

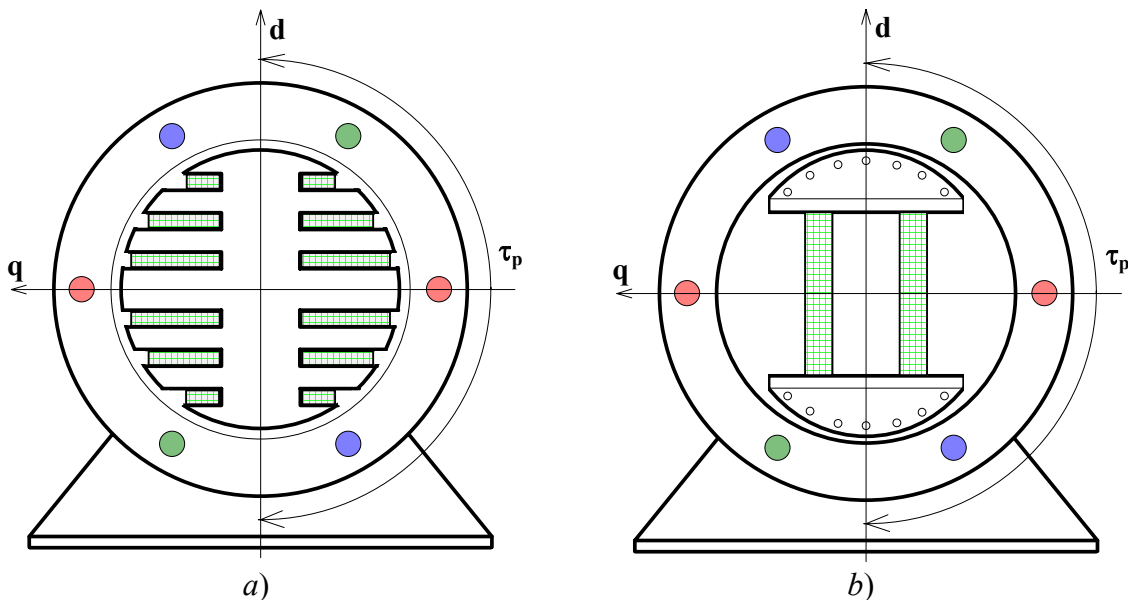
III. Szinkron gépek

A hagyományos szinkron motorokat rendszerint nagy teljesítményű ($P > 100$ kW), állandó fordulatszámú hajtásoknál alkalmazzák, pl. szivattyúk, dugattyús kompresszorok, malmok hajtásainál. Az áramirányítós szinkron motoros hajtással fordulatszám szabályozást, állandó nyomatékkal történő indítást is megvalósítanak. Az állandó mágneses szinkrongépek fő alkalmazási területe a szerszámgépek és robotok szervohajtásaiban van.

A szinkron generátorokat erőművi vagy segédüzemi, illetve tartalék forrásokban villamos energia termelésre használják.

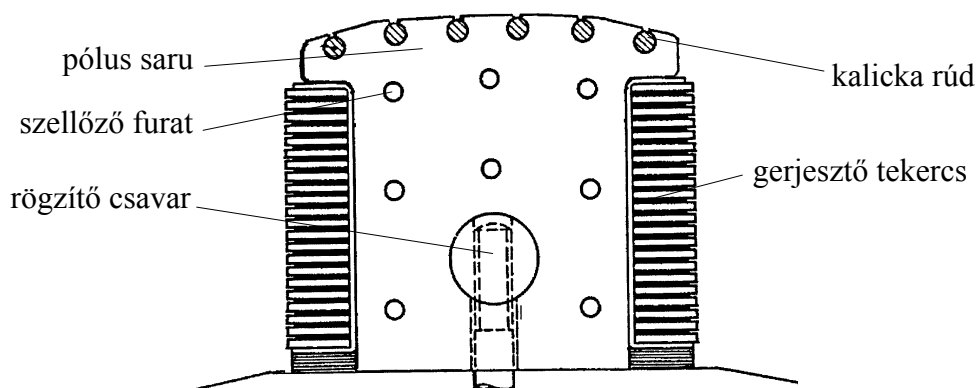
A szinkron gép felépítése

Az állórészén rendszerint háromfázisú tekercrendszer (armatúra) van, forgórésze hengeres (állandó légrésű) vagy kiálló pólusú (változó légrésű). A forgórész mágneses terét egyenárammal gerjesztett tekercsel vagy a forgórészre rögzített állandó mágnessel állítják elő.

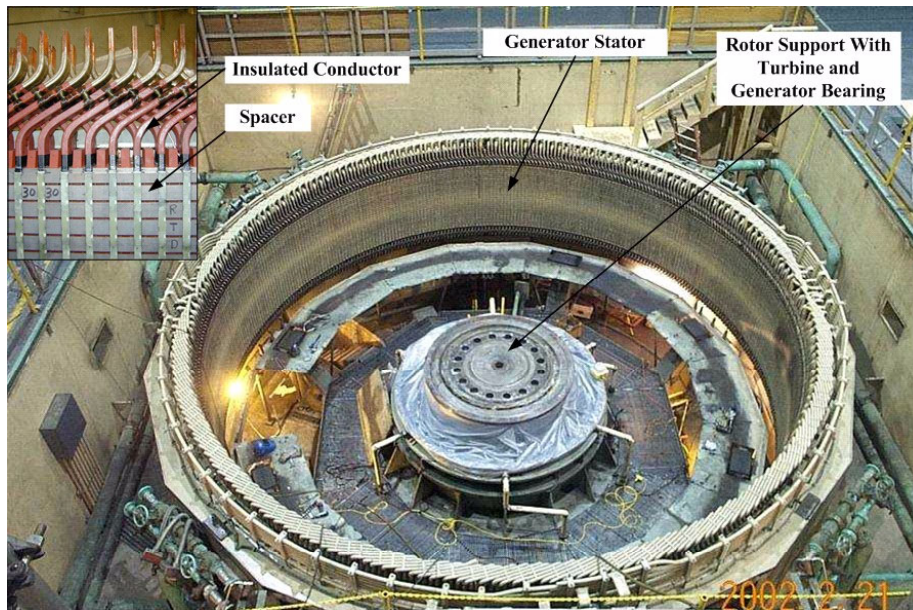


a) Hengeres forgórészű és b) kiálló pólusú szinkron gép vázlatja

A forgórész pólusaiban gyakran rövidrezárt tekercset képező kalickákat helyeznek el az aszinkron indítás és az üzemi lengések csillapítása céljából.



Kiálló pólus felépítése, az indító/csillapító kalicka elhelyezkedése a pólussaruban



Függőleges tengelyű hidrogenerátor állórésze



Függőleges tengelyű kiálló pólusú hidrogenerátor forgórésze

A szinkron gép működése

Motor üzemben az f_1 (hálózati) tápfrekvenciájú áramok az állórész tekercsrendszerével forgó mágneses mezőt (pólusrendszert) létesítenek. Ehhez a mezőhöz kapcsolódik a forgórész által létrehozott pólusrendszer, ami a forgórészszel együtt forog. A hálózatról táplált szinkron gép egyetlen fordulatszámon – az állórész mező fordulatszámával megegyező ún. szinkron fordulatszámon – üzemképes.

$$n_1(n_0) = \Omega_1 \frac{60}{2\pi} = f_1 60, \quad n_{1m} = \frac{n_1}{p} = \frac{\Omega_1}{p} \frac{60}{2p} = \frac{f_1 60}{p},$$

n_1 – a villamos, n_{1m} – a mechanikai szinkron fordulatszám, Ω_1 – a villamos és Ω_{1m} a mechanikai szinkron szögsebesség.

