

IV. Aszinkron gépek

A villamos hajtások közel 2/3 része aszinkron motoros hajtás. Az egyszerű kivitelű, kalickás forgórészű aszinkron motorok elterjedésének okai:

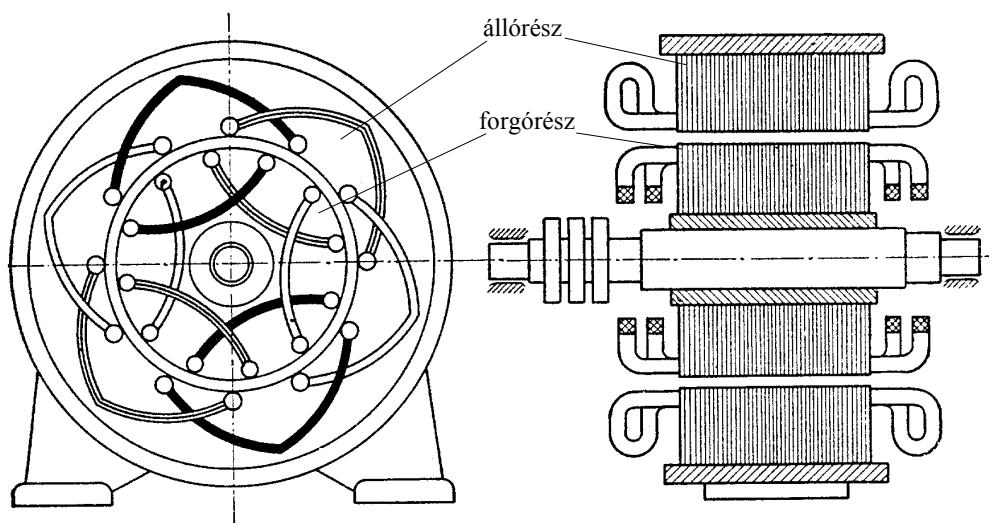
- közvetlenül csatlakoztathatók három fázisú táphálózatra, nem igényelnek kiegészítő tápforrást (nincs gerjesztése), vagy az áramnem átalakítását (mint az egyenáramú gép),
- felépítése (így gyártása is) egyszerű, ezért viszonylag olcsó,
- súlya és tehetetlenségi nyomatéka kicsi,
- nem kíván különleges karbantartást (pl. kefe, kommutátor).

Nem szabályozott hajtásokban döntően aszinkron motorokat használnak. A szabályozott hajtásokban részarányuk növekszik – ma már a városi közlekedésben és a vasúti vontatásban is hódítanak – köszönhetően a teljesítményelektronikai eszközök (inverterek) terjedésének.

A sorozatban gyártott 3 fázisú aszinkron motorok teljesítmény tartománya pár száz W-tól pár MW-ig terjed. A motorok többségét 400 V és 660 V névleges feszültségre készítik, a nagyobb teljesítményűeket 1000 V, 3000 V és 6000 V feszültségre.

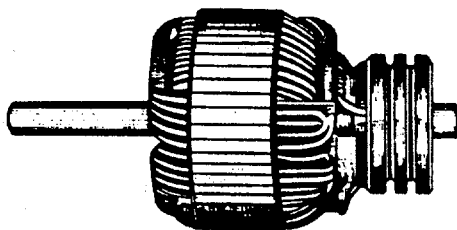
A 3 fázisú aszinkron gép felépítése

Az állórészen 3 fázisú, p póluspár számú tekercsrendszer van, ami 3 fázisú energiaforrásról táplálva – a térbeli felharmonikusokat elhanyagolva, a légrésben szinuszos mezőeloszlású Ω_m mechanikai szögsebességgel forgó pólusrendszert hoz létre.



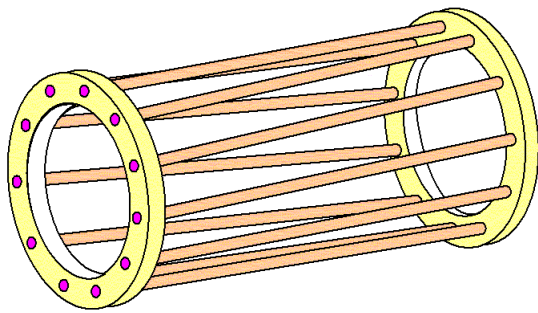
Háromfázisú, négypólusú csúszógyűrűs aszinkron motor metszetvázlatai

A forgórészen 3 fázisú, p póluspár számú, zárt áramkört képező tekercsrendszer van, kialakítása lehet tekercselt, vagy kalickás. A tekercselt forgórész csillag kapcsolású, a szabad tekercsvégek 1-1 csúszógyűrűhöz csatlakoznak, a rövidzárást ezeken keresztül valósítják meg.

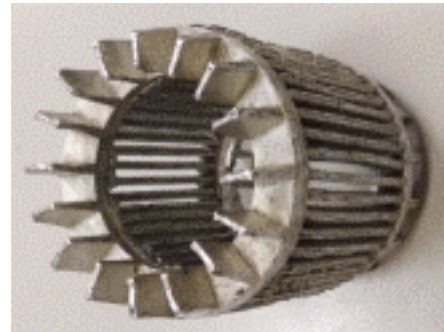


Aszinkron motor tekercselt forgórésze

Csúszógyűrűs forgórészeknél biztosítani kell, hogy a pólusszám megegyezzen az állórész pólusszámával, kalickás forgórészeknél ez automatikusan kialakul.



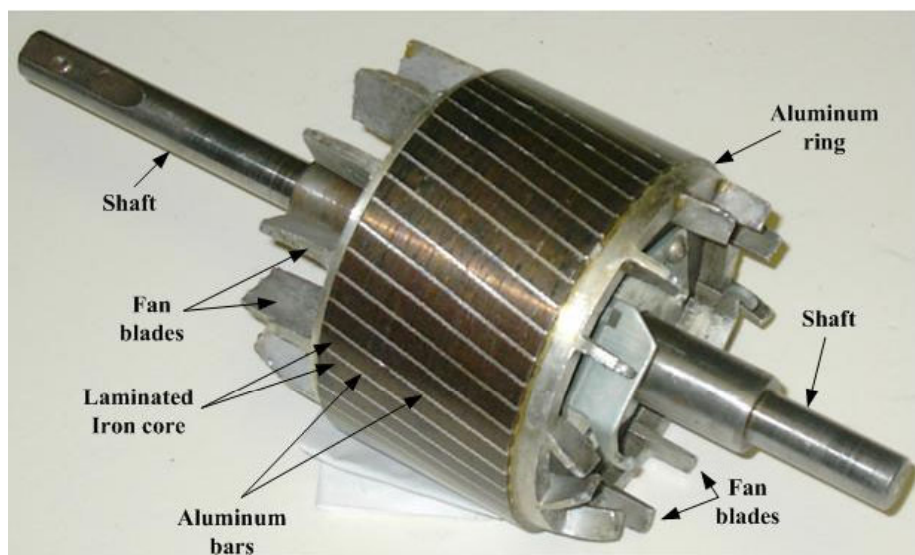
a)



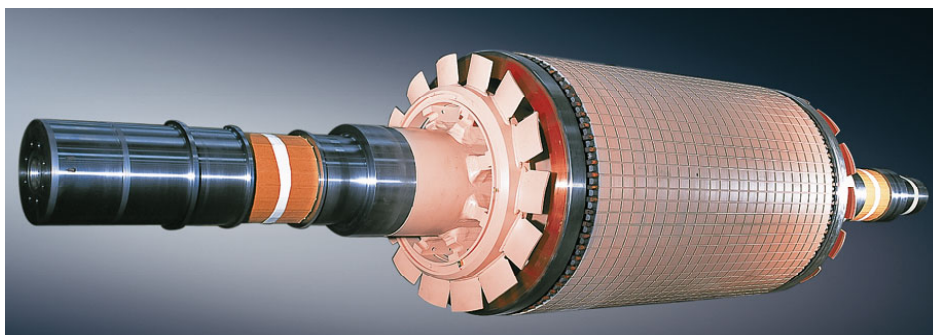
b)

