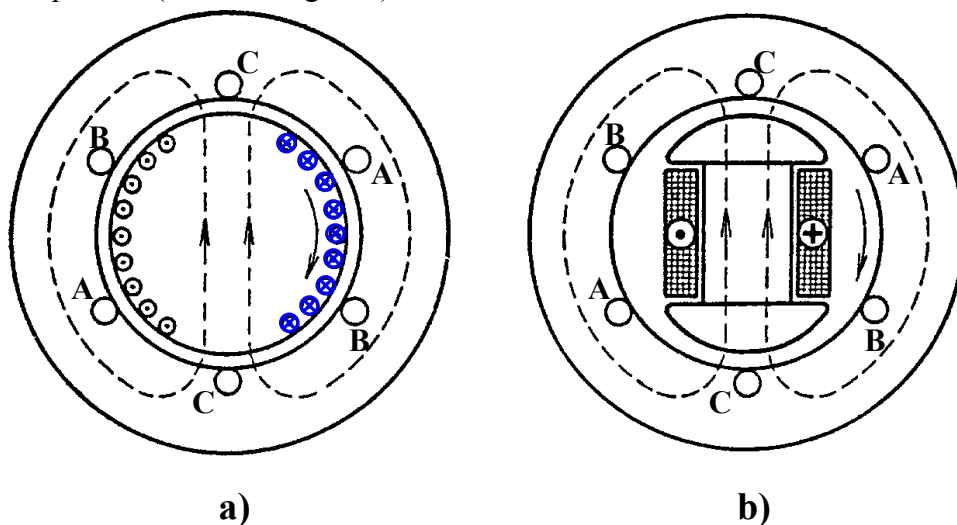


3. SZINKRON MOTOROS HAJTÁSOK

A hagyományos szinkron motorokat rendszerint nagy teljesítményű ($P > 100 \text{ kW}$) 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 állórésze általában 3 fázisú, forgórésze hengeres (állandó légrésű) vagy kiálló pólusú (változó légrésű).

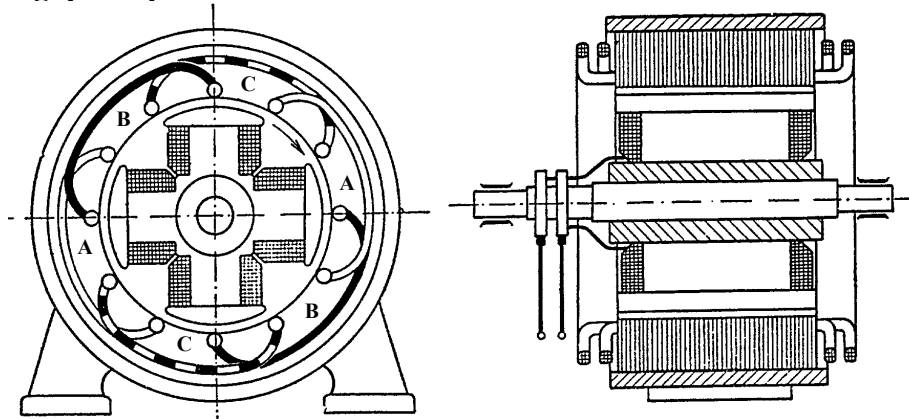


a) Hengeres forgórészű és b) kiálló pólusú szinkron gép vázlatai

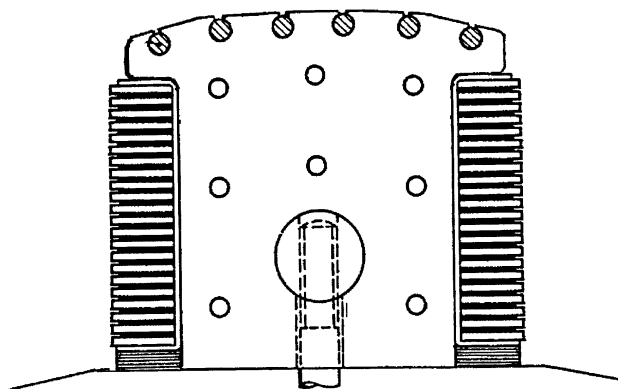
A szinkron gép működése

Az állórész által létrehozott forgó mágneses tér pólusrendszerével kapcsolódik a forgórész gerjesztő tekercse (vagy a forgórészre rögzített állandó mágnes) által létrehozott pólusrendszer. A hálózatról táplált szinkron gép egyetlen fordulatszámon az állórész mező fordulatszámaival megegyező ún. szinkron fordulatszámon üzemképes.

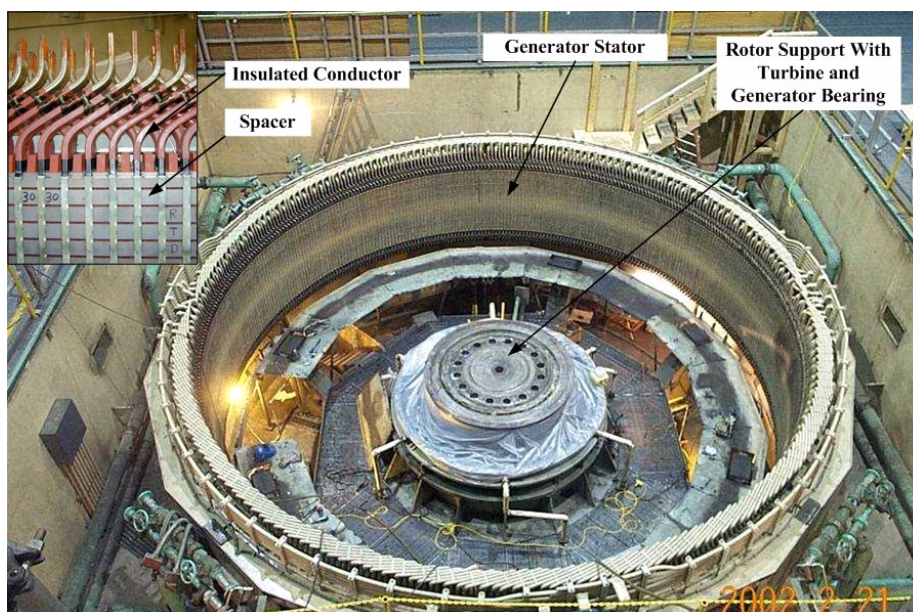
A szinkron gép felépítése



Négypólusú szinkron gép metszétvázlatai



Az indító/csillapító kalicka elhelyezése a pólussaruban



Függőleges tengelyű hidrogenerátor állórésze

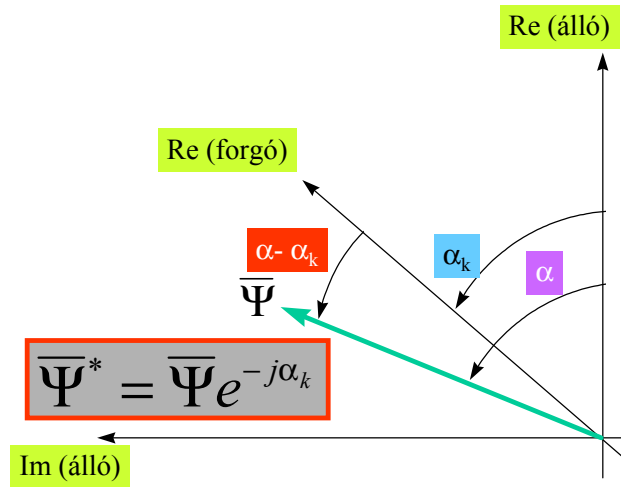


Függőleges tengelyű kiálló pólusú hidrogenerátor forgórésze

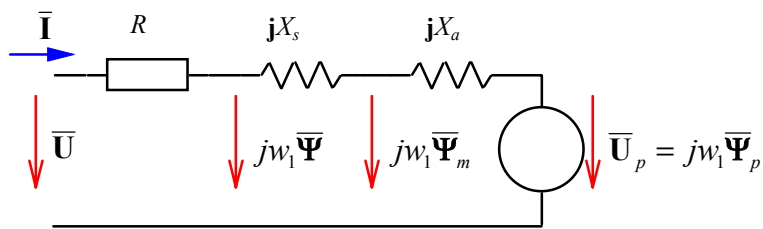
Hengeres forgórészű szinkron gép

A szinkron gép állórészének feszültség egyenlete

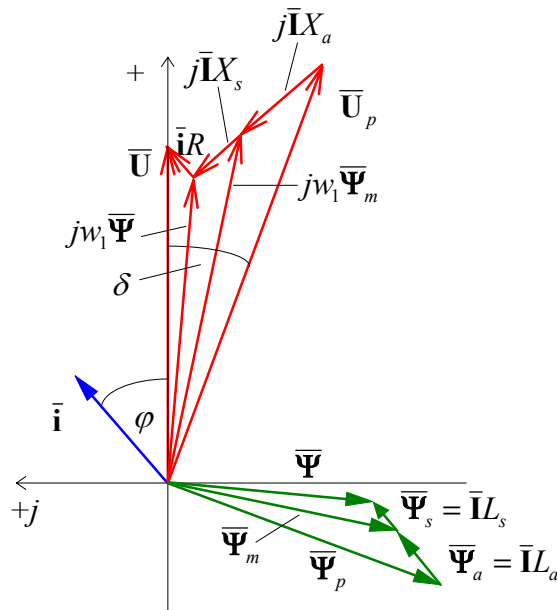
Állórész feszültségegyenlete, vektorábra



