1. A transzformátor működési elve, felépítése, helyettesítő kapcsolása

(működési elv, indukált feszültség, áttétel, felépítés, vasmag, tekercsek, helyettesítő kapcsolás és származtatása)

(1. és 2. kérdéshez van vet-en egy 20 oldalas pdf a Transzformátorokról, ide azt írtam le, amit én kiválasztanék belőle a zh-kérdéshez.)

Működési elv

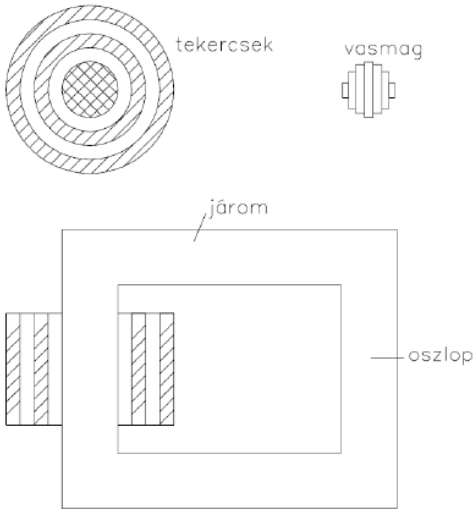
Vasmag: Elősegíti, hogy a mágneses indukciót minél kisebb gerjesztő áram hozza létre. Tereli a fluxusvonalakat. Lemezelt az örvényáramok (vasveszteség) miatt. Kialakításánál kör keresztmetszetet közelítünk (lépcsőzött). Részei a járom és az oszlopok.

Tekercselés: Szoros csatolású egymásba csúsztatott, koncentrikus hengeres kialakítás. Kívül a nagy, belül a kis feszültségű tekercs helyezkedik szigetelési megfontolásokból.

A transzformátor aktív részei a vasmag és a tekercselés.

A frekvencia állandó.

Felépítés



Indukált feszültség:

$$U_i = \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$\mathbf{U_{1i}} = j\omega N_1 \boldsymbol{\phi}_\mathbf{m}$$

$$\mathbf{U_{2i}} = j\omega N_2 \boldsymbol{\phi}_\mathbf{m}$$

$$\frac{\mathbf{U_{i1}}}{\mathbf{U_{i2}}} = \frac{N_1}{N_2} = n = \text{menetszám áttétel}$$

$\omega = 2\pi f$ – hálózati körfrekvencia

N_1 = primer menetszám

N_2 = szekunder menetszám

Φ_m= főmező fluxus

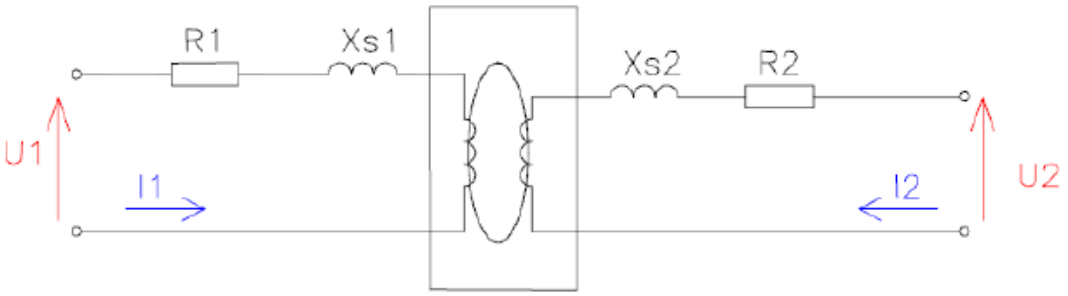
A feszültség áttétel nem egyenlő a menetszám áttétellel.

$$U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} \text{ (csak szinuszos esetben)}$$

$$U_{i,eff} = \frac{2\pi f \phi_m N}{\sqrt{2}} \text{ (indukált feszültség effektív értéke)}$$

Helyettesítő kapcsolás származtatása:
Kölcsönös induktivitást nem tartalmaz. Csak passzív elemek vannak benne a számítás leegyszerűsítése végett. Galvanikus kapcsolat.

Ideális transzformátor:



(középen $\mathbf{U_{i1}}$ illetve $\mathbf{U_{i2}}$ indukált feszültségek)

$$U_{s1} = 2\pi f N_1 \phi_{s1} = 2\pi f \frac{N_1 \phi_{s1} I_1}{I_1} = \omega \frac{\Psi_{s1}}{I_1} I_1 = \omega L_{s1} I_1$$

L_{s1} = szórási induktivitás ($X_{s1} = \omega L_{s1}$ = szórási reaktancia)

Feszültségegyenletek (fogyasztói pozitív irányok figyelembevételével):

$$\mathbf{U_1} = R_1 \mathbf{I_1} + jX_{s1} \mathbf{I_1} + \mathbf{U_{i1}}$$

$$\mathbf{U_2} = R_2 \mathbf{I_2} + jX_{s2} \mathbf{I_2} + \mathbf{U_{i2}}$$

$$\mathbf{u_1} = r_1 \mathbf{i_1} + jx_{s1} \mathbf{i_1} + \mathbf{u_{s1}}$$

$$\mathbf{u_2} = r_2 \mathbf{i_2} + jx_{s2} \mathbf{i_2} + \mathbf{u_{s2}}$$

Relatív egységek:

$$U_1 = \frac{U_1}{U_{1n}}, I_1 = \frac{I_1}{I_{1n}} \text{ (mennyiségek)}$$

$$r_1 = \frac{R_1}{Z_{1n}}, Z_n = \frac{U_n}{I_n}, X_{s1} = \frac{X_{s1}}{Z_{1n}} \text{ (paraméterek)}$$

Ideális transzformátor kiküszöbölése

- **galvanikus kapcsolat:**

$$\phi = NI\lambda_m = \theta\lambda_m$$

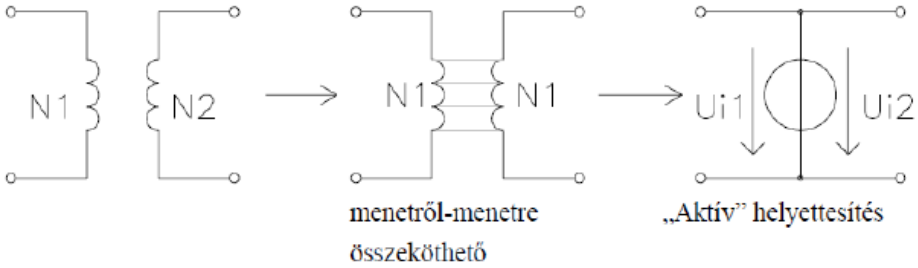
$$\Psi_1 = N_1\phi_m = N_1\lambda_m\theta$$

θ = gerjesztés
Ψ = tekercs fluxus
λ_m = mágneses vezetőképesség

$$\mathbf{U_1} = \text{áll}\,;\ \mathbf{U_{i1}} = \text{áll}\,;\ \phi_m = \text{áll}\,; B = \text{áll}\,;\ \theta = \text{áll}$$

$$N_i I_i = N_i' I_i' \text{ azaz } N_2 I_2 = N_1 \frac{N_2}{N_1} I_2 = N_1 \frac{1}{n} I_2 = N_1 I_2'$$

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



- **teljesítmény:**

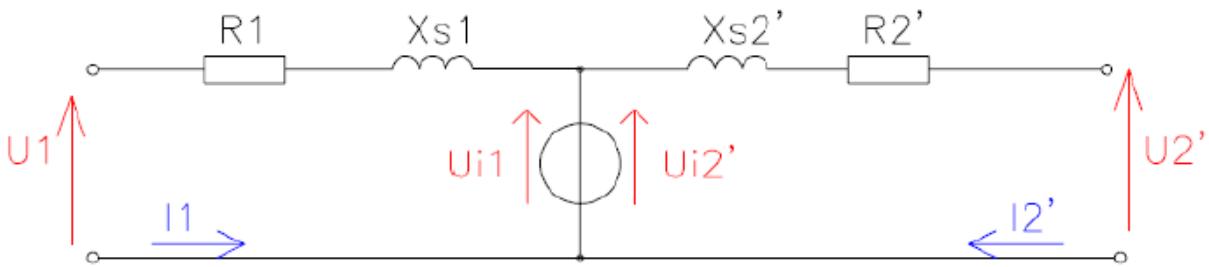
$$S_2 = U_2 I_2 = nU_2 \frac{I_2}{n} = U_2' I_2'$$

$$n = \frac{U_{i1}}{U_{i2}}\ ;\ nU_{i2} = U_{i1} - U_{i2}'$$

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

$$U_2' = nU_2\ ;\ R_2' = n^2 R_2\ ;\ X_{2s}' = n^2 X_{2s}$$

Az aktív helyettesítő kapcsolás (feszültséggenerátor aktív):



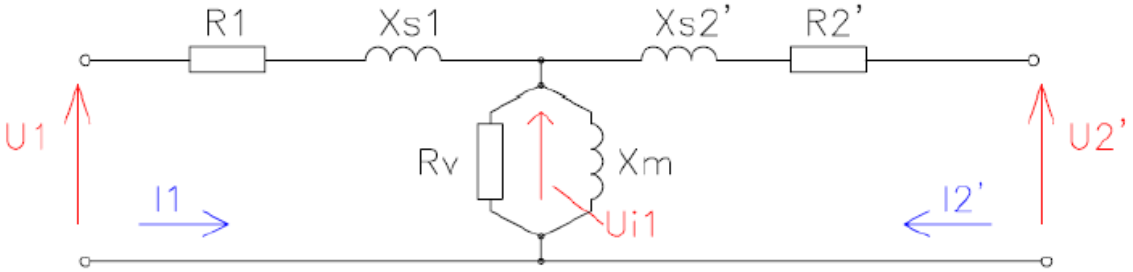
- **feszültséggenerátor kiküszöbölése:**

$$\mathbf{\Psi_m} = N_1\lambda_m(N_1\mathbf{I_1} + N_2\mathbf{I_2}) = N_1\lambda_m(N_1\mathbf{I_1} + N_1\mathbf{I_2'}) = N_1^2\lambda_m(\mathbf{I_1} + \mathbf{I_2'}) = L_m\mathbf{I_m}$$

$$\mathbf{U_1} = j\omega\mathbf{\Psi_m} = j\omega L_m\mathbf{I_m} = X_m\mathbf{I_m}$$

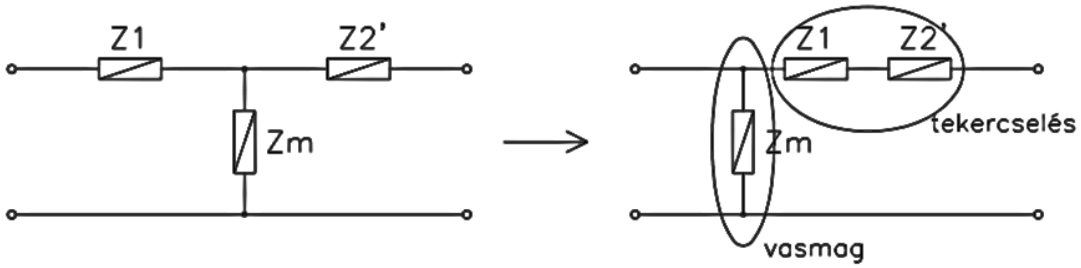
X_m = mágnesező reaktancia (10000 relatív egységben)
R_v = vasveszteség =hiszterézis + örvényáram veszteség (5000-10000 % relatív egységben, elhanyagolható)

A passzív helyettesítő kapcsolás:

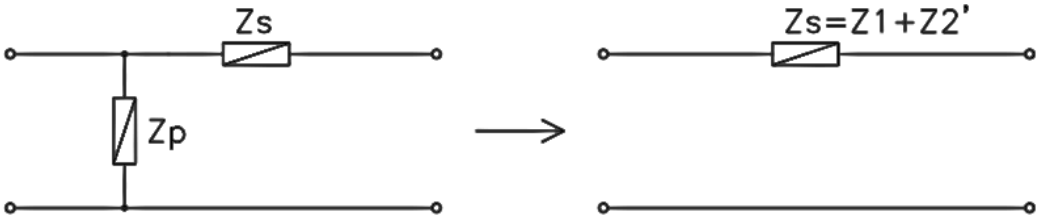


Egyszerűsítések:

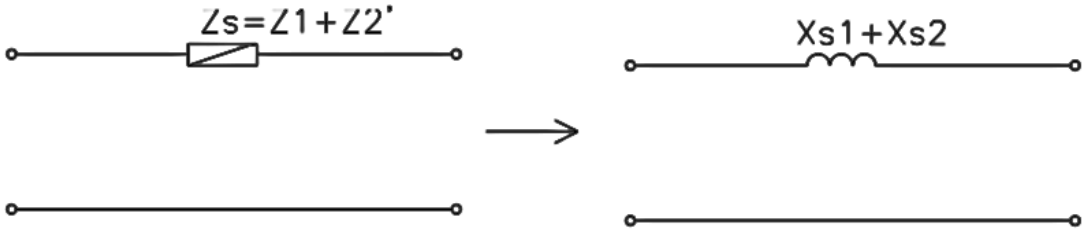
1. $\mathbf{U_i \approx U_{i1}}$



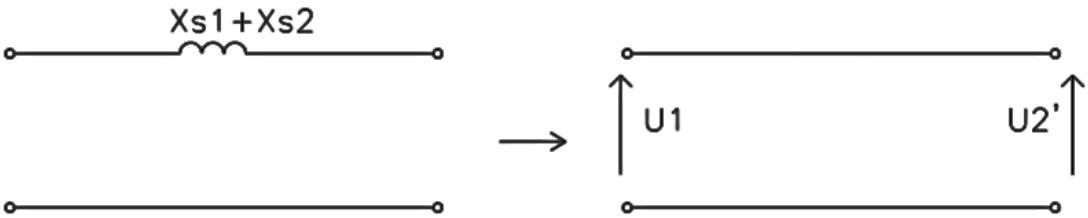
2. $\boldsymbol{Z_p \gg Z_1, Z_2}$



3. $\boldsymbol{r_1 r_2' \ll X_{s1}, X_{s2}'}$



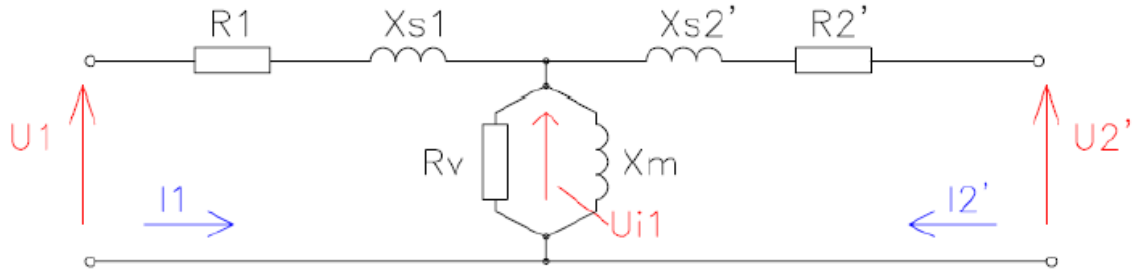
4. **Ideális, veszteség és szórásmentes transzformátor**



2. A transzformátor vektorábrája, üzeme. Háromfázisú transzformátorok.

(Vektorábra, feszültségek, feszültségesések, áramok, főfluxus. A transzformátor feszültség esése, mérési rövidzárlata, dropja,. Háromfázisú transzformátorok felépítése, lehetséges kapcsolásai, kapcsolási csoport jelentése.)