Kalickás forgórész a) rudazott b) öntött (vasmag nélkül)

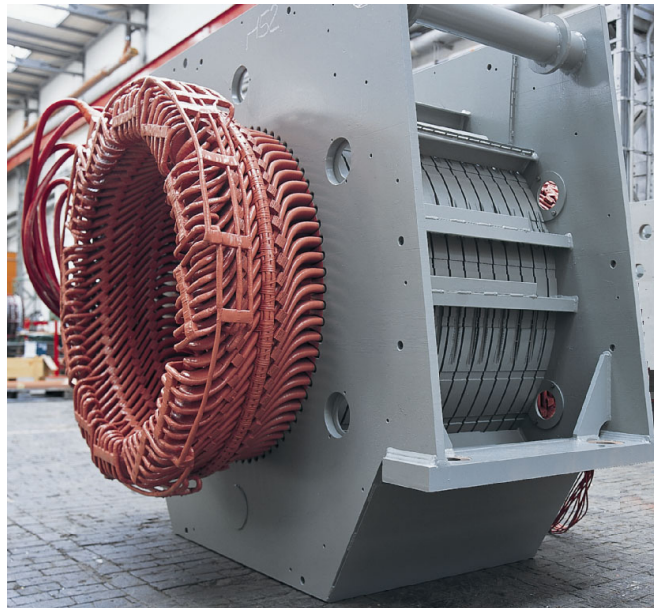
A kalickás forgórész hornyaiba vagy rúd-vezetőket helyeznek, amiket ráhegesztett gyűrűkkel zárnak, vagy a rudazást ötvözött alumínium öntvényből alakítják ki a zárógyűrűkkel és ventilátor lapátokkal együtt.



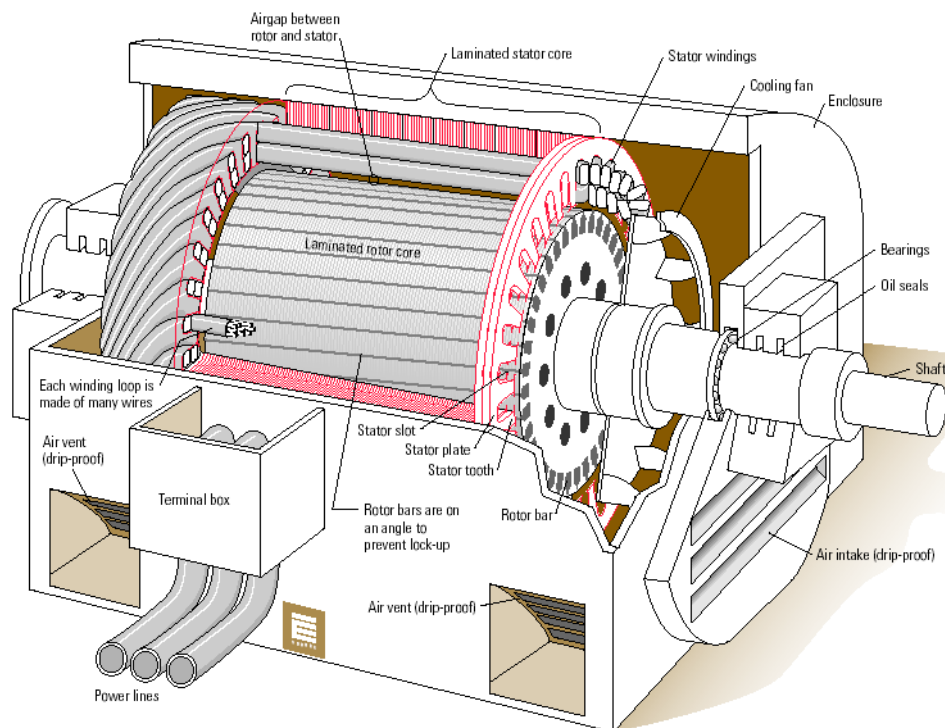
Öntött kalickás forgórész



Nagy aszinkron gép kalickás forgórésze



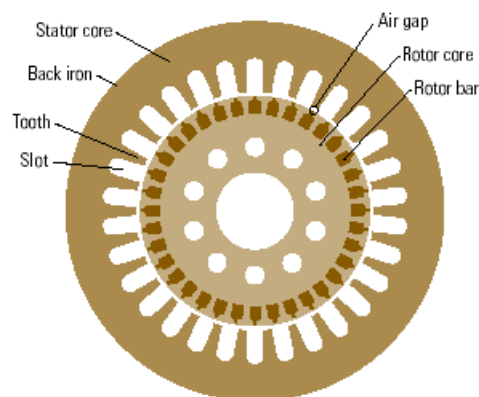
Nagy aszinkron gép állórésze



Nagy aszinkron gép metszetrajza



Zárt házkialakítású kis aszinkron motor

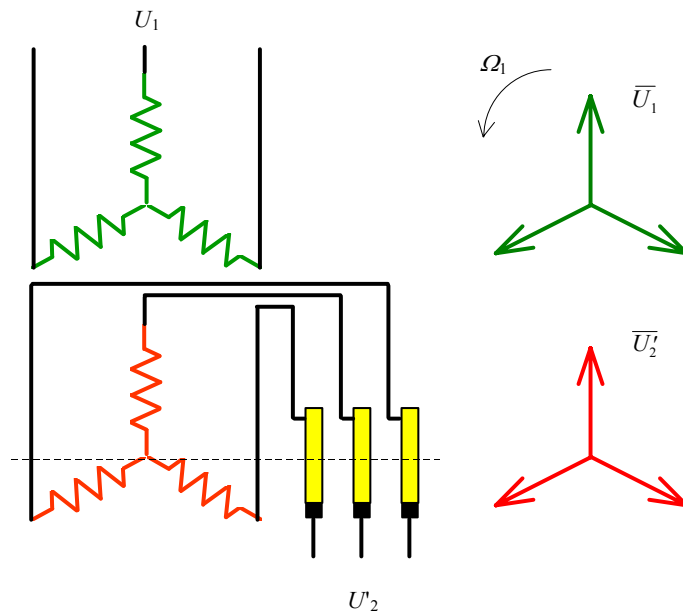


Kis aszinkron motor álló- és forgórész vastestének lemezrajza

Ha az aszinkron gép állórészét háromfázisú hálózatra kapcsoljuk, forgórészét elfordulás ellen rögzítjük és a forgórész tekercselés áramkörét zárjuk, akkor villamos szempontból egy légréssel ellátott transzformátort kapunk. A forgórész (szekunder) U_{i2} indukált feszültségének f_2 frekvenciája megegyezik az állórész (primer) tápfeszültség f_1 frekvenciájával, nagysága az állórész és a forgórész tekercselésének a_N menetszám áttételével számítható.

Az aszinkron gép mint indukciós feszültség szabályozó

Az indukciós feszültség szabályozó az aszinkron gép egyik különleges alkalmazása. Működési elve azon alapul, hogy egy rögzített forgórészű motor csúszógyűrűin az ábra szerint háromfázisú, szimmetrikus, hálózati frekvenciájú feszültséget kapunk, amelynek nagysága az állórész és a forgórész tekercsek menetszámainak arányától (áttételtől) függ. Vagyis ilyen körülmények között az aszinkron motor háromfázisú transzformátorként üzemel.