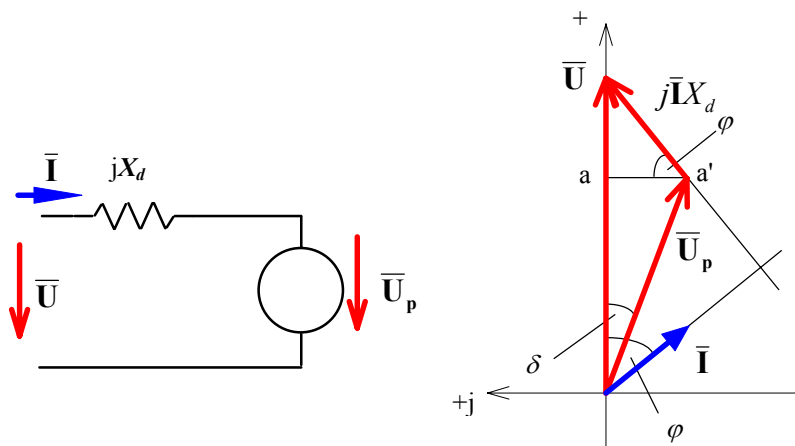
Az állórész változók transzformálása a forgó koordináta rendszerbe



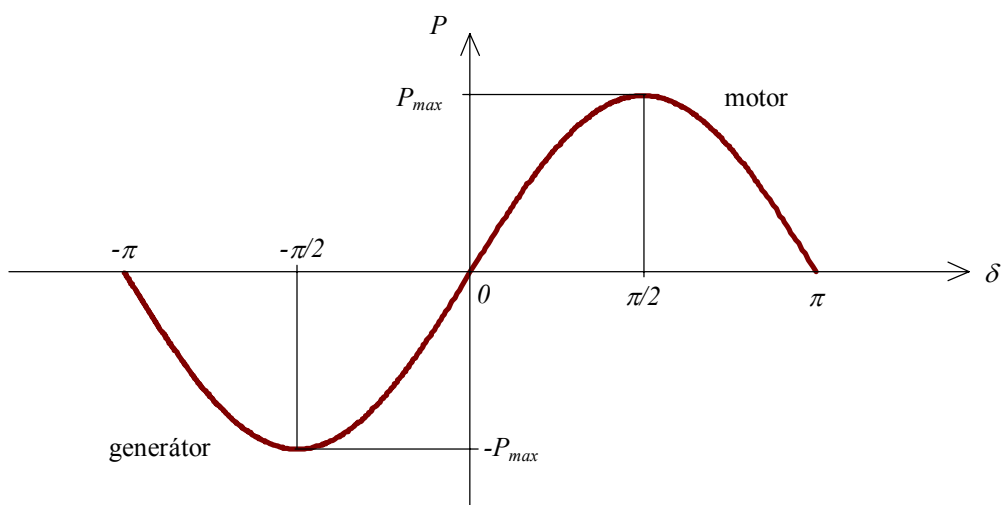
A szinkron gép helyettesítő vázlatja



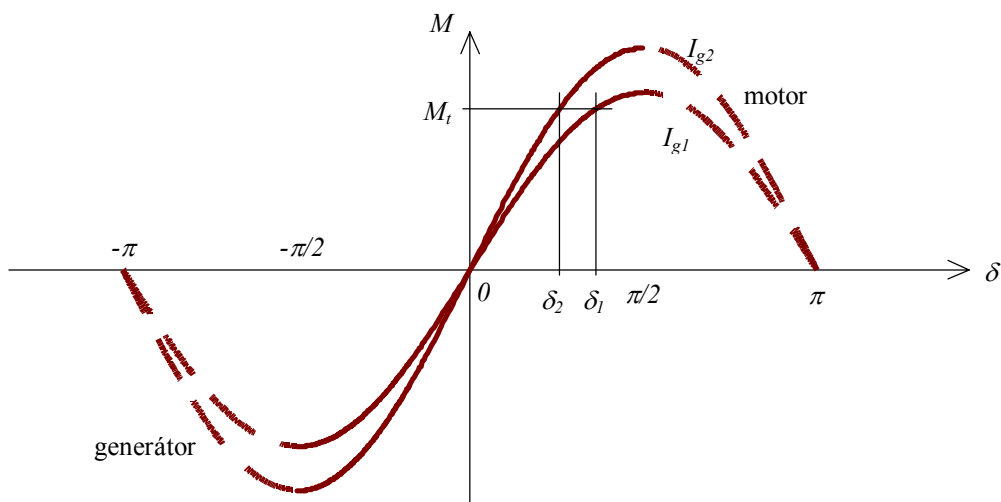
A szinkron gép vektorábrája



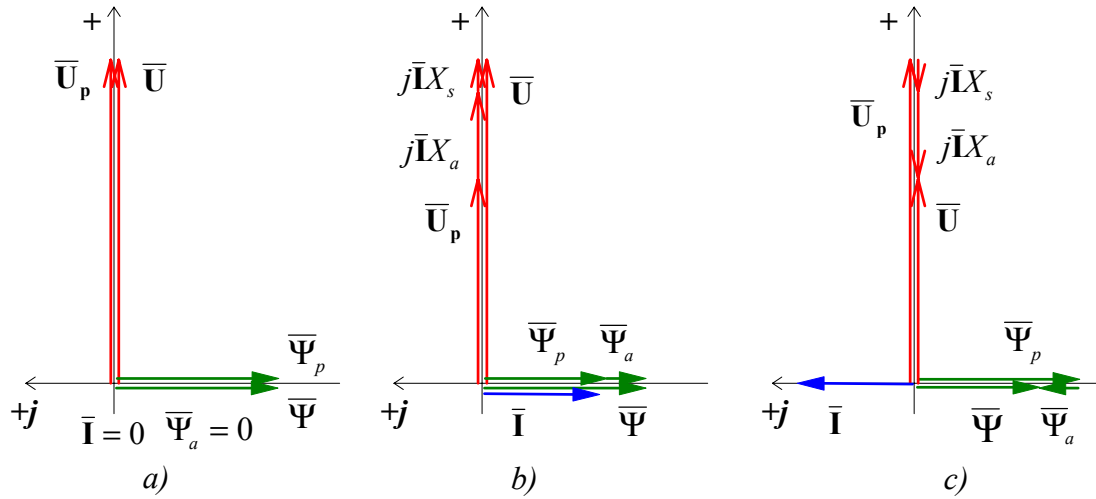
A szinkron gép egyszerűsített helyettesítő vázlatja és vektorábrája