Vektor ábra:

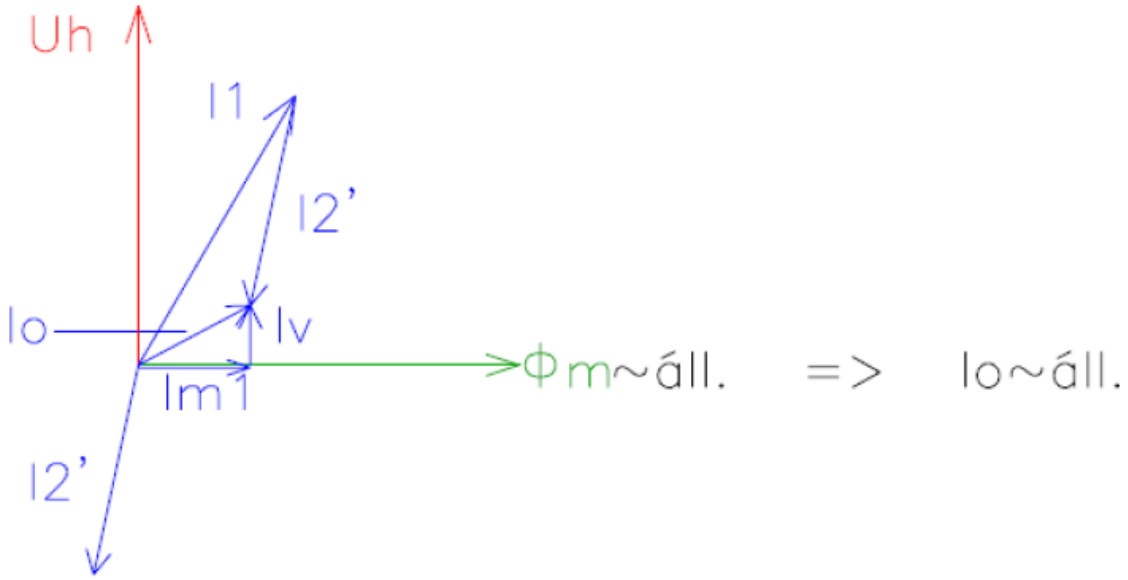


I_1 induktív áram késik a feszültséghez képest.

$$\mathbf{U_i} = \mathbf{U_1} - \mathbf{I_1}R_1 - j\mathbf{I_1}X_{S1}$$

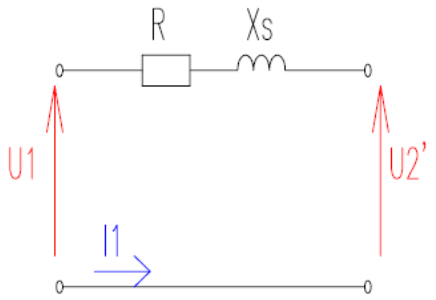
$$\mathbf{U_2'} = \mathbf{U_i} + \mathbf{I_2'}R_2' + j\mathbf{I_2'}X_{S2}'$$

$$\boldsymbol{I_o} = \boldsymbol{I_1} + \boldsymbol{I_2'}$$

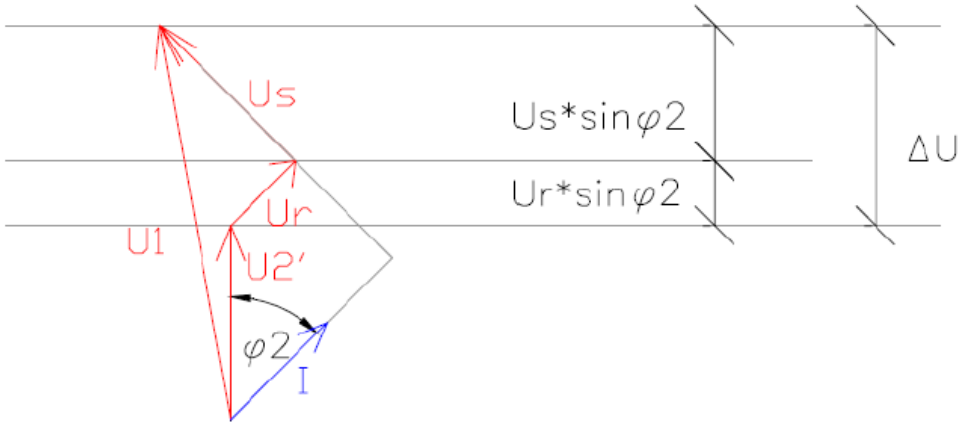


Transzformátor üzeme:

1. feszültség változás (transzformátor, mint feszültségforrás)



$$R = R_1 + R_2' \; ; \; X_s = X_{S1} + X_{S2} \; ; \; I = I_1 = -I_2'$$



$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{U_1} - \mathbf{U_2}$$

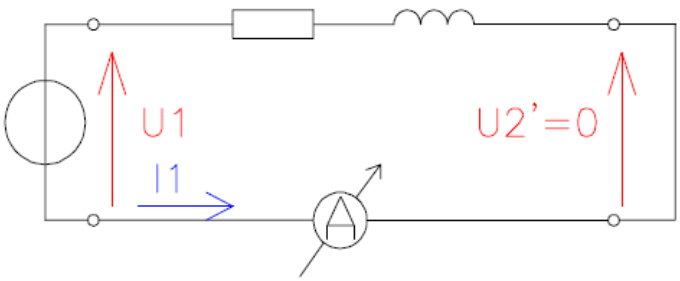
$$\Delta U = \Delta U_S + \Delta U_2 = U_S \sin\varphi + U_R \cos\varphi = I_1 X_S \sin\varphi + I_1 R \cos\varphi$$

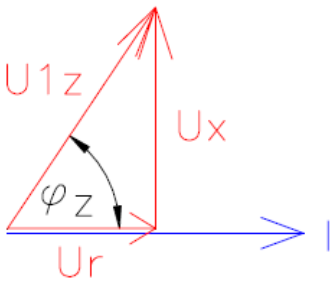
$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{I}{I_n}\left(\frac{X_S}{\frac{U_n}{I_n}}\sin\varphi + \frac{R}{\frac{U_n}{I_n}}\cos\varphi\right)$$

$$\varepsilon = \alpha(\epsilon_S \sin\varphi + \epsilon_R \cos\varphi$$

$\varepsilon < 0$ esetén a feszültség nő – kapacitív
$\varepsilon > 0$ esetén a feszültség csökken – induktív

2. rövid zárlat:





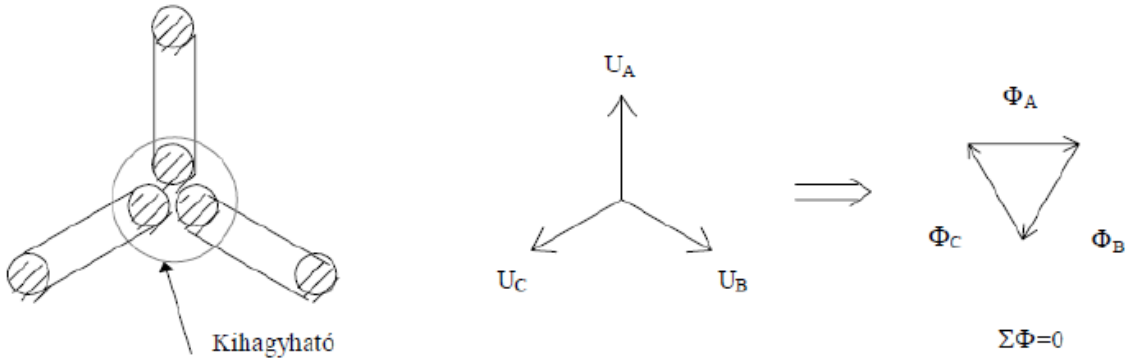
$$\frac{U}{U_{1n}} = \frac{I_{1n}R}{U_{1n}} + j\frac{X_\varepsilon I_{1n}}{U_{1n}}$$

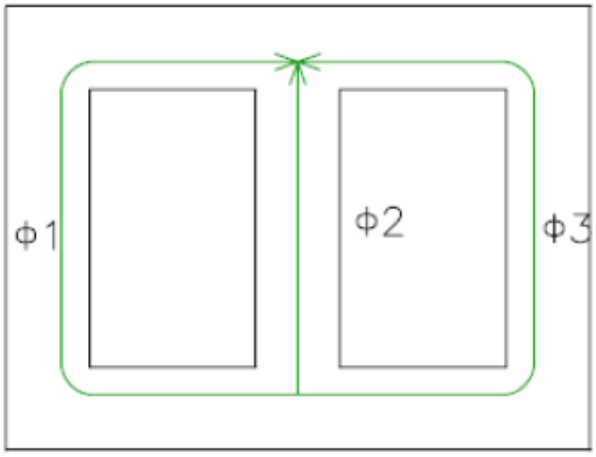
$$\varepsilon = \varepsilon_R + j\varepsilon_s$$

$$|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_S^2}$$

A transzformátor rövidzáras feszültségesését relatív egységben dropnak nevezzük. (5-15 %)

Háromfázisú transzformátorok:





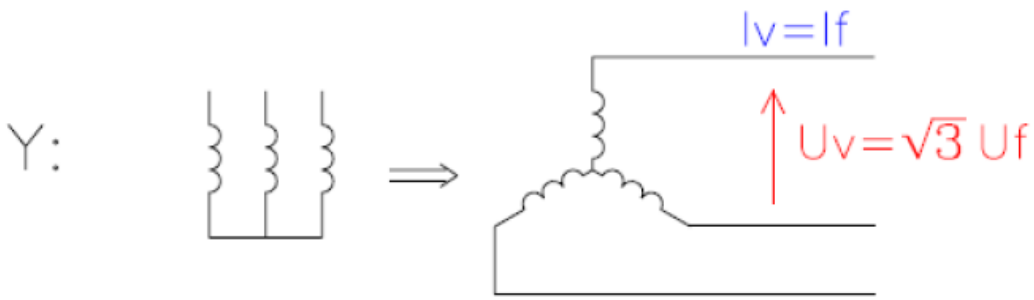
$\Rightarrow F_2 < F_1$, vagy F_3

Háromfázisú transzformátoroknál három egyfázisú egységből indulunk ki. Az elrendezés szimmetrikus, így a fluxusok vektorösszege zérus. A középső oszlop elhagyható, abban nincs fluxus. A magtípusú transzformátor sematikus ábráján jól látható, hogy a középső oszlop rövidebb, így ott kisebb mágnesező áram, vagyis gerjesztés szükséges.

Kapcsolások:

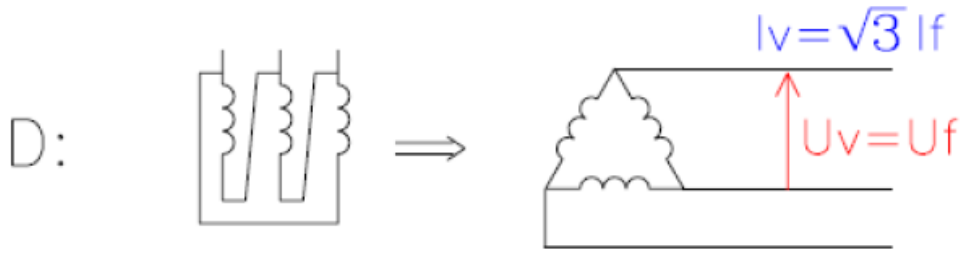
$$P = \sqrt{3}U_v I_v \cos\varphi \text{ avagy } P = 3U_f I_f \cos\varphi$$

- **Csillag (Y) kapcsolás**



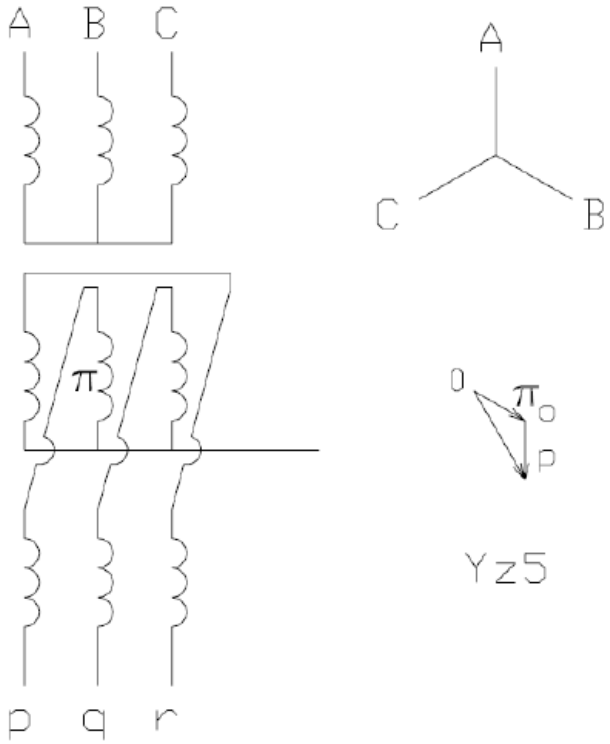
$$P_Y = 3\frac{U_Y}{\sqrt{3}} I_Y \cos\varphi$$

- **Delta (D, △) kapcsolás:**



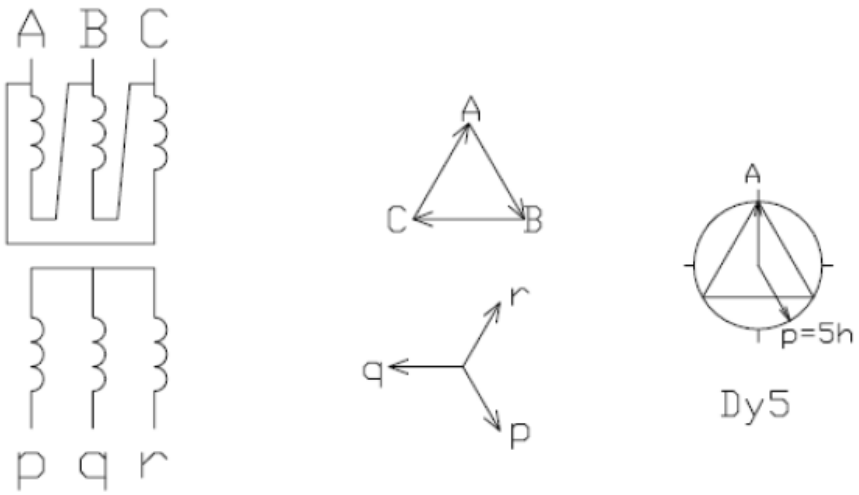
$$P_\Delta = 3U_\Delta \frac{I_\Delta}{\sqrt{3}} \cos\varphi$$

- **Zeg-zug (z) kapcsolás:**



A fázisok közötti egyenlőtlenségek kiegyenlítésére használják.

Fázishelyzet:

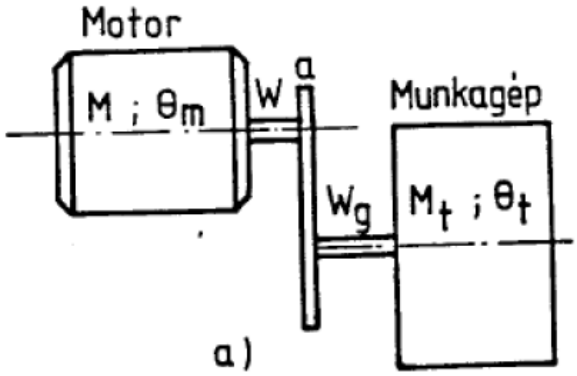


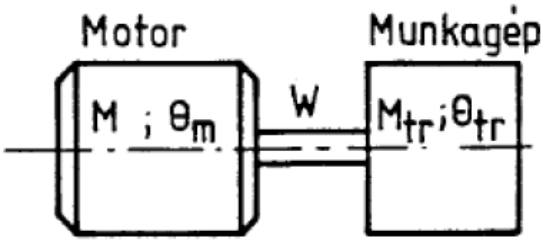
Az ábrán a primeroldal delta, a szekunderoldal pedig csillagkapcsolásban van. (p,q,r, helyett a,b,c kell)
Dy5 jelentése: 150°-ot forgat ez a transzformátor. A fázis pedig 30°-onként forgat.