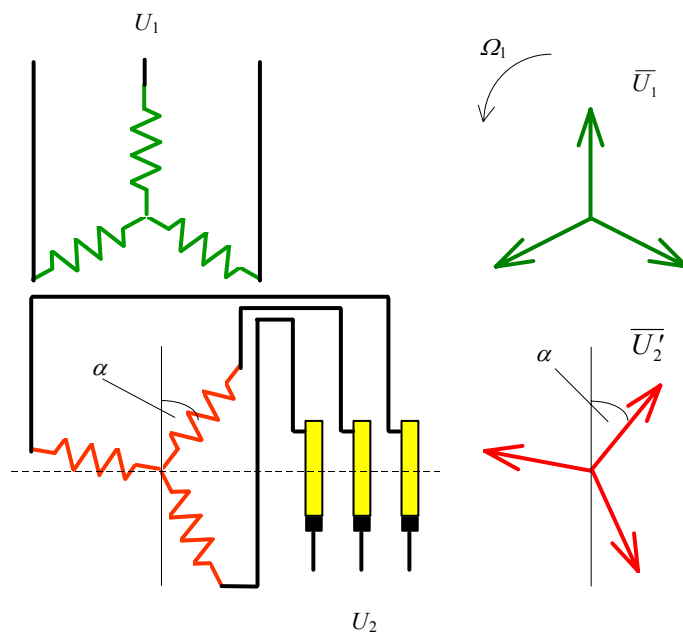


Az indukciós szabályozó működési elve

A csúszógyűrűről kapott U_2 feszültség a forgórész különböző helyzeteiben (α elfordulási szög különböző értékeinél) mindig ugyanakkora nagyságú, mert ugyanaz az Ω_1 szinkron szögsebességgel forgó mágneses mező hozza létre.

Az állórész U_1 feszültségéhez viszonyított fázishelyzete viszont változik, a forgó mező ugyanazon része az elfordulás α szögének megfelelő idővel előbb, vagy később metszi a forgórész tekercs vezetőit az elfordítás irányától függően. Ha az álló- és a forgórész tekercs tengelyei egybe esnek, az álló- és a forgórész indukált feszültsége tekercspáronként fázisban van, pólusosztásnyi elfordulás 180° -os fázistolást eredményez.

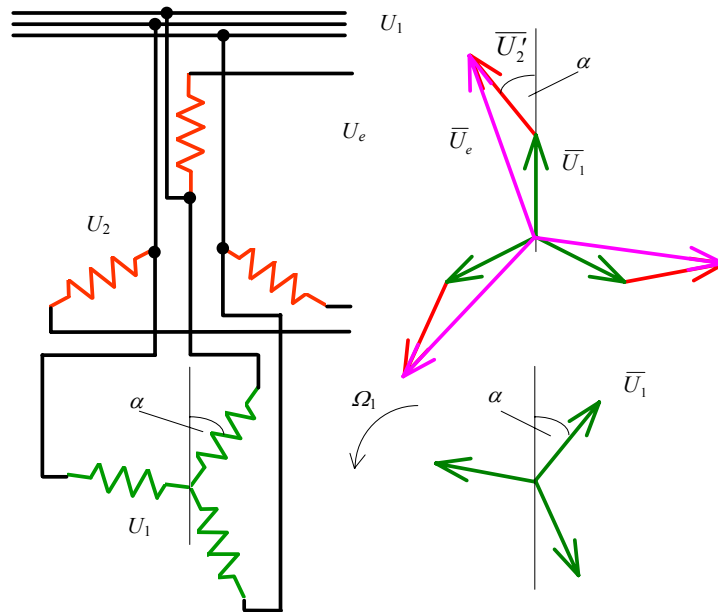
Az indukciós szabályozót változtatható fázishelyzetű szimmetrikus háromfázisú feszültségrendszer előállítására használják energetikai mérésekhez.



A csúszógyűrűről kapott U_2 feszültség fázishelyzetének változása

Másik alkalmazási lehetőség a takarékos kapcsolás, változó nagyságú szimmetrikus háromfázisú feszültségrendszer előállítására oly módon, hogy az U_2 indukált feszültséget hozzáadják a hálózat U_1 hálózati feszültségéhez.

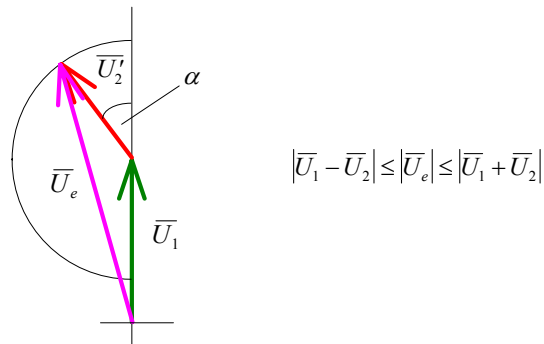
Ilyenkor az álló- és a forgórész szerepét megcserélik: a forgórész vezetői alkotják a primer tekercsrendszert és az állórészt a szekundert. A gyakorlati oka ennek az, hogy az állórész tekercsek összekötései könnyebben bonthatók, így a tekercsvégek egyszerűbben hozzáférhetőek.



Az álló- és a forgórész szerepének megcserélése

A csillag kapcsolású forgórészt az ábra szerint a hálózatra kapcsolják, az állórész tekercsek egyik végét szintén a hálózatra kötik, míg másik kivezetésük szolgáltatja azt az U_e változtatható nagyságú feszültséget, ami a hálózati U_1 és az indukált U_2 feszültség vektoros eredője. A forgórész elfordításakor tulajdonképpen a forgórész által létrehozott forgó mező helyzetét változtatjuk az állórész tekercseléséhez képest, ezáltal megváltozik az állórészben indukált feszültség fázishelyzete is a hálózati feszültséghez képest.

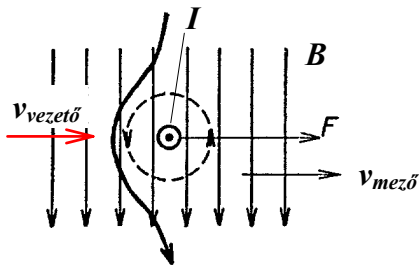
Az egy fázisra érvényes feszültség fázorábrát az ábra mutatja, U_e értéke a forgórész elfordításával U_1+U_2 és U_1-U_2 között változtatható.



Az egy fázisra érvényes feszültség fázorábrája

Az aszinkron gép mint motor működési elve

Az állórész tekercselés által létrehozott, Ω_{1m} mechanikai szinkron szögsebességgel forgó mező, metszve a térben álló, vagy $\Omega_m \neq \Omega_{1m} = \frac{2\pi f_1}{p}$ mechanikai szögsebességgel forgó forgórész tekercselésének a vezetőit, azokban feszültséget indukál. A forgórész zárt áramkörében létrejövő áram és a mágneses tér hatására a forgórész vezetőkre erő hat, amely erő a vezetőket a mágneses mező mozgásának irányában hat - Lenz törvényének megfelelően.



Az egyes vezetőkben indukálódó feszültség:

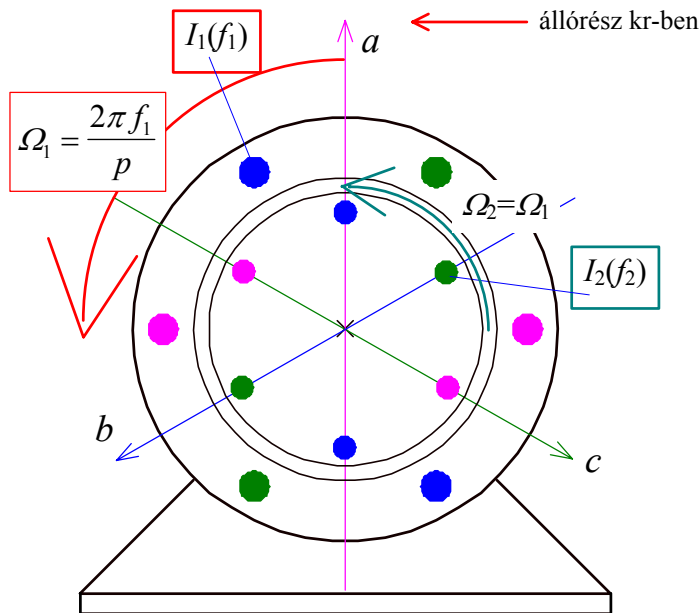
$$U_{il} = \bar{\ell}(\bar{B} \times \bar{v}),$$

az egyes vezetőkre ható erő:

$$\bar{F} = \ell \bar{I} \times \bar{B}.$$

A mágneses mező és egy áramjárta vezető viszonylagos mozgásakor keletkező indukált feszültség és erőhatás

