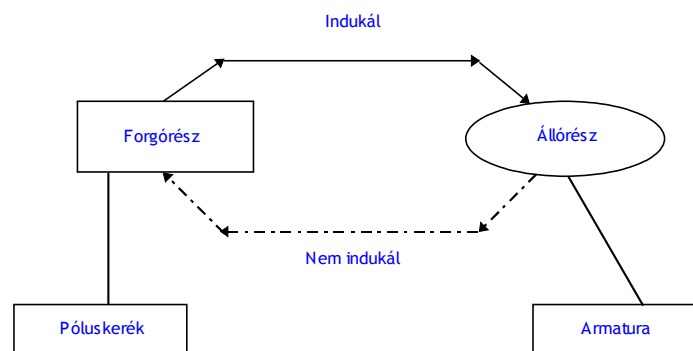
Megjegyzések:

1. Önállóan indulni nem képes.
2. Ha „kiesik” a szinkronizmusból, zárlati állapotba kerül.
3. Lengésekre hajlamos.
4. Gerjesztőáramot független áramforrás biztosítja \Rightarrow meddőt képes szolgáltatni.

Főként a nagy generátorok fontosak.

4.2Helyettesítő kapcsolás

Származtatása „egyszerű”, mert a gép állandósult, szimmetrikus állapotban UNILATERÁLIS = indukálás csak egy irányban van: a forgórész indukál az állórészbe.



armatura = a gép azon része (tekerceslése), amelyben állandó és szimmetrikus állapotban feszültség indukálódik. E feszültség neve: *pólusfeszültség*.

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

A pólusfeszültség az ismert módon:

$$U_p = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 \xi_1 N_1 \Phi_{(\max)} \rightarrow \text{ez „aktív” (feszültségforrás)}$$

Az armatura-feszültség

$$U_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 \xi_a N_a \Phi_a \rightarrow \text{ez indukált feszültség, de}$$

feszültségesésként vesszük figyelembe

A transzformátorhoz hasonlóan:

AKTÍV: U_i

PASSZÍV: X_m

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

$$= 2\pi f_1 \times \frac{I_a}{X_a} \times I_a = I_a \times X_a$$

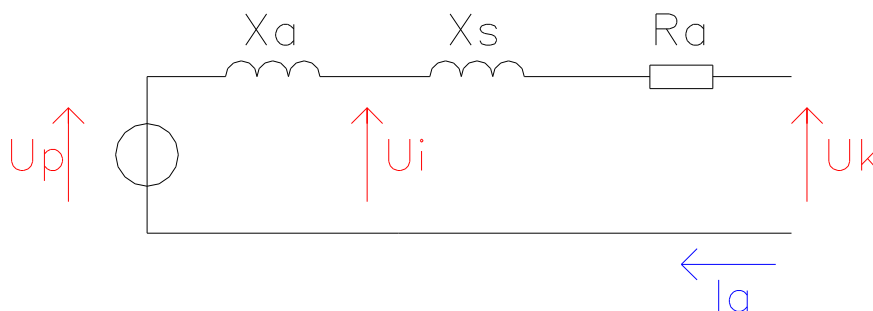
azaz:

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

Ehhez járulnak a szórások, amikkel a feszültség-egyenlet:

$$\bar{U}_k = \bar{U}_p + jX_a \bar{I}_a + jX_s \bar{I}_a + R_a \bar{I}_a$$

Az egyenlethez tartozó Thevenin-kapcsolás



Itt is: FOGYASZTÓI POZITÍV IRÁNYRENDSZER van érvényben.

Megjegyzések:

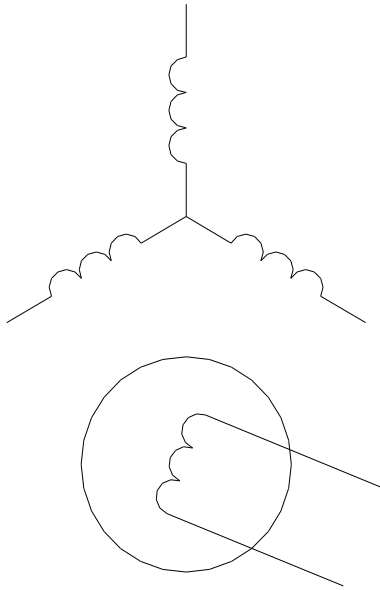
1. Vasveszteség elhanyagolva: állandósult szimmetrikus állapotban CSAK az állórészben keletkezik vasveszteség.

Nagy gépeknél $\eta \rightarrow 100\% \Rightarrow P_{\text{vas}} \approx 0$

2. Növekedési törvények miatt $P \Rightarrow x_a \downarrow \Rightarrow R_a \approx 0$ a szokásos elhanyagolás

3. A gépben egyetlen mező van, ez hozza létre az indukált feszültséget.

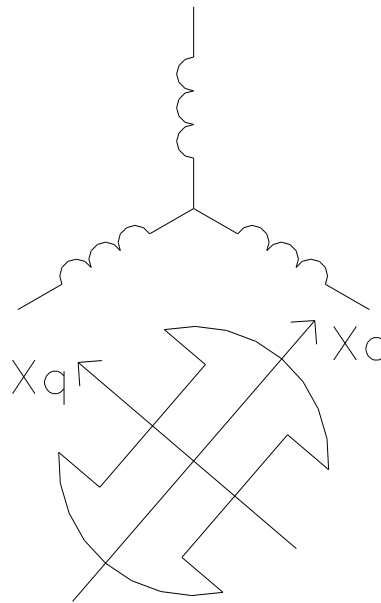
4. $X_a + X_s = X_d =$ SZINKRON REAKTANCIA



Hengeres

Minden irányban

azonos



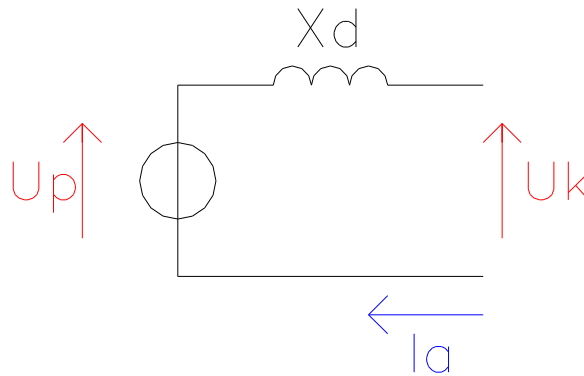
Kiálló pólusú

Az eltérő irányokban

eltérő

mágneses ellenállás

Ezzel: a hengeres forgórészű szinkron gép egyszerűsített helyettesítő kapcsolása:



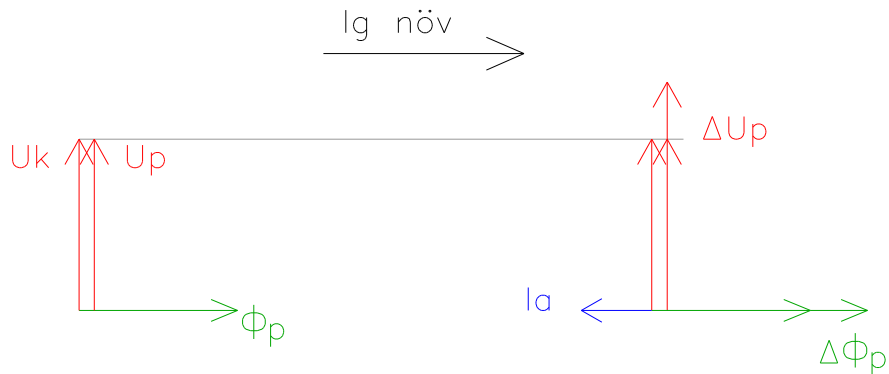
Thevenin kapcsolásból \Rightarrow Norton kapcsolás kapható az ismert átalakítással:

feszültség-amplitudó
 megfelelő fázisfeszültségek között fázisszög zérus.