3. Nyomatékok és tömegek átszámítása közös tengelyre. Villamos hajtások mozgásegyenlete, pozitív irányok.

(Átszámítás a motor tengelyére, fizikai elv, képletek. A szögsebesség és nyomatékok pozitív iránya, a negyedek jelentése a w(M) síkon. Villamos hajtások mozgásegyenlete θ=áll esetén.)

Nyomatékok és tömegek átszámítása közös tengelyre:





M = nyomaték
Θ = tehetetlenségi nyomaték
a = áttétel

$$a = \frac{\omega}{\omega_g} > 1$$

A közös tengelyre hozás a motor tengelyére való átszámítást jelenti.

Fizikai elvek:

- Tehetetlenség változatlan.
- Mozgási energia invíriáns.

Képletek:

Teljesítmény:

$$M_t \omega_g \frac{1}{\eta_a} = \omega \text{ (motoros esetre)}$$

Áttétel veszteség

$$M_{tr} - M_t \frac{\omega_g}{\omega} \frac{1}{\eta_a} = \frac{M_t}{a\eta_a} \text{ (redukált nyomaték)}$$

Mozgási egyenlet:

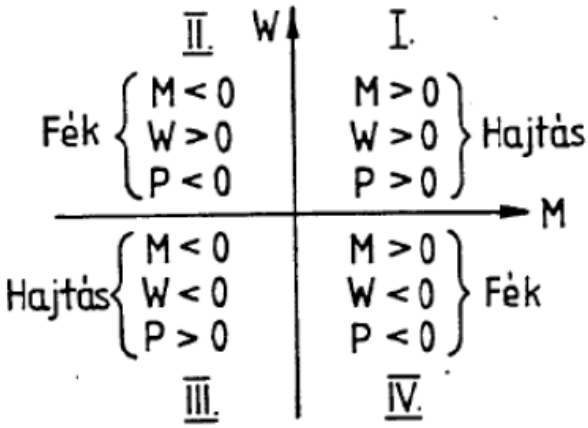
$$\frac{1}{2}\Theta_t \omega_g^2 = \frac{1}{2}\Theta_{tr}\omega^2$$

$$\Theta_{tr} = \Theta_t \left(\frac{\omega_g}{\omega}\right)^2 = \frac{\Theta}{a^2}$$

$$\Theta = \Theta_m + \Theta_{tr}$$

Hajtások egyenlete

Pozitív irányok, negyedek ω(M):



P=M ω>0 - Ez a fogyasztói pozitív irány (motoros üzem)

M_t = terhelő nyomatéka

$M-M_t$ = eredő nyomaték

1. Motors vagy hajtási negyed
2. Generátoros vagy fékez negyed
3. Motoros negyed

4. Generátoros negyed

A villamos gép minden negyedben tud forogni, a villamos hajtás nem feltétlenül (1/4, 2/4, 4/4).

Mozgás egyenlet:

$$P_{\text{eredő}} = P - P_t = \frac{dA}{dt}$$

dA = mozgási energia
P = motor teljesítmény
P_t = terhelés

Θ=áll. (eredő tehetetlenségi nyomaték)
Newton mozgásegyenletének analógiájára (F=ma lineáris mozgás)

$$M - M_t = \Theta \frac{d\omega}{dt} = \Theta\beta$$

(β a szöggyorsulás)
A dinamikai nyomaték:

$$M_d = M - M_t$$

Ha ez nulla, akkor állandósult az állapot, vagyis M = M_t. Ha negatív akkor lassulásról van szó. A β szöggyorsulás ekkor szintén negatív. Gyorsulás esetén a dinamikai nyomaték pozitív, akárcsak a szöggyorsulás.

4. A hajtás stabilitásának feltétele. Terhelőnyomatékok osztályozása. Viszonylagos egységek használata.

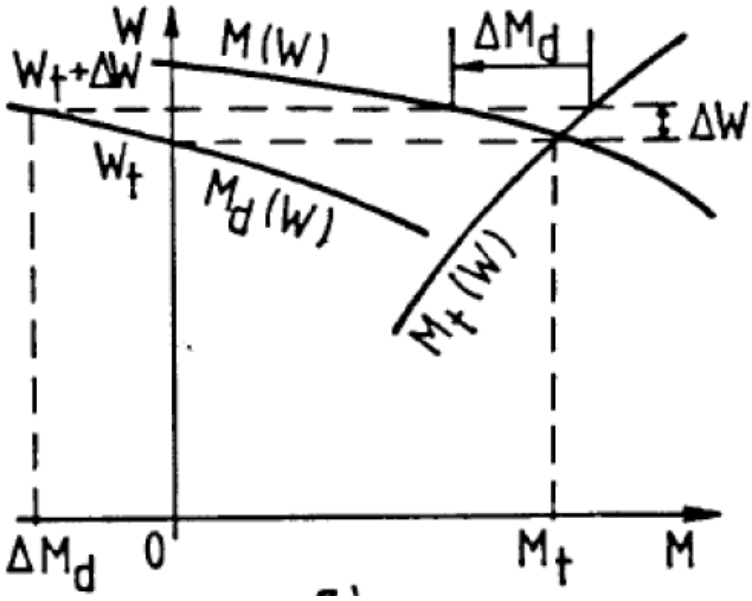
(Mit jelent a stabilitás? Vizsgálatának módja, ábrákkal. Stabilitás feltétele képlettel. Terhelőnyomatékok osztályozása. Viszonylagos egységek előnye, alapértékek. egyenáramú gépnél.)

Kis kitérés kis változással jár.

- Ha visszatér, akkor stabil.
- Ha nem tér vissza, akkor labilis.

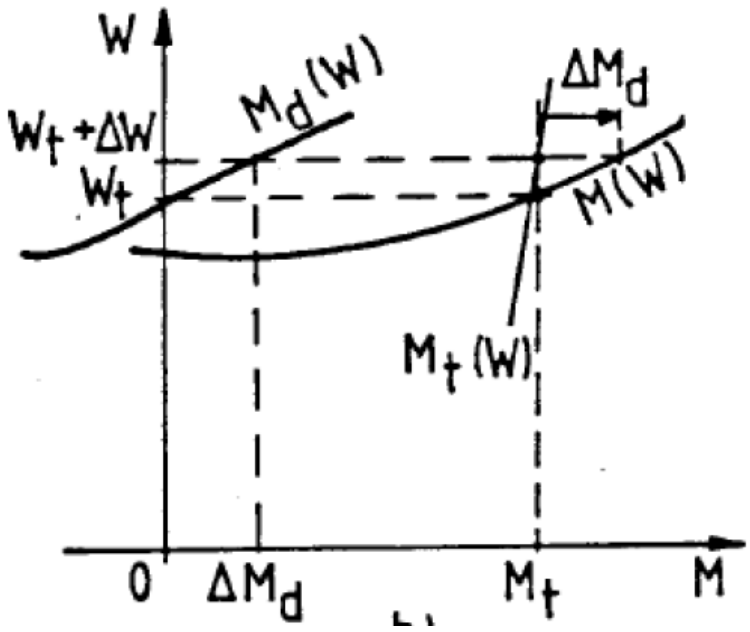
Stabilitás vizsgálat:

1. **Stabil**



- $\Delta\omega > 0,\ \Delta M_d = M - M_t < 0$ esetben lassul
- $\Delta\omega < 0,\ \Delta M_d = M - M_t > 0$ esetben gyorsul

2. **Labilis:**



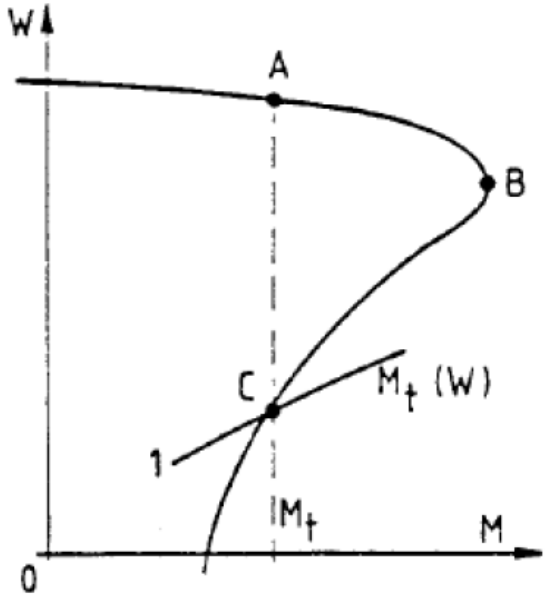
- $\Delta\omega > 0,\ \Delta M_d = M - M_t > 0$ esetben gyorsul
- $\Delta\omega < 0,\ \Delta M_d = M - M_t < 0$ esetben lassul

Stabilitás feltétele:

$$\frac{\Delta M_d}{\Delta\omega} < 0\ vagyis\ \frac{dM_d}{d\omega} < 0$$

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_t}{d\omega} < 0\ vagyis\ \frac{dM}{d\omega} < \frac{dM_t}{d\omega}$$

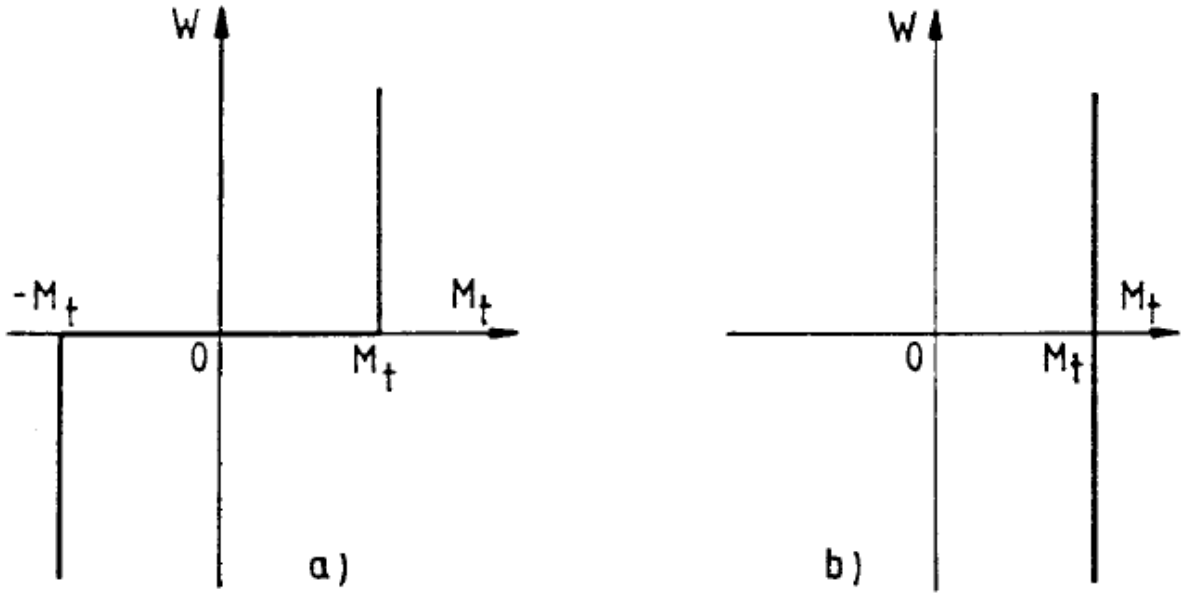
A motor és terhelés jelleggörbéje együtt határozza meg a stabilitást.



Az aszinkron motor jelleggörbéje felül stabil, alul labilis állapotot mutat.

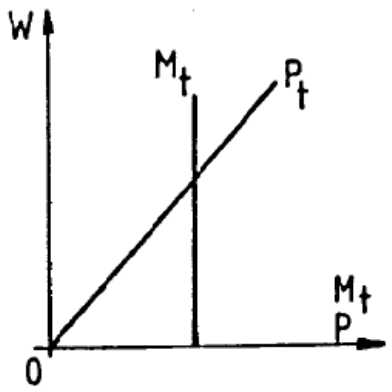
Terhelőnyomatékok osztályozása:

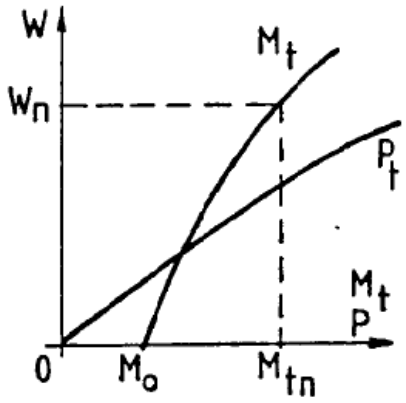
- Aktív: A forgásiránytól függetlenül nem változik az iránya.
- Passzív: Forgásiránytól függően változik az iránya.



b ábra az aktív, **a** pedig a passzív terhelőnyomatékot szemlélteti

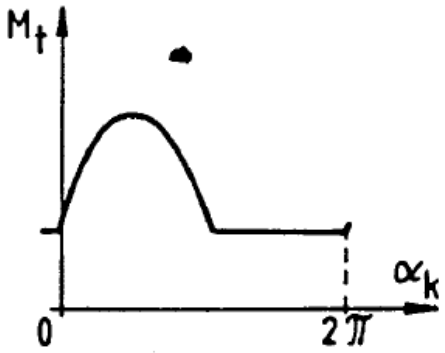
- Állandó
- $M_t(\omega)$ a sebesség függvénye (általában hatványfüggvény)



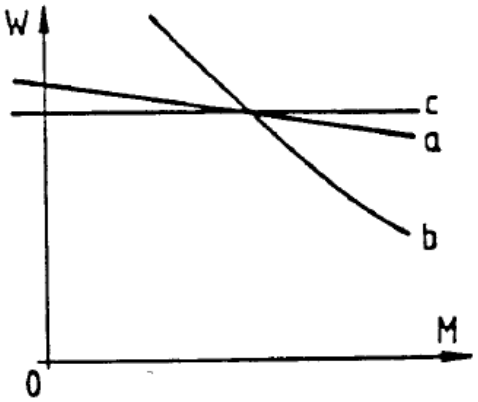


A fenti ábrákból az első az állandó a második pedig a sebességtől függő terhelőnyomatékot ábrázolja.

- út, idő



Motor jelleggörbéi M(ω):



- a Merev jelleggörbe (aszinkron)
- b Lágy (soros gerjesztés DC)
- c Szinkron típusú

Viszonylagos egységek:

A viszonylagos egységeket általában a névleges értékekre fajlagosítjuk. Előnye a dimenzió nélküliség, a %-os érték, valamint a névleges értékekhez viszonyítás.

Alapértékek egyenáramú gépeknél:

- mennyiségek

- paraméterek

$$U' = \frac{U}{U_n}\ ;\ I' = \frac{I}{I_n}\ ;\ \phi' = \frac{\phi}{\phi_n}$$

$$R_n = \frac{U_n}{I_n}\ ;\ R' = \frac{R}{R_n}$$

5. Szögsebesség és nyomaték időfüggvények meghatározása. Névleges indítási idő. Elektromechanikai időállandó.

(Villamos hajtások mozgásegyenlete. Hogyan származtatható ebből a szögsebesség-idő függvény? Mely esetekben egyszerű a származtatás? A névleges indítási idő definíciója és képlete. Az elektromechanikai időállandó képlete. A két időállandó kapcsolata.)