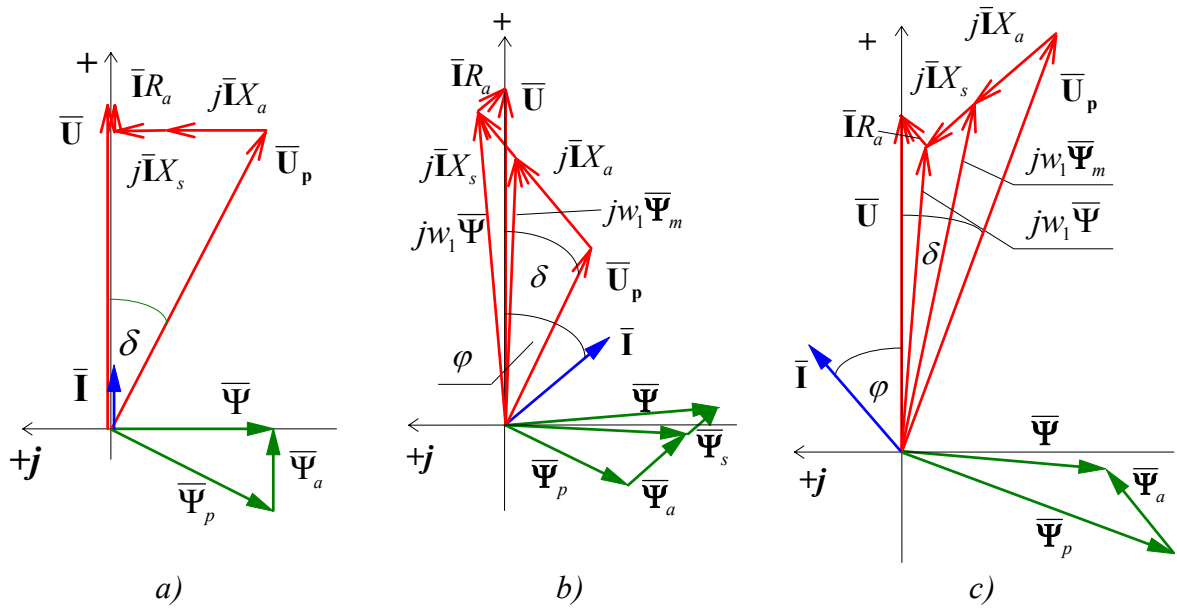
A szinkron gép teljesítmény - terhelési szög jelleggörbéje



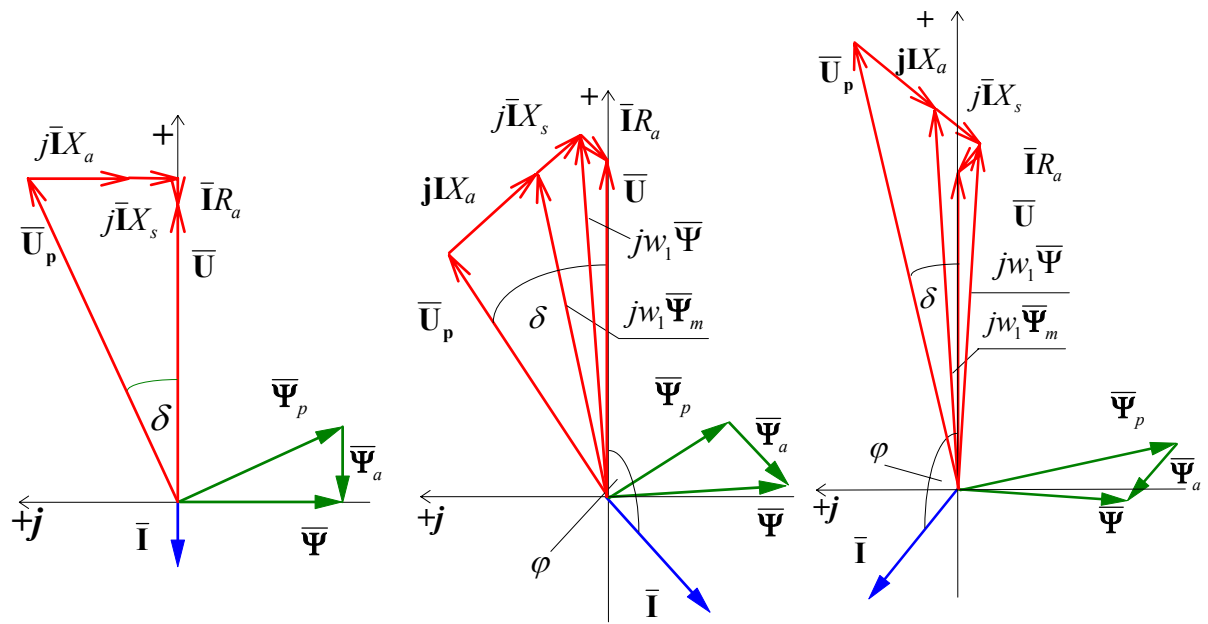
A gerjesztő áram változtatás hatása a statikus munkapontra



Végtelen hálózatra kapcsolt szinkron gép üresjárású vektorábrája
 a) $U=U_p$, b) alulgerjesztett, c) túlgerjesztett



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

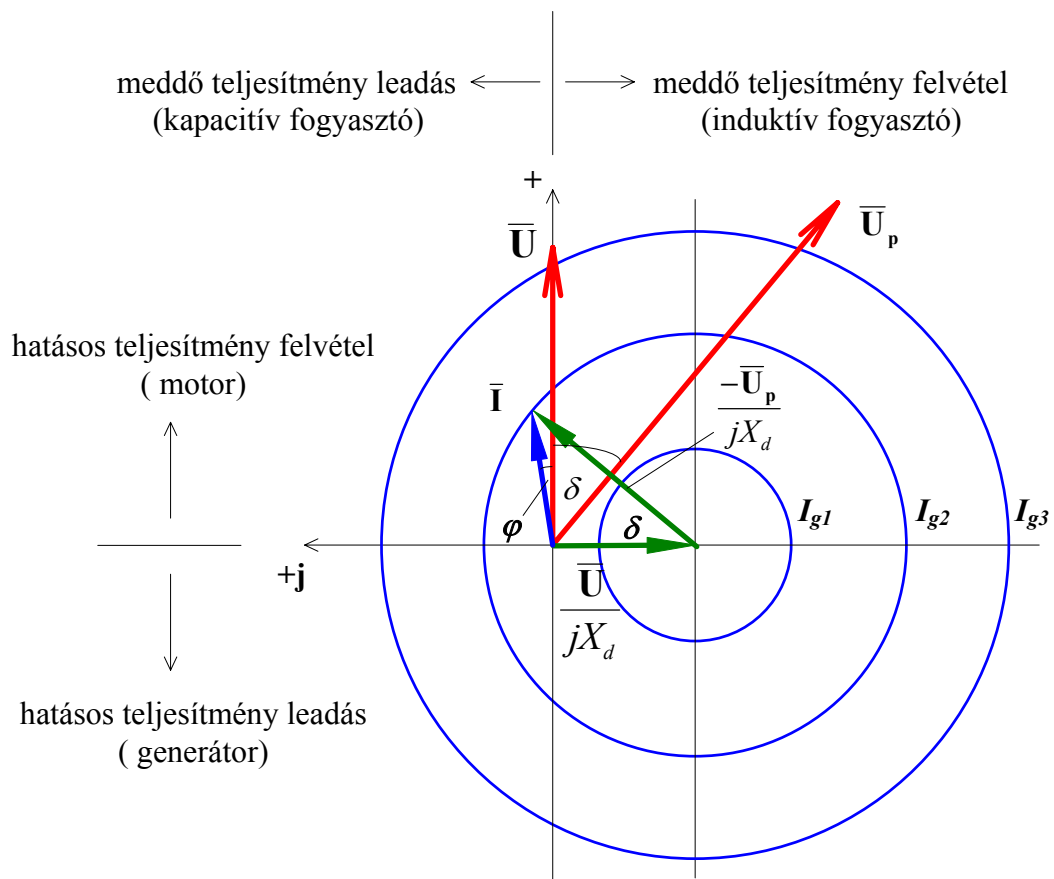


a)

b)

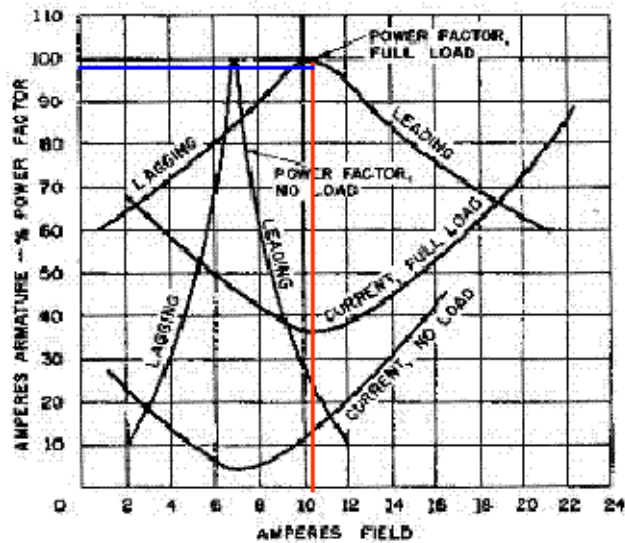
c)