4.5 Terhelésvétel

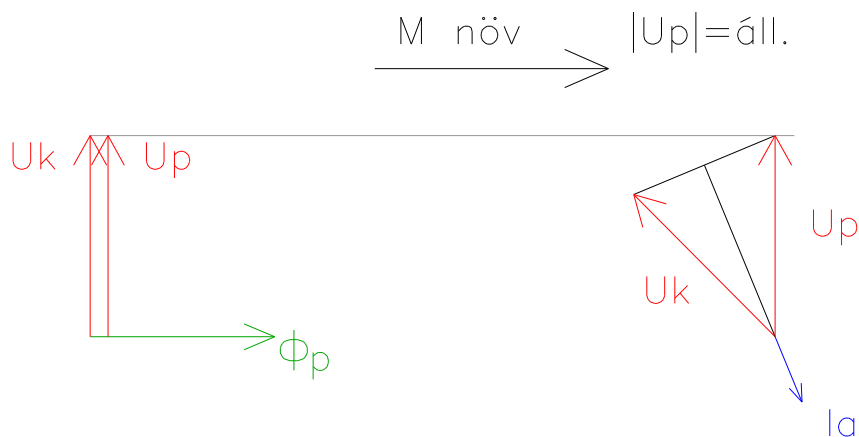
SZINKRONOZÁS UTÁN

1 A gerjesztőáram növelése



Megállapítható, hogy ha a gerjesztőáramot az üresjárási érték fölé növeljük, akkor a szinkron gép meddő teljesítményt képes szolgáltatni a hálózatnak. Ez a szinkron gépek szokásos gerjesztési állapota, mivel a fogyasztók többsége meddő teljesítményt igényel. A gerjesztőáram csökkentésével a szinkron gép is meddő teljesítményt vesz fel. A gerjesztőáram változásának nincs hatása a szinkron gép hatásos teljesítményére.

2 A hajtó- vagy fékezónyomaték növelése



Megállapítható, hogy a hajtó- vagy fékezónyomaték növelésével változik a szinkron gép által szolgáltatott vagy felvett villamos teljesítmény. A nyomaték változása általában csak kis mértékben befolyásolja a szinkron gép meddő teljesítményét. Ezt a hatást gyakran elhanyagoljuk.

A fenti két eset vizsgálata alapján arra a következtetésre jutunk, hogy
 a meddő teljesítményt a gerjesztőárammal,

a hatásos teljesítményt a tengelyen bevitt nyomatékkal tudjuk változtatni. A két beavatkozás egymástól többé-kevésbé független hatású.

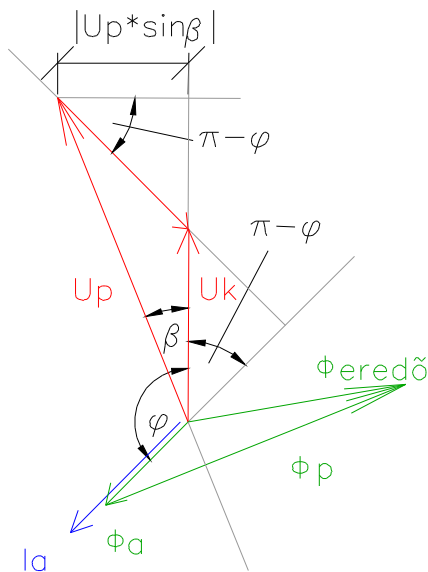
4.6A nyomaték és a teljesítmény

A nyomaték és a villamos teljesítmény számítása az alábbi feltételeken alapszik:

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

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

A vektorábra felhasználásával az alábbi összefüggéseket kapjuk:



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

$$X_d I_a \cos\varphi = U_p \sin \beta$$

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

A teljesítmény:

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

β a *terhelési szög*

Megállapodás szerint:

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

$\beta < 0$ generátoros üzemállapotnak felel meg.

A nyomaték képlete:

$$M = \frac{P_{mech}}{\Omega_0} = \frac{P_{mech}}{\omega_{1/p}} = \frac{3p}{\omega_1} \frac{U_k U_p}{X_d} \sin \beta$$

ahol Ω_0 a forgórész (mechanikai) fordulatszáma.

4.7A szinkron gép stabilitása

A munkapont **stabilis**, ha kis kitérítést követően a gép visszatér eredeti állapotába.

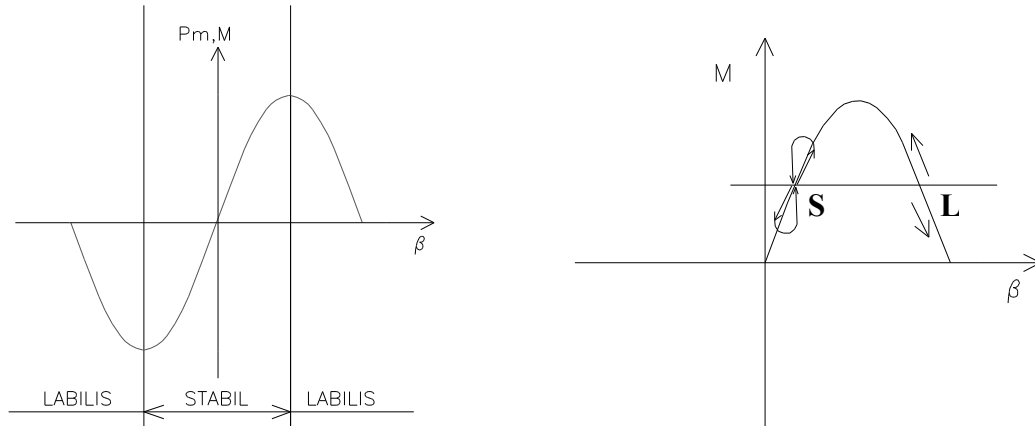
A munkapont **labilis**, ha kis kitérítést követően a gép nem tér vissza eredeti állapotába.

Megkülönböztetünk **statikus** és **dinamikus** stabilitást.

A **statikus stabilitás** lassú változások esetén követelmény. A **dinamikus stabilitást** gyors változások esetén vizsgáljuk.

A jobb oldali ábra S-sel jelölt pontja állandó nyomaték feltételezése esetén statikusan stabil, mivel kis nyomatékváltozást követően a gép visszatér az eredeti munkapontba. Könnyű belátni, hogy az L-lel jelölt munkapont statikus labilis.

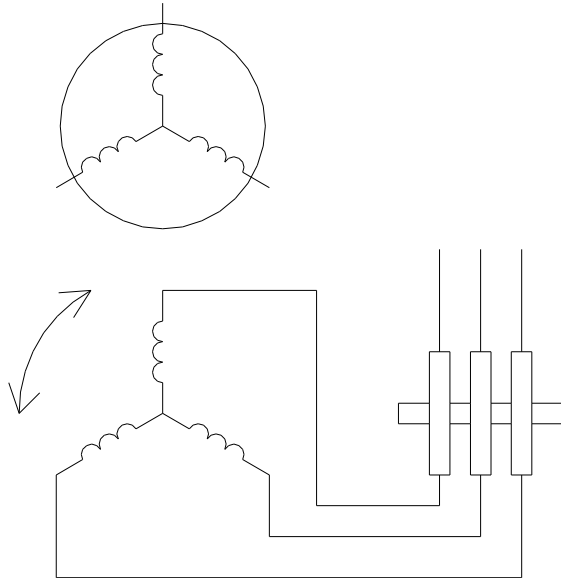
A bal oldali ábráról leolvasható, hogy a statikus stabilitás (elvi) határa $\beta = \pm 90^\circ$



Bizonyítás nélkül közöljük, hogy a dinamikus stabilitás határa mindig nagyobb, mint a statikus stabilitás határa, mivel a gyors változásokat a szinkron gép "jobban bírja". A dinamikus stabilitás számszerű értéke függ a munkaponttól is.

5. Aszinkron gépek

5.1 Az indukciós szabályzó



Állórész jellegzetességei:
 általában háromfázisú
 (ezt vizsgáljuk)
 de: lehet egyfázisú is.

Forgórész jellegzetességei:
 nyugalomban van,
 de: elforgatható
 csúszógyűrűkhöz csatlakozó kapcsai
 nyitottak

a) A forgórészen indukált feszültség amplitúdója

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1i}}{U_{2i}} = \frac{\xi_1 N_1}{\xi_2 N_2} = n_n$$

A feszültségekényszer miatt itt is érvényes a **gerjesztések egyensúlyának törvénye**.