Villamos hajtások mozgásegyenlete:

$$M - M_t = \Theta \frac{d\omega}{dt}$$

Szögsebesség időfüggvény:

$$\omega = \frac{1}{\Theta}\int_o^t (M - M_t)dt + \omega_k$$

Speciális esetek:

- $M_d = M - M_t = \Theta \frac{d\omega}{dt} = \text{áll}$
  (merev, szinkron)
  $\omega = \frac{M - M_t}{\Theta} t + \omega_k$
  Az indításkor ω_k=0, vagyis a görbénk az ω-t koordinátarendszerben egy nullától induló lineáris egyenes.
- $M_d$lineáris függvénye az ω-nak
  $M_d = M - M_t$
  Az ω - $M_d$diagramban lineáris szigorú monoton csökkenő függvény.

Névleges indítási idő:

$$M_d = M - M_t = M_n$$

$$\omega = \frac{1}{\Theta}\int_o^t (M - M_t)dt + \omega_k = \frac{M - M_t}{\Theta} t = \omega_n$$

M_n a névleges nyomaték
ω = ω_n a végső szögsebesség
ω_k = 0 az indításkor
Tehát:

$$T_{in} = \frac{\Theta\omega_n}{M - M_t} \text{ a névleges indítási idő}$$

Elektromechanikai időállandó:

$$\omega(M_d) \text{ lineáris}$$

$$M_d = M - M_t$$

$$\omega = \frac{1}{\Theta}\int_{o}^{t} M_d dt + \omega_k$$

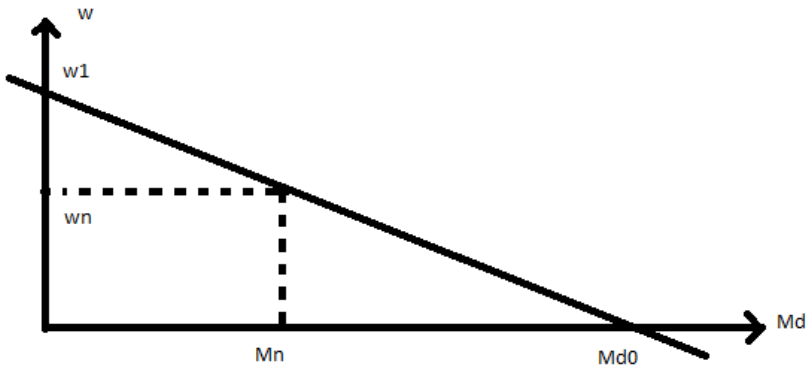
Vagyis:

$$T_m = \Theta\left(-\frac{d\omega}{dM_d}\right)$$

A névleges indítási idő és az elektromechanikai időállandó kapcsolata:

$$T_m = \Theta\frac{\omega}{M_{do}} \text{ és } T_{in} = \Theta\frac{\omega_n}{M_n}$$

$$\frac{T_m}{T_{in}} = \frac{\Theta\frac{\omega_1}{M_{do}}}{\Theta\frac{\omega_n}{M_n}} = \frac{M_n\omega_1}{M_{do}\omega_n}$$



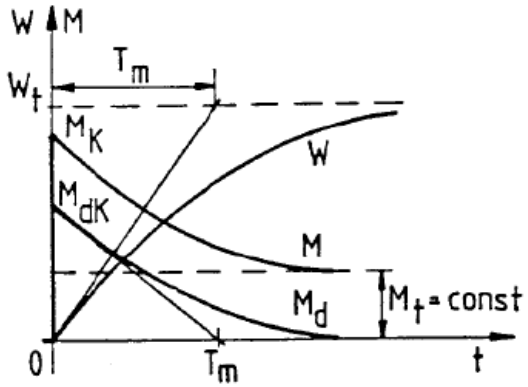
Az $\omega - M_d$ diagramban a lineáris szigorú monoton csökkenő egyenes a függőleges tengelyt ω_1-nél, a vízszintest pedig M_{do}-nál metszi. A $\omega_n - M_n$ pontot bejelöljük és szaggatott vonallal a tengelyekhez vezetjük. A monoton csökkenés következtében nyílván mindegyik n érték kisebb, mint az egyenes tengelymetsző-pontjai.

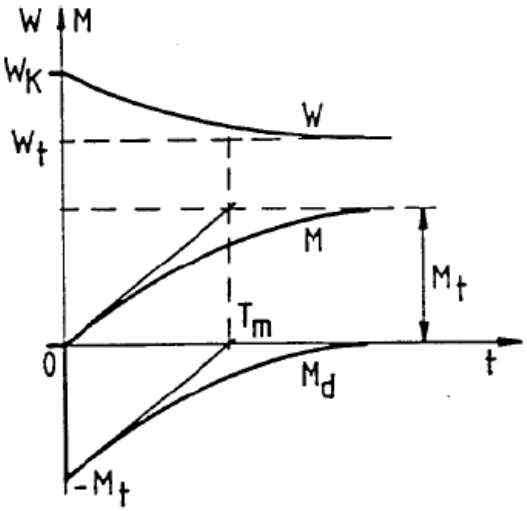
$$\frac{\omega_n}{\omega_1} = \frac{M_{do} - M_n}{M_{do}} = 1 - \frac{M_n}{M_{do}}$$

$$\frac{M_n}{M_{do}} = 1 - \frac{\omega_n}{\omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega_n}{\omega_1} \; ; \; \omega_1 \approx \omega_n$$

$$\frac{T_m}{T_{in}} = \frac{\omega_1 - \omega_n}{\omega_n} \approx \frac{\omega_1 - \omega_n}{\omega_1} = S_n \text{ (slip)}$$

$$\omega = (\omega_k - \omega_{áll})e^{-\frac{t}{T_m}} + \omega_{áll}$$



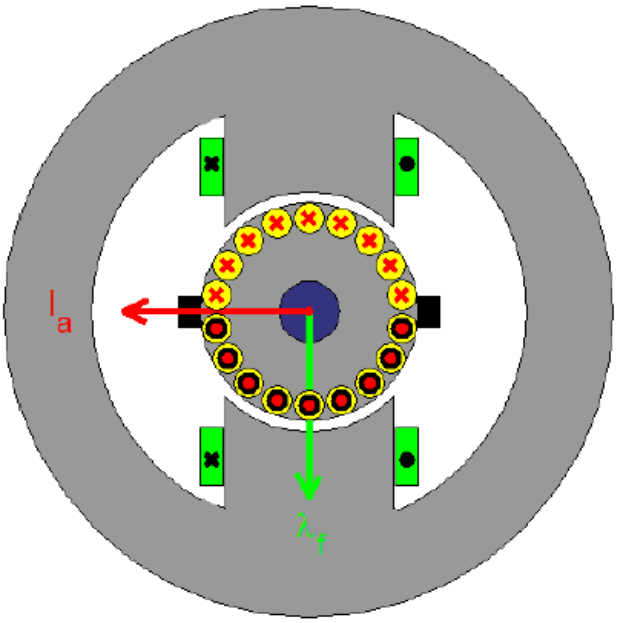


Az első ábrán az időfüggvények az indításkor vannak ábrázolva, a másodikon pedig a terhelés ugrásszerű változását kísérjük figyelemmel.

6. Az egyenáramú gép felépítése, működése, az indukált feszültség számítása.

(Felépítés: mi van az alkatrészen, mi van a forgórészen, sematikus rajz. A kommutátor és feladata. Az indukált feszültség mivel arányos, képlete.)

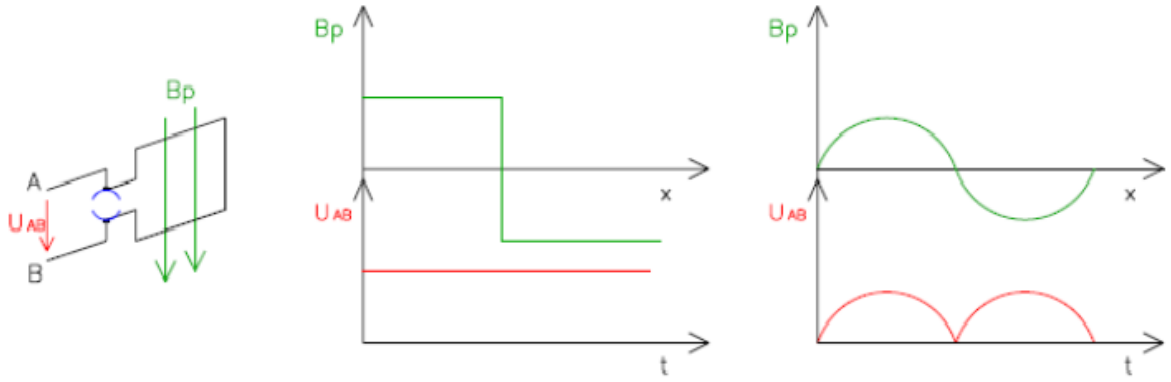
Felépítés:



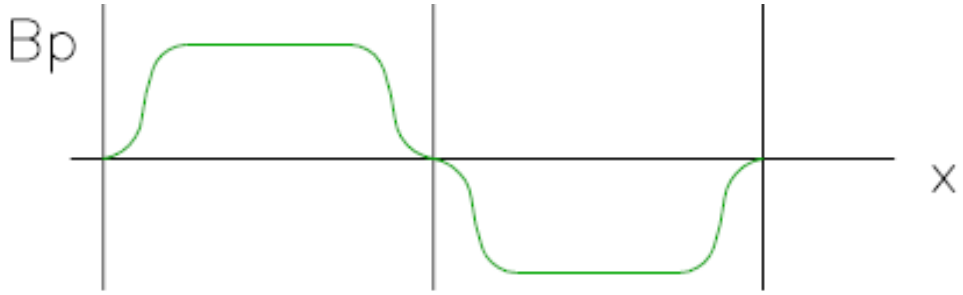
Kívül helyezkedik el a póluskerék, vagyis az álló rész (szürke szín). Középen található az armatúra, a forgó rész. A négy sarokban helyezkednek el a gerjesztő tekercsek (zöld). A fekete szín a szénkefét szimbolizálja. A csúszókontaktus (szénkefe) feladata a teljesítmény levétele a forgó részről. Jellemző rá a kopás, illetve szikrázás, ezért robbanásveszély esetén nem alkalmazható. A kommutátor az egyenirányításért felelős.
(Ha mágneses térben áramjárta vezető mozog, akkor a vezetőre erő hat. Ez akkor a legnagyobb, ha a mozgás a térre merőleges.)

- motor
- generátor

Kommutátor:
Az egyenáramú gépek armatúrájában a heteropoláris elrendezés miatt váltakozó feszültség indukálódik. Ennek irányítását kommutátorral, egy mechanikus egyenirányítóval lehet megoldani.

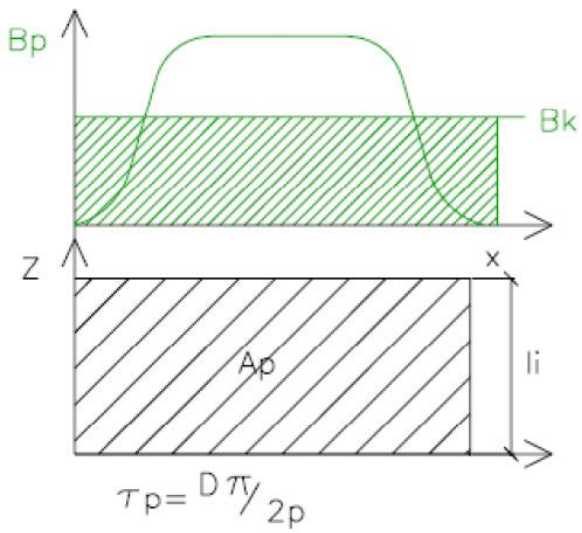


Az első ábrán a tekercsvezetéket metszik az indukcióvonalak. A másodikon az ideális esetet látjuk, egyrészt az indukciót a távolság függvényében, másrészt pedig a potenciálkülönbséget az idő függvényében. Jobb oldalon a szinuszos indukció eloszlást figyelhetjük meg. Ha több menet van sorba kötve, akkor a feszültségek összeadódnak, így simább lesz a jelleggörbénk.
A tényleges eloszlás:



(U-görbét ábrázolva az az X tengely fölött helyezkedik el, ugyanis B_p pozitív - tükrözés)

Az indukált feszültség
Indukció-eloszlás ábrája:



B_p = pólusok által létrehozott indukció
B_k = közepes indukció
l_i = vezető hossz
P = póluspárok száma
τ_p = pólus eloszlás (félkerület két pólusnál)
A_p = pólus alatti terület
2p = pólusok száma

A feszültség az armatúra forgó részben indukálódik. Az indukció a szögsebességgel arányos.

Számítása:

$$U_{i,\text{vezető}} = B_k l_i v - \text{ az indukálódott feszültség egy vezetőben}$$

$$\text{ahol } v = \omega \frac{D}{2} = 2\pi n \frac{D}{2} = nD\pi \text{ (szögsebesség)}$$

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

Vagyis:

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

z = az összes vezető száma
2a = a párhuzamos ágak száma

$$z_{\text{soros}} = \frac{z}{2a} \text{ (tevezési paraméter)}$$

k_n = feszültség konstans
ϕ_a = armatúra fluxus

7. Az egyenáramú gép nyomatékának számítása, helyettesítő kapcsolása. Az armatúravisszahatás.

(A nyomaték: mivel arányos, képlete. Helyettesítő kapcsolás, feszültség egyenlet). Az armatúra visszahatás mibenléte, az okozott probléma és kiküszöbölésének módja. Az egyenáramú gépek fordulatszám nyomaték összefüggése: $\omega(M)$.)

Nyomaték:

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

$$F_l = B_k \cdot I_i \cdot I_{ág}$$

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

$$M = z \cdot \frac{D}{2} \cdot F_l = z \cdot \frac{D}{2} \cdot B_k \cdot l_l \cdot \frac{I_a}{2a} =$$

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

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

$$= \frac{z}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi_a \cdot I_a$$

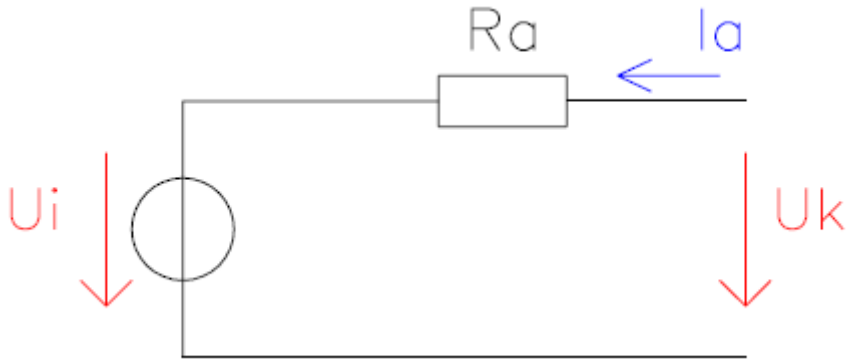
Tehát:

$$M = k_M \cdot \phi_a \cdot I_a$$

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

A helyettesítő kapcsolás

A gép működése viszonylag bonyolult, a helyettesítő kapcsolás azonban nagyon egyszerű: a belső feszültségforrás az indukált feszültség, a belső ellenállás pedig az armaturában keletkező veszteségeket képviselő ellenállás.