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



Hengeres forgórészű szinkrongép áram vektor-diagramja

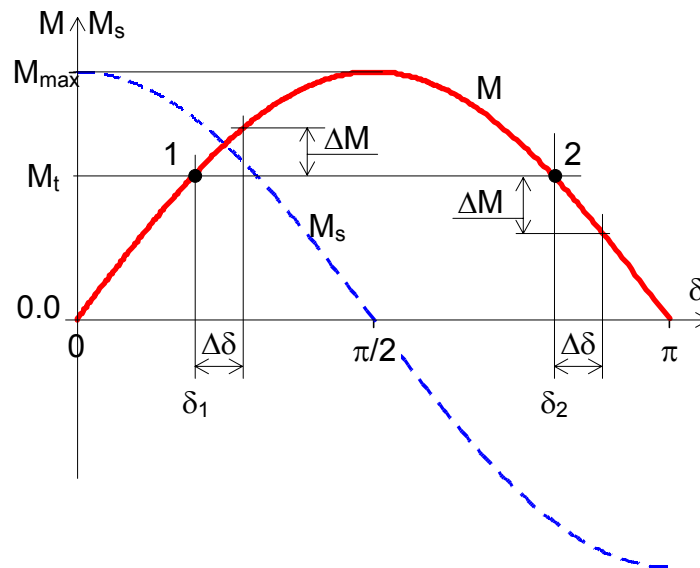
Typical "V" Curves



Állórész áram és hatások a gerjesztőáram függvényében
 Synchronous Motor, Power Factor, Copyright 2004 Kilowatt Classroom, LLC.
<http://www.kilowattclassroom.com/Archive/SyncMotors.pdf>

A szinkron gép statikus stabilitása

Lassú terhelés vagy gerjesztés változás esetén.



A statikus stabilitás illusztrálása

Az 1-el jelölt munkapontban a nyomaték $M=M_t$, a szögsebesség $w=w_1$, a terhelési szög $\delta=\delta_1$.

$$M - M_t = M - M_{\max} \sin \delta_1 = 0 = M_d = \Theta \frac{dw}{dt}.$$

Ha a terhelési szög valamilyen ok miatt $\Delta\delta$ -val megváltozik (nö), a motor nyomatéka szintén változik, ΔM -el megnő:

$$M + \Delta M - M_t = M_d = \Theta \frac{dw}{dt} > 0,$$

vagyis $w > w_1$, a gyorsulás következtében a δ terhelési szög csökkenni fog, a motor közelít az eredeti munkaponthoz, ami ennek alapján statikusan stabilis.

Az 2-vel jelölt munkapontban a nyomaték $M = M_t$, a szögsebesség $w = w_2$, a terhelési szög $\delta = \delta_2$.

$$M - M_t = M - M_{\max} \sin \delta_2 = M_d = 0 = \Theta \frac{dw}{dt}.$$

Ha a terhelési szög valamilyen ok miatt $\Delta\delta$ -val megváltozik (nő), a motor nyomatéka szintén változik, ΔM -el csökken:

$$M - \Delta M - M_t = M_d = \Theta \frac{dw}{dt} < 0,$$

vagyis $w < w_1$, a lassulás következtében a δ terhelési szög tovább fog nőni, a motor távolodik az eredeti munkaponttól, ami ennek alapján statikusan labilis.

Ezekből a vizsgálatokból azt a következtetést lehet levonni, hogy a szinkron gép statikusan akkor stabilis, ha ΔM és $\Delta\delta$ előjele azonos:

$$\frac{\Delta M}{\Delta\delta} > 0,$$

A $\frac{\Delta M}{\Delta\delta} = M_s$ hányadost szinkronozó nyomatéknak nevezik.

Mivel $M_s = M_{\max} \cos \delta$, $M_s > 0$, ha $\delta < 90^\circ$.

A statikus stabilitási tartalékra a $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_t}$ hányados, az ún. túlterhetőség a jellemző.

Általános célú motoroknál a névleges munkapontban szokásos értéke $\lambda = 0,6$, amiből $\sin \delta_n = \frac{1}{1,6}$ és $\delta_n = 38,7^\circ$.

A szinkron gép dinamikus stabilitása

Hirtelen fellépő, nagy változásoknál.

Állandósult üresjárásban ($\delta = 0$, $M = 0$) M_t nagyságú terheléslökés jut a motor tengelyére ($t = 0$).

Mindaddig, amíg $\delta < \delta_1$ és $M < M_t$, $M_d = M - M_t < 0$, ez a mozgásegyenlet szerint lassulást jelent, $\frac{dw}{dt} = \frac{M - M_t}{\Theta}$, vagyis ($w < w_1$).

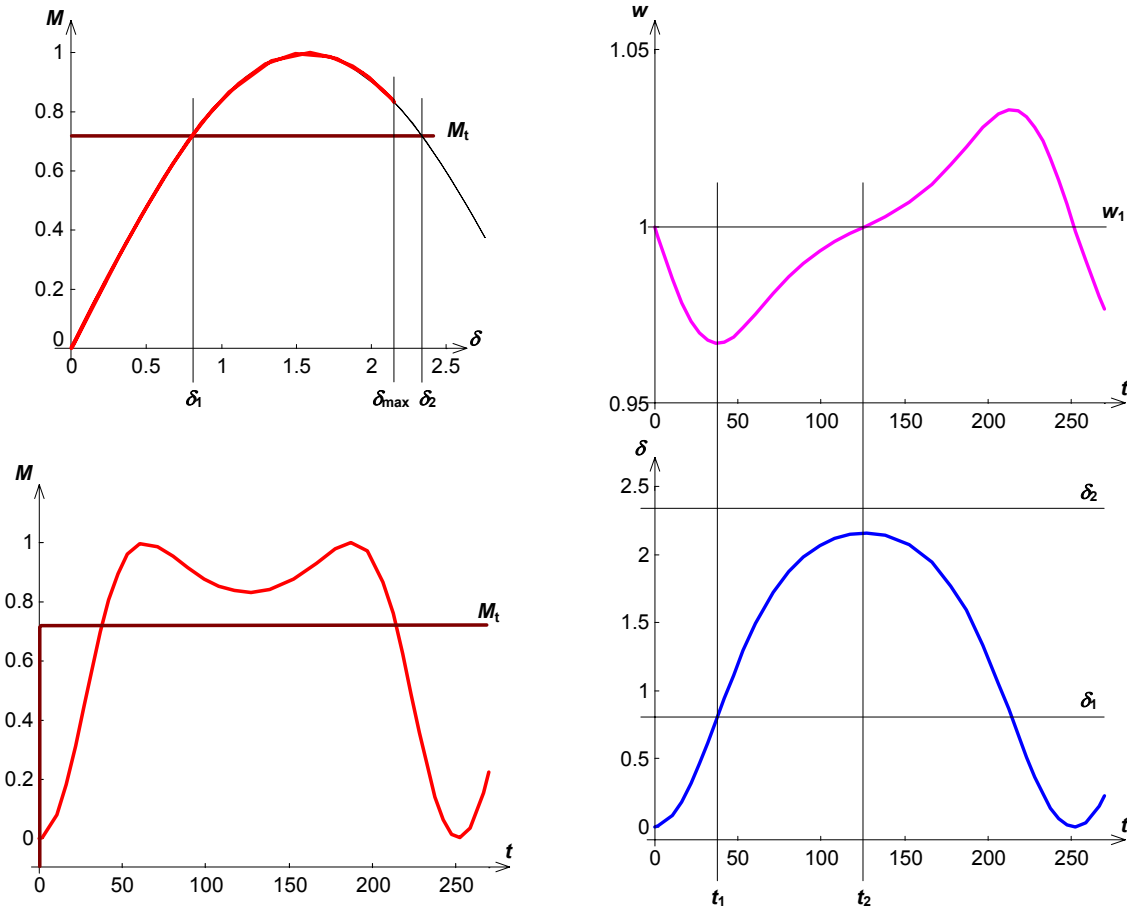
A $t = t_1$ időpontban $\delta = \delta_1$, $M = M_t$, $M_d = 0$ és $\frac{dw}{dt} = 0$, ebben a pillanatban van w minimuma, $w = w_{\min} < w_1$. A t_1 időpontot követően a forgórész δ lemaradása tovább nő, de már $M_d = M - M_t > 0$ mellett, a motor gyorsul, így $w > w_{\min}$.

A terhelési szögnek a $t = t_2$ időpontban van maximuma $\delta = \delta_{\max}$, amikor a szögsebesség eléri a $w = w_1$ szinkron értéket, mivel $\frac{d\delta}{dt} = w_1 - w$. Ekkor $M > M_t$, $M_d = M - M_t > 0$, ami

további gyorsulást jelent. A terhelési szög $w > w_1$ mellett csökkenni kezd.