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

Az álló- és forgórész fázisszám, m_s és m_r eltérő is lehet. Az alapharmonikusra vonatkozó gerjesztés-egyenlet:

$$\frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_1 + \frac{m_2}{2} \xi_2 N_2 \bar{I}_2 = \frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_1$$

$$\bar{I}_1 + \frac{m_2 \xi_2 N_1}{m_1 \xi_1 N_1} \bar{I}_2 = \bar{I}_m$$

$$n_l = \frac{m_1 \xi_1 N_1}{m_2 \xi_2 N_2}$$

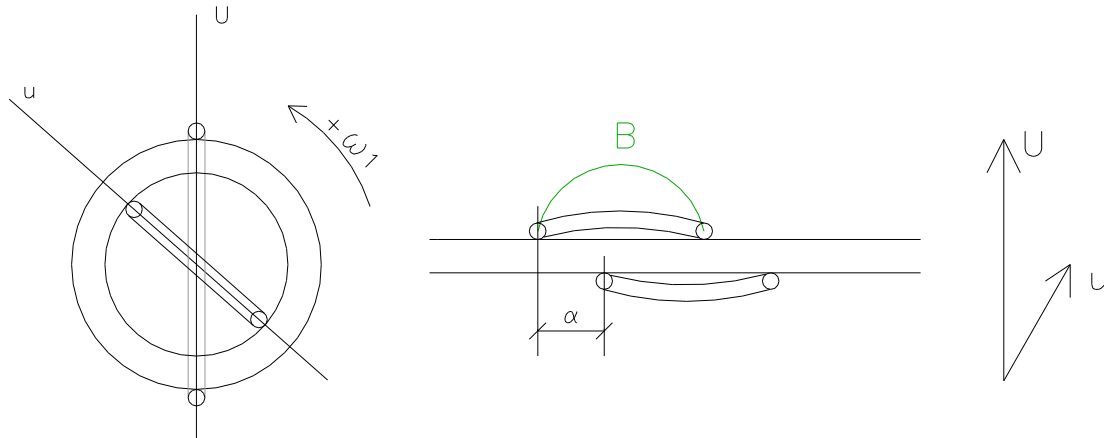
Az impedanciák átszámítása:

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

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

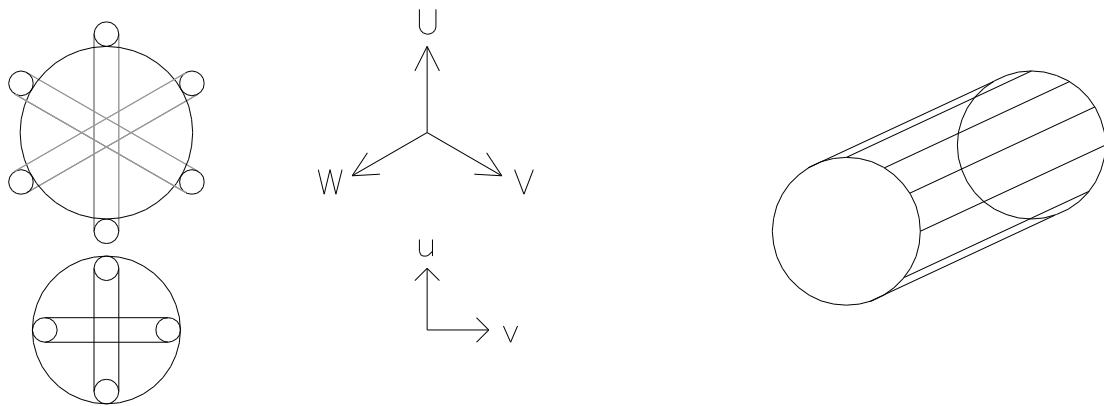
b) A forgórészen indukált feszültség fázishelyzete

Egyfázisú indukciós szabályzó esetén a forgórész-feszültség vektorának fáziseltérése az állórészfeszültség vektorához viszonyítva a forgórész elfordulási szögével arányos. Háromfázisú indukciós szabályzó esetén a forgórész-feszültség vektora egybeesik az állórész-feszültség vektorával, nem függ a forgórész szöghelyzetétől. A forgórész-feszültség nagysága függ a forgórész szöghelyzetétől.

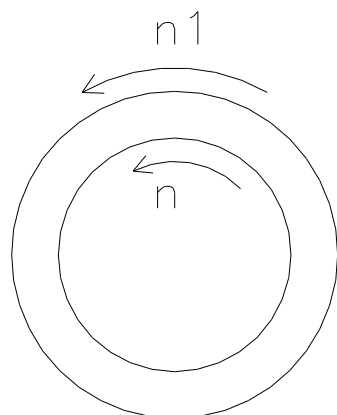


c) A forgórészen indukált feszültség fázisszáma

Forgórész fázisszáma tetszőleges, ezért a forgórész lehet *kalickás* és *tekerceslt* (csúszógyűrűs) kivételű is.



d) A forgórészen indukált feszültség frekvenciája



n_1 = állórészmező fordulatszáma

n = forgórész fordulatszáma

$n_2 = n_1 - n =$ forgórészmező

fordulatszáma a forgórészhez képest

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

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_2 p}{n_1 p} = \frac{n_2}{n_1} = s \Rightarrow f_2 = s f_1, \text{ szlipfrekvencia}$$

Tehát a forgórész-feszültség frekvenciáját a *szlip*, magyar nevén *csúszás* határozza meg. Ezért a forgórészmenyiségek frekvenciáját *szlipfrekvenciának* is szokás nevezni.

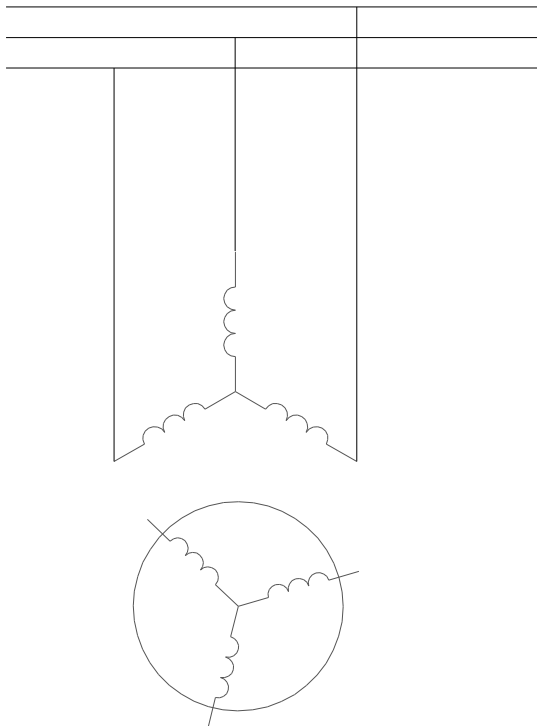
Példa:

S	f_2 , Hz	n, ford/perc	p = 1
1	50 Hz	0	
0	0	3000	

5.2 Az aszinkron gép működése

Egyszerű, robusztus kivitel.

A forgórész üzemszerűen rövidrezárt mind *kalickás*, mind pedig *csúszógyűrűs* kivitel esetén.



A működés feltételele: $M_{vill} = M_{terh}$

Ez szinkron fordulatszámom nem teljesülhet, hiszen ekkor nincs "erővonal metszés", **csak** a szinkrontól eltérő fordulatszámokon. Ezért nevezzük ezeket a gépeket **aszinkron gépeknek**.

Példa: legyen p = 1

$$n_1 = \frac{f_1}{p} = 50/s = 3000/\text{perc}$$

$n < n_1$ esetén

$$n = n_1 (1-s) = 2940/\text{perc}$$

$$s = 2\%$$

$$n_2 = sn_1 = 60/\text{perc}$$

$$f_2 = pn_2 = 60/\text{perc} = 1 \text{ Hz}$$

5.3A helyettesítő kapcsolás

Célunk, hogy a helyettesítés kapcsolás nyugvó áramkör legyen, tehát valamilyen módon "ki kell iktatni a forgást".