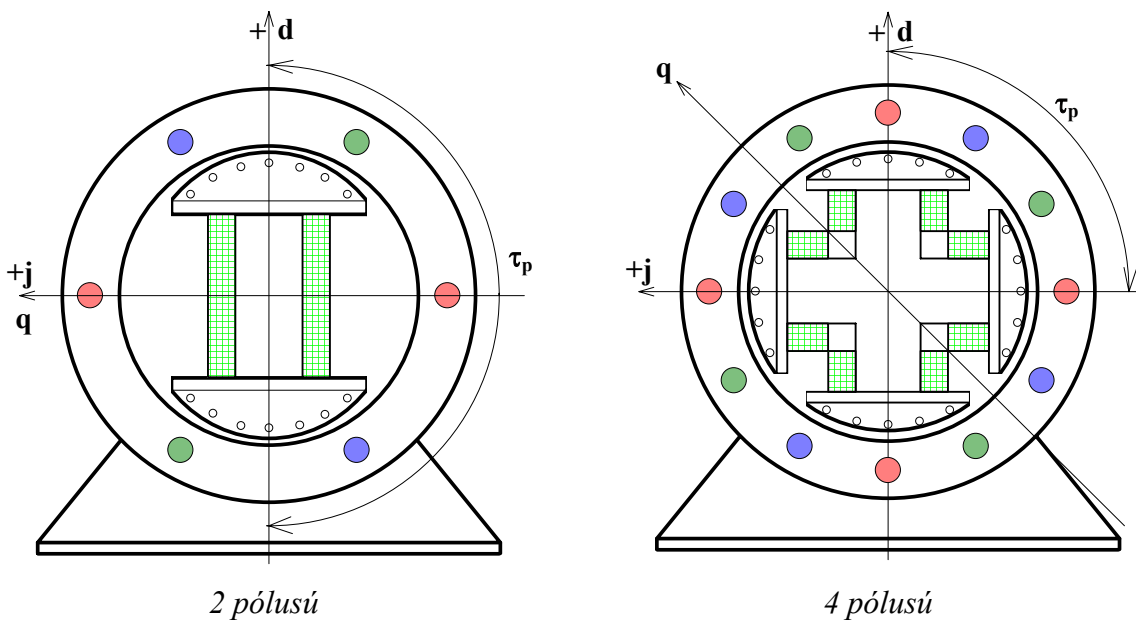
III. Szinkron gépek

Generátor üzemben a forgórész egyenárammal gerjesztett tekercsei a légrés mentén közel szinuszos eloszlású mágneses teret hoznak létre. Ez a mágneses tér együtt forog a forgórészszel és metszi az állórész 3 fázisú tekercseinek vezetőit. A szinuszos eloszlás a gerjesztő tekercs vezetőinek térbeli eloszlásával, vagy a légrés kialakításával érhető el, illetve közelíthető. A szinuszos térbeli eloszlású indukcióval való erővonalmetszés mértéke időben szinuszos (vagy koszinuszos). Ha a vezetőkeret (állórész tekercs) által átfogott fluxus változása szinuszos (vagy koszinuszos), akkor a vezetőkben indukálódó feszültség időbeli változása is szinuszos (vagy koszinuszos). Az állórészben indukálódó feszültség f_1 frekvenciája a forgórész n_{1m} (mechanikai) fordulatszámától (Ω_{1m} mechanikai szögsebességétől) és a p póluspár számtól függ, villamos n_1 , Ω_1 vagy mechanikai n_{1m} , Ω_{1m} mennyiségekkel:

$$f_1 = \frac{n_1}{60} = \frac{\Omega_1}{2\pi}, \text{ vagy } f_1 = p \frac{n_{1m}}{60} = p \frac{\Omega_{1m}}{2\pi}.$$

A forgórész mező irányát hossz- (direct), a rá merőlegeset kereszt (quadrature) iránynak nevezik és „ d ”, illetve „ q ” betűvel jelölik. (A merőleges irány villamos vagy mágneses 90° -ot jelent.)

A két pólusrendszer együtt forog. Motor üzemben a forgórész, generátor üzemben az állórész tekercs pólusrendszerének pozíciója elmarad a másikhöz képest. A közöttük lévő, β -val jelölt szögeltérés terhelésfüggő, ezért terhelési szögnek nevezik. A terhelési szöget villamos fokban mérik.



Az állórészt, mivel üzemszerűen a feszültség az állórészben indukálódik, armatúrának nevezik, az állórész változóinak megnevezésére is ezt a jelzőt használják, pl. armatúra áram, armatúra fluxus.

Hengeres forgórészű szinkron gép feszültség egyenlete

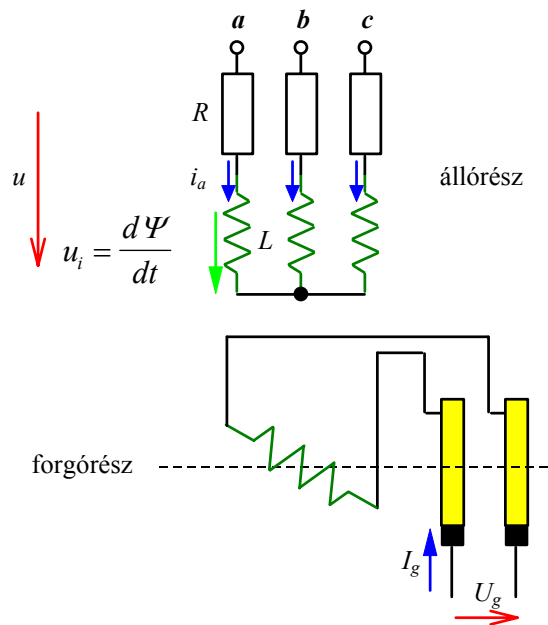
Az állórész fázistekercseinek motor üzemben, az állórész egy fázisára:

$$u(t) = i(t)R + \frac{d\psi(t)}{dt}$$

vagy szinusz függvény szerinti időbeli változásnál, állandósult állapotban komplex fázorokkal felírva:

$$\bar{U} = \bar{I}_a R + \frac{d\bar{\Psi}}{dt} = \bar{I}_a R + j\Omega_1 \bar{\Psi},$$

\bar{U} – a kapocsfeszültség, \bar{I}_a – az armatúra áram, $\bar{\Psi}$ – az állórész eredő fluxusának fázora, R – az állórész fázistekercsének ellenállása nagy betűkkel az állandósult értékeket jelölve.



A szinkron gép álló- és forgórészének áramköri vázlatja

Az állórész $\bar{\psi}$ eredő tekercsfluxusa összetevőkre bontható:

$$\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_s + \bar{\Psi}_m = \bar{\Psi}_s + \bar{\Psi}_a + \bar{\Psi}_p,$$

ahol

$\bar{\Psi}_s$ – az állórész szórt fluxusa, $\bar{\Psi}_m$ – az álló- és a forgórészrel egyaránt kapcsolódó kölcsönös fluxus, $\bar{\Psi}_a$ – kölcsönös fluxus állórész tekercs (armatúra) által létrehozott része, Ψ_p – kölcsönös fluxus forgórész (pólus) tekercs által létrehozott része.