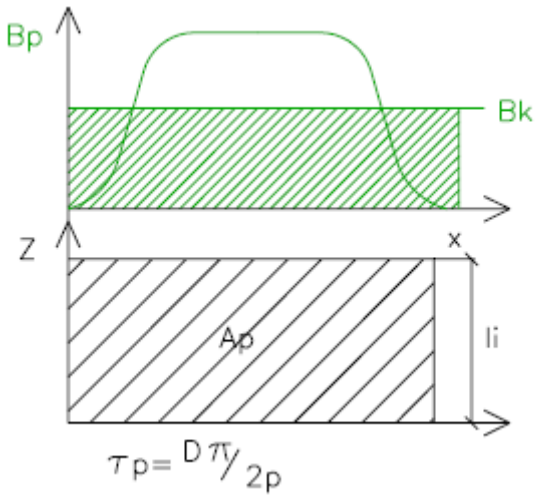
A motoros és a generátoros üzemre vonatkozó feszültség egyenletek egyszerűek és hasonlóak:

$$U_k = U_i \frac{-}{+} R_b \cdot I_a \qquad \frac{G}{M}$$

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

Az indukált feszültség számítása

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



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

v: az armatura kerületi sebessége

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

z: az összes sorbakötött vezető száma

2a: a párhuzamos ágak száma

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

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

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

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

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

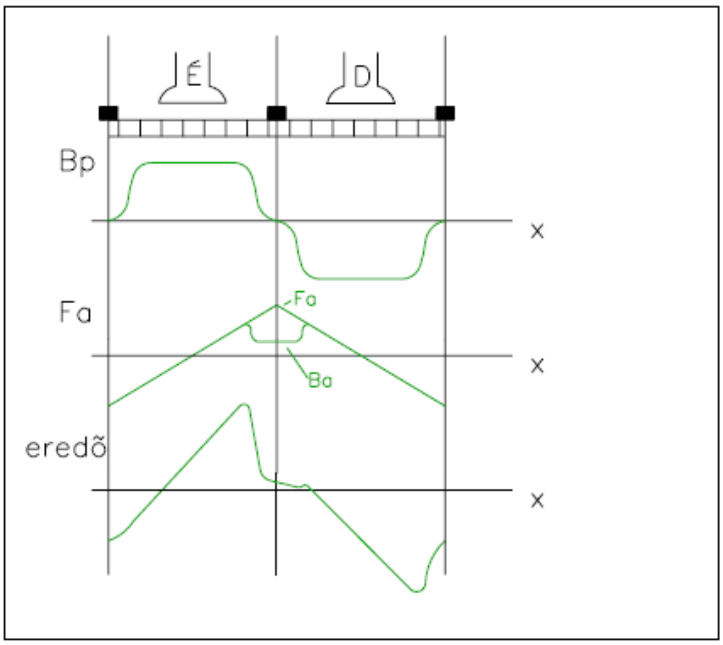
Így:

$$U_i = k_U \cdot \phi_a \cdot n$$

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

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.

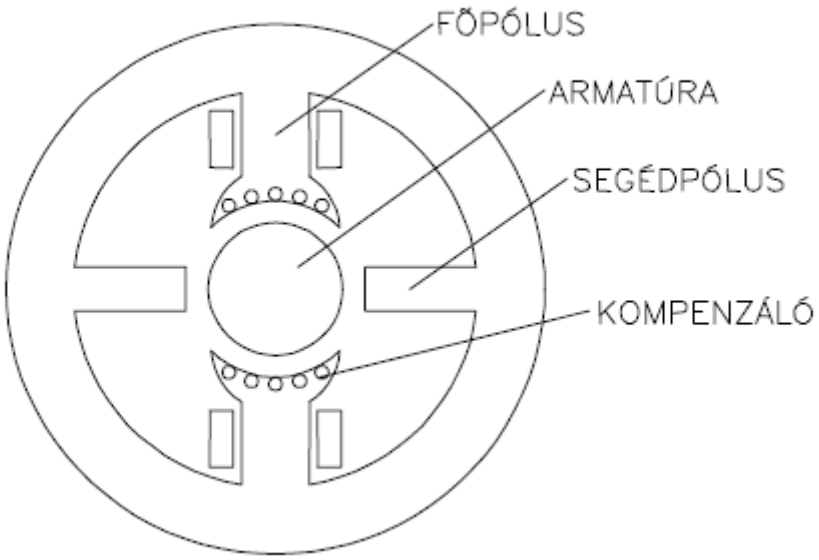
Üresjárási mezőeloszlás.

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.

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 armaturatekercs a forgórész hornyaiban, míg (szükség esetén) a kompenzáló tekercs a főpólussaru hornyaiban található.



$\boldsymbol{\omega(M)}$**:**

$$U_k = I_a \cdot R_a + U_i = I_a \cdot R_a + k \cdot \Phi_a \cdot \omega$$

$$\omega = \frac{U_k - I_a \cdot R_a}{k \cdot \Phi_a} = \frac{U_k}{k \cdot \Phi_a} - \frac{I_a \cdot R_a}{k \cdot \Phi_a}$$

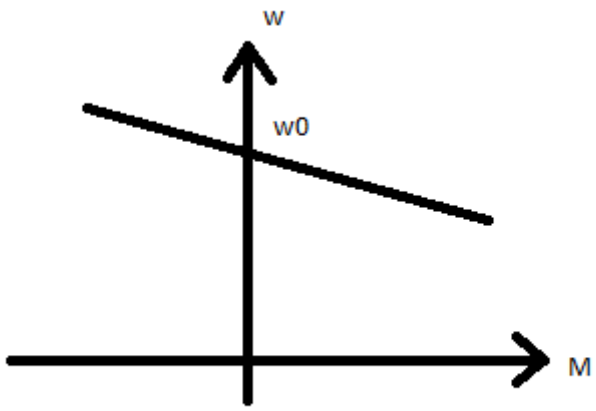
$$I_a = \frac{M}{k \cdot \Phi_a}$$

Így:

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

Ahol:

$$\omega_0 = \frac{U_k}{k \cdot \Phi_a}$$



8. Az egyenáramú gép gerjesztési módjai, jelleggörbék.

(Az armatúra feszültség egyenlete, az indukált feszültség és a nyomaték kifejezése. A gerjesztési módok áramköri rajzai. Fordulatszám nyomaték jelleggörbék származtatása)

Armatura feszültség, indukált feszültség, nyomaték:

$$U_i = k_U \cdot \phi_a \cdot n$$

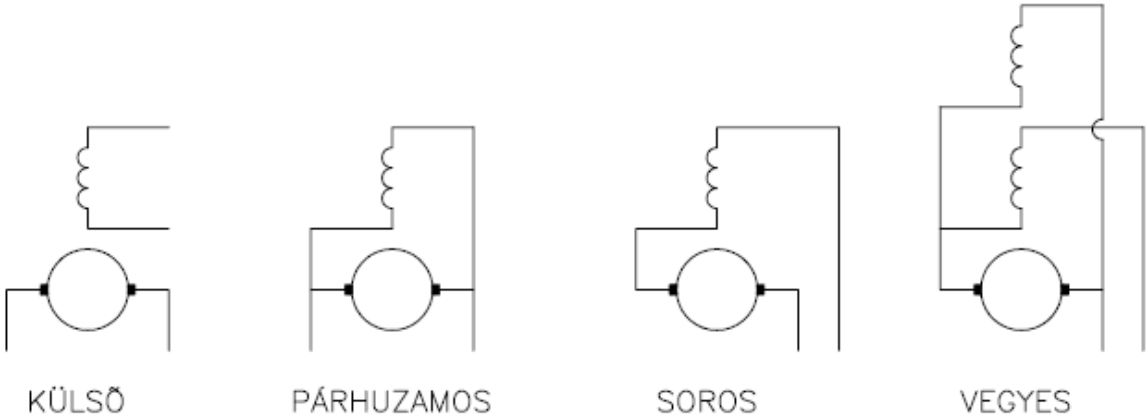
$$M = k_M \cdot \phi_a \cdot I_a$$

Bővebben lásd: 7-es kérdés eleje.

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 tekerccsel párhuzamosan, *soros* gerjesztés esetén az armatura tekerccsel sorosan kapcsolva. *Vegyes* gerjesztés esetén a gép sönt és soros tekerccsel 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).



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:

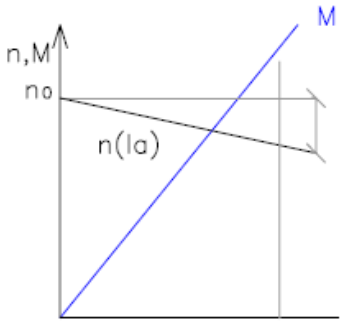
a) n (I_a) sebességi jelleggörbe;
b) M (I_a) nyomatéki jelleggörbe.
c) n (M) mechanikai jelleggörbe;

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

a) Sebességi jelleggörbe

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

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



b) Nyomatéki jelleggörbe

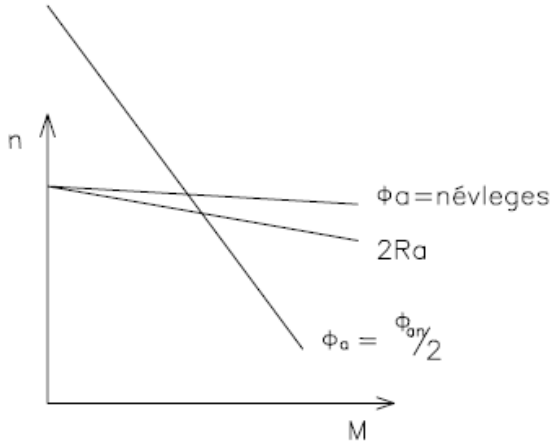
$$M = k_m \Phi_a I_a \qquad \Phi_a = áll$$

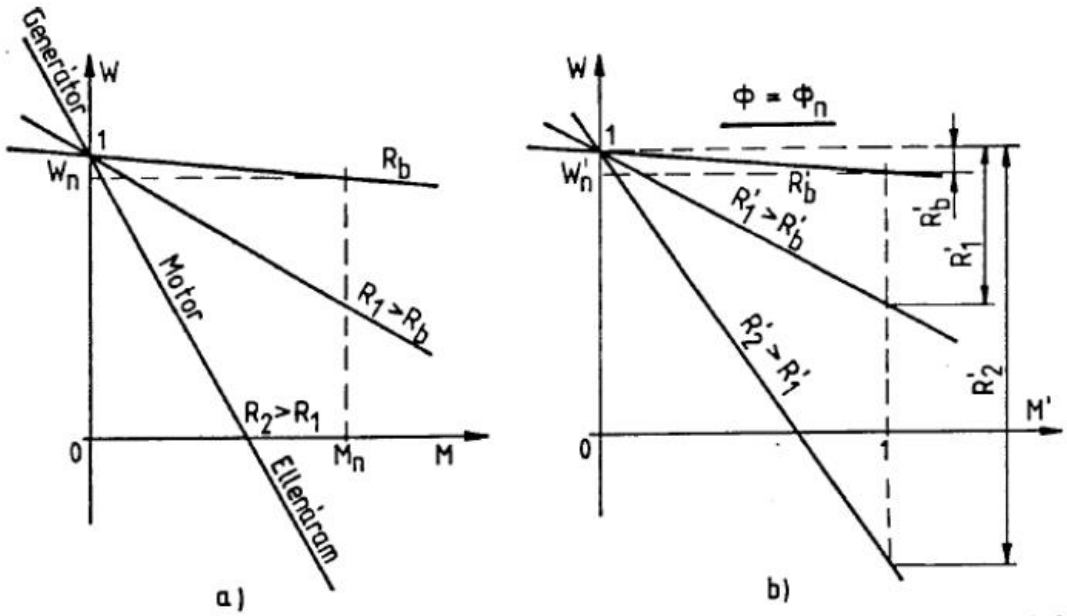
c) Mechanikai jelleggörbe

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

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

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





3.5. ábra Külső gerjesztésű egyenáramú motor mechanikai jelleggörbéi
a./ Természetes értékek b./ Relatív értékek

9. Külső gerjesztésű motorok indítása.

(Az indítás problémája és megoldási módja. Indítási kapcsolás. Az indítási fokozatok számítása. Egy öt fokozatú indítás folyamata az M(ω) síkon.)

Indítási probléma, megoldás módja:
Indításkor túl nagy az áram, és túl kicsi a nyomaték.

$$U = I \cdot R + U_b$$

$$U_b = 0$$

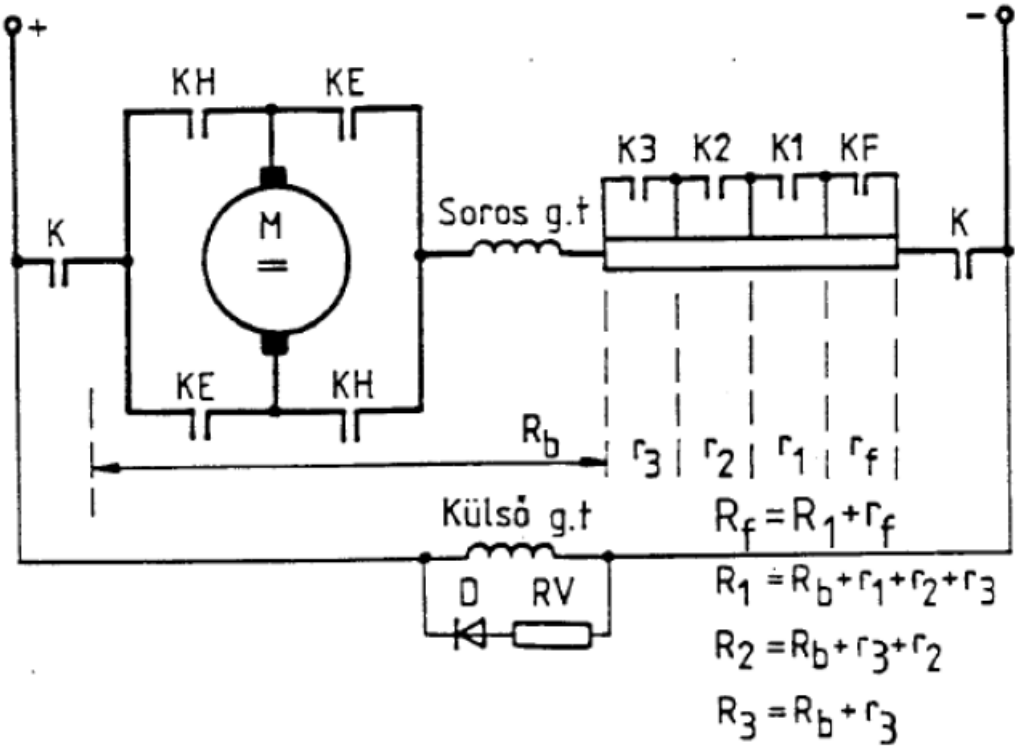
Arányokkal:

$$1 = I_{ind} \cdot 0{,}05$$

$$I_{ind} = 20$$

Megoldás: ellenállásokat iktatunk be, hogy csökkentsük az indulási áramot.

Indítási kapcsolás:



3.20. ábra Egyenáramú motor indításának elvi kapcsolása

Indítási fokozatok számítása:

$$U = I \cdot R + U_b$$

$$U_n = I_{max} \cdot R_1 + 0$$

$$R_1 = \frac{U_n}{I_{max}}$$

Fokozatok közti váltásnál a fordulatszám nem változik.

k. fokozat I_{min} pontja:

$$U_n = U_b + I_{min} \cdot R_k$$

Átkapcsolás után:

$$U_n = U_b + I_{max} \cdot R_{k+1}$$

Ezekből:

$$I_{min} \cdot R_k = I_{max} \cdot R_{k+1}$$

$$\frac{R_{k+1}}{R_k} = \frac{I_{min}}{I_{max}} = \text{áll.} = q$$

Az ellenállások mértani sort alkotnak.