A forgórészen indukált feszültség a már ismert módon számítható:

$$U_{i2} = 4,44 f_2 \xi_2 N_2 \Phi_m = s 4,44 f_1 \xi_2 N_2 \Phi_m$$

U_{2r} á lló helyzetben

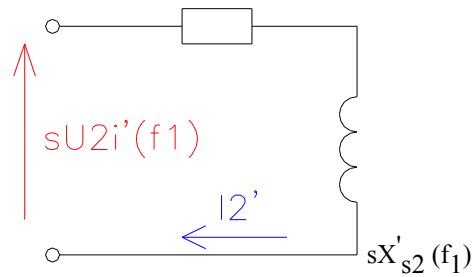
$$U_{s2}(s) = s U_{2i}(f_1)$$

$$R_2 = \text{áll}$$

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

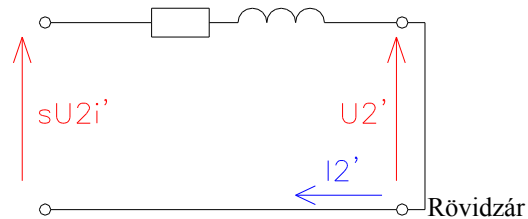
Jelölés: $U_{2i}(f_1) = U_{2i}$

$$X_{s2}(f_1) = X_{s2}$$



A feszültségegyenlet 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
 \Rightarrow a forgórészáramok az állórészről nézve MINDIG 50 Hz frekvenciájúnak látszanak. Más szóval az aszinkron gép “elvégzi” az

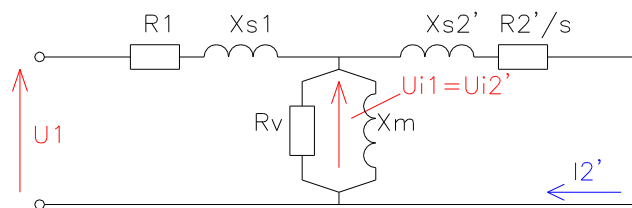
$$f_2 \rightarrow f_1 = \frac{f_2}{s} \quad \text{frekvenciatranszformációt.}$$

Az abszolút értékekre nézve:

$$\bar{U}'_{2i} + \frac{R_2}{s} \bar{I}'_2 + j X'_{s2} \bar{I}'_2 = 0$$

$$\bar{U}'_{2i} = \bar{U}_{1i}$$

Most már összeköthető a primer és a szekunder oldal a helyettesítő kapcsolásban:



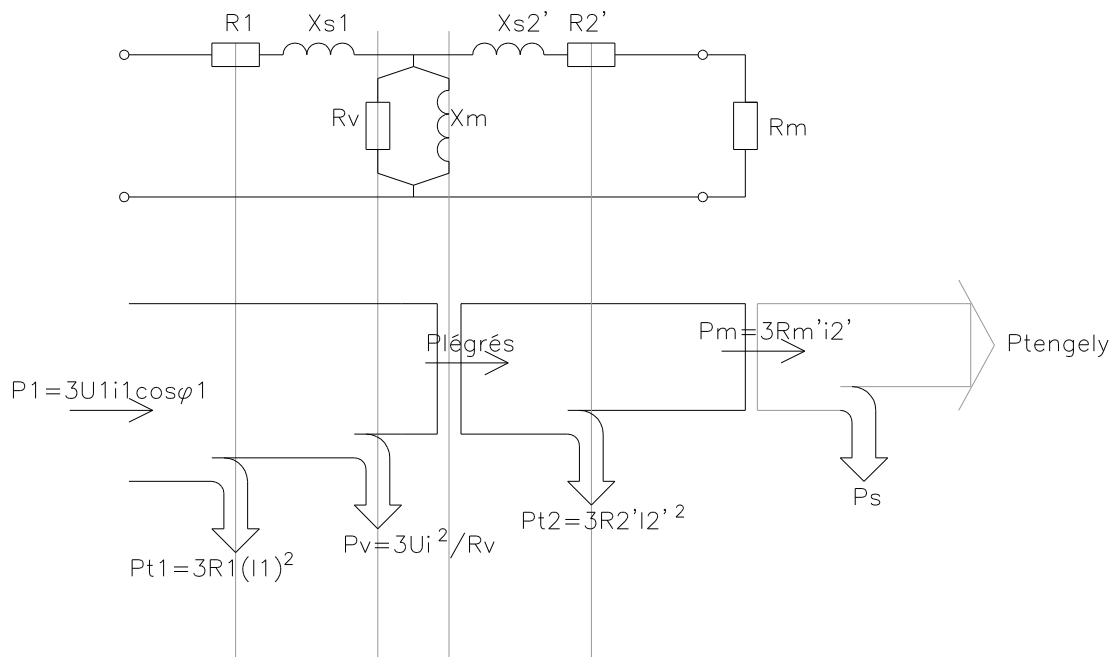
ahol $\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \frac{1-s}{s} = R'_2 + R'_m$

R'_m a „mechanikai ellenállás”, a tengelyen leadott teljesítményt képviseli.

R'_2 forgórész tekercsveszteséget képviseli.

5.4 Az energiamérleg

$f_2 \approx 0$ miatt $P_{\text{vas}2} \approx 0$, vagyis normál üzemi viszonyok között a forgórész vasvesztéséget elhanyagoljuk. Vigyázzunk: ez nem mindig tehető meg!



A légrésen átadott teljesítmény (légrésteljesítmény):

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

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

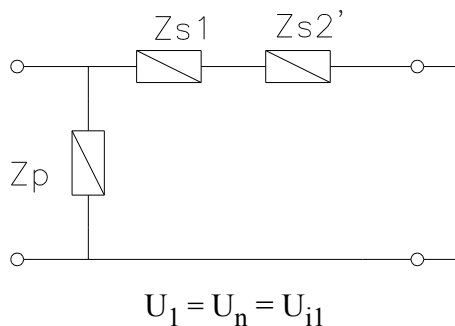
$$P_{t2} = 0 \text{ esetén nincs } P_l \Rightarrow \text{nincs } M$$

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

A tengelyen levehető nyomaték:

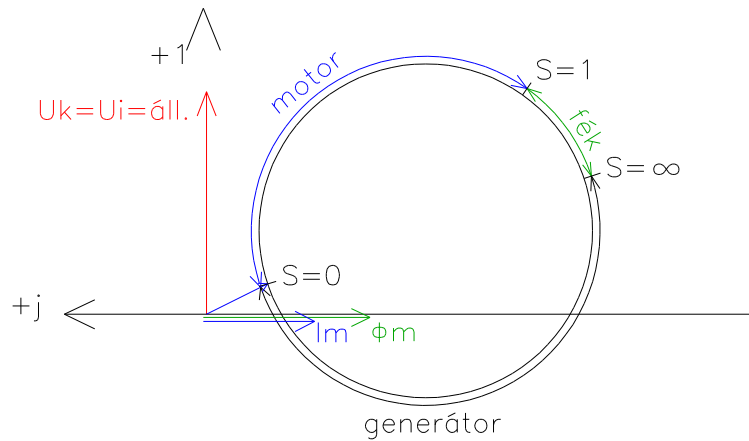
$$M = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{(1-s) P_l}{(1-s) \Omega_0} = \frac{P_l}{\omega_1/p} = p \frac{P_l}{\omega_1} = \frac{3}{\Omega_0} \frac{R_2'}{s} I_2'^2$$

Az egyszerűsített helyettesítő vázlat a transzformátorokéhoz hasonló:



5.5A kördiagram

Az aszinkron gép állórész-áram végpontja egy, a komplex síkon felrajzolt körön helyezkedik el. Az állórész-feszültség vektora a pozitív valós tengely irányába mutat, és állandó értékű.