Az indukálódó feszültség a vezetők és a mágneses tér közötti viszonylagos sebességgel (forgó mozgás esetén viszonylagos szögsebességgel) arányos.



$$\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

$$\Omega = 0$$

$$f_2 = f_1$$

$$\Omega_2 = \Omega_1$$

A mágneses tér komponensei rögzített forgórész esetén

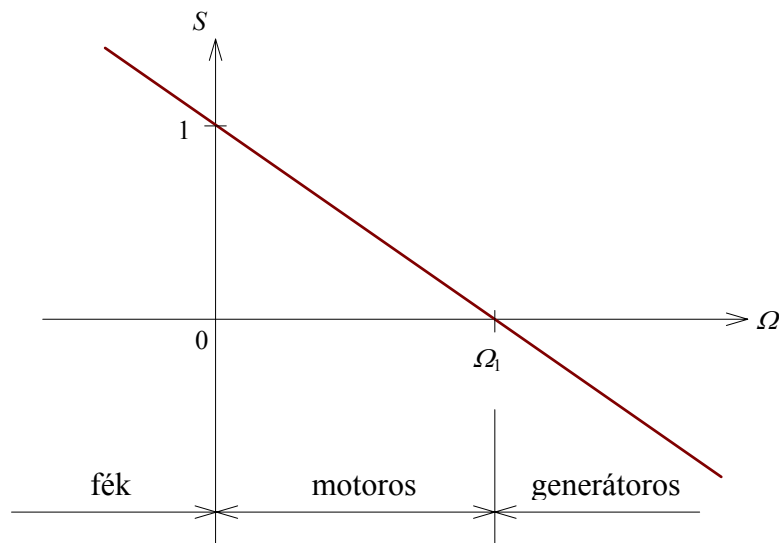
- Ω_1 – az állórész tekercselés által létrehozott mágneses mező villamos szögsebessége az állórészhez képest (villamos szinkron szögsebesség),
- Ω – a forgórész villamos szögsebessége álló koordináta rendszerben,
- Ω_2 – a forgórész tekercselés által létrehozott mágneses mező mechanikai szögsebessége a forgórészhez képest,
- f_1 – az állórész tápfeszültségének alapharmonikus frekvenciája,
- f_2 – a forgórész indukált feszültségének alapharmonikus frekvenciája.

A forgórész szimmetrikus tekercseiben folyó szimmetrikus 3 fázisú áramok (a forgórészhez képest) forgó mágneses mezőt hoznak létre. A forgórészben indukálódó feszültség f_2 frekvenciája arányos a szögsebesség különbség ($\Omega_{1m} - \Omega_m$), illetve fordulatszám különbség ($n_1 - n$) állórész mezőhöz képesti viszonylagos értékével:

$$f_2 = f_1 \frac{\Omega_{1m} - \Omega_m}{\Omega_{1m}} = f_1 \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

A viszonylagos szögsebesség különbséget (viszonylagos fordulatszám különbséget) szlipnek nevezik és S -el jelölik. A szlip a villamos szögsebességekkel és a (mechanikai) fordulatszámokkal is kifejezhető:

$$S = \frac{\Omega_{1m} - \Omega_m}{\Omega_{1m}} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$



A szlip és a szögsebesség összefüggése

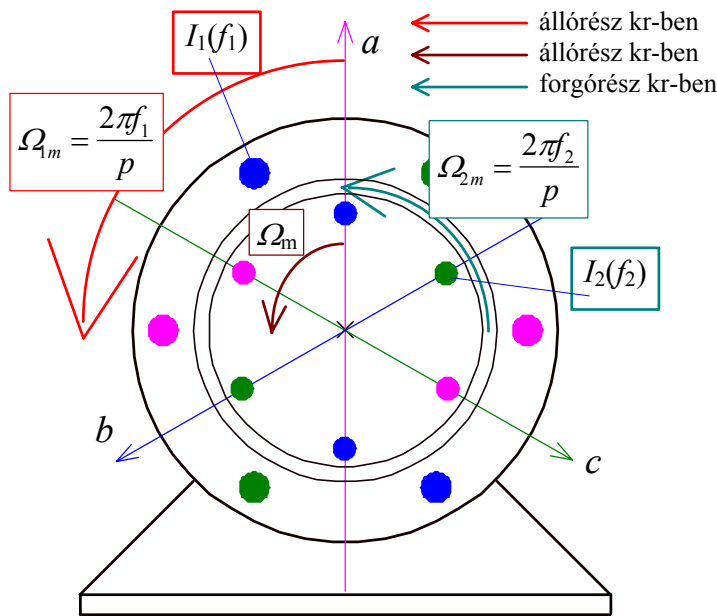
Ezzel $f_2 = Sf_1$, a forgórész indukált feszültségének és áramának frekvenciája az állórész tápfrekvencia szlipszerese. A forgórész áram egy olyan forgó mezőt létesít, aminek mechanikai szögsebessége a forgórészhez képest

$$\Omega_{rm} = \frac{2\pi f_2}{p} = \frac{2\pi S f_1}{p} = S \frac{\Omega_1}{p} = S \Omega_{1m} = \Omega_{1m} - \Omega_m.$$

Tehát álló koordináta rendszerben a forgórész által létrehozott forgó mező szögsebessége: $\Omega_m + \Omega_{2m} = \Omega_{1m}$, megegyezik az állórész által létrehozott mező mechanikai szögsebességével, az álló- és forgórész tekercsrendszere által létrehozott mágneses pólusrendszer mechanikai szögsebessége egyaránt Ω_{1m} (villamos szögsebessége Ω_1). Így a forgórész pólusrendszere kapcsolódni tud az állórész mágneses pólusrendszerével, ami a nyomatékképzés előfeltétele.

Mivel a forgórészben csak akkor indukálódik feszültség, ha a vezetőit metszik az állórész mágneses erővonalai, az aszinkron gépnek szinkron fordulatszámon nincs nyomatéka, a működés feltétele az állórész forgó mezője és a forgórész vezetői közötti szögsebesség különbség. Működési elve alapján az aszinkron gépet indukciós motornak is nevezik.

A forgórész 1 vezetőjében indukálódó feszültség a viszonylagos szögsebességgel arányos, így az állórész vezetőkben indukálódó feszültségnek a szlipszerese, egy teljes fázistekercsben – a menetszám áttétel figyelembevételével $U_{i2} = \frac{SU_{i1}}{a_N}$.



$$\Omega_m = \frac{\Omega_1}{p} = \Omega_m + \Omega_{2m}$$

$$\frac{2\pi f_1}{p} = \Omega_m + \frac{2\pi f_2}{p}$$

A szlip:

$$S = \frac{\Omega_{1m} - \Omega_m}{\Omega_{1m}} = \frac{\Omega_{2m}}{\Omega_{1m}}$$

$$S\Omega_{1m} = \Omega_{1m} - \Omega_m = \Omega_{2m}$$

$$S = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$$

$$S\Omega_1 = \Omega_1 - \Omega$$

$$Sf_1 = f_2$$

A mágneses tér komponensei Ω_m szögsebességgel forgó forgórész esetén

Ω_1 – az állórész tekercselés által létrehozott mágneses mező villamos szögsebessége az állórészhez képest,

Ω_{1m} – az állórész tekercselés által létrehozott mágneses mező mechanikai szögsebessége az állórészhez képest,

Ω – a forgórész villamos szögsebessége álló koordináta rendszerben,

Ω_m – a forgórész mechanikai szögsebessége álló koordináta rendszerben,

Ω_{2m} – a forgórész tekercselés által létrehozott mágneses mező mechanikai szögsebessége a forgórészhez képest,

f_1 – az állórész tápfeszültségének alapharmonikus frekvenciája,

f_2 – a forgórész indukált feszültségének alapharmonikus frekvenciája.

S – a szlip (csúszás) – a szinkron szögsebességhez viszonyított szögsebesség különbség, a forgórész viszonylagos lemaradása.

Az aszinkron gép alapegyenletei

Az egyenletek a gép felépítése és áramkörei alapján könnyen felírhatók.

Az állórész paraméterei és változói 1 index-el, a forgórész paraméterei és változói 2 index-el állnak.