A fluxusösszetevők (Ψ_p kivételével) úgy szemléltethetők, hogy azokat az I_a állórész áram hozza létre valamilyen induktivitáson (Ψ_p -t a forgórész I_g gerjesztő árama hozza létre), az indukált feszültségek pedig ezen induktivitásokon fellépő önindukciós feszültségek, illetve a Ψ_p által az állórész tekercselésben létrehozott forgási indukált feszültség.

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_s &= L_s \bar{I}_a & j\omega_1 \bar{\Psi}_s &= jX_s \bar{I}_a, \\ \bar{\Psi}_a &= L_a \bar{I}_a & j\omega_1 \bar{\Psi}_a &= jX_a \bar{I}_a, \\ \bar{\Psi}_p &= L_a \bar{I}_g & j\omega_1 \bar{\Psi}_p &= \bar{U}_p, \end{aligned}$$

itt L_s – az állórész szórásos induktivitása, L_a – az állórész (armatúra) és a forgórész közötti kölcsönös induktivitás, X_s és X_a pedig a megfelelő reaktanciák névleges frekvencián.

III. Szinkron gépek

A forgórész gerjesztő tekercsének teljes $\bar{\Psi}_g$ fluxusa az álló- és a forgórészrel egyaránt kapcsolódó $\bar{\Psi}_m$ kölcsönös fluxus és a forgórész $\bar{\Psi}_{gs}$ szórt fluxusának összege:

$$\bar{\Psi}_g = \bar{\Psi}_m + \bar{\Psi}_{gs} = L_a(\bar{I}_g + \bar{I}_a) + L_{sg}\bar{I}_g = \bar{\Psi}_p + \bar{\Psi}_a + L_{gs}\bar{I}_g,$$

itt L_{gs} – a forgórész szórási induktivitása. A forgórész (gerjesztő kör) szórt fluxusának nincs hatása az állórész feszültségére.

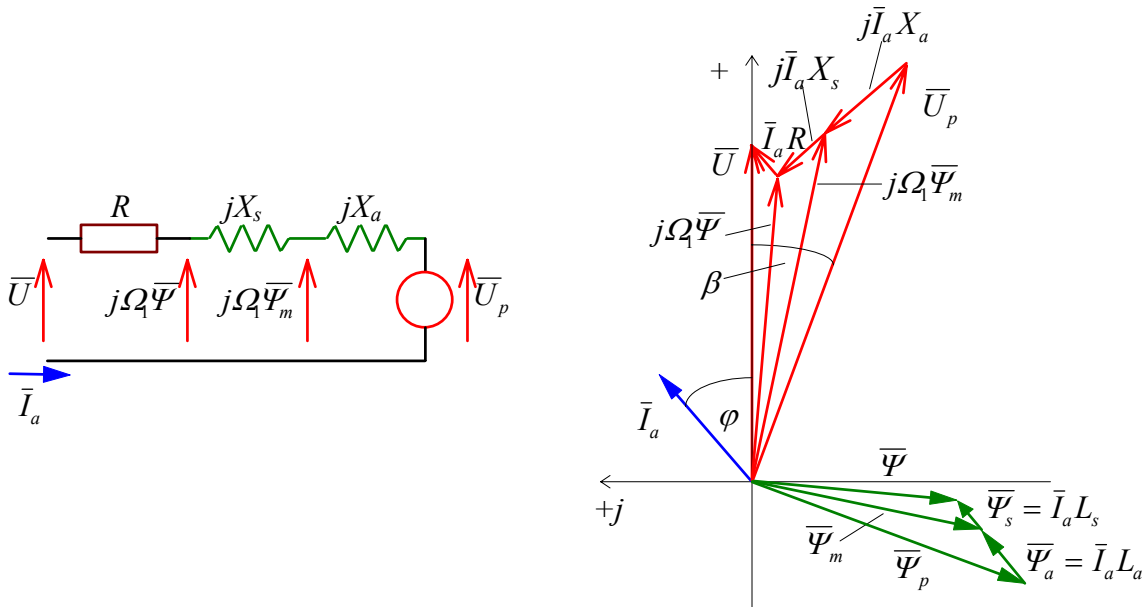
Az állórész feszültség egyenlete a fentiekkel:

$$\bar{U} = \bar{I}R + jX_s\bar{I} + jX_a\bar{I} + \bar{U}_p.$$

Az U_p pólusfeszültség a forgórész gerjesztő-tekercsének (d -irányú) fluxusa által az állórész tekercseiben indukált feszültség, üresen járó generátornál ($I_a=0$) a kapcsokon mérhető.

Az \bar{U} hálózati és az \bar{U}_p pólusfeszültség vektora közötti (villamos) szög a β terhelési szög.

Definíciója szerint ez a szög motor üzemben pozitív, vagyis akkor, amikor a forgórész késik az állórész mezőhöz képest. A β szög a terhelőnyomaték növekedésekor nő, ideális (mechanikai) üresjárásban $\beta=0$. Generátor üzemben a forgórész siet, így a terhelési szög negatív.

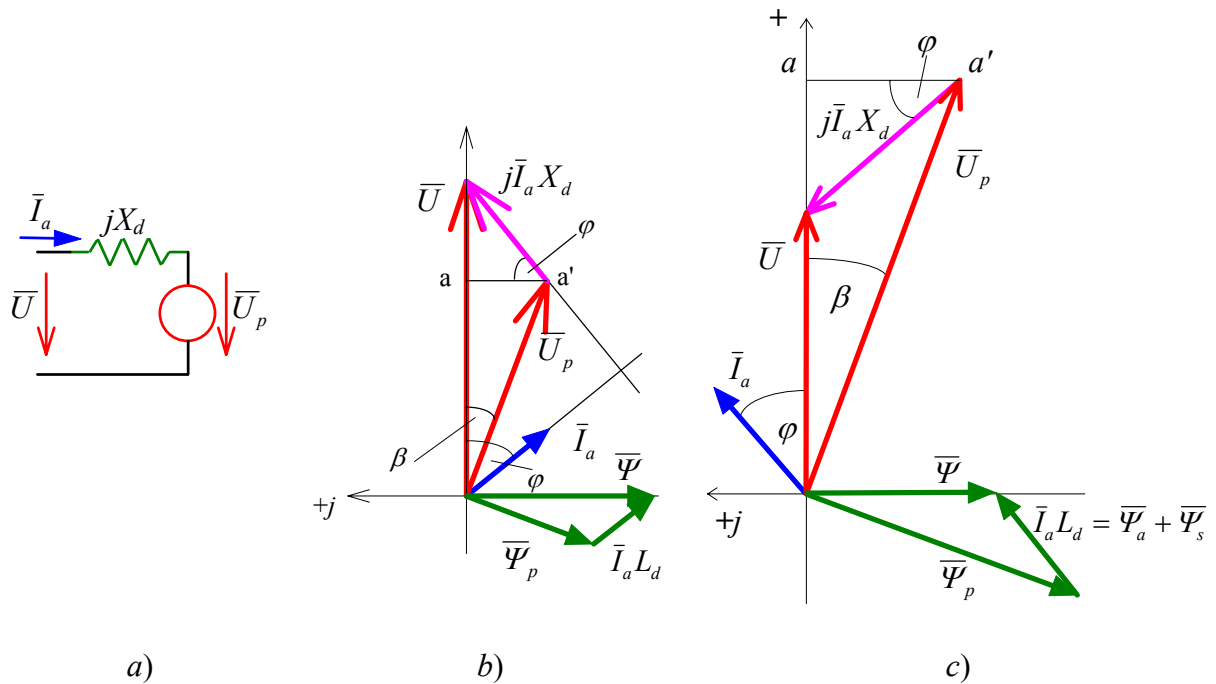


A hengeres forgórészű szinkrongép helyettesítő áramköri vázlatja és vektorábrája (túlgerjesztett, motor)