Megjegyzések:

1. A kördiagramon jól megkülönböztethetők az aszinkron gép üzemmódjai:

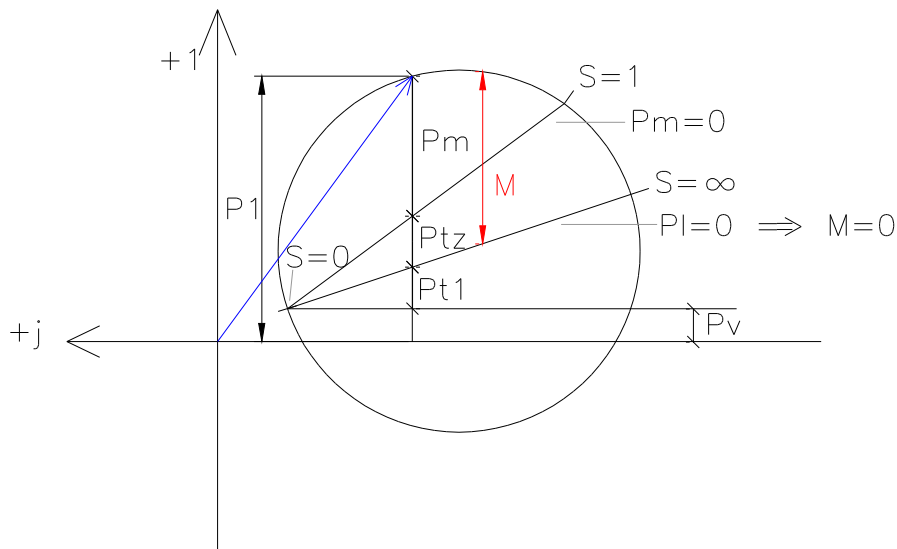
$0 < s < 1$ motor

$s < 0$ generátor

$s > 1$ fék

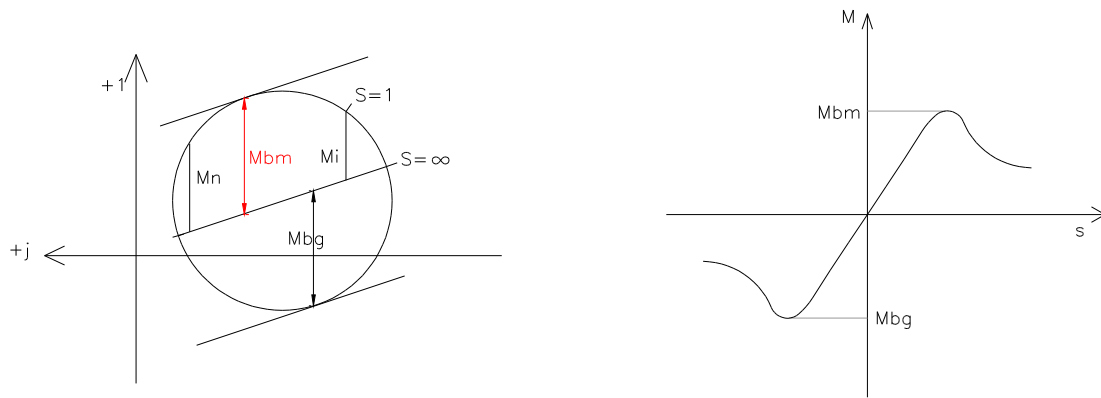
2. Az áram mindig késik a feszültséghez képest, mivel a gép mágnesező áramát – a transzformátorokhoz hasonlóan – mindig a hálózat fedezi.

3. Teljesítmények a kördiagramban:



5.6A nyomatéki görbe

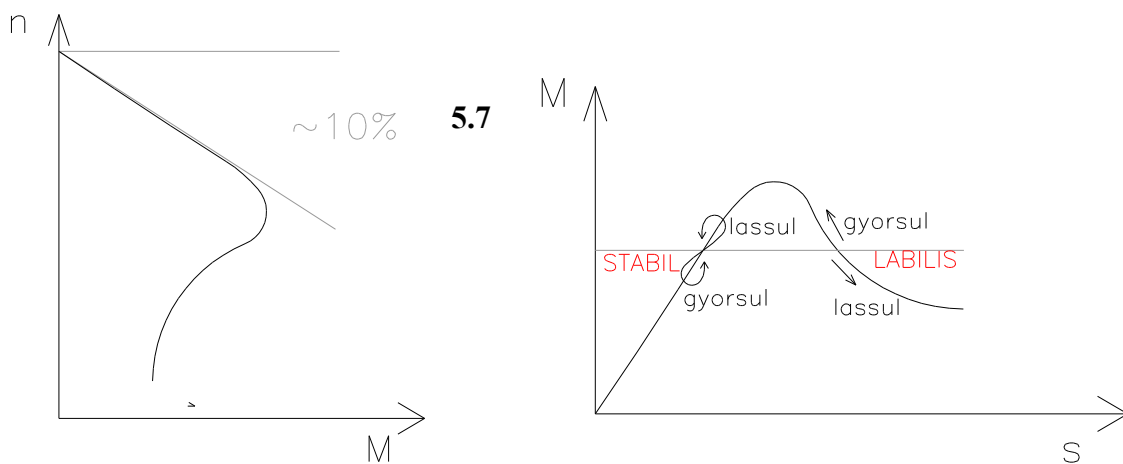
A nyomatéki görbe például a kördiagram alapján is megszerkeszthető. A szerkesztés vázlatos lépései láthatók az alábbi ábrán.



A 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 alábbi bal oldali 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 fordulatszám-tartó: üresjárástól (szinkron fordulatszám-tól) a névleges terhelésig a gép fordulatszáma csupán néhány százalékkal csökken.

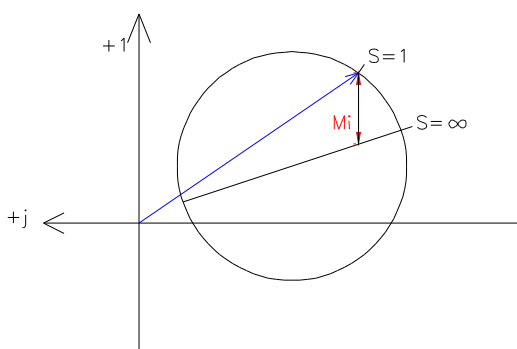
A jobb oldali ábra a *statikusan stabilis* és *labilis* tartományokat mutatja. A stabilitásvizsgálat teljesen hasonló a szinkron gépeknél bemutatottal. Az ábráról leolvasható, hogy az aszinkron gép *statikusan stabilis*, ha a szlip nem nagyobb a billenőnyomatékhoz tartozó *billenőszlipnél*, és *statikusan labilis*, ha a szlip nagyobb, mint a billenőszlip.



Üzemi viszonyok

5.7.1 Indítás

A. Probléma



I_i az indítási áram nagy;

M_i az indítónyomaték kicsi.

B. Közvetlen indítás

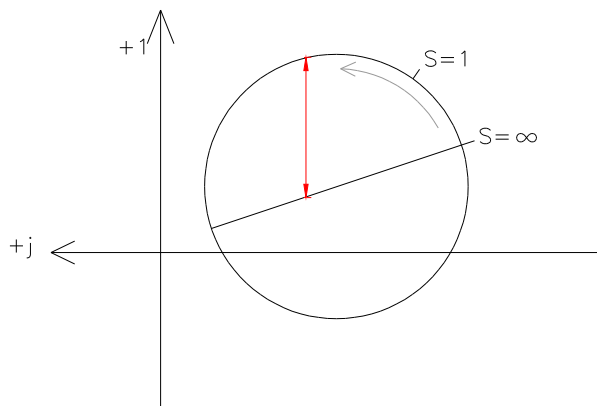
függ: hajtástól

a hálózat erősségétől

C. Közvetett mód

I. Csúszógyűrűs gépek esetén

Ha a forgórészbe ellenállásokat iktatunk, akkor „két legyet ütünk egy csapásra”: lecsökken az indítási áram, és megnő az indítónyomaték. A beiktatandó ellenállás értékének számítását az alábbi összefüggések mutatják:



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

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

$$s^* = 1$$

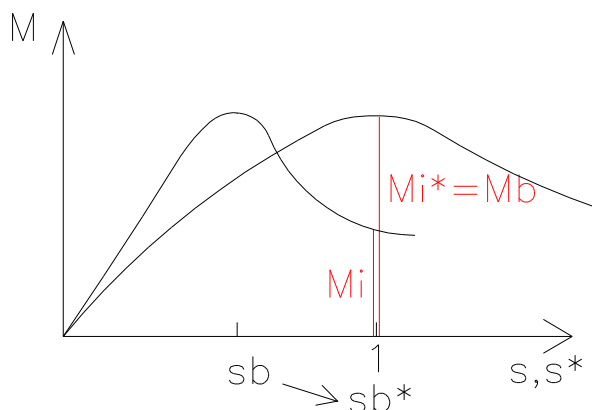
$$\frac{R_2}{s_b} = \frac{R_2 + R_k}{1}$$

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

A billenőszlip általában $s_b \sim 0,2=20\%$ körüli, így közelítőleg $R_k = \frac{1-0,2}{0,2} R_2 = 4R_2$

ellenállást kell a forgórész körbe beiktatni.