Amennyiben a terhelési szög meghaladja a δ_2 értéket, úgy $M < M_t$ és $M_d < 0$ lesz, w csökken, δ tovább nő, a gép kiesik a szinkronizmusból.

A stabilitás feltétele tehát: $\delta_{\max} < \delta_2$.



A terheléslökés hatása állandósult üresjárásban

Számítás a kinetikai energia állandósága alapján.

A $0 < \delta < \delta_1$ tartományban a forgórész lassul, a kinetikai energia csökken, míg a $\delta_1 < \delta < \delta_{\max}$ tartományban a forgórész gyorsul, a kinetikai energia nő.

$$A = \Theta \frac{w^2}{2}, \quad \frac{dA}{d\delta} = \frac{\Theta}{2} 2w \frac{dw}{d\delta} = \Theta \frac{d\delta}{dt} \frac{dw}{d\delta} = \Theta \frac{dw}{dt} = M_d$$

A kinetikai energia ΔA_1 csökkenése:

$$\Delta A_1 = \int_0^{\delta_1} M_d d\delta.$$

A kinetikai energia ΔA_2 növekedése:

$$\Delta A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_{\max}} M_d d\delta.$$

A stabilitás feltétele a kinetikai energia változatlansága: $\Delta A_1 + \Delta A_2 = 0$.

Mivel $\delta_2 = \pi - \delta_1$ és $M_t = M_{\max} \sin \delta_1$,

$$\begin{aligned} \Delta A_1 &= \int_0^{\delta_1} (M_{\max} \sin \delta - M_{\max} \sin \delta_1) d\delta = M_{\max} [-\cos \delta - \delta \sin \delta_1]_0^{\delta_1} = \\ &= M_{\max} [(1 - \cos \delta_1) - \delta_1 \sin \delta_1] \end{aligned}$$

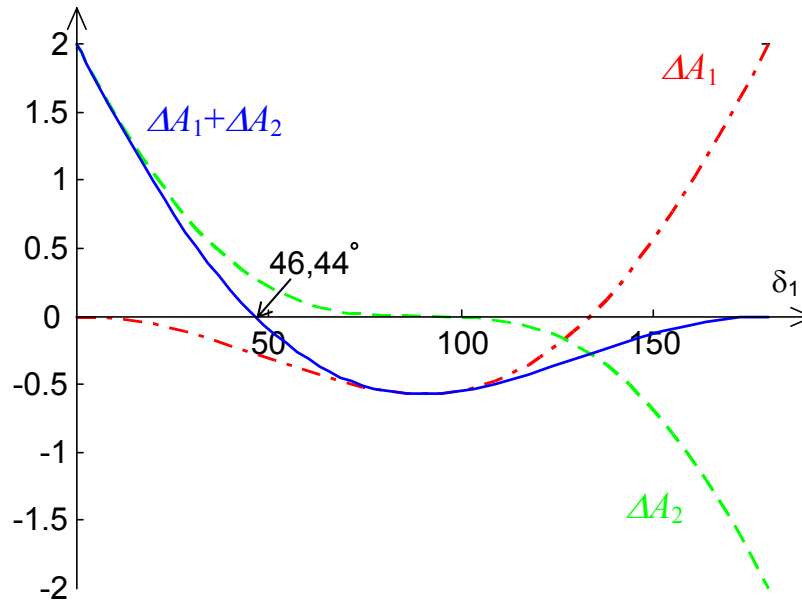
$$\Delta A_2 = \int_{\delta_1}^{\pi - \delta_1} (M_{\max} \sin \delta - M_{\max} \sin \delta_1) d\delta = M_{\max} [-\cos \delta - \delta \sin \delta_1]_{\delta_1}^{\pi - \delta_1} =$$

$$= M_{\max} [(\cos \delta_1 + \cos \delta_1) - (\pi - 2\delta_1) \sin \delta_1]$$

$$\Delta A_1 + \Delta A_2 = M_{\max} [(1 - \cos \delta_1) - \delta_1 \sin \delta_1 + 2 \cos \delta_1 - (\pi - 2\delta_1) \sin \delta_1] = 0$$

$$1 + \cos \delta_1 = (\pi - \delta_1) \sin \delta_1, \text{ amiből } \delta_{1\max} = 46,44^\circ.$$

Vagyis $M_{t\max} = M_{\max} \sin \delta_1 = 0,725 \cdot M_{\max}$.



A dinamikus stabilitás határához tartozó terhelési szög

A kiálló pólusú szinkrongép

A kiálló pólusú gépnél d és q irányban eltérő a mágneses vezetőképesség, Ψ_a irányfüggő, a fluxust d és q irányú összetevőkre bontjuk.

$$\bar{\Psi}_\alpha = \bar{\Psi}_{ad} + \bar{\Psi}_{aq}$$

Ψ_{ad} -t Θ_{ad} illetve i_d hozza létre ($\Phi_{ad} = \Theta_{ad} \Lambda_{ad}$), Ψ_{aq} -t Θ_{aq} illetve i_q ($\Phi_{aq} = \Theta_{aq} \Lambda_{aq}$), így a $\bar{\Psi}_\alpha$ teljes armatúra fluxus által indukált feszültség

$$j\omega_1 \bar{\Psi}_\alpha = j\bar{I}_d X_{ad} + j\bar{I}_q X_{aq}$$

Az állórész feszültség egyenlete

$$\bar{U} = (\bar{I}_d + \bar{I}_q)R + j(\bar{I}_d + \bar{I}_q)X_s + j\bar{I}_d X_{ad} + j\bar{I}_q X_{aq} + \bar{U}_p$$

A d - és q -irányú szinkron reaktancia

$$X_d = X_s + X_{ad}$$

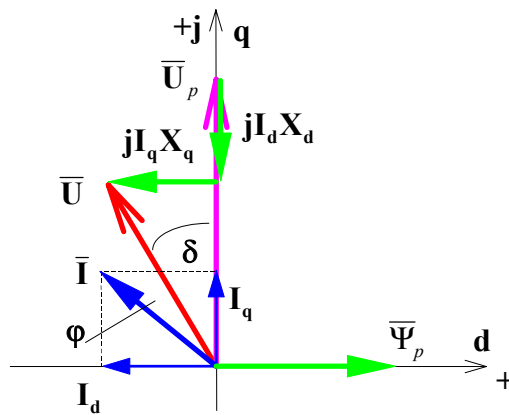
$$X_q = X_s + X_{aq} \quad X_d > X_q$$

Az ohmos feszültségesés elhanyagolásával

$$\bar{U} = j\bar{I}_d X_d + j\bar{I}_q X_q + \bar{U}_p$$

$$\bar{I} = \bar{I}_d + \bar{I}_q$$

Célszerű az egyenleteket forgórészhez rögzített d - q koordináta rendszerben vizsgálni, a komplex valós irányt a d -tengely, a képzetest pedig a q -tengely irányába választva egy túlgerjesztett motor vektorábrája



A kiálló pólusú szinkrongép vektorábrája

Az ábra alapján

$$\bar{\mathbf{I}}_{d-q} = -I_d + jI_q \text{ és}$$

$$\bar{\mathbf{U}}_{d-q} = -U \sin \delta + jU \cos \delta$$

A feszültség egyenlet vetületi alakjai:

a valós (d-irányú) összetevők

$$-U \sin \delta = -I_q X_q, \text{ ebből} \quad I_q = \frac{U}{X_q} \sin \delta$$

a képzetes (q-irányú) összetevők

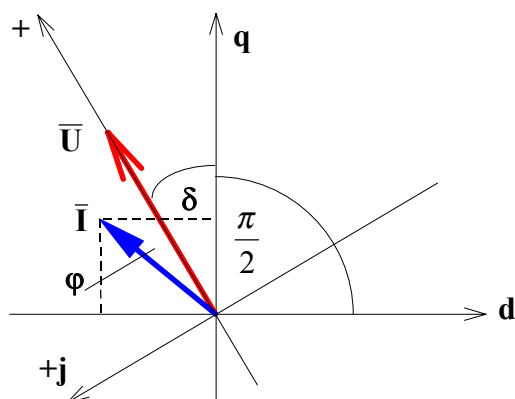
$$U \cos \delta = -I_d X_d + U_p, \text{ ebből} \quad I_d = -\frac{U}{X_d} \cos \delta + \frac{U_p}{X_d}$$

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

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

$$\bar{\mathbf{I}}_{d-q} = \frac{U}{2} e^{j\delta} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) - \frac{U}{2} e^{-j\delta} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{U_p}{X_d} \quad (X_d > X_q)$$