Az állórész

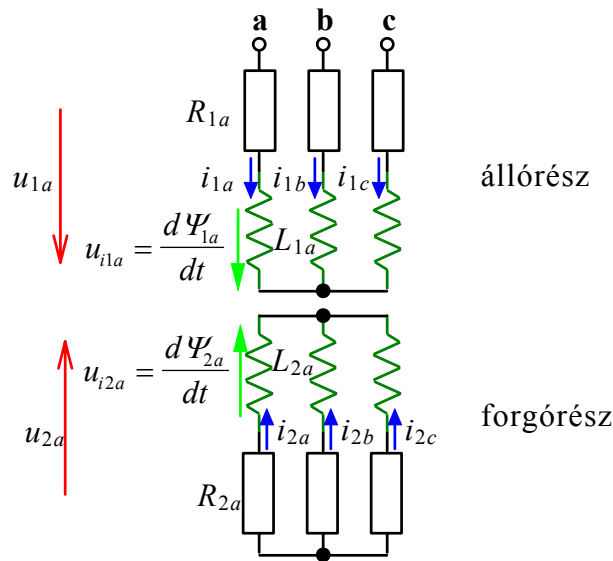
$$a \text{ fázisára } u_{1a} = i_{1a} R_{1a} + \frac{d\Psi_{1a}}{dt} = i_{1a} R_{1a} + u_{i1a}, \text{ a } b \text{ fázisra } u_{1b} = i_{1b} R_{1b} + \frac{d\Psi_{1b}}{dt} = i_{1b} R_{1b} + u_{i1b},$$

$$\text{a } c \text{ fázisra } u_{1c} = i_{1c} R_{1c} + \frac{d\Psi_{1c}}{dt} = i_{1c} R_{1c} + u_{i1c}.$$

A forgórész

$$a \text{ fázisára } u_{2a} = i_{2a} R_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt} = i_{2a} R_{2a} + u_{i2a}, \text{ a } b \text{ fázisra } u_{2b} = i_{2b} R_{2b} + \frac{d\Psi_{2b}}{dt} = i_{2b} R_{2b} + u_{i2b},$$

$$\text{a } c \text{ fázisra } u_{2c} = i_{2c} R_{2c} + \frac{d\Psi_{2c}}{dt} = i_{2c} R_{2c} + u_{i2c}.$$



Az aszinkron gép álló- és forgórészének áramköri vázlata

A mechanikai egyenlet a szokásos, állandó Θ tehetetlenségi nyomatékot feltételezve:

$$M - M_t = M_d = \Theta \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{\Theta}{p} \frac{d\Omega}{dt},$$

itt M – a motor, M_t – a terhelés nyomatéka, M_d – a dinamikai nyomaték, Θ – a hajtás (motor Θ_m és terhelés Θ_t összegezett) tehetetlenségi nyomatéka.

Állandósult állapotra érvényes egyenletrendszer és helyettesítő áramkör

Az állórész fluxus felbontása főmezőre és szórt fluxusra

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_{1s} + \bar{\Psi}_{1m} \quad \text{illetve} \quad \bar{\Psi}_2 = \bar{\Psi}_{2s} + \bar{\Psi}_{2m},$$

itt $\Psi_{1s} = I_1 L_{1s}$, $\Psi_{2s} = I_2 L_{2s}$, az állórész szórt fluxusát az állórész áram, a forgórészét a forgórész áram hozza létre egy megfelelő szórási induktivitáson.

A Ψ_{1m} és Ψ_{2m} tekercsfluxusok az álló- és forgórészrel egyformán kapcsolódó Φ_m (kölsönös vagy főmező) fluxusból számíthatók:

$$\Psi_{1m} = N_1 \Phi_m, \quad \Psi_{2m} = N_2 \Phi_m, \quad \text{itt } N_1 \text{ és } N_2 \text{ – az álló- és a forgórész fázistekercsek menetszáma.}$$

Állandósult állapotban a feszültség egyenletek egy fázisra

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j\Omega_1 \bar{\Psi} = R_1 \bar{I}_1 + j\Omega_1 L_{1s} \bar{I}_1 + j\Omega_1 \bar{\Psi}_{1m},$$

$$\bar{U}_2 = 0 = R_2 \bar{I}_2 + jS\Omega_1 \bar{\Psi}_2 = R_2 \bar{I}_2 + jS\Omega_1 L_{2s} \bar{I}_2 + jS\Omega_1 \bar{\Psi}_{2m}.$$

$X_{1s} = \Omega_1 L_{1s}$ és $X_{2s} = \Omega_1 L_{2s}$ helyettesítéssel:

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_{1s} \bar{I}_1 + j\Omega_1 \bar{\Psi}_{1m} = R_1 \bar{I}_1 + jX_{1s} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1m}$$

$$\bar{U}_2 = 0 = R_2 \bar{I}_2 + jS\Omega_1 L_{2s} \bar{I}_2 + jS\Omega_1 \bar{\Psi}_{2m} = R_2 \bar{I}_2 + jX_{2s} \bar{I}_2 + \bar{U}_{2m}.$$

\bar{U}_{1m} és \bar{U}_{2m} a $\bar{\Psi}_{1m}$ és $\bar{\Psi}_{2m}$ (főmező) fluxus által indukált feszültség az álló- és a forgórész tekercsekben.

Az egyenletekben szereplő X_{2s} forgórész körüli szórási reaktanciát az L_{2s} forgórész körüli szórási induktivitásból a névleges Ω_1 körfrekvenciával és nem a forgórész aktuális Ω_2 körfrekvenciájával definiálják. Ezért a tényleges, f_2 forgórész frekvenciától függést az S szorzó jelzi:

$$2\pi f_2 L_{2s} = S X_{2s}.$$

IV. Aszinkron gépek

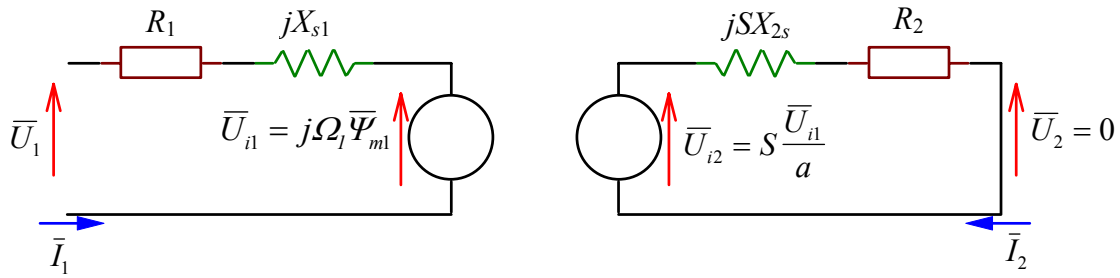
Mivel $\Psi_{2m} = \frac{N_2}{N_1} \Psi_{1m} = \frac{\Psi_{1m}}{a_N}$, ezért $\bar{U}_{1m} = jS\Omega_1 \frac{\bar{\Psi}_{1m}}{a_N} = jS\Omega_1 \frac{\bar{\Psi}_{1m}}{a_N} = S \frac{\bar{U}_{1m}}{a_N}$,

ahol $a_N = \frac{N_1}{N_2}$ – az állórész és a forgórész fázis tekercsei közötti menetszám áttétel.

A forgórész egyenlet ezekkel az átalakításokkal

$$\bar{U}_2 = 0 = R_2 \bar{I}_2 + jSX_{2s} \bar{I}_2 + S \frac{\bar{U}_{1m}}{a_N}.$$

Az egyenletek alapján felrajzolható az álló- és a forgórész állandósult állapotra érvényes áramköri vázlata.