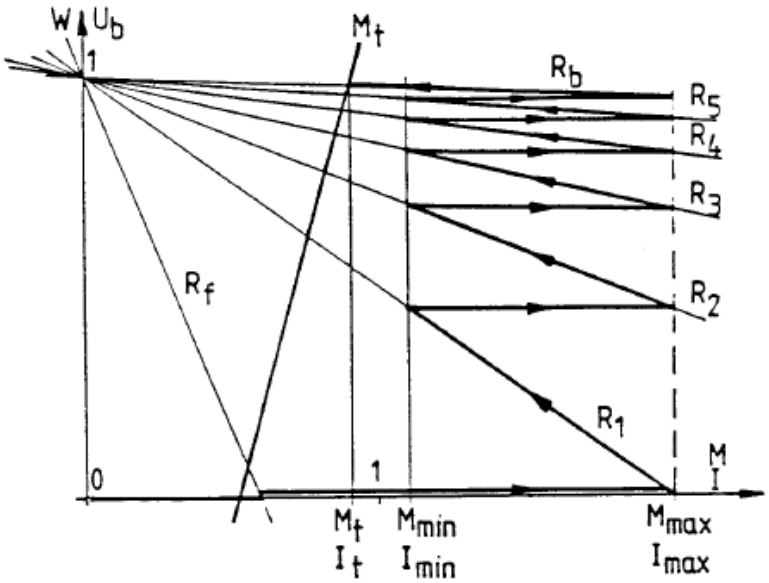
Ha a fokozatok száma m (R_1, R_b ismert):

$$R_1 \cdot q^m = R_b$$

$$q = \sqrt[m]{\frac{R_b}{R_1}}$$

$R_2 = q \cdot R_1$, $R_3 = q \cdot R_2$ stb. összefüggésekkel megkapjuk a fokozatok teljes ellenállásait.

Öt fokozatú indítás folyamata az M(ω) síkon:



3.21. ábra Külső gerjesztésű motor öt fokozatú indító diagramja

ahol: M_{t1} - terhelőnyomaték a k-dik fokozat elején;
M_{t2} - terhelőnyomaték a k-dik fokozat végén;
T_{mk} - elektromechanikai időállandó a k-dik fokozatban.

10. Egyenáramú motorok visszatápláló fékezése.

(Mikor tud generátorosan fékezni? Energetikai viszonyok. Milyen fordulatszám tartományban működik külső gerjesztésű motor esetén, rajzolja fel a generátoros fékezési tartományt a fordulatszám-nyomaték síkon. Mi a probléma soros gerjesztésű motor esetén.)

Mikor féke generátorosan:

A motor akkor fékez visszatáplálással, ha a forgással indukált U_b feszültség nagyobb, mint az U kapocsfeszültség, ekkor ugyanis az armatúraáram az

$$I = \frac{U - U_b}{R}$$

képlet szerint a motoros üzemmel szemben negatívvá válik, és a motor a lefékezett mechanikai teljesítmény nagy részét visszaadja a hálózatnak. Külső vagy vegyes gerjesztésű motorokra a $\omega_{0,n}$ üresjárati szögsebességen U_b=U, tehát az U_b>U feltétel $\omega > \omega_{0,n}$ esetében áll elő.

Energetika:
A motor a lefékezett mechanikai teljesítmény nagy részét visszaadja a hálózatnak (lásd fentebb).

Fordulatszám tartomány külső gerjesztésű motor esetén:

$$\omega > 0$$

$$P = M \cdot \omega < 0 \;\rightarrow\; M < 0$$

$$M = k \cdot \phi \cdot I$$

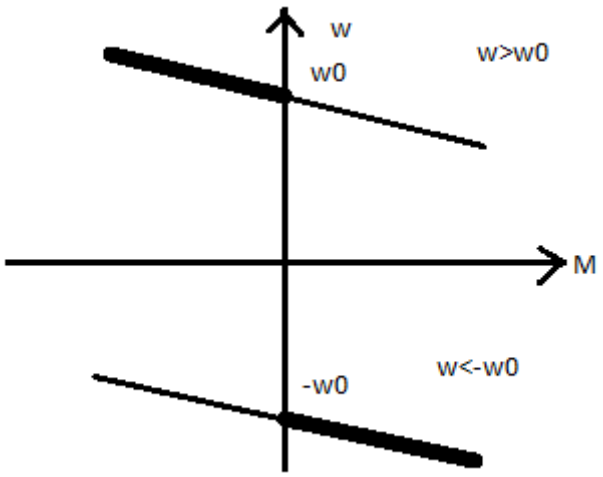
$$I < 0$$

$$U = I \cdot R + U_b \;\rightarrow\; I = \frac{U - U_b}{R} < 0 \;\rightarrow\; U_b > 0$$

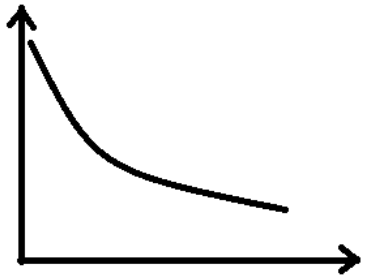
$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \phi} \rightarrow U = k \cdot \phi \cdot \omega_0$$

$$U_b = k \cdot \phi \cdot \omega \;\rightarrow\; \omega > \omega_0$$

Fordulatszám-nyomaték síkon felrajzolva:



Soros gerjesztésű motor esetén:
Soros gerjesztésű motoroknál a generátoros fékezés U_b>U feltétele önműködően nem jöhet létre, ugyanis az üresjárás környékén hiába növekszik meredeken a szögsebesség, a motor fluxusa annyira lecsökken, hogy eredeti kapcsolásban a motor kapocsfeszültsége mindig meghaladja a belsőfeszültséget. Ezen kívül a nyomaték iránya ($M = k \cdot \phi \cdot \mathrm{I}$) csak az armatura és a soros tekercs kölcsönös kapcsolásának megváltozásával válhat ellentétessé.
(Magyarul: üresjáratban 0 a fluxus, tehát nem tudunk átmenni a másik tartományba.)



$k \cdot \phi \downarrow$ akkor $\omega \uparrow$

$M = k \cdot \phi \cdot \mathrm{I} > 0$: nem jó

11. Egyenáramú motorok ellenállásos fékezése (külső gerjesztésű motor).

(Megvalósítása, kapcsolási rajza, folyamat a fordulatszám-nyomaték síkon. Energetikai viszonyok. Milyen fordulatszám tartományban működik?)

Megvalósítás:

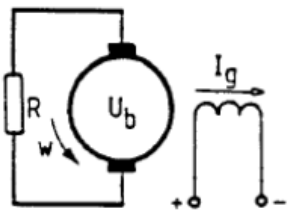
Ellenállásos fékezéskor a motor armaturáját lekapcsoljuk a hálózatról és ellenállásra kapcsoljuk. Külső gerjesztésű motorokon a gerjesztés megmarad, ezt tartja fent a fluxust. Az ellenállásos fékezés is generátoros üzemállapot; a motor mint generátor a terhelő ellenállásra dolgozik. Az ellenállások ugyanazok, mint az indítási ellenállások, és méretezésük is ugyanúgy történik (lásd: 9-es kérdés).

Kapcsolási rajz, folyamat a fordulatszám-nyomaték síkon:

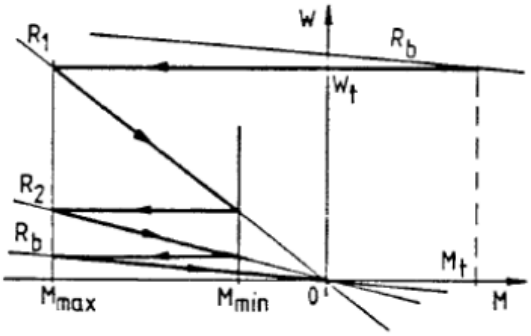
$$\omega = \frac{U}{k \cdot \phi} - M \cdot \frac{R}{(k \cdot \phi)^2}$$

Rövidre zárjuk: U=0 → jelleggörbe lecsúszik.

Ha R=0: a két görbe messze találkozik → kell ellenállás → a görbe meredekebb lesz. Viszont így a nyomaték csökken, ezért az ellenállásokból több fokozat kell (mint indításnál).



3.28. ábra Külső gerjesztésű motor ellenállásos fékezésének elvi kapcsolása



3.29. ábra Külső gerjesztésű motor két előtét fokozatú ellenállásos fékezése

Energetika viszonyok:
A mechanikai teljesítményt a visszatápláló fékezéssel szemben nem nyerjük vissza, hanem az a terhelő ellenállásban hővé alakul.

Fordulatszám tartomány:
Ellenállásos fékezéssel – bár a jelleggörbék átmennek az origón – nem lehet megállásig fékezni, mivel az R_b belső ellenállást nem lehet kiiktatni, és a fékező áram létesítése végett a motornak forognia kell. Ezért ellenállásos fékezéssel csak az álló állapot közeléig, kis fordulatszámig lehet eljutni és onnan kezdve mechanikai fékezéssel kell biztosítani a berendezés megállítását.
Tehát: $\omega_0 > \omega > 0$
Akkor használjuk, ha nem kell lemenni 0 fordulatszámra, és nem kell forgási irányt váltani: nem verzáló (forgási irányt váltó) hajtások esetén.

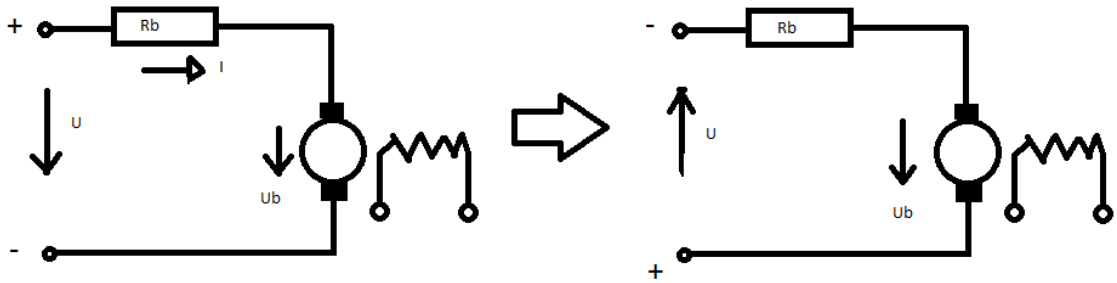
12. Egyenáramú motorok ellenáramú fékezése (külső gerjesztésű motor).

(Megvalósítása, kapcsolási rajza, folyamat a fordulatszám-nyomaték síkon. Energetikai viszonyok. Milyen fordulatszám tartományban működik?)

Megvalósítása:
Hajtáskor az armatúrakörben U feszültség az I áram növelése irányában, U_b ezzel szemben dolgozik. Ellenáramú fékezéskor U-t fordított polaritással kapcsoljuk az armatúrakörre, a körben U és U_b azonos irányban hat, az armatúrában az áramirány a hajtási állapothoz képest megfordul, és így a nyomaték iránya is megfordul.

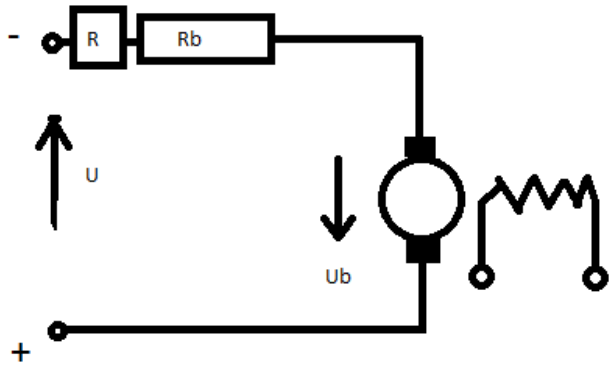
Általában nem kellenek fokozatok.

Kapcsolási rajz:

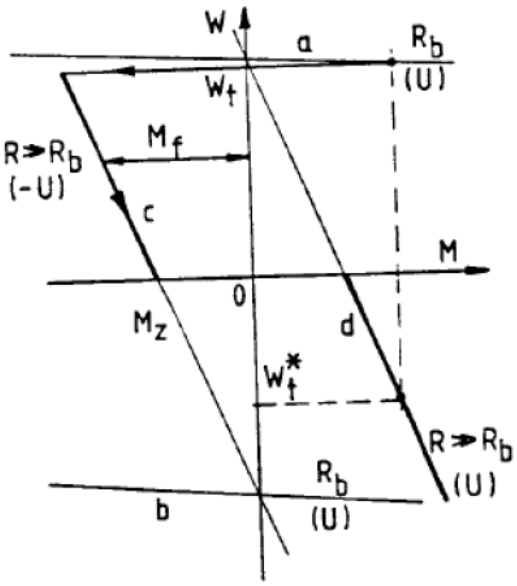


$$I_f = \frac{U - U_b}{R}$$

Ha R=0,05, U=-1 és U_b=0,95, akkor I_f=-39, tehát a fékáram 39-szerese, ami nagyon sok, ezért a rendszerbe egy nagy ellenállást is be kell építenünk a fékezéshez.



Folyamat a fordulatszám-nyomaték síkon:



3.36. ábra Ellenáramú fékezés jelleggörbéi külső gerjesztésű motorral

Energetikai viszonyok:

Ha pl. a motor névleges fordulatszámon névleges nyomatékkal fékez, akkor a tengelyén a névleges mechanikai teljesítményt veszi fel. Ugyanakkor a hálózatból is a névleges teljesítményt veszi fel, a két teljesítmény összege alakul hővé az armatúraköri ellenálláson.

$$P_f = \omega_n \cdot M_n = P_n$$
$$U = -U_n$$
$$I = -I_n$$
$$P_{fel} = U_n \cdot I_n = P_n$$

Tehát 2Pn disszipál el (a tengely teljesítmény és a felvett teljesítmény).

Fordulatszám tartomány:
$\omega = 0$-nál is fékez, utána forgási irányt is vált, sőt, $\omega < 0$ tartományban is fékez. Tipikusan reverzáló hajtásoknál használják (pl. daru).

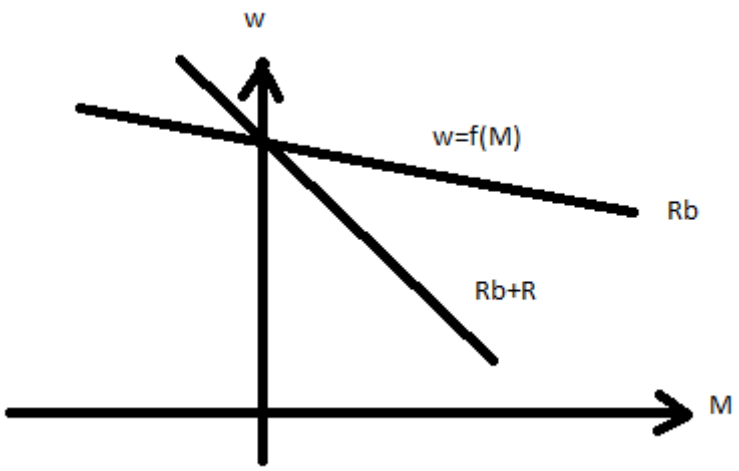
13. Állandó feszültségről táplált egyenáramú motorok fordulatszámának változtatása az ellenállás változtatásával.

(Az egyenáramú motor fordulatszámának kifejezése. Az ellenállás változtatásának hatása a jelleggörbére és a kialakuló fordulatszámra. Energetikai viszonyok.)

Fordulatszám kifejezése:
$U_i = k \cdot \phi \cdot \omega$ (indukált feszültség)
$U_k = I_a \cdot R_a \cdot U_i$ (kapocs feszültség)
Ezekből:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \phi} - M \cdot \frac{R}{(k \cdot \phi)^2}$$

Ellenállása hatása a jelleggörbére:
Ebből látható, hogy az ellenállás növekedésével csökken a szögsebesség.



R>0 növeli a meredekséget → fokozatosan csökken a nyomaték → fokozatos üzem → a nyomatéknak egy adott sávban kell maradnia.
$\omega_0 > \omega > 0$ → $\omega = 0$-t nem tudjuk elérni, mert ahhoz a belső ellenállást is változtatnunk kellene.
Nem reverzáló hajtásaoknál (pl. villamos).