Visszatérés a hálózati feszültséghez rögzített koordinátákhoz, az áram vektor egyenlete

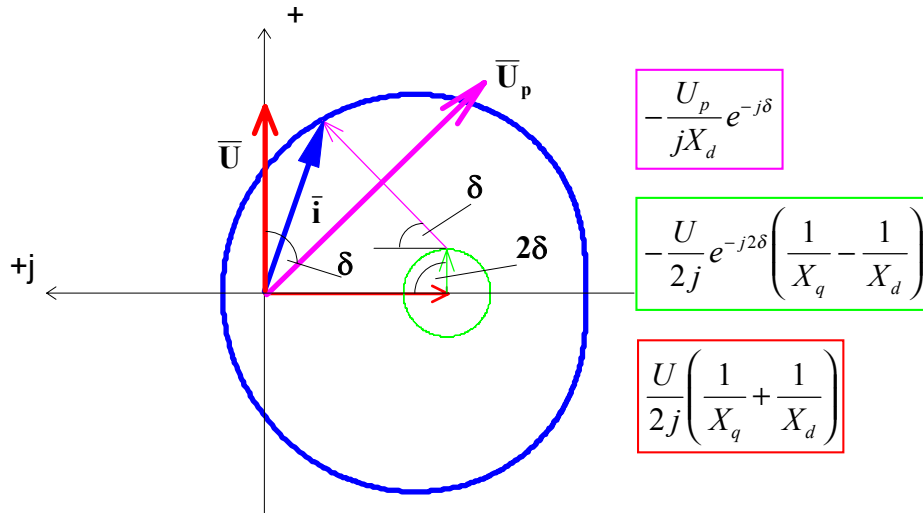


A koordináta transzformáció szemléltetése

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

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

origó, terheléstől független 1. sugár, gerjesztéstől független 2. sugár, aszimmetriától független



A kiálló pólusú szinkrongép áram vektor-diagramja

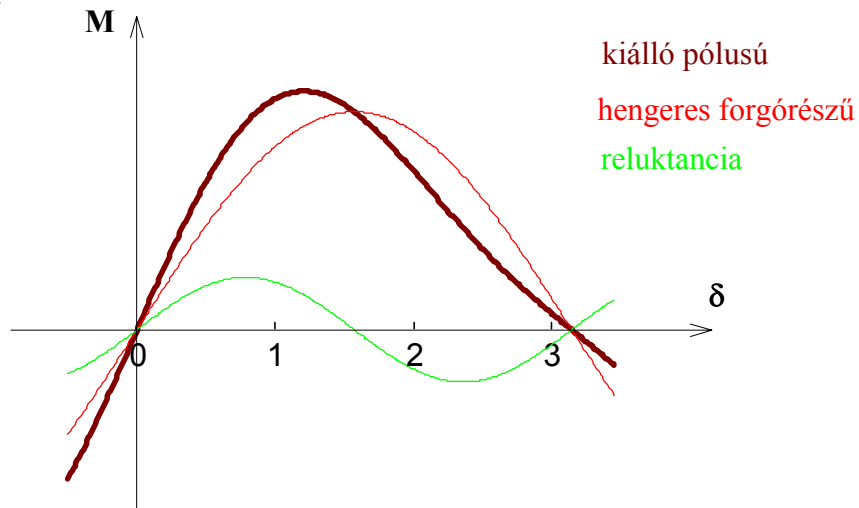
A teljesítmény és a nyomaték számítása

$$P = \frac{3}{2} U \operatorname{Re}\{I\}$$

$$\operatorname{Re}\{I\} = \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta + \frac{U_p}{X_d} \sin \delta$$

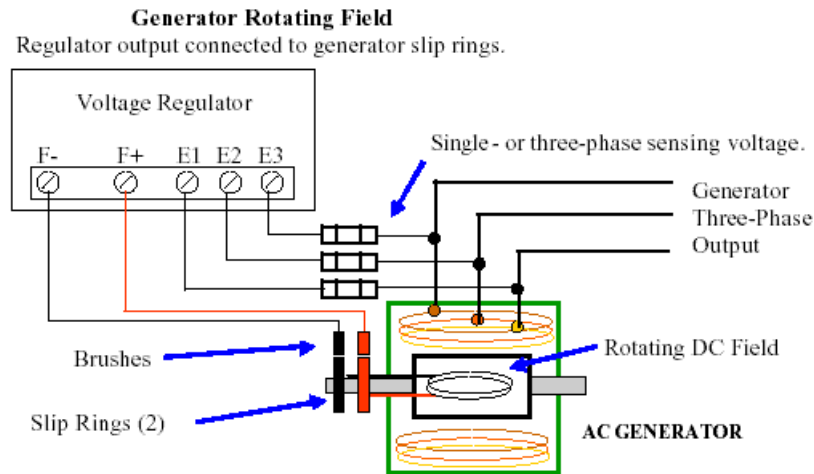
$$P = \frac{3}{2} \frac{U U_p}{X_d} \sin \delta + \frac{3}{2} \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

$$M = \frac{pP}{w_1} = \frac{3p}{2} \frac{U U_p}{w_1 X_d} \sin \delta + \frac{3p}{2} \frac{U^2}{2w_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

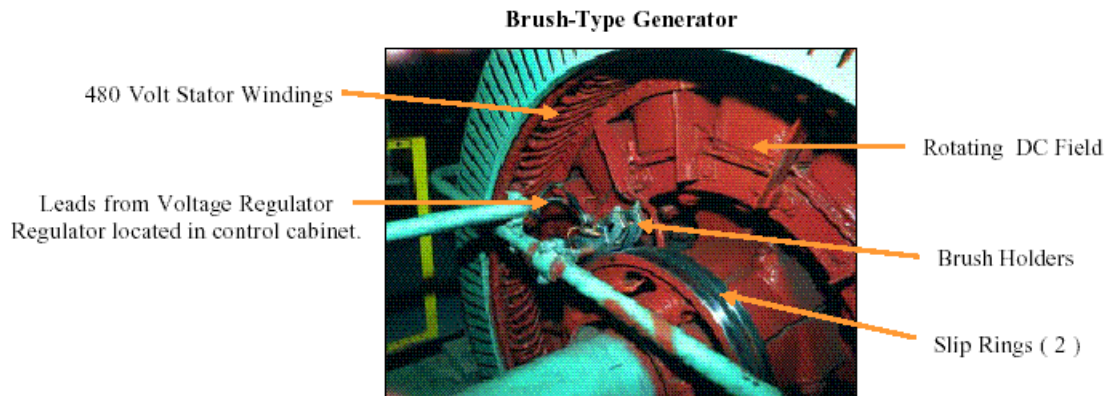


A kiálló pólusú szinkrongép nyomaték-terhelési szög görbéje

Szinkron gépek gerjesztése

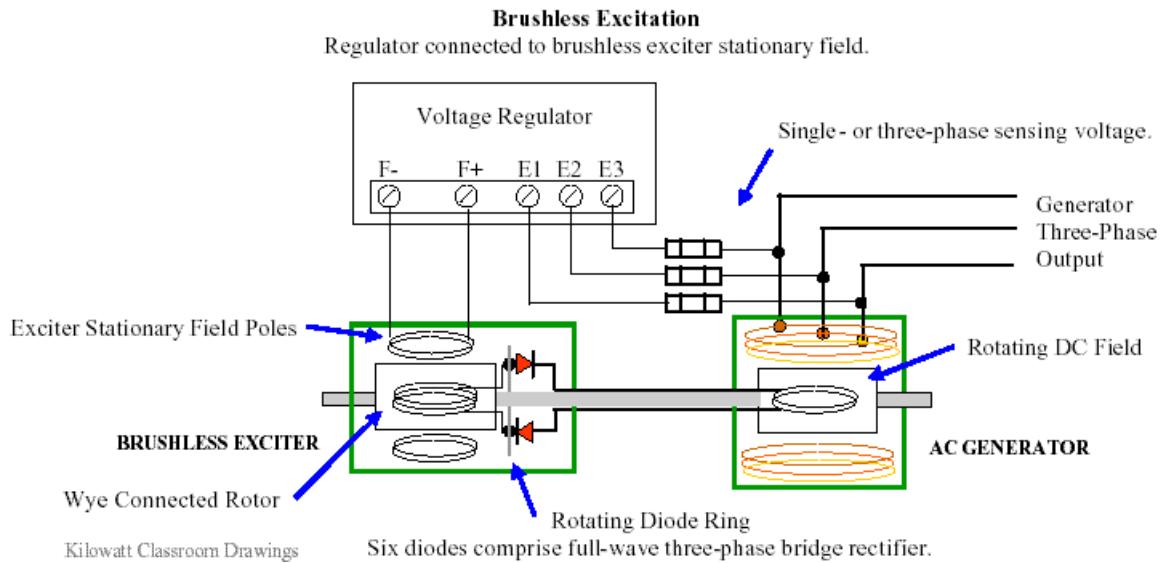


Szinkron generátor gerjesztése külső tápforrásról
Generator Voltage Regulation, Excitation Methods,
Copyright 2004. Kilowatt Classroom, LLC.
<http://www.kilowattclassroom.com/Notebook4.htm>