Az aszinkron gép álló- és forgórészének áramköri vázlata állandósult állapotra

A forgórész feszültség egyenletét az S szlip-el osztva megszűnik a frekvencia különbség az álló- és forgórész mennyiségek között, aminek következménye az egyenletben megjelenő R_2/S , a szlipfüggő ellenállás

$$\frac{\bar{U}_2}{S} = 0 = \frac{R_2}{S} \bar{I}_2 + jX_{2s} \bar{I}_2 + \frac{\bar{U}_{1m}}{a_N}.$$

Az álló és a forgórész helyettesítő áramköri vázlata akkor kapcsolható össze, ha az indukált U_{1m} és U_{2m} feszültségek megegyeznek, amit a forgórész U_{2m} feszültségének az a_N menetszám áttétellel való korrekciója (állórészre redukálása) útján érünk el.

A teljesítmény, a veszteség és a viszonylagos feszültségesések változatlanságának (invarianciájának) biztosítása érdekében a feszültségegyenlet a_N -el való szorzása miatt az I_2 áramot a_N -el osztani kell, ezért szerepel az áramot tartalmazó tagokban a redukálási tényező négyzete.

Vesszővel jelölve a redukált mennyiségeket:

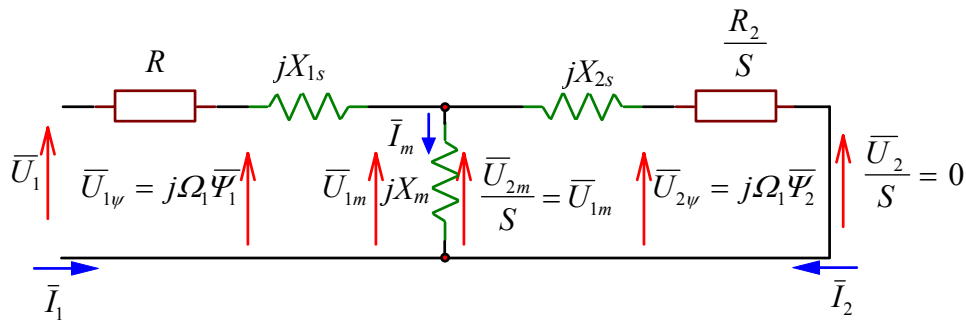
$$a_N \frac{\bar{U}_2}{S} = 0 = \frac{a_N^2 R_2}{S} \frac{\bar{I}_2}{a_N} + ja_N^2 X_{2s} \frac{\bar{I}_2}{a_N} + \bar{U}_{1m},$$

$$\frac{\bar{U}_2'}{S} = 0 = \frac{R_2'}{S} \bar{I}_2' + jX_{2s}' \bar{I}_2' + \bar{U}_{1m},$$

vagyis a forgórész állórészre redukált mennyiségei és paraméterei:

$$U_2' = a_N U_2 \quad R_2' = a_N^2 R_2 \quad X_{2s}' = a_N^2 X_{2s} \quad I_2' = \frac{I_2}{a_N}$$

A továbbiakban $a_N=1$ -et feltételezünk és a redukálást a mennyiségek vesszőzésével jelöljük. Mivel az átalakítás eredményeként az álló- és forgórész egyenletben is ugyanaz az U_{1m} szerepel, továbbá a forgórész változók frekvenciája megegyezik az állórész változókéval, a két áramkör összeköthető, ezzel létrejön az egyesített helyettesítő áramköri vázlat állandósult állapotra.

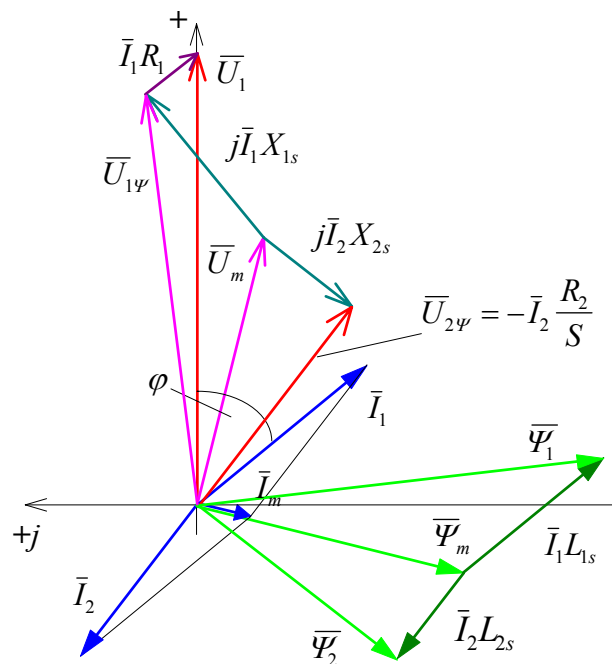


Az aszinkron gép egyesített áramköri vázlata állandósult állapotra

Az áramkörben R_1 az állórész tekercsveszteséget, R_2 a forgórész tekercsveszteséget reprezentálja. A vázlatban szereplő $\frac{R_2}{S}$ felbontható két összetevőre $\frac{R_2}{S} = R_2 + R_2 \frac{1-S}{S}$, utóbbi a mechanikai teljesítményt képviseli.

A helyettesítő áramkörben nem jelenik meg a vasvesztés, a járulékos veszteség (pl. a felharmonikusok által okozott veszteségek) valamint a súrlódási és a ventilációs veszteség. A közülük legjelentősebb állórész vasvesztéséget egy külön R_v ellenállással vehetjük figyelembe az áthidaló ágban.

Az egyenletek és az áramköri vázlat alapján is felrajzolható az aszinkron gép állandósult állapotra érvényes Park-vektorábrája.



Az aszinkron gép állandósult állapotú Park-vektorábrája

A helyettesítő áramkör paramétereit 2 mérésel lehet közelítően meghatározni:

- $\Omega = \Omega_1$ ($S=0$) szinkron szögsebesség mellett (hajtó motorral) névleges feszültségen végzett mérésnél a kapcsok felől mérhető (üresjárási) impedancia $Z_0 = R_1 + jX_{1s} + jX_m$ (a forgórész áramköre szakadt, mivel $\frac{R_2}{S} \rightarrow \infty$). A hatásos teljesítmény ilyenkor az állórész tekercs- és

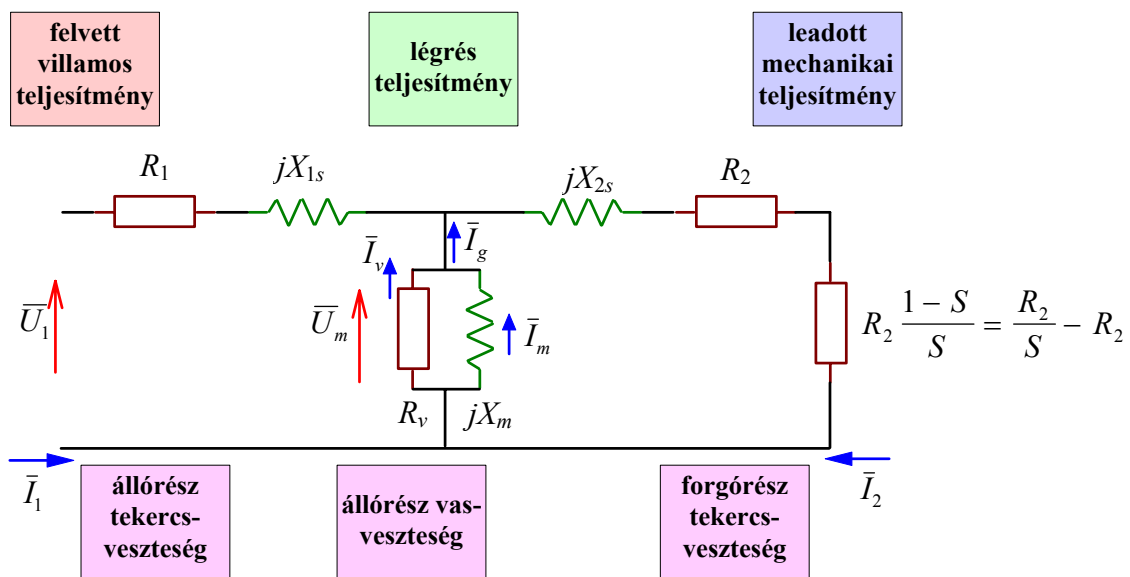
IV. Aszinkron gépek

vasvesztésének összege: $P_0 = P_{1Cu} + P_{1Fe}$. Ezt a mérést gyakran üresjárási méréssel ($S \approx 0$) közelítik.