A túlgerjesztett – alulgerjesztett állapot az állórész tápfeszültség és a pólusfeszültség nagyságára utal. Túlgerjesztett állapotban a forgórész gerjesztésétől függő U_p pólusfeszültség amplitúdója (effektív értéke és vektorának hossza) nagyobb a tápfeszültségénél $U_p > U$, alulgerjesztett állapotba fordítva, $U_p < U$.

Az X_a armatúra reaktancia és az állórész X_s szórási reaktanciája összevonható: $X_s + X_a = X_d$, ahol X_d – a d -irányú szinkron reaktancia, ami hengeres forgórészű gépnél megegyezik az X_q q -irányú reaktanciával. Mivel rendszerint $X_d \gg R$, ezért minőségi vizsgálatoknál az állórész ellenállást gyakran elhanyagolják. Ennek megfelelően az állórész egyszerűsített feszültség egyenlete:

$$\bar{U} = jX_d\bar{I}_a + \bar{U}_p.$$



A szinkron gép egyszerűsített helyettesítő vázlatát a) illetve vektorábrája alulgerjesztett b) és túlgerjesztett állapotban c)

Teljesítmény, nyomaték

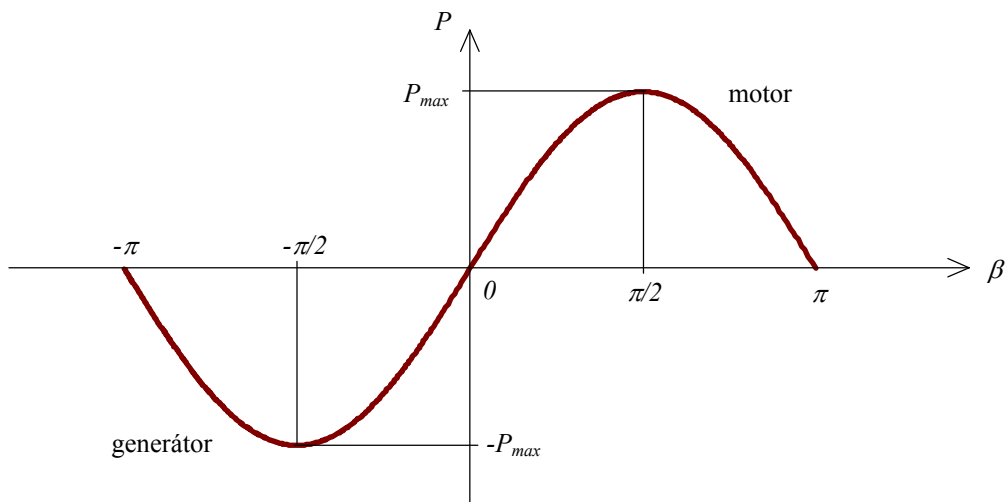
A 3-fázisú felvett teljesítmény:

$$P = 3\bar{U}\bar{I} = 3UI \cos \varphi .$$

Az R állórész ellenállás elhanyagolásával felrajzolt egyszerűsített vektorábrákon látható aa' szakasz hossza a két érintett háromszögből:

$\bar{a}\bar{a}' = I_a X_d \cos \varphi = U_p \sin \beta$, amivel

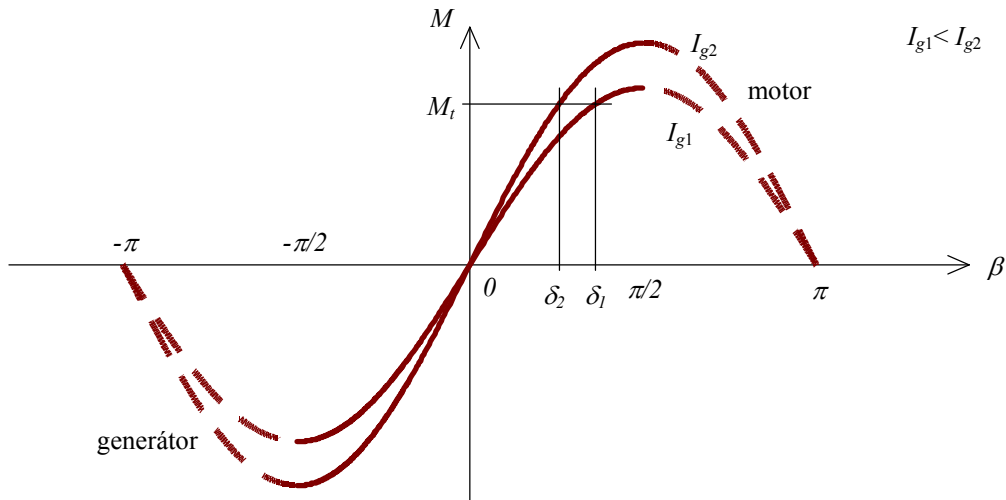
$$P = 3 \frac{U U_p}{X_d} \sin \beta .$$



A szinkron gép teljesítmény - terhelési szög jelleggörbéje

A nyomaték a teljesítményből a mechanikai szinkron szögsebességgel számítható

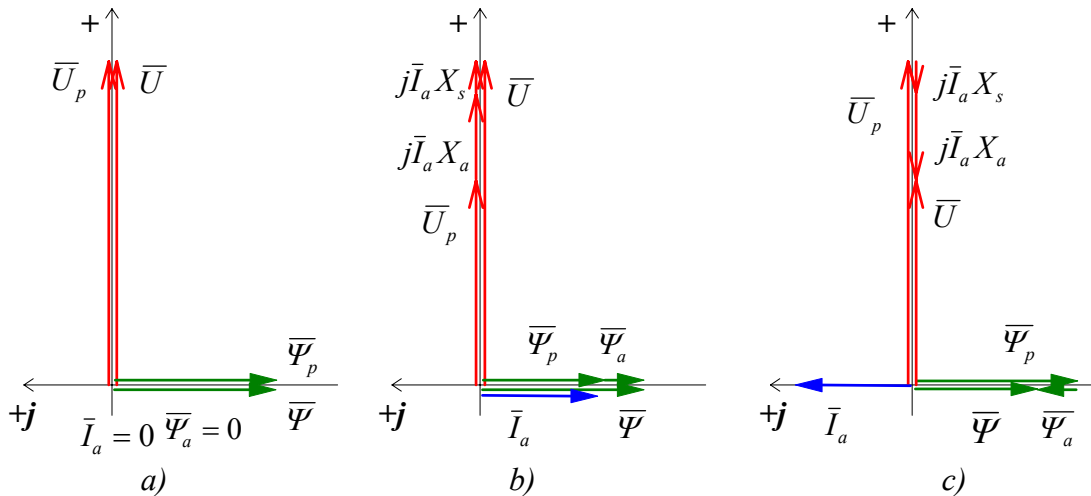
$$M = \frac{P}{\Omega_{1m}} = 3 \frac{p}{w_1} \frac{U U_p}{X_d} \sin \beta.$$