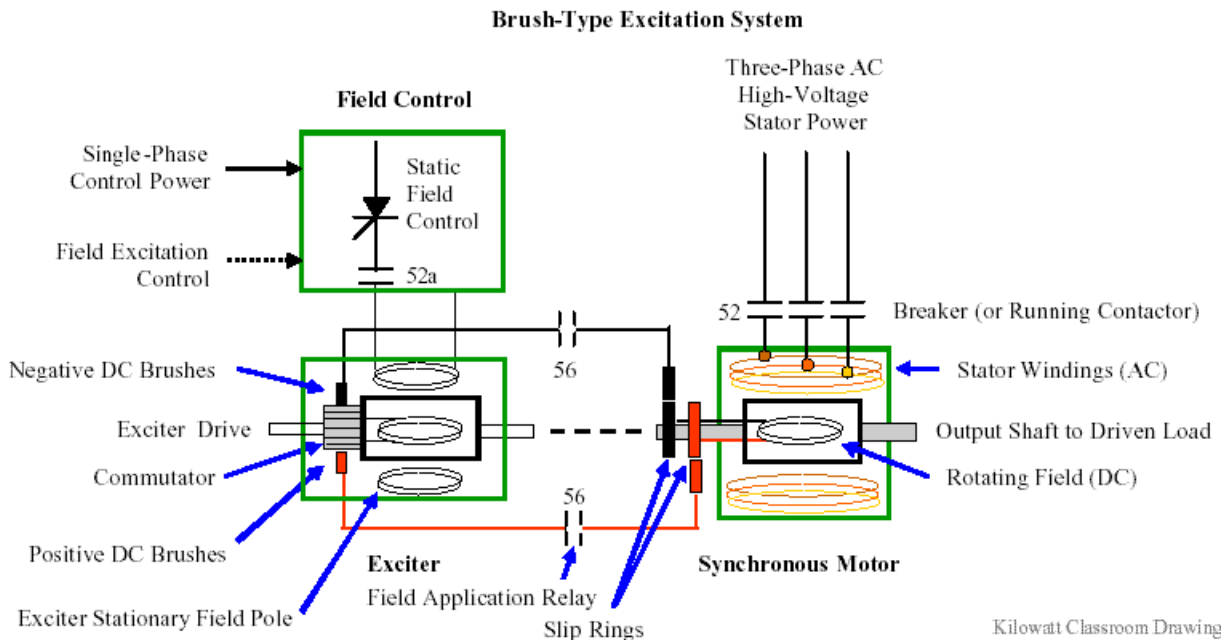


Gerjesztés külső tápforrásról
Generator Voltage Regulation, Generator Components,

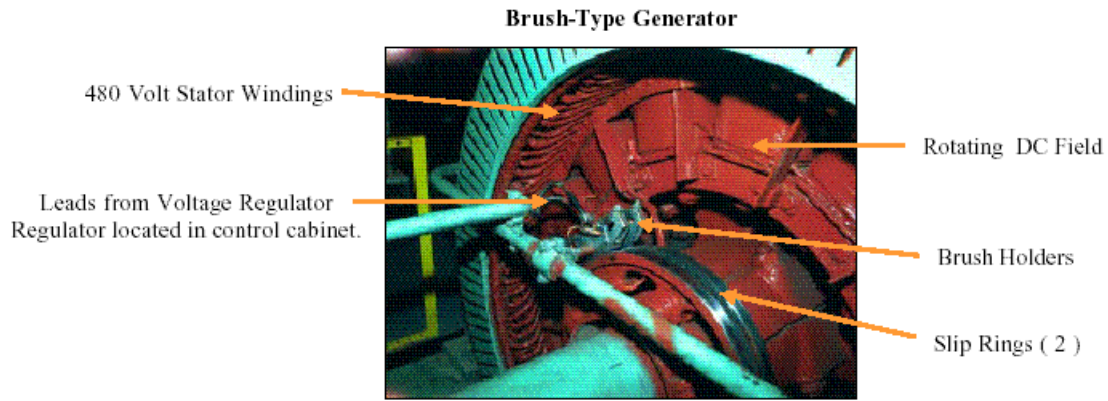
Copyright 2004 Kilowatt Classroom, LLC.
<http://www.kilowattclassroom.com/Notebook4.htm>



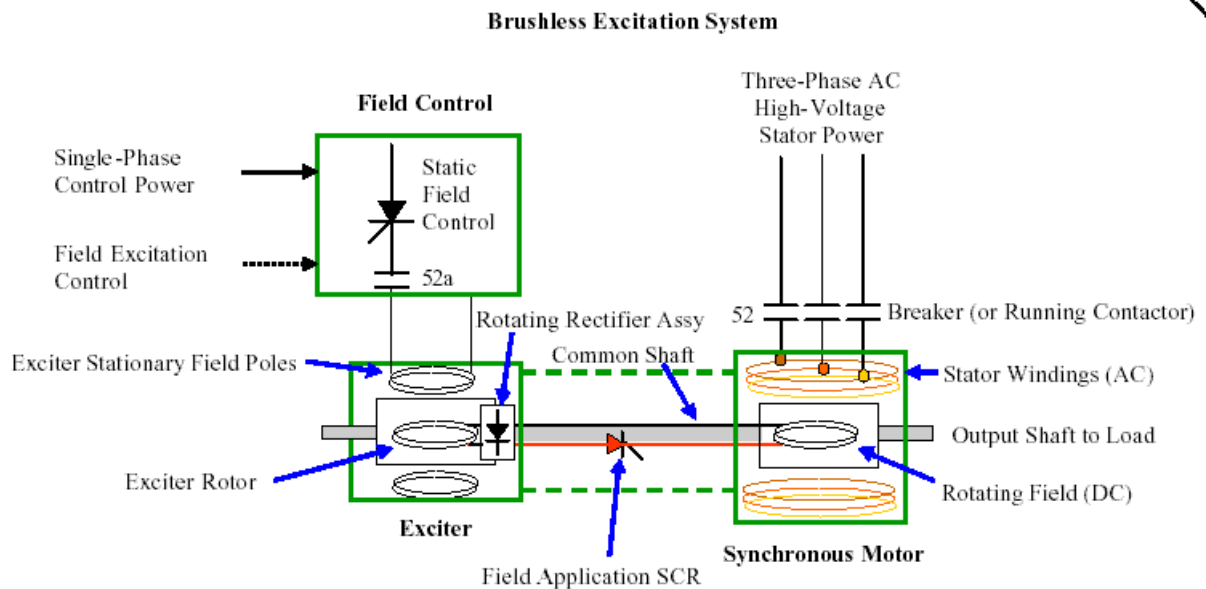
Six diodes comprise full-wave three-phase bridge rectifier.
Szinkron generátor gerjesztése forgódiódás átalakítóról
Generator Voltage Regulation, Excitation Methods,
 Copyright 2004. Kilowatt Classroom, LLC.
<http://www.kilowattclassroom.com/Notebook4.htm>



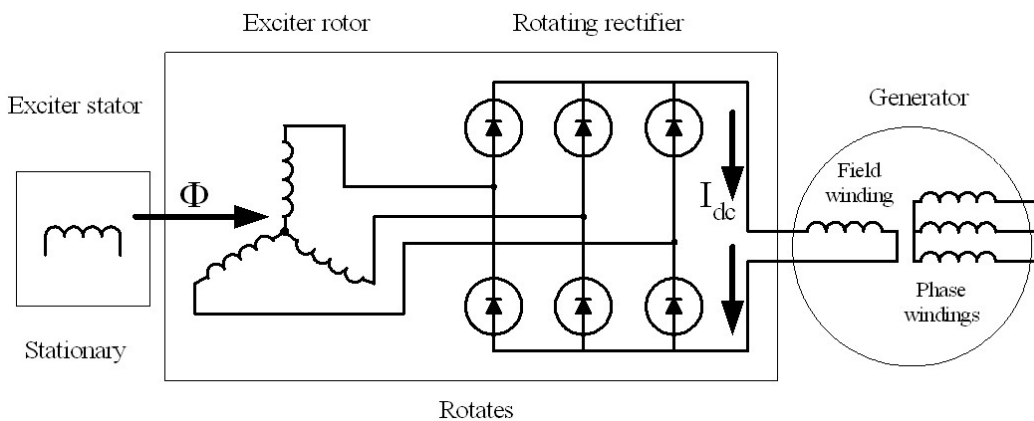
Szinkron motor gerjesztése egyenáramú gerjesztőgépről
Synchronous Motor, Brush-Type Excitation Systems,
 Copyright 2004. Kilowatt Classroom, LLC.
<http://www.kilowattclassroom.com/Archive/SyncMotors.pdf>