Az ellenállás beiktatása módosítja a nyomatéki görbét:



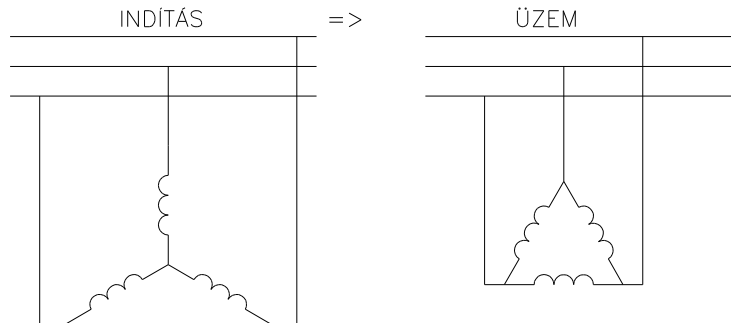
Az indítónyomaték **nő**

és

a billenő nyomaték **állandó**.

II. Kalickás gépek esetén

a) Csillag–delta indítás



$$\frac{I_{v,y}}{I_{v,\Delta}} = \frac{I_{f,y}}{\sqrt{3} I_{f,\Delta}} = \frac{U_{f,y}/Z}{\sqrt{3} (U_{fD}/Z)} = \frac{\frac{U_{vy}}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z}}{\sqrt{3} U_{fD}/Z} = \frac{1}{3}$$

$$I_{v,y} = \frac{1}{3} I_{v,\Delta} \quad \text{a HÁLÓZATBAN}$$

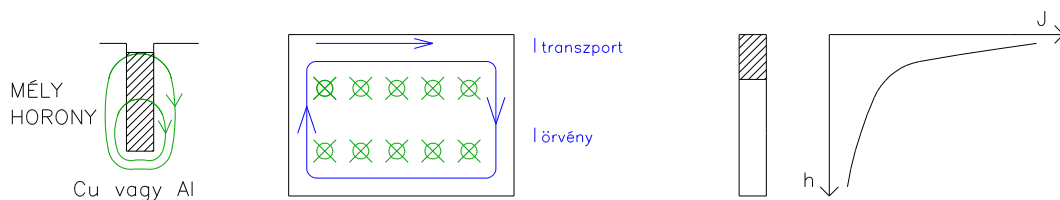
$$I_{f,y} |_{motor} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{f,\Delta} \quad \text{a MOTORBAN}$$

$$M_{i,y} = \frac{1}{3} M_{i,\Delta}$$

Tehát ez az indítási mód alkalmas az indítóáram csökkentésére. Ennek ára azonban kis indítónyomaték, ami sok gyakorlati esetben kedvezőtlen következmény.

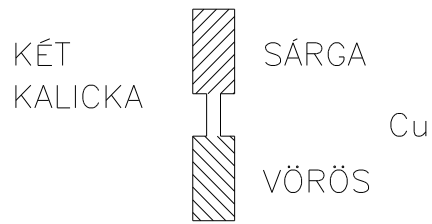
b) Áramkiszorításos forgórész

Az indítási viszonyok kedvezőbbé tételére felhasználható az *áramkiszorítás* jelensége. Az 50 Hz frekvenciájú indítási áram a nagyméretű vezető külső, nagyobb sugáron elhelyezkedő részébe „szorul”. Ezáltal a forgórész ellenállása növekszik, szórási reaktanciája pedig csökken. Így az indítási áram csökken, az indítónyomaték pedig elegendően nagy lesz.



c) Mélyhornyú forgórészű gép

Az áramkiszorításos forgórészű géphez hasonlóan működik: indításkor a forgórészáram a nagyobb fajlagos ellenállású külső kalickába szorul ki. Üzemszerűen a szlipfrekvenciájú forgórészáram a kis fajlagos ellenállású belső kalicka rúdjaiban folyik.



5.7.2A fordulatszám változtatása

Az aszinkron gép fordulatszámának változtatását az alábbi összefüggés alapján tudjuk megvalósítani:

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{f_1}{p} (1 - s)$$

Tehát az alábbi módszerek jöhetnek szóba:

1. Az f_1 primer frekvencia változtatása félvezetős áramirányítóval;
2. Az s szlip, illetőleg a szlipfrekvencia változtatása: kaszkád kapcsolásokkal;
3. A p pólusszám változtatása: pólusszámváltó gépekkel.

6. Egyenáramú gépek

6.1A feladat kitűzése

Feladat: Készítsünk olyan szinkron gépet, amelyre minden üzemállapotban teljesül, hogy az armaturamező merőleges a pólusmezőre:

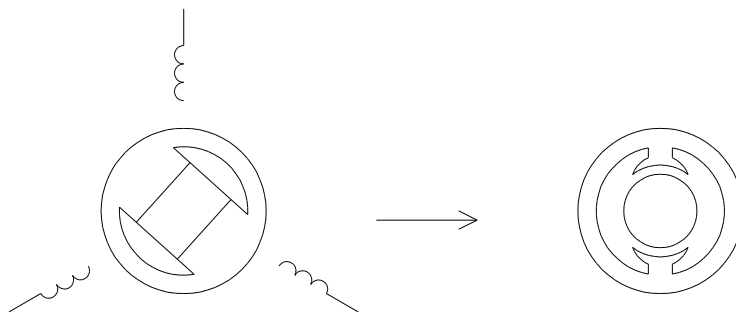
$$B_a \perp B_p$$

Ekkor: az előírt nyomatékot minimális armatura-áram mellett érhetjük el.

Ehhez: „Fordítsuk ki” a gépet!

Póluskerék → állórészre kerül;

Armatura → forgórészre kerül.



Ekkor: Állórész-mező: állandó

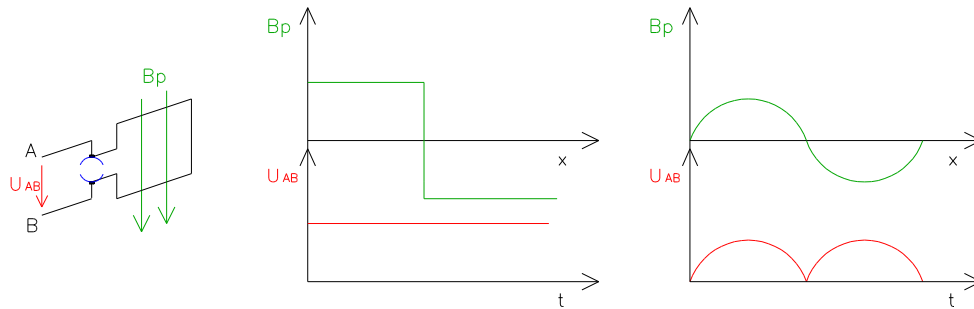
Forgórészmező: úgyszintén legyen állandó az állórész felől nézve.

De: Heteropoláris elrendezés miatt armaturában váltakozó feszültség indukálódik

váltakozó áram által keltett mágneses teret meg kell állítani.