A gerjesztő áram változtatás hatása a mechanikai jelleggörbe statikus munkapontjára

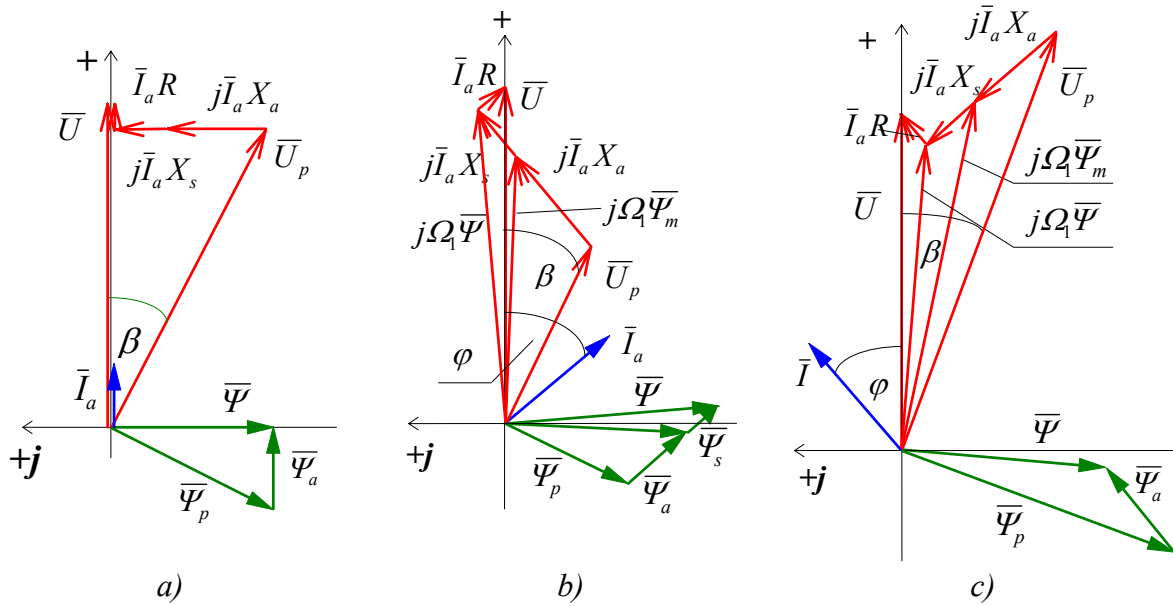
Fázorábrák állandósult állapotban

A szinkrongép fázorábrája az egyes jellegzetes üzemmódokban és gerjesztettségi állapotokban az alábbiak szerint alakul.

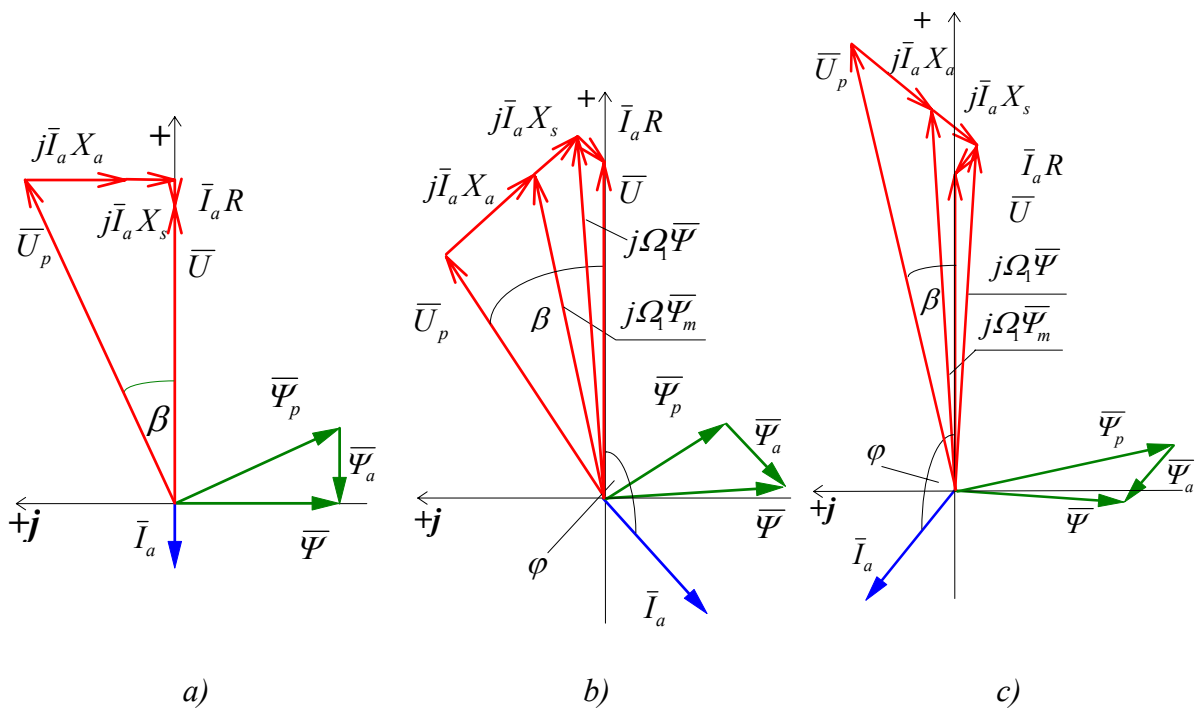


Végtelen hálózatra kapcsolt szinkron gép üresjárási ($\delta=0$) fázorábrája
 a) $U=U_p$, b) alulgerjesztett ($U>U_p$), c) túlgerjesztett ($U<U_p$)

Az üresen járó szinkron gép árama a gerjesztettség állapotától függően 90°-ot késik vagy siet a hálózati feszültséghez képest. Ezért a szinkron gép, motor üzemben, a terhelési állapotától függetlenül is alkalmas meddő teljesítmény szabályozására.



Végtelen hálózatra kapcsolt szinkron motor vektorábrája a) $\cos\varphi=1$ esetén, b) alulgerjesztett, c) túlgerjesztett állapotban



Végtelen hálózatra kapcsolt szinkron generátor vektorábrája a) $\cos\varphi=1$ esetén, b) alulgerjesztett, c) túlgerjesztett állapotban

A szinkron generátor hatásos teljesítménye a terhelési szöggel (a hajtó nyomaték nagyságával), meddő teljesítménye a gerjesztéssel (pólus feszültség) változtatható.