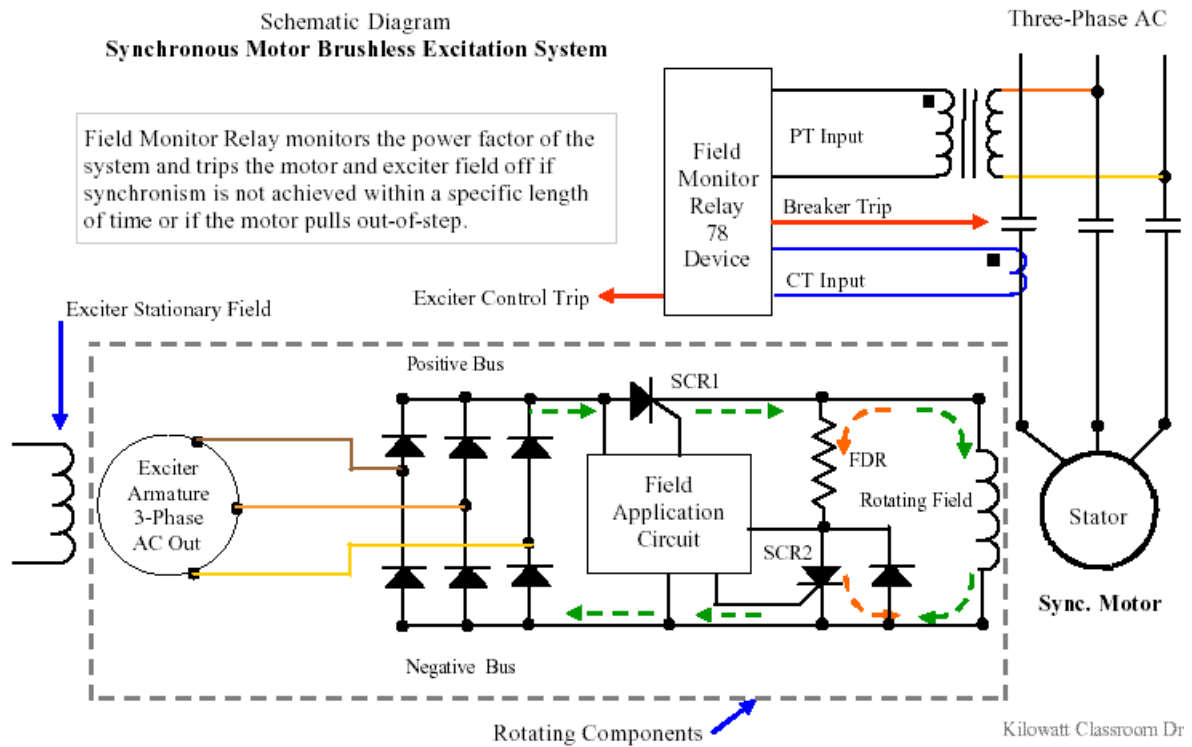
Gerjesztés külső tápforrásról
Generator Voltage Regulation, Generator Components,
Copyright 2004 Kilowatt Classroom, LLC.
<http://www.kilowattclassroom.com/Notebook4.htm>



Szinkron motor gerjesztése forgódiódás átalakítóról
Synchronous Motor, Brushless Exciters,
Copyright 2004. Kilowatt Classroom, LLC.
<http://www.kilowattclassroom.com/Archive/SyncMotors.pdf>



Gerjesztés forgódiódás átalakítóról

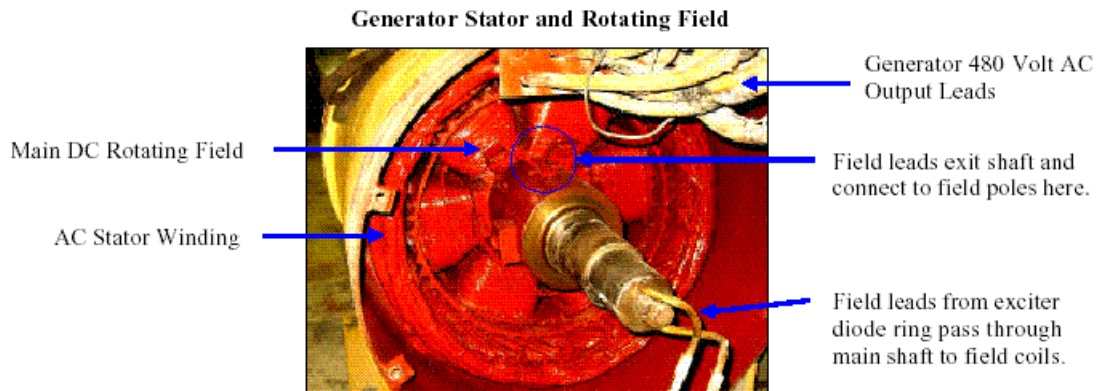


Szinkron motor gerjesztése forgódiódás átalakítóról

Synchronous Motor, Synchronizing Principle,

Copyright 2004. Kilowatt Classroom, LLC.

<http://www.kilowattclassroom.com/Archive/SyncMotors.pdf>



Gerjesztés forgódiódás átalakítóról

Generator Voltage Regulation, Generator Components,

Copyright 2004 Kilowatt Classroom, LLC.

<http://www.kilowattclassroom.com/Notebook4.htm>

A viszonylagos (relatív) egységek használata váltakozó áramú gépeknél

Alapmennyiségek:

Névleges értékek:

U_n, I_n - fázis névleges amplitudó, (a Park-vektor abszolút értéke)

w_l - szinkron szögsebesség

Származtatott mennyiségek:

$$\Psi_a = \frac{U_n}{w_l} \text{ - amplitudó}$$

$$P_a = \frac{3}{2} U_n I_n \text{ - 3 fázisú, } U_n, I_n \text{ csúcserték, ez minden teljesítmény (} P, Q, S \text{) viszonyítási}$$

alapja

$$M_a = \frac{P_a}{w_{lm}} = p \frac{P_a}{w_l} = \frac{3}{2} \frac{U_n I_n}{w_{lm}} = \frac{3}{2} p \frac{U_n I_n}{w_l}$$

$$Z_a = \frac{U_n}{I_n}$$

$$L_a = \frac{Z_a}{w_l} = \frac{U_n}{w_l I_n} = \frac{\Psi_a}{I_n}$$

A névleges teljesítmény relatív egységben:

$$P'_n = \frac{P_n}{P_a} = \frac{\frac{3}{2} U_n I_n \cos \varphi_n \eta_n}{\frac{3}{2} U_n I_n} = \cos \varphi_n \eta_n \quad P'_n < 1$$

$$M'_n = \frac{M_n}{M_a} = \frac{p \frac{P_n}{w_n}}{p \frac{P_a}{w_l}} = P'_n \frac{1}{\frac{w_n}{w_l}} = \frac{\cos \varphi_n \eta_n}{1 - S_n} \quad M'_n < 1 \quad (S_n = \frac{w_l - w_n}{w_l} = 1 - \frac{w_n}{w_l})$$

A névleges tápláláshoz tartozó névleges indítási idő:

$$T'_{in} = \frac{\Theta w_{mn}}{M_n} \approx \frac{\Theta w_{lm}}{M_a} = \frac{\Theta w_l}{p M_a}$$

A mozgásegyenlet:

$$M - M_t = \Theta \frac{dw_m}{dt}$$

$$\frac{M - M_t}{M_a} = M' - M'_t = \frac{\Theta}{p M_a} \frac{dw}{dt} = \frac{w_l}{w_l} \frac{w_l}{w_l} \frac{\Theta}{p M_a} \frac{dw}{dt} = w_l \frac{\Theta w_l}{p M_a} \frac{dw'}{dw_l t} = w_l T'_{in} \frac{dw'}{dw_l t}$$