- $\Omega = 0$ ($S = 1$) álló állapotban (rövidzárás) névleges áramnál végzett mérésnél a kapcsok felől mérhető (rövidzárási) impedancia nagysága $Z_{rz} \approx R_1 + jX_{1s} + jX_{2s} + R_2$, ha feltételezzük, hogy $X_m \gg (X_{1s} + X_{2s})$ és így az áthidaló (mágnesező ág) árama $I_m \approx 0$ értékkel közelíthető. További közelítési lehetőség, ha feltételezzük a szórási reaktanciák egyenlőségét: $X_{1s} = X_{2s}$. Rövidzárási mérésnél a hatásos teljesítmény az állórész- és a forgórész tekercsvesztésének összege: $P_{rz} \approx P_{1Cu} + P_{2Cu}$.

Az aszinkron motor teljesítményei, veszteségei és nyomatéka

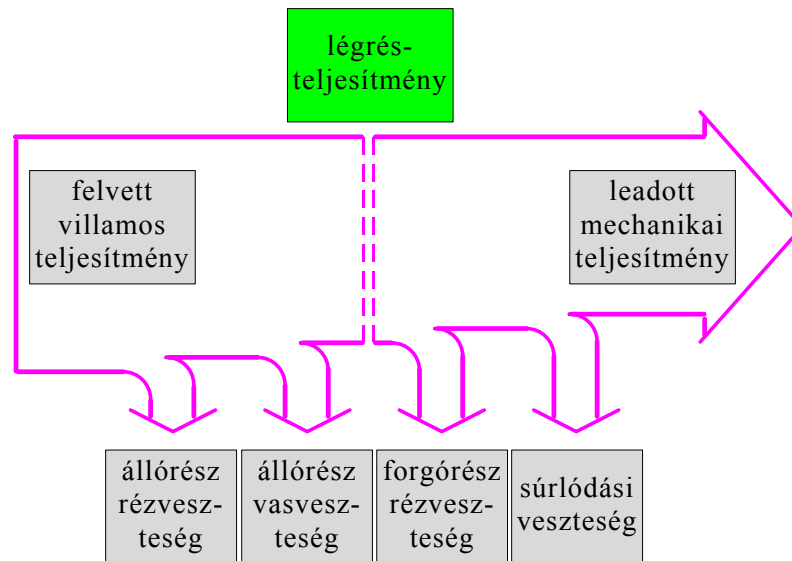
A helyettesítő áramkörben a vasvesztés, a járulékos veszteségek (pl. a felharmonikusok által okozott veszteségek) valamint a súrlódási és ventilációs veszteség nem jelenik meg. A közülük legjelentősebb állórész vasvesztéséget külön ellenállással lehet figyelembe venni az áthidaló ágban.



Áramköri vázlat osztott forgórész ellenállással és az állórész vasvesztését figyelembe vevő ellenállással, teljesítmények és veszteségek

A forgórész vasvesztése az alacsony névleges üzemi rotorfrekvencia (2-5 %) miatt, általában elhanyagolható.

A légrés teljesítmény szétválasztható egy R_2 -el arányos forgórész tekercsvesztésre és egy $\frac{R_2}{S} - R_2$ -el arányos mechanikai teljesítményre, utóbbi a súrlódási veszteség elhanyagolásával megegyezik a leadott tengelyteljesítménnyel.



Az aszinkron motor teljesítményei és veszteségei a helyettesítő vázlat közelítésével

A légrés teljesítmény szétválasztását a forgórész kör ellenállás megosztásával lehet szemléltetni:

$$\frac{R_2}{S} = R_2 + R_2 \frac{1-S}{S}.$$

	Az összes veszteség százalékában	A felvett teljesítmény százalékában
állórész tekercsvesztés	40%	6,1%
forgórész tekercsvesztés	25%	3,6%
vasvesztés	20%	3,0%
súrlódási és ventilációs veszteség	5%	0,7%
járuelős veszteségek	10%	1,4%
összes veszteség	100%	14,8%

Egy 3 fázisú, 4 pólusú, 5 HP teljesítményű, $\eta=0,852$ hatásfokú motor tipikus energia- és veszteség viszonyai

Teljesítmények és veszteségek

Az állórész által a táphálózatról felvett P_{fel} hatásos teljesítményből a P_ℓ légrés teljesítmény jut a forgórészbe, ahol az veszteséggé és a tengelyen leadott mechanikai teljesítménnyé alakul.

$$P_{fel} = P_{1Cu} + P_{1Fe} + P_\ell = 3\bar{U}\bar{I}, \quad P_\ell = P_{2Cu} + P_{mech} + P_{jár} = 3\bar{U}_m\bar{I}_1 = 3I_2^2 \frac{R_2}{S}.$$

Az állórész P_{1Cu} és forgórész P_{2Cu} tekercsvesztése (rézvesztés) a helyettesítő áramkörnek megfelelően:

$$P_{1Cu} = 3I_1^2 R_1, \quad P_{2Cu} = 3I_2^2 R_2 = SP_\ell.$$

Az állórész P_{1Fe} vasvesztése az áthidaló ág feszültségével számítható:

$$P_{1Fe} = 3 \frac{U_m^2}{R_v},$$

a P_{mech} mechanikai teljesítmény a P_ℓ légrés teljesítménynek a forgórész tekercsvesztésével csökkentett része:

$$P_{mech} = P_\ell - P_{2Cu} = (1-S)P_\ell = 3I_2^2 \frac{1-S}{S} R_2.$$

A mechanikai teljesítmény a tengelyen leadott P_{teng} teljesítmény és a $P_{súrl}$ mechanikai veszteség (súrlódás) összege, ez utóbbit a továbbiakban elhanyagoljuk.

A motor nyomatéka közelíthető az egyszerűen számítható „légrésnyomatékkal”:

$$M = \frac{P_{teng}}{\Omega_m} \approx \frac{P_{mech}}{\Omega_m} \approx \frac{P_\ell(1-S)}{\Omega_m} = \frac{P_\ell(1-S)}{\Omega_{1m}(1-S)} = \frac{P_\ell}{\Omega_{1m}} = p \frac{P_\ell}{\Omega_1},$$

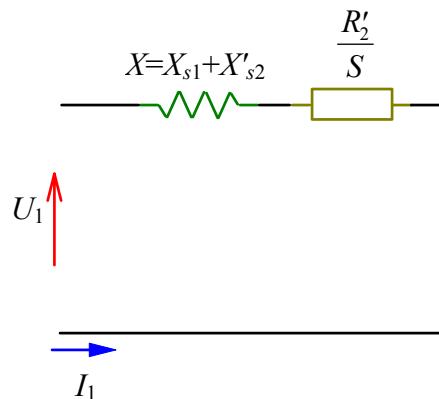
a légrésteljesítmény behelyettesítésével:

$$M = 3 \frac{p}{\Omega_1} I_2^2 \frac{R_2}{S}.$$

Az aszinkron gép állandósult állapotú nyomatéka

A motor nyomatéka a P_m mechanikai teljesítmény és a forgórész Ω_m mechanikai szögsebességének a hányadosa.

Minőségi vizsgálatokhoz egyszerűsített helyettesítő áramkört használunk az R_1 állórész ellenállás (állórész tekercsveszteség) és áthidaló ág (vasveszteség) elhanyagolásával. Az egyszerűsítés következtében a tengelyen leadott P_{mech} mechanikai teljesítmény megegyezik a P_1 felvett villamos teljesítménnyel, az $\frac{R'_2}{S}$ ellenálláson keletkező veszteségi teljesítménnyel.