Áram vektor-diagram

Az egyszerűsített állórész feszültség egyenletből az állórész áram vektora

III. Szinkron gépek

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{U} - \bar{U}_p}{jX_d} = \frac{\bar{U}}{jX_d} - \frac{\bar{U}_p}{jX_d}$$

Amennyiben az U hálózati feszültség állandó és vektorának irányát a (+) valós tengely irányában vesszük fel, akkor a pólusfeszültség vektora $\bar{U}_p = U_p e^{-j\delta}$. Ha az I_g gerjesztő áram, és ezzel U_p pólusfeszültség állandó, akkor az \bar{I} állórész áram vektorának kifejezése

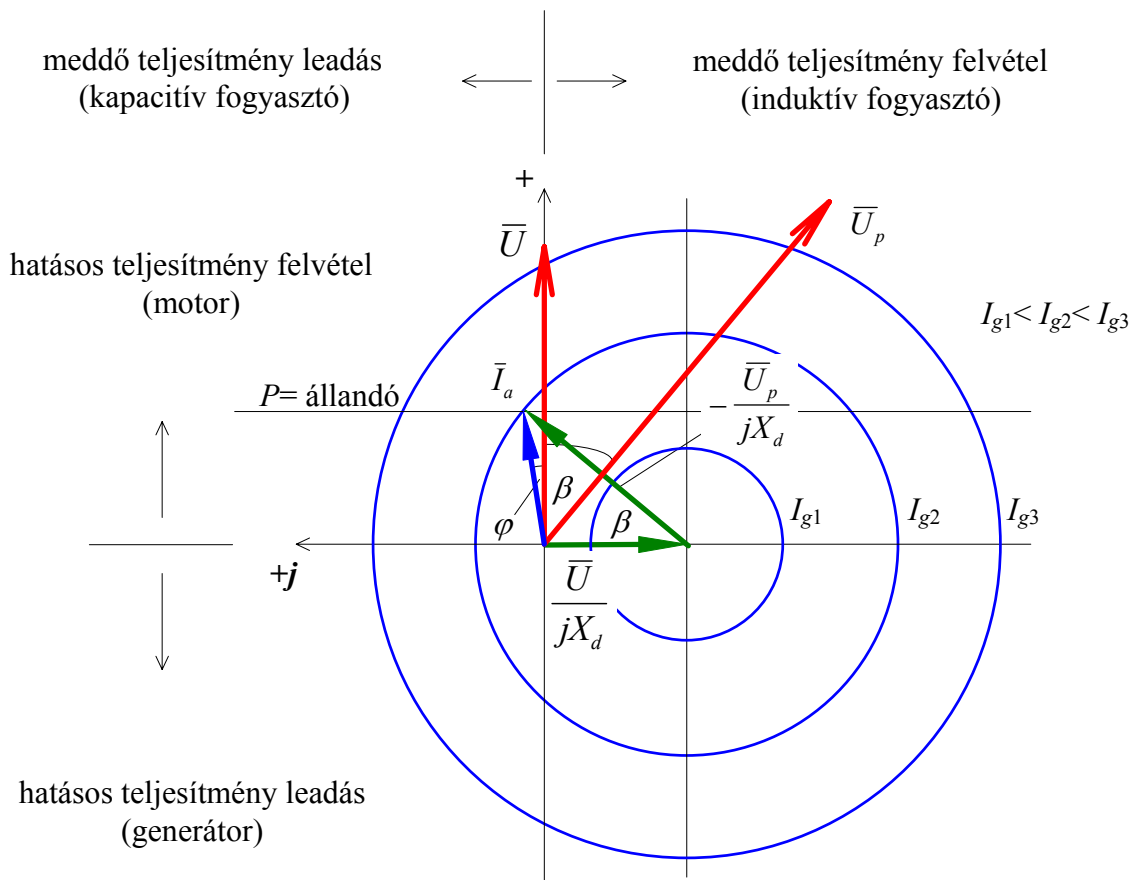
$$\bar{I}_a = \frac{U - U_p e^{-j\beta}}{jX_d} = \frac{U}{jX_d} - \frac{U_p e^{-j\beta}}{jX_d}$$

alakú, vagyis az \bar{I}_a áramvektor végpontjának mértani helye a terhelési szög változásakor egy olyan körív, amelynek középpontja a koordinátarendszer origójától $\frac{U}{X_d}$ távolságra van a (-) képzetes tengelyen, sugara pedig $\frac{U_p}{X_d}$ nagyságú.

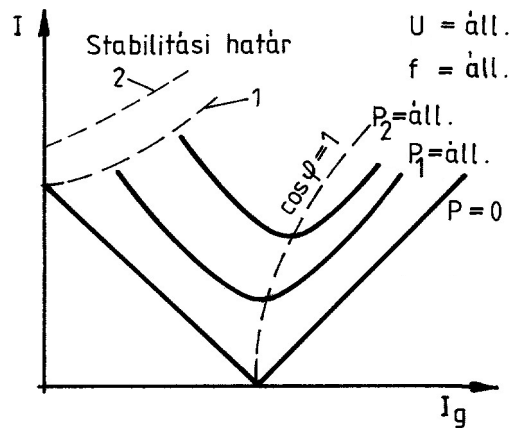
Különböző forgórész gerjesztések (különböző U_p értékek) mellett különböző sugarú koncentrikus köríveket kapunk.

Az U hálózati feszültség állandónak feltételezett értéke miatt a határos teljesítmény az áramvektor valós, a meddő teljesítmény pedig az áramvektor képzetes komponensével arányos.

A gerjesztő áram változtatása mellett az állandó P határos teljesítményhez tartozó mért vagy számított munkapontok áramaiból felrajzolható az $I(I_g)$ kapcsolat, a szinkron gép „V” görbéje.



Hengeres forgórészű szinkrongép áram vektor-diagramja



Állórész áram a gerjesztő áram függvényében (V-görbék)

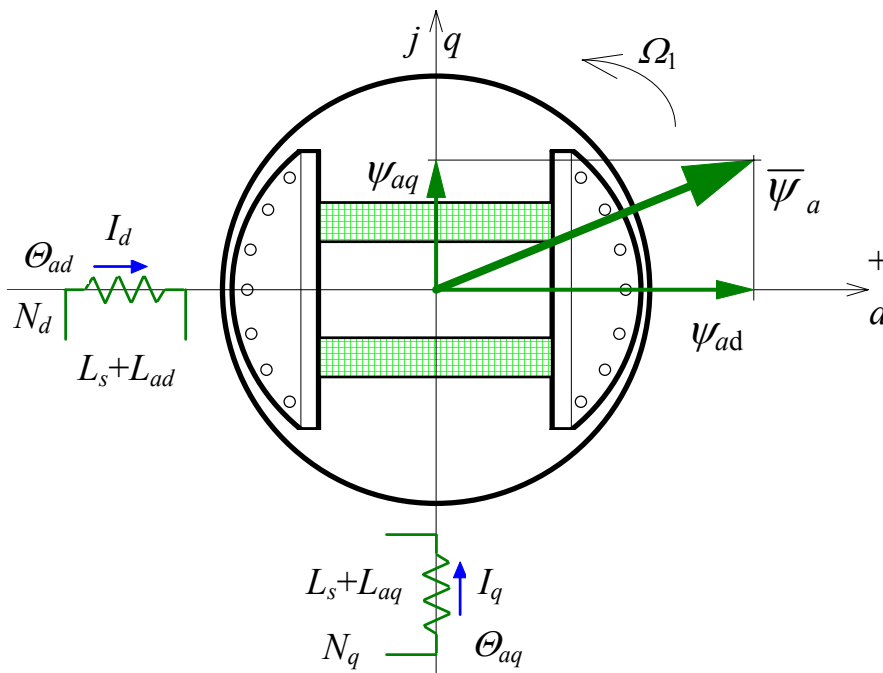
A kiálló pólusú szinkrongép

A kiálló pólusú gépnél a forgórész aszimmetriája miatt az egyenleteket célszerű forgórészhez rögzített (d - q) koordináta rendszerben felírni, majd az így kapott eredményt transzformálni a szokásos, állórész feszültséghez rögzített koordináta rendszerbe. d - és q -irányban eltérő a mágneses vezetőképesség (Λ_{ad} és Λ_{aq}), az armatúra Ψ_a tekercsfluxusa irányfüggő, ezért azt d - és q -irányú összetevőkre bontjuk.