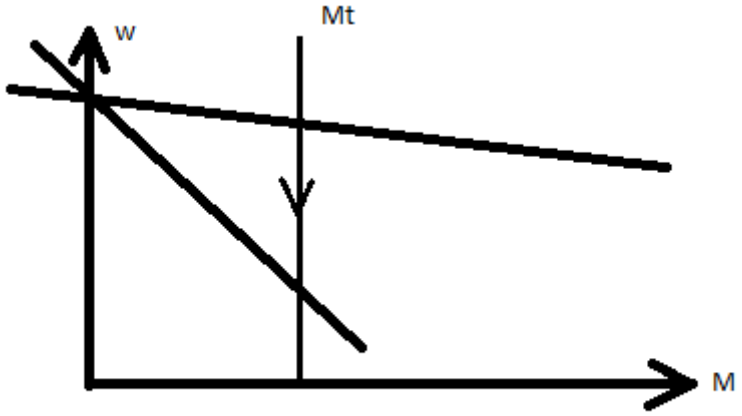
Energetikai viszonyok:
Veszteséges.
$P = U \cdot I = M \cdot \omega$ M és I állandó → csak a feszültség változik.

$$\frac{P}{P_L} = \frac{U_b}{U} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\frac{\Delta P}{P_1} = \frac{P_1 - P}{P_1} = 1 - \frac{P}{P_1} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{I \cdot R}{U}$$

P_1: változás előtti
P: változás utáni

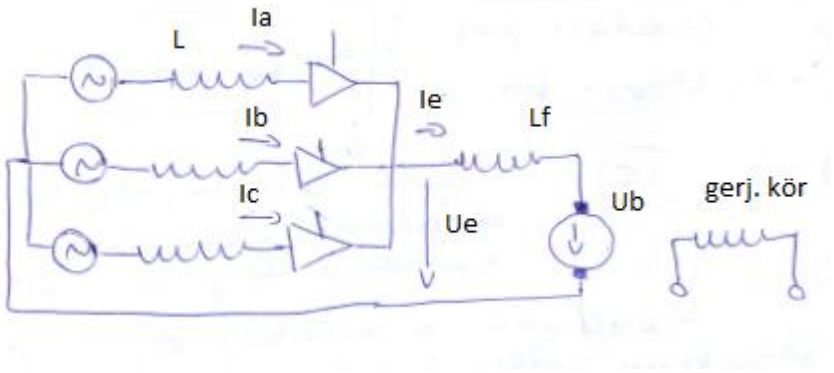
Mechanikai: $P = U_b \cdot I$
Felvett: $P_1 = U \cdot I$



14. Egyenáramú áramirányítós hajtások. Áramirányító kapcsolások. A hídkapcsolású áramirányító származtatása.

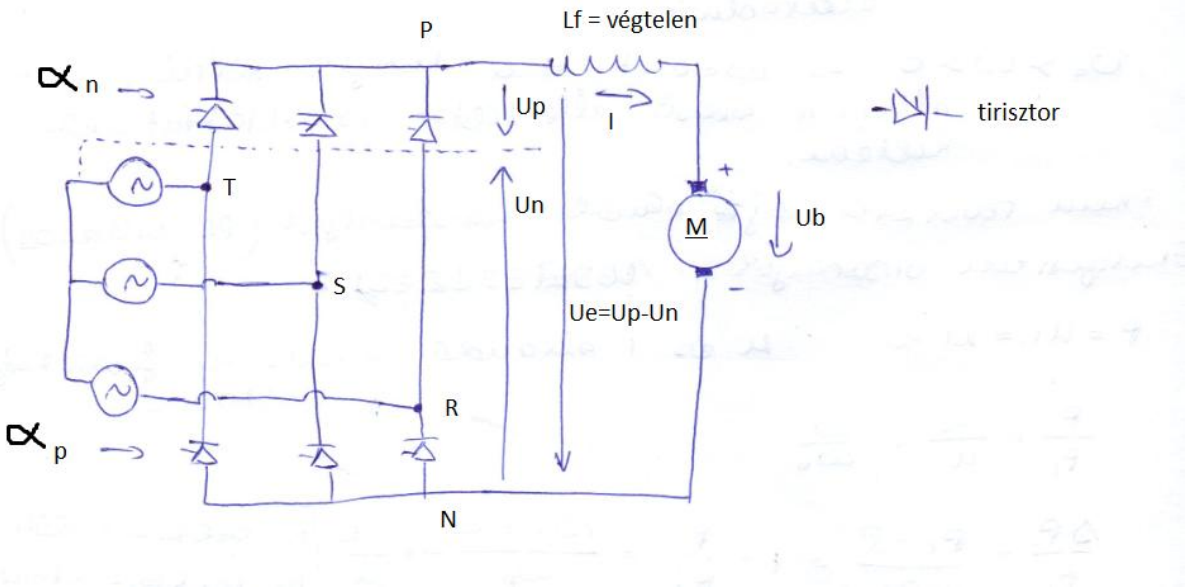
(A háromfázisú csillagpontos kapcsolás rajza, motorral együtt. A hídkapcsolású áramirányító származtatása és rajza, motorral együtt. Vezérlési elv, a gyújtásszög és az egyenirányított feszültség változtatási tartománya.)

3 fázisú csillagpontos kapcsolás rajza:

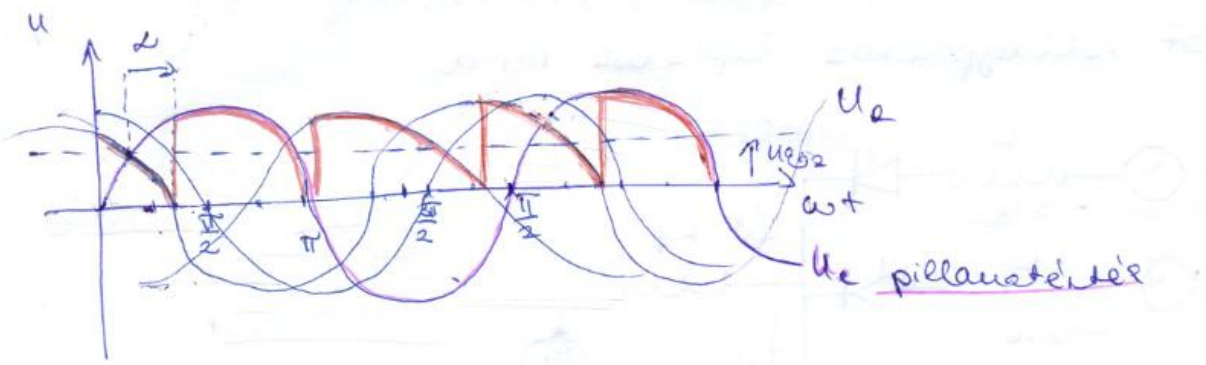


L: transzformátor vagy hálózat induktivitása
L_f: fojtó

Hídkapcsolású áramirányító:
Származtatás: 2 sorba kapcsolt 3 ütemű áramirányító.



Vezérlési elv, a gyújtásszög és az egyenirányított feszültség változtatási tartománya:
Tirisztorral késleltethető a begyújtás. $0 < \alpha < 180°$ → késleltetési szög



- Közös katód.
- Váltás: <u>természetes</u> <u>kommutációs</u> pont
  ↓ ↓
  itt váltanak a diódák — váltás a fázisok között

$$U_e = U_{e,m} \cdot \cos\alpha$$

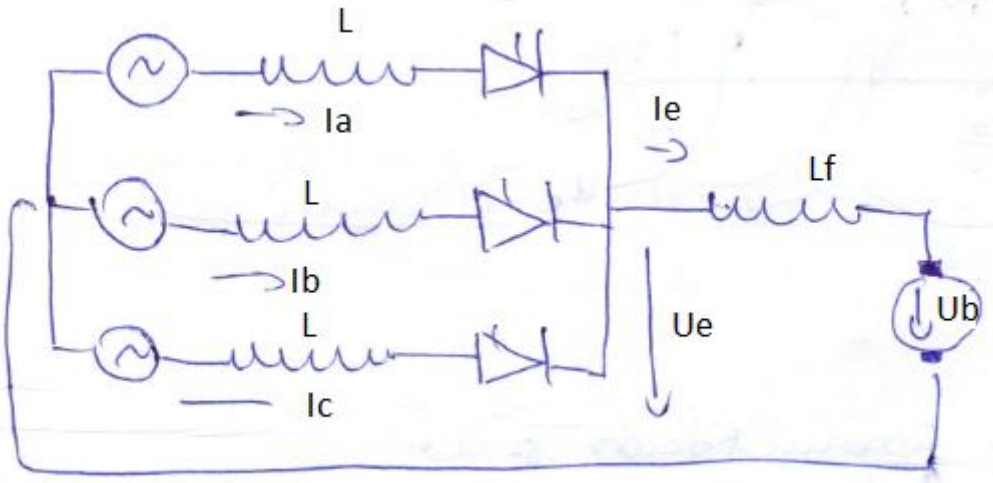
$$-U_{e,m} \leq U_e \leq U_{e,m}$$

$$U_e = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_e(t)dt = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \cdot \int_0^T U_e(\omega t)d\omega t$$

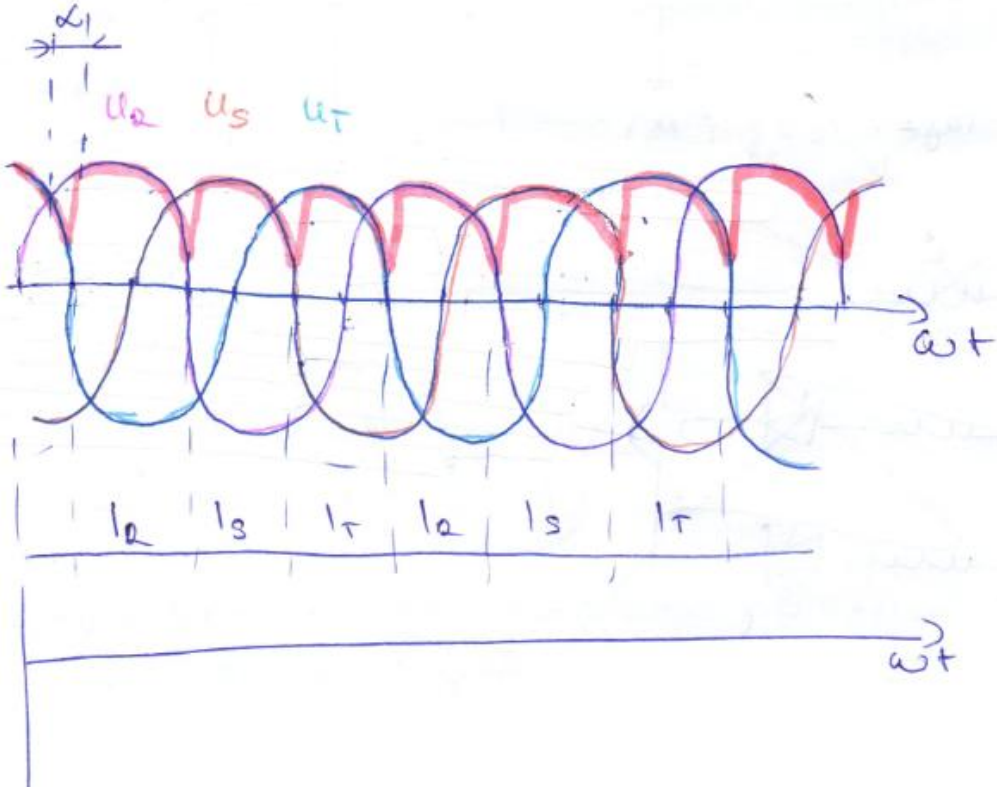
15. Áramirányító működése a fedés elhanyagolásával, az egyenirányított feszültség.

(A háromfázisú csillagpontos kapcsolás rajza. Az egyenirányított feszültség és a sima egyenköri áram (melyik fázis vezeti) időbeli ábrája adott és bejelölt gyújtásszögre. Az egyenirányított feszültség középértékének kifejezése. A gyújtásszög változtatási tartománya.)

Háromfázisú csillagpontos kapcsolás rajza:



Az egyenirányított feszültség és a sima egyenköri áram időbeli ábrája adott és bejelölt gyújtásszögre:



Egyszerű, tirisztorral szaggatott egyenirányító.

Az egyenirányított feszültség középértékének kifejezése:

$$U_e = \frac{1}{\frac{2}{3}\pi} \cdot \int U_e(x)dx = U_{e,max} \cdot \cos\alpha$$

A gyújtásszög változtatási tartománya:

$$0 < \alpha < 180°$$

16. Áramirányító működése a fedés figyelembevételével, a fedési szög és áramfüggése.

(Mi okozza a fedést? Az egyenfeszültség pillanatértéke a fedés alatt, képlet. Az egyenfeszültség pillanatértékének alakulása a fedés figyelembevételével, időbeli rajz. Az egyenfeszültség középértéke a fedés figyelembevételével. A fedési szög áramfüggése, tendenciák.)

A fedés oka:

A hálózatosan, illetve transzformátorosan fellépő indukció miatt I_a és I_b között a változás nem pillanatszerű. Mialatt az egyik elkezd nőni, a másik még nem nulla, ezért belelógnak egymásba. Ez a fedés jelensége.

Az egyenfeszültség pillanatértéke a fedés alatt:

$$U_a = R \cdot I_a + \frac{dI_a}{dt} + U_e$$

$$U_b = R \cdot I_b + \frac{dI_b}{dt} + U_e$$

Ezekből:

$$U_e = \frac{U_a + U_b}{2} - \frac{R}{2} \cdot I - \frac{L}{2}\frac{dI}{dt}$$

Ebből feltételezzük, hogy $L = \infty$ sima → deriváltja 0 → valamint R elhagyhatóan kicsi:

$$U_e = \frac{U_a + U_b}{2}$$

(Ezt feltételezhettük, mert U_b már indulna, de U_a még jelen van, ezért I_a még nem 0)

Az egyenfeszültség középértéke a fedés figyelembevételével:

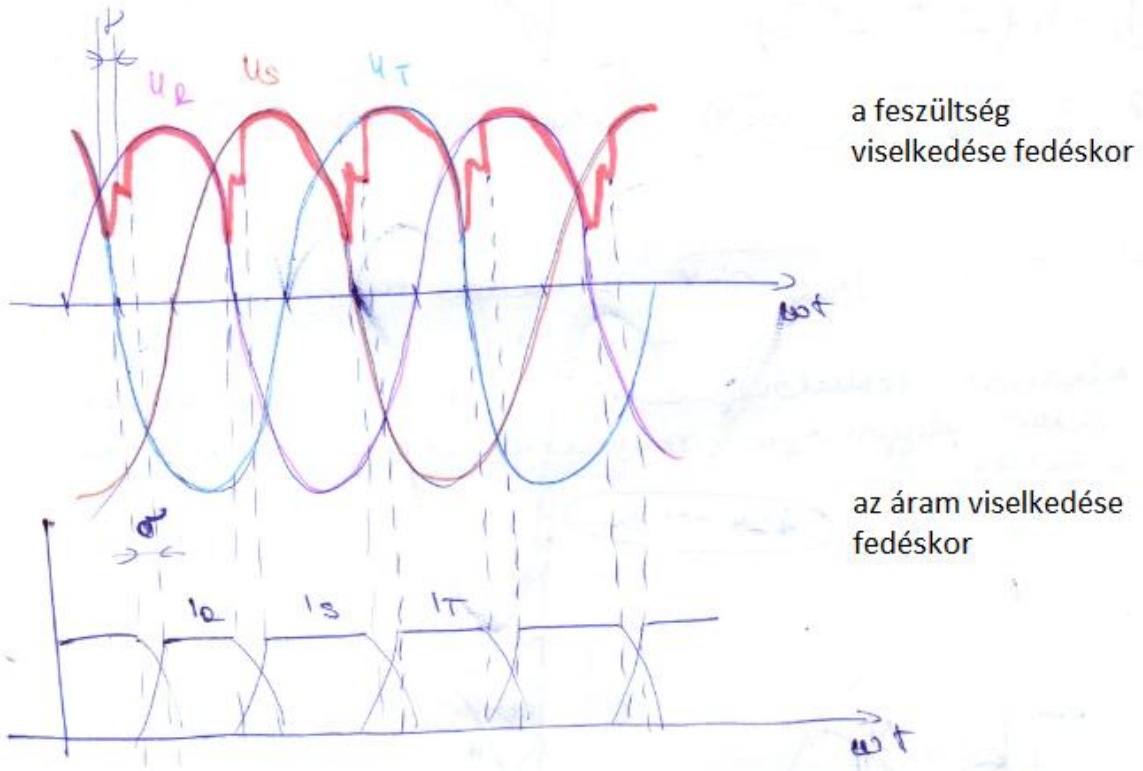
$$U_e = U_{e,max} \cdot \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \delta)}{2}$$

α: gyújtási szög; δ: fedési szög.