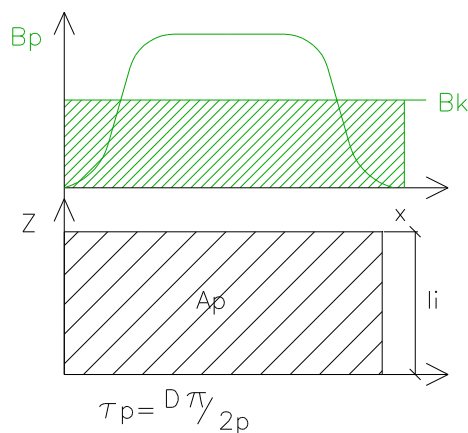
Ezt a feladatot végzi el a *kommutátor*.

A kommutátor elvi, egyszerűsített változata látható a bal oldali ábrán. Az ábrán egyetlen menetet, és a hozzá csatlakozó két fél csúszógyűrűt, valamint a csúszógyűrűkkel érintkező rögzített keféket rajzoltuk fel. A középső ábra felső része mutatja a mágneses indukció térbeli eloszlását négyszög-hullám, míg a jobb oldali ábra felső része szinuszos mezőeloszlás esetén. A középső és a jobb oldali ábra alsó részén az A–B pontok között levehető egyenirányított indukált feszültség jelalakja látható. A menetszám növelésével, és az egyes menetek sorba kapcsolásával az indukált feszültség nagysága növekszik, hullámossága pedig csökken.



6.2 Az indukált feszültség számítása

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



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

v: az armatura kerületi sebessége

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

z: az összes sorbakötött vezető száma

2a: a párhuzamos ágak száma

$$U_i = \frac{z}{2a} B_k l_i D\pi n = \frac{z}{2a} B_k \cdot A_p \cdot 2p \cdot n =$$

$$A_p = \tau_p \cdot l_i = \frac{D\pi}{2p} \cdot l_i$$

$$= \frac{z}{2a} B_k \cdot A_p \cdot 2p \cdot n =$$

$$D\pi \cdot l_i = A_p (2p)$$

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

$$\boxed{U_i = k_U \cdot \Phi_a \cdot n}$$

Tehát az indukált feszültség egyenesen arányos az armaturfluxussal (lineáris esetben a gerjesztő árammal is), valamint a forgórész fordulatszámaival.

6.3A nyomaték számítása:

A nyomaték számításához először kiszámítjuk az egyetlen tekercsoldalra ható erőt a közismert képlet segítségével:

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

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

$$\begin{aligned} M &= z \cdot \frac{D}{2} \cdot F_1 = z \frac{D}{2} \cdot B_k \cdot l_i \cdot \frac{I_a}{2a} = \\ &= z \frac{D\pi}{2\pi} l_i \cdot B_k \frac{I_a}{2a} = \\ &= \frac{z}{2\pi} \cdot \frac{1}{2a} \cdot A_p (2p) \cdot B_k \cdot I_a = \\ &= \frac{z}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot \Phi_a \cdot I_a \end{aligned}$$

$$M = k_M \cdot \Phi_a \cdot I_a$$

Tehát a nyomaték arányos az armaturafluxussal (lineáris esetben a gerjesztő árammal is), valamint az armaturaárammal.

Az arányossági tényezőt másképp felírva kapjuk meg az egyenáramú gépek indukált feszültségét és nyomatékát meghatározó összefüggéseket:

$$U_i = \frac{k_M}{2\pi} \cdot \Phi_a \cdot \omega$$

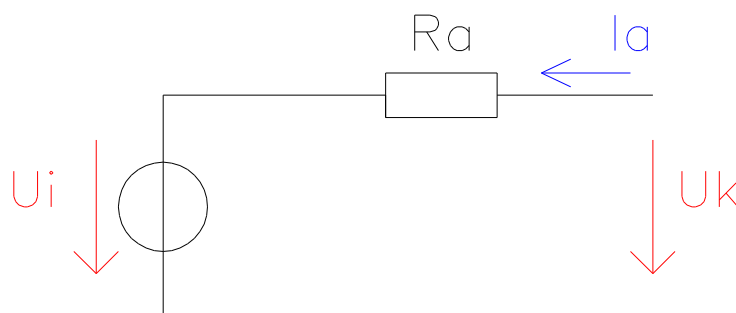
↓

$$U_i = k \cdot \Phi_a \cdot \omega$$

$$M = k \cdot \Phi_a \cdot I_a$$

6.4A helyettesítő kapcsolás

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:

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

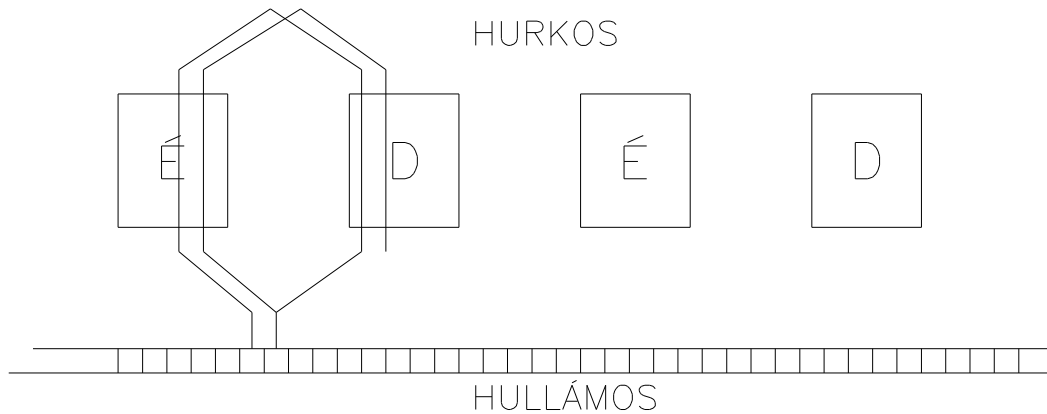
A különbség annyi, hogy motoros üzemállapotban a kapocsfeszültség nagyobb, mint az indukált feszültség, míg generátoros üzemállapotban fordított a helyzet.

6.5 Tekerceslések

Az egyenáramú gépek tekerceslései mindig zártak, hornyokban vannak elhelyezve, kétrétegesek és általában húrosak.

6.5.1 Alaptípusok:

A) Hurkos tekerceslés



A tekerceslés jellemzői: a horonylépésben kifejezett tekercesszélesség, y_h , a horonyszám, Z , az egy rétegben elhelyezett tekercesoldalok száma, u , az tekercesoldalokban kifejezett tekercesszélesség, y_1 , a tekercesoldalokban kifejezett kapcsolási lépés, y_2 , a kommutátorlépés, K , a tekercesoldalokban kifejezett eredő tekerceslési lépés, y , valamint a lépésrövidítési tényező, ε . Ezekkel:

$$y_n = \frac{Z}{2p} + \varepsilon$$

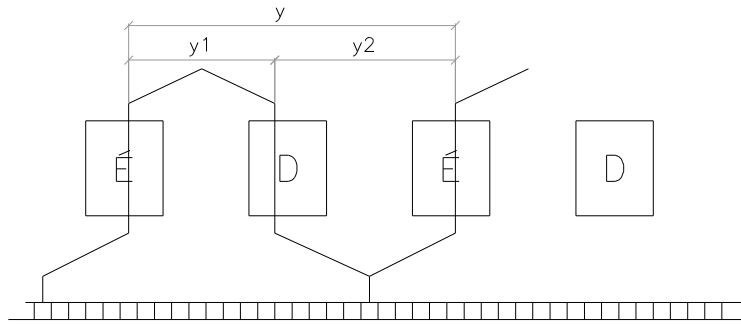
$$y_1 = u \cdot y_n$$

$$y_2 = y_1 - 1$$

$$y = y_2 - y_1 = 1 = y_k$$

$$K = 1$$

B) Hullámos tekerceslés



Az fentebb megismert tekercselési jellemzőkkel:

$$p \cdot y = K - 1$$

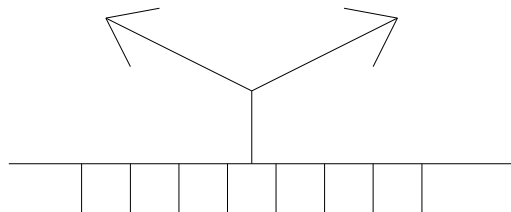
$$y = \frac{K-1}{p}, \quad K = uZ$$

$$y = \frac{uZ-1}{p} = \text{egész szám}$$

Nyilvánvalóan nem minden (u, Z, p) értékhármásra teljesül, hogy y egész szám.