$$\bar{\Psi}_a = \bar{\Psi}_{ad} + \bar{\Psi}_{aq}.$$

A felbontás úgy illusztrálható, hogy az állórészen két, egymásra merőleges tekercs van, Ψ_{ad} -t a Θ_{ad} gerjesztés, illetve az I_d áramkomponens hozza létre a d -irányú tekercs N_d menetén ($\Psi_{ad} = N_d \Phi_{ad} = N_d \Theta_{ad} \Lambda_{ad}$), Ψ_{aq} -t a Θ_{aq} gerjesztés, illetve I_q áramkomponens a q -irányú tekercs N_q menetén ($\Psi_{aq} = N_q \Phi_{aq} = N_q \Theta_{aq} \Lambda_{aq}$).

Az áramkomponensekkel kifejezve $\Psi_{ad} = I_d N_d^2 \Lambda_{ad} = I_d L_{ad}$ és $\Psi_{aq} = I_q N_q^2 \Lambda_{aq} = I_q L_{aq}$.



A kiálló pólusú szinkrongép állórész paramétereinek és változóinak d - és q -irányú összetevői

III. Szinkron gépek

Ha olyan koordináta rendszert választunk, amelyikben d a valós és q a képzetes tengely, a pólusfluxus valós ($\bar{\Psi}_p = \Psi_p$), akkor $\bar{I}_a = I_d + jI_q$ és a $\bar{\Psi}_a = \Psi_{ad} + j\Psi_{aq} = I_d L_{ad} + jI_q L_{aq}$ eredő armatúra fluxus által az állórészben indukált feszültség

$$j\Omega_1 \bar{\Psi}_a = jI_d X_{ad} - I_q X_{aq}.$$

Az állórész feszültség egyenlete, feltételezve, hogy az X_s szórási reaktancia és az R armatúra ellenállás d - és a q -irányban azonos:

$$\bar{U} = \bar{I}_a R + j\bar{I}_a X_s + j\Omega_1 \bar{\Psi}_a + j\Omega_1 \bar{\Psi}_p,$$

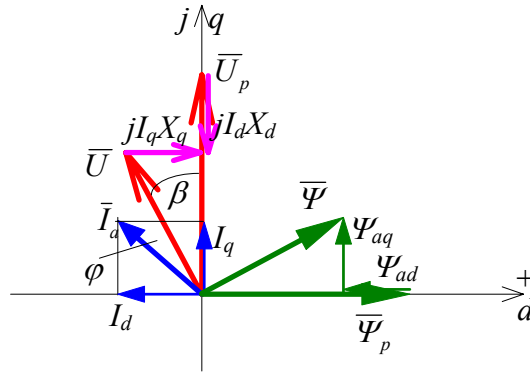
$\Omega_1 \Psi_p = U_p$ és behelyettesítve az armatúrafluxus által indukált feszültséget

$$\bar{U} = (I_d + jI_q)R + j(I_d + jI_q)X_s + jI_d X_{ad} - I_q X_{aq} + jU_p$$

Az azonos irányú reaktanciák összevonásával kapjuk a d - és q -irányú szinkron reaktanciát X_d -t és X_q -t:

$$X_d = X_s + X_{ad} \text{ és } X_q = X_s + X_{aq}$$

az aszimmetria miatt $X_d > X_q$ (gerjesztett forgórészű gépeknél).



A kiálló pólusú túlgerjesztett szinkron motor vektorábrája

Az ohmos feszültségesés elhanyagolásával az állórész egyszerűsített feszültségegyenlete:

$$\bar{U} = jI_d X_d - I_q X_q + jU_p$$

Motor üzemben a hálózat \bar{U} feszültsége siet a q -tengely irányába mutató \bar{U}_p pólusfeszültséghez képest ($\bar{U} = Ue^{-j\beta}$), túlgerjesztett állapotban az \bar{I}_a áram siet \bar{U} -hoz képest ($\bar{I} = Ie^{-j(\beta-\phi)}$).

Az állórész feszültsége d - q koordináta rendszerben:

$$\bar{U}_{d-q} = U \sin(-\beta) + jU \cos \beta = -I_q X_q + jI_d X_d + jU_p.$$

A feszültség egyenlet vetületi alakjai

a valós (d -irányú) összetevők:

$$-U \sin \beta = -I_q X_q, \text{ ebből } I_q = \frac{U}{X_q} \sin \beta = \frac{U}{X_q} \frac{e^{j\beta} - e^{-j\beta}}{2j},$$

a képzetes (q -irányú) összetevők:

$$U \cos \beta = I_d X_d + U_p, \text{ amiből } I_d = \frac{U}{X_d} \cos \beta - \frac{U_p}{X_d} = \frac{U}{X_d} \frac{e^{j\beta} + e^{-j\beta}}{2} - \frac{U_p}{X_d}.$$

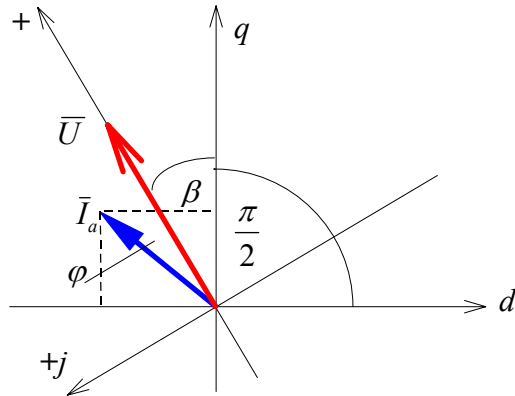
Fentiekkel az áram d - q koordináta rendszerben:

$$\bar{I}_{d-q} = I_d + jI_q = \frac{U}{X_d} \cos \beta - \frac{U_p}{X_d} + j \frac{U}{X_q} \sin \beta = \frac{U}{X_d} \frac{e^{j\beta} + e^{-j\beta}}{2} - \frac{U_p}{X_d} + j \frac{U}{X_q} \frac{e^{j\beta} - e^{-j\beta}}{2j}$$

$$\bar{I}_{d-q} = \frac{U}{2} e^{j\beta} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) + \frac{U}{2} e^{-j\beta} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) - \frac{U_p}{X_d}, \text{ vagy}$$

$$\bar{I}_{d-q} = \frac{U}{2} e^{j\beta} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) - \frac{U}{2} e^{-j\beta} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{U_p}{X_d}, \text{ mivel } X_d > X_q.$$

Térjünk vissza a hálózati feszültséghez rögzített koordinátákhoz. Az áram vektor egyenletén az alábbi átalakításra van szükség:



A koordináta transzformáció szemléltetése

$$\bar{I} = \bar{I}_{d-q} e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right)}.$$