A fedési szögelhanyagolásával:

$$U_e = U_{e,max} \cdot \cos\alpha$$

A fedési szög áramfüggése, tendenciák:



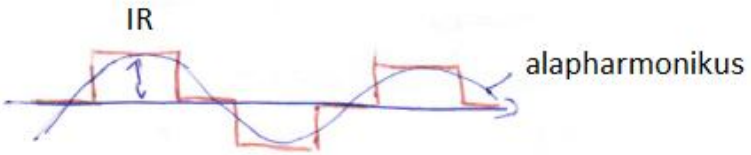
I_R még nem ért véget, amikor I_S indulna → a feszültségnél látható, hogy U_S vissza van fogva → ugrás a pillanatértékben.

- Üres járásban nincs fedés.
- L vagy I növekedésére nő.

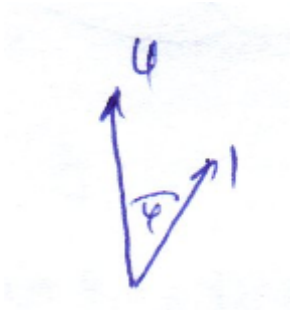
17. Áramirányítós hajtás teljesítményviszonyai.

(Mivel magyarázható fizikailag a nagy meddőigény? A hálózati feszültség és áram fázisszöge. Ábra: állandó terhelőnyomaték esetén a hálózati áram vektor végpontja szimmetrikus vezérlés, aszimmetrikus vezérlés és féligvezérelt híd esetén, bejelölve a maximális hatásos és meddő teljesítményt.)

Nagy meddőigény fizikai magyarázata:



Alapharmonikus: amplitúdója arányosa az egyenárammal.
φ: áram fázisszöge. Jó közelítéssel: $\alpha = \varphi$ (gyújtás késleltetés)



$$\underline{I_1} = I_1 \cdot \left(e^{-j\alpha_p} + e^{j\alpha_n}\right)$$

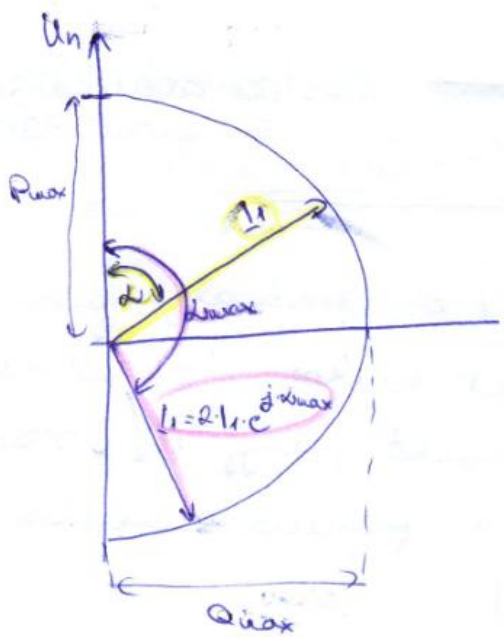
$$P = \frac{3}{2} \cdot U_{h,max} \cdot I_{1,max} \cdot \cos\varphi$$

Ahol: $U_{h,max}$, $I_{1,max}$ csúcsértékek; $I_{1,max} \cdot \cos\varphi \sim P$ (P: hatásos teljesítmény)

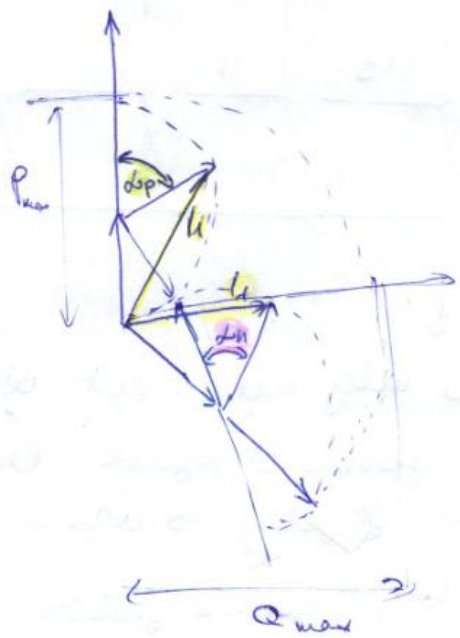
$$Q = \frac{3}{2} \cdot U_{h,max} \cdot I_{1,max} \cdot \sin\varphi$$

Ahol: $I_{1,max} \cdot \sin\varphi \sim Q$ (Q: meddő teljesítmény)

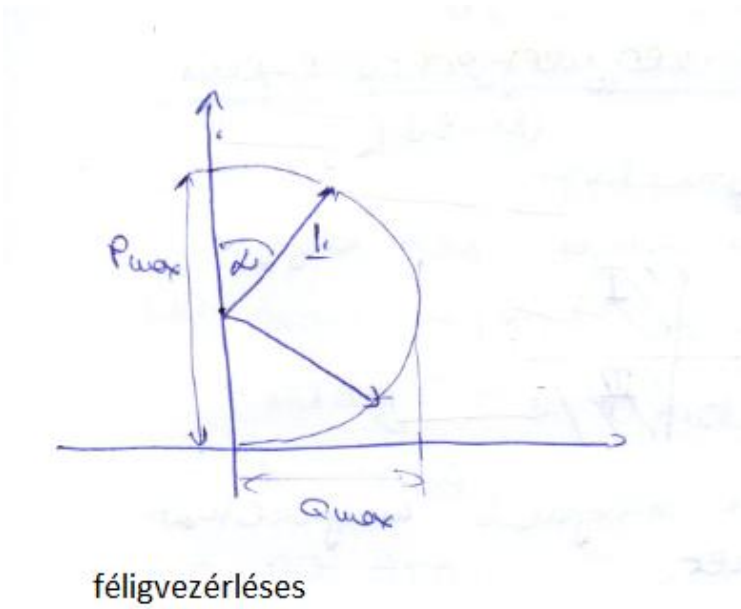
Állandó terhelőnyomaték esetén a hálózati áram vektor végpontja szimmetrikus vezérlés, aszimmetrikus vezérlés, és féligvezérelt híd esetén:



szimetrikus



aszimetrikus

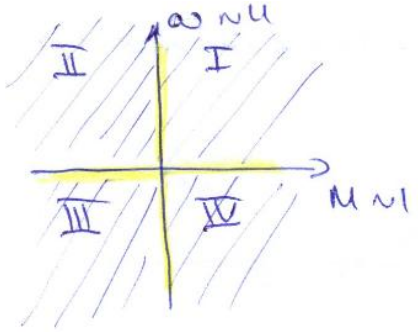


$$Q_{max} = \frac{P_{max}}{2}$$

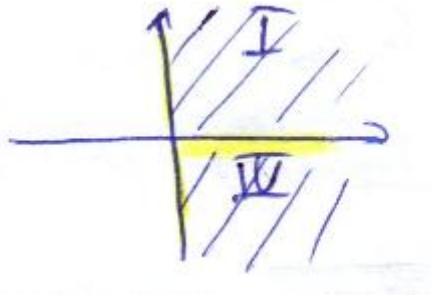
18. Áramirányítós hajtások négynegyedes üzeme.

(Mely negyedekben képes működni a hídkapcsolású áramirányító? Mi kell a négynegyedes üzemhez? A négynegyedes üzem megvalósításának háromféle módszere, leírás, kapcsolás.)

Mely negyedekben képes működni a hídkapcsolású áramirányító:



A motor nyomatéka szelephatás miatt csak egyirányú lehet:

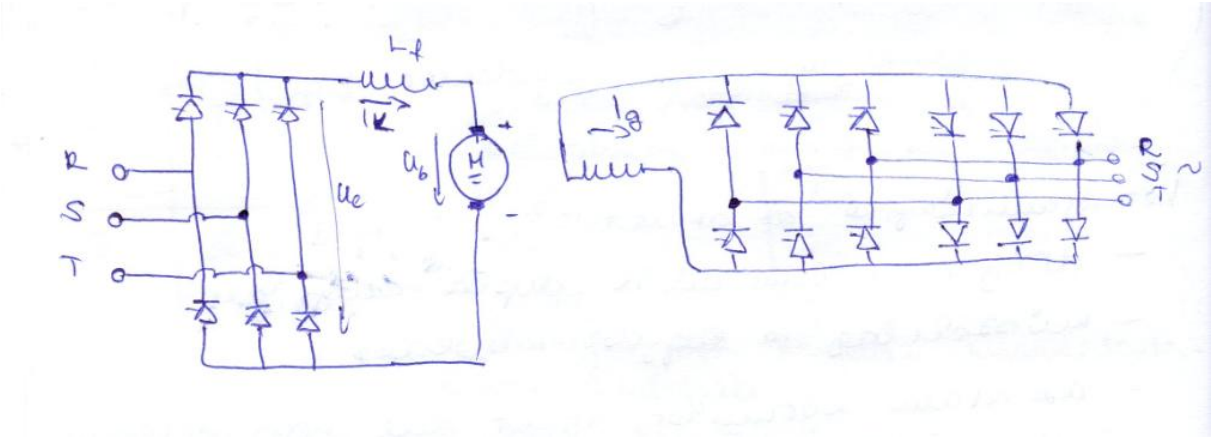


A nyomaték irányának megváltoztatására 3 módszer:

- Motor fluxusának, vagyis a gerjesztő áramának megváltoztatása.
- A motor armatúrája és az áramirányító összeköttetését megváltoztató irányváltó kapcsoló
- Mindegyik armatúra áramhoz külön áramirányító

Fluxus irányváltoztatása:

- Kis gerjesztő teljesítmény → olcsó berendezések, szinte csak a meddő teljesítményt kell fedezni.
- Lassú, nagy az időállandó
- Műszaki megoldás két ellentétes híddal

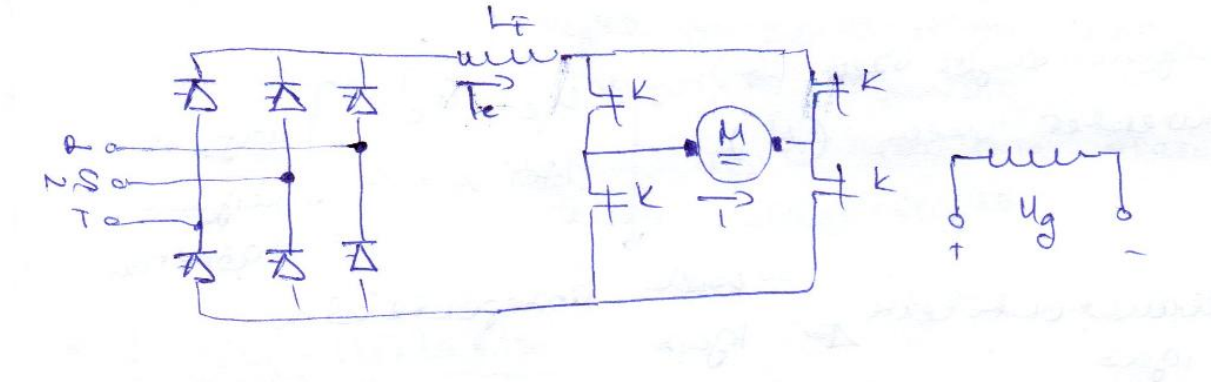


Irányváltó kapcsoló:

- Műszaki megoldás: a motort kétféle képen kötjük rá → polaritás váltás
- Nagy áramú mágneses kapcsoló szükséges → korlátozott számú kapcsolás → rövid élettartam
- Lesz olyan pillanat, amikor 0 a nyomaték → sok esetben nem megengedhető
- Bizonytalan áramirányítás →

$$U = I \cdot R + U_b \rightarrow I = \frac{U - U_b}{R}$$

U-t mi szabályozzuk, U_b viszont a motortól függ.



Két áramirányító az armatúrakörben:

- Drága → mindenből dupla annyi kell
- Műszakilag a legjobb megoldás
- Az áram bármikor iránt kell, hogy válthasson → mindkettőt folyamatosan vezérelt állapotban kell tartani.

U_e – egyenirányító üzem (∝)

U_e' – inverter üzem (∝')

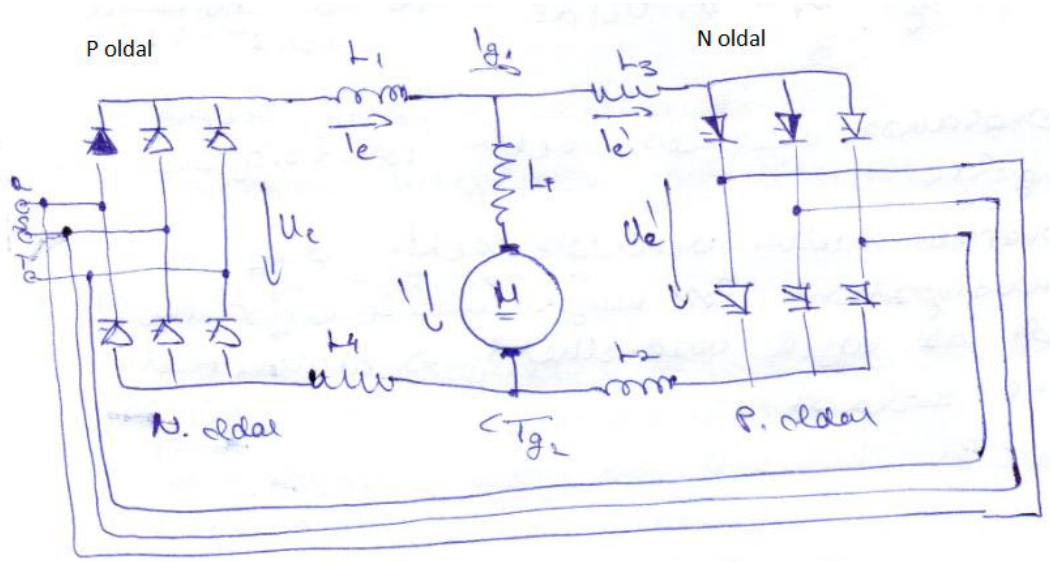
Hogy ne legyen köráram:
$U_e=U_e'$
$180°-\propto=\propto'$

Mivel $U_e=U_e'$ csak középértékre igaz → pillanatértékre nem igaz → lesz köráram → nincs haszna → korlátozni kell, pl. induktivitással.

$$\dot{L_q} = \frac{1}{L_q} \cdot \int (U_1 - U_R) dt$$

Ahol L_q L_1, L_2, L_3, stb…

- A köráramos vezérlés esetén szükség van L_q-kra
- A köráram mentes vezérlés esetén nincs L_q → szabályozással kell megoldani → egyszerre csak az egyik vezérelhető → átmenetnél M=0 szakasz.



Áramirányítók ellenpárhuzamos kapcsolása