6.5.2 Párhuzamos ágak

A tekercselés vizsgálata megmutatja, hogy a párhuzamos ágak száma minden esetben legalább 2. Ugyanis, mint az az ábrán is jól látható, egy-egy kommutátorszelethez legalább két tekercsoldal csatlakozik.



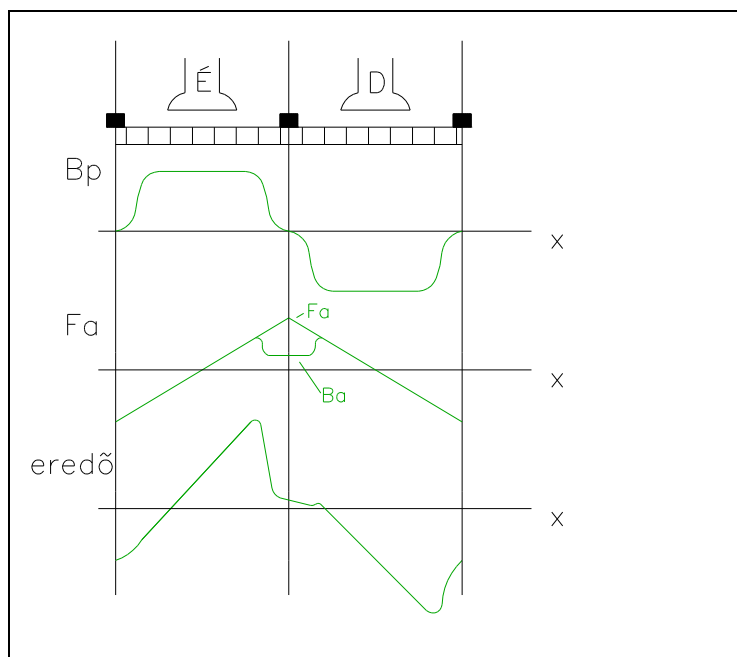
Hurkos tekercselés esetén a párhuzamos ágak száma a pólusszámmal egyezik meg, míg hullámos tekercselés esetén a párhuzamos ágak száma a pólusszámtól függetlenül mindig kettő. Képletszerűen:

$$\text{Hurkos tekercselésre:} \quad 2a = 2p$$

$$\text{Hullámos tekercselésre:} \quad 2a = 2$$

6.6 Az armatura - visszahatás

Az armaturában folyó terhelő áram megváltoztatja a gép légrésében kialakuló mezőeloszlást: az üresjárási pólusmezőhöz hozzáadódik a terhelő áram által keltett mágneses tér.



A pólusok,
a kommutátor és
a kefék.

Üresjárás mezőeloszlás.

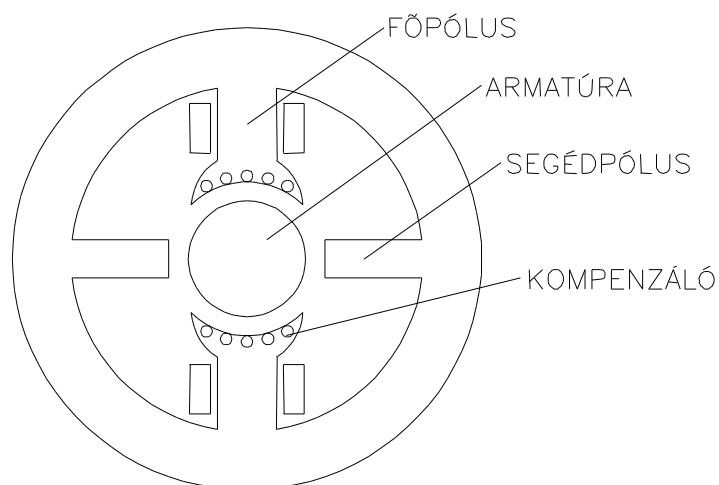
Az armatura gerjesztése, F_a ,
illetve indukciója, B_a .

Az eredő terhelési mezőeloszlás

Látható, hogy a mezőeloszlás erősen inhomogénné válik, valamint a maximális indukció jelentősen megnő. Mindkét körülmény kedvezőtlenül befolyásolja a kommutációt, ezért gondoskodni kell az armaturareakció káros hatásai csökkentéséről. Erre szolgálnak a *segédpólusok*, melyeket minden esetben, illetve a *kompenzáló tekercselés*, amelyet csak erősen igénybe vett gépekben alkalmazunk.

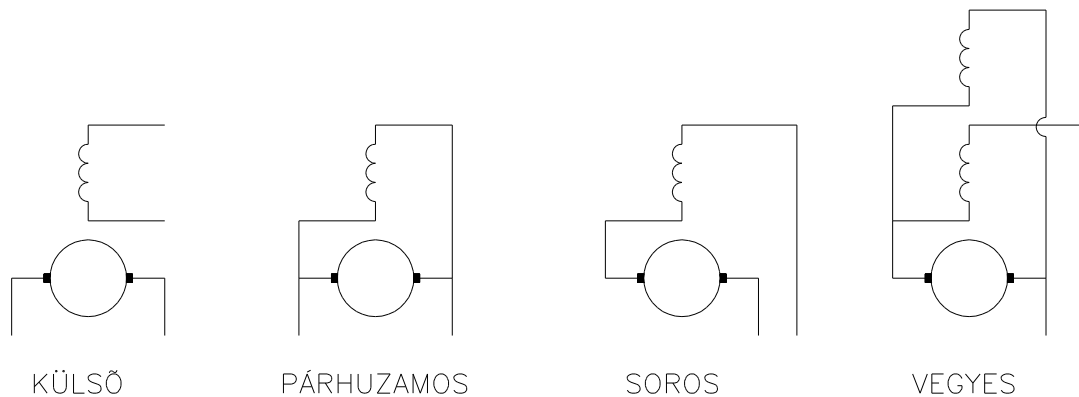
6.7 Felépítés

Az egyenáramú gépek az alábbi, az ábrán látható módon elhelyezett tekercselésekkel vannak ellátva. A főpólustekercs a főpólusokon, a segédpólustekercs a *semleges zónában* elhelyezett segédpólusokon, az armaturetekercs a forgórész hornyaiban, míg (szükség esetén) a kompenzáló tekercs a főpólussaru hornyaiban található.



6.8 Kapcsolások (gerjesztési módok)

Az egyenáramú gépek gerjesztő tekercseit többféleképpen is kapcsolhatjuk. *Külső gerjesztés* esetén a gerjesztő tekercset független áramforrás táplálja. *Párhuzamos* vagy *sönt* gerjesztés esetén a gerjesztő tekercs az armatura tekercsel párhuzamosan, *soros* gerjesztés esetén az armatura tekercsel sorosan kapcsolva. *Vegyes* gerjesztés esetén a gép sönt és soros tekercsel 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).



6.9 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.

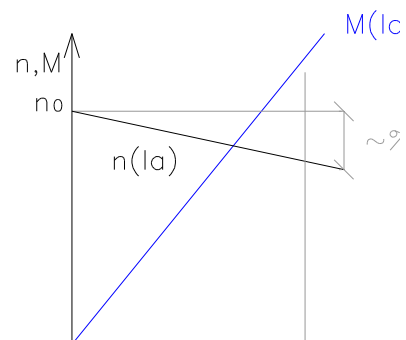
- a) Sebességi jelleggörbe

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

$$n = \frac{U_k - I_a R_a}{k_n \Phi} = \frac{U_k}{k_n \Phi} - \frac{R_a}{k_n \Phi} I_a = n(I_a)$$

- b) Nyomatéki jelleggörbe

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



c) Mechanikai jelleggörbe

$$n = \frac{U_k - R_a I_a}{k_n \Phi} \quad I_a = \frac{M}{k_n \Phi_a}$$

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

A képlet jól mutatja, hogy a fordulatszám a kapcsolófeszültség és az armaturaellenállás lineáris, és a fluxus inverz függvénye.