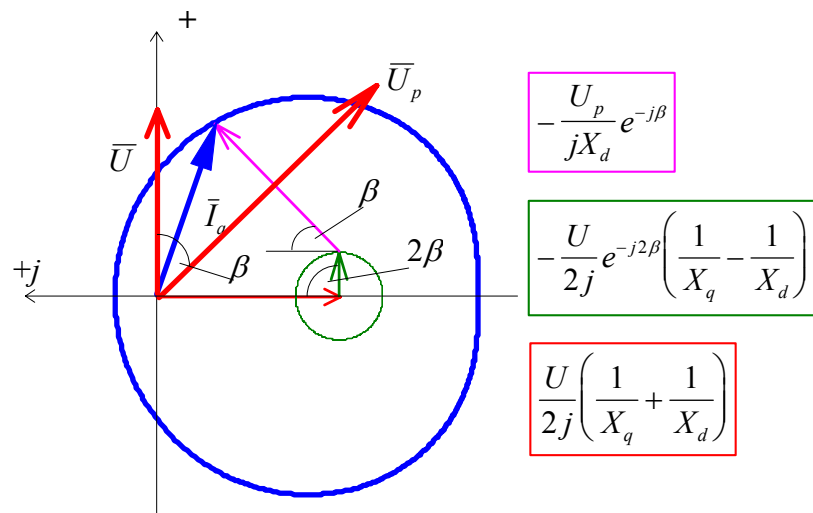
Mivel $e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right)} = e^{-j\frac{\pi}{2}} e^{-j\beta} = \frac{e^{-j\beta}}{j}$

$$\bar{I} = \frac{U}{2j} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) - \frac{U}{2j} e^{-j2\beta} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{U_p}{jX_d} e^{-j\beta}.$$

Az áram vektornak tehát három összetevője van:

$\frac{U}{2j} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right)$	$-\frac{U}{2j} e^{-j2\beta} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$	$-\frac{U_p}{jX_d} e^{-j\beta}$
1. sugár, a körív független a terheléstől	2. sugár, a körív független a gerjesztéstől	3. sugár, a körív független az aszimmetriától

Az I áram vektor-diagramja az alábbiak szerint alakul:



A kiálló pólusú szinkrongép áramának vektor-diagramja

A teljesítmény és a nyomaték számítása

A hengeres forgórészű géphez hasonlóan a 3-fázisú felvett hatásos teljesítmény az áram valós összetevőjével arányos, mivel U most valós tengely irányú.

$P = 3U \operatorname{Re}\{I\}$, ahol

$$\operatorname{Re}\{I\} = \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\beta + \frac{U_p}{X_d} \sin \beta, \text{ ezt behelyettesítve}$$

$$P = 3 \frac{UU_p}{X_d} \sin \beta + 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\beta.$$

A nyomaték a mechanikai szinkron szögsebességgel számítható:

$$M = \frac{P}{\Omega_m} = \frac{pP}{\Omega_1} = \frac{3pUU_p}{\Omega_1 X_d} \sin \beta + \frac{3pU^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\beta.$$

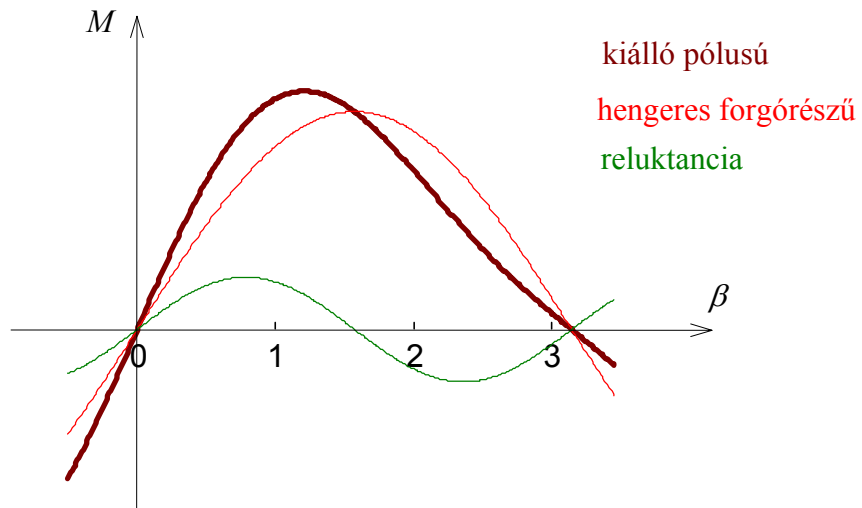
A kiálló pólusú szinkrongép nyomatékának két összetevője van: az egyik megegyezik a hengeres forgórészű gép nyomatékával, a másik a terhelési szög szinuszának kétszeresével változó, csak mágneses aszimmetria esetén – viszont gerjesztés nélkül is – fellépő reluktancia nyomaték.

Egyszerűbb jelöléssel a statikus nyomaték függése a terhelési szögtől:

$$M = M_{\max} \sin \delta + M_r \sin 2\delta,$$

ahol $M_{\max} = \frac{3pUU_p}{\Omega_1 X_d}$ – a hengeres forgórészű gép nyomatékának maximális értéke,

$$M_r = \frac{3pU^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{ – a reluktancia nyomaték maximális értéke.}$$



A kiálló pólusú szinkrongép nyomaték-terhelési szög görbéje

Összeállította: Kádár István
2019. december

Ellenőrző kérdések

1. Milyen mágneses teret hoz létre a szinkron gép állórésze és milyen a forgórésze?
2. Melyek a forgórész legfontosabb kialakítási típusai, mi az eltérés közöttük?
3. Milyen árammal gerjesztik az álló- és milyen a forgórész tekercselését?
4. Mi az indító/csillapító tekercs szerepe, milyen a kialakítása, hol helyezkedik el?
5. Milyen kapcsolat van a szinkron generátor pólusszáma és feszültségének frekvenciája között?
6. Milyen kapcsolat van a szinkron motor pólusszáma és fordulatszámuk között?
7. Írja fel a hengeres forgórészű szinkron gép állórészének feszültség egyenletét, rajzolja fel helyettesítő vázlatát és vektorábráját.
8. Rajzolja fel a hengeres forgórészű és a kiálló pólusú szinkron gép teljesítmény-terhelési szög és nyomaték-terhelési szög jelleggörbéjét.
9. Rajzolja fel a végtelen hálózatra kapcsolt hengeres forgórészű szinkron gép üresjárási vektorábráját $U=U_p$, továbbá alulgerjesztett és túlgerjesztett állapotban.
10. Rajzolja fel a végtelen hálózatra kapcsolt hengeres forgórészű szinkron motor vektorábráját $\cos\varphi=1$ esetére, továbbá alulgerjesztett és túlgerjesztett állapotban.
11. Rajzolja fel a végtelen hálózatra kapcsolt hengeres forgórészű szinkron generátor vektorábráját $\cos\varphi=1$ esetére, továbbá alulgerjesztett és túlgerjesztett állapotban.
12. Írja fel a hengeres forgórészű szinkron gép áram vektorának egyenletét, rajzolja fel a vektor-diagramot.
13. Írja fel a kiálló pólusú szinkron gép állórészének feszültség egyenletét, rajzolja fel a vektorábráját.
14. Rajzolja fel a kiálló pólusú szinkron gép áram vektor-diagramját.