Az aszinkron gép egyszerűsített áramköri vázlata

A nyomaték a mechanikai teljesítmény és a mechanikai szögsebesség hányadosa, $p=1$ -el és Ω_1 szinkron mechanikai szögsebességgel számolva:

$$M \cong \frac{P_1}{\Omega_1} = \frac{3}{\Omega_1} I_1^2 \frac{R'_2}{S}.$$

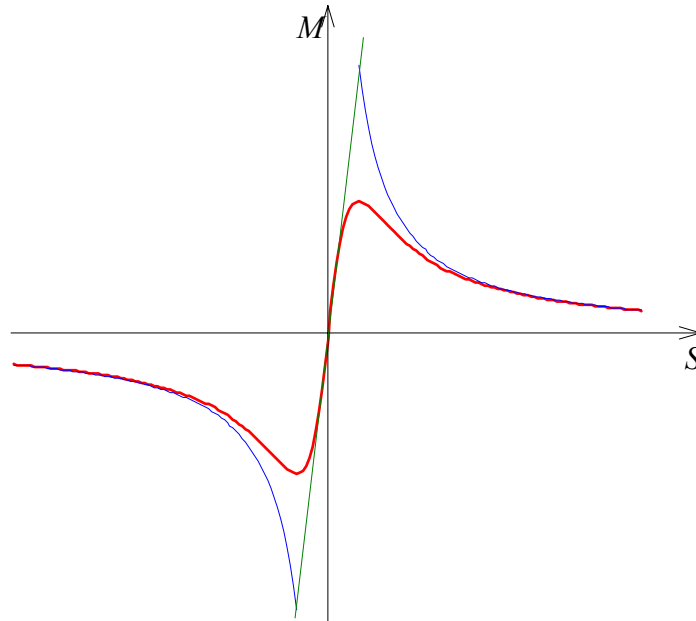
$$I_1^2 \cong \frac{U_1^2}{\left(\frac{R'_2}{S}\right)^2 + X^2} \frac{R'_2}{S}$$

$$M \cong \frac{3}{\Omega_1} \frac{U_1^2}{\left(\frac{R'_2}{S}\right)^2 + X^2} \frac{R'_2}{S}$$

Az összefüggésből megállapítható, hogy

- $M \sim U_1^2$ – a nyomaték arányos a tápfeszültség négyzetével,

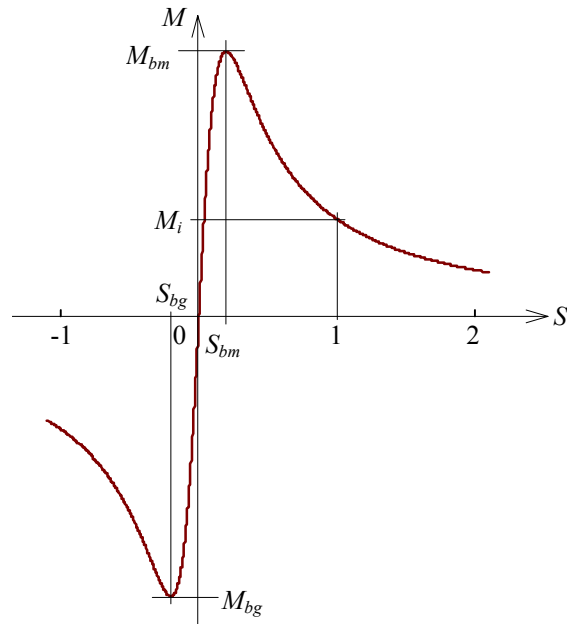
- $\frac{R'_2}{S}$ = áll. esetén a nyomaték (U_1 =állandó mellett) állandó,
- ha S nagy, akkor $\left(\frac{R'_2}{S}\right)^2$ kicsi, ezért $M \sim \frac{1}{S}$ – a jelleggörbe aszimptotája a szlip nagyobb értékeinél hiperbola,
- ha S kicsi, akkor $\left(\frac{R'_2}{S}\right)^2$ nagy, ezért $M \sim S$ – a jelleggörbe aszimptotája a szlip kisebb értékeinél egyenes.



Az aszinkron gép statikus $M(S)$ jelleggörbéje

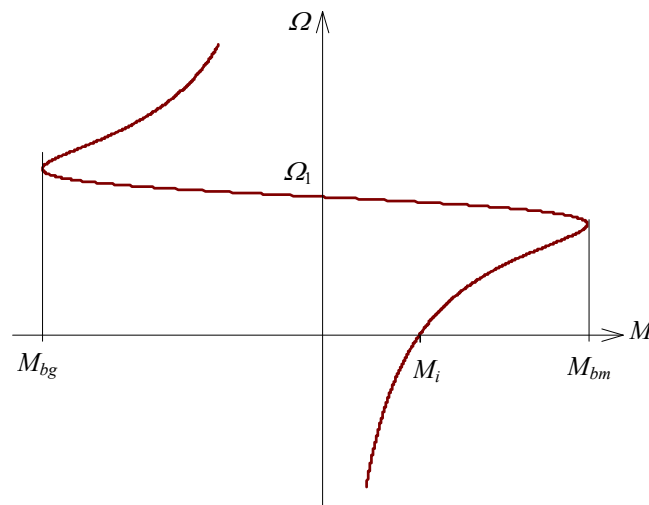
A nyomaték-szlip görbe jellemző értékei:

- M_{bm} – a motor üzemi maximális (billenő) nyomaték,
- M_{bg} – a generátor (fék) üzemi maximális (billenő) nyomaték,
- S_{bm} – a motor, S_{bg} – a generátor (fék) üzemi billenő szlip,
- M_i – az álló állapothoz tartozó indítónyomaték (zárlati nyomaték).



Az aszinkron gép nyomaték-szlip jelleggörbéje a jellemző értékekkel

A mechanikai jelleggörbét gyakran Ω - M koordináta rendszerben ábrázolják.



Az aszinkron gép szögsebesség-nyomaték jelleggörbéje

A maximális (billenő) nyomaték számítása:

A nyomatéknak a szlip függvényében szélső értékei vannak – $M_b=M(S_b)$:

$$\frac{dM}{dS} = 0 = \frac{3U_1^2}{\Omega_1} \frac{-\frac{R'_2}{S^2} \left(\frac{R'_2}{S}\right)^2 + X^2 + 2\frac{R'_2}{S} \frac{R'_2}{S^2} \frac{R'_2}{S}}{\left(\left(\frac{R'_2}{S}\right)^2 + X^2\right)^2}.$$

A szélső értékek helyét a számláló zérus értékéből kapjuk:

$$-\frac{R'_2}{S^2} \left(\frac{R'_2}{S}\right)^2 + X^2 + 2\frac{R'_2}{S} \frac{R'_2}{S^2} \frac{R'_2}{S} = 0, \text{ átrendezve}$$

$$2 \frac{R'_2}{S} \frac{R'_2}{S^2} \frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2}{S^2} \left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 + X^2, \text{ egyszerűsítve}$$

$$2 \frac{R'_2}{S} \frac{R'_2}{S} = \left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 + X^2, \text{ amiből } \left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 = X^2,$$

a billenő szlip értéke:

$$S_b = \pm \frac{R'_2}{X} - \text{ ahol } S_b > 0 \text{ a motor-, } S_b < 0 \text{ a (generátoros) féküzemre vonatkozik.}$$

Ugyanezt az eredményt kapjuk a teljesítmény illesztés $\frac{R'_2}{S} = X$ összefüggéséből is.

A kapott eredményből az S_b billenő szlip arányos R'_2 -el, külső forgórész körüli ellenállás beiktatásakor a billenő szlip nő, a mechanikai jelleggörbe lágyul.

A billenő szlip független a tápfeszültségtől.

A billenő nyomaték M_b nagyságát a billenő szlip S_b értékének behelyettesítésével kapjuk:

$$M(S_b) = M_b = \frac{3}{\Omega_1} \frac{U_1^2}{\left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 + X^2} \frac{R'_2}{X} = \pm \frac{3}{\Omega_1} \frac{U_1^2}{2X}$$

A nyomatéknak a billenő nyomatékhoz viszonyított aránya:

$$\frac{M}{M_b} = \frac{\frac{R'_2}{S}}{\left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 + X^2} = \pm \frac{2X}{\left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 + X^2} \frac{R'_2}{S} = \frac{\pm 2}{\frac{R'_2}{XS} + \frac{XS}{R'_2}}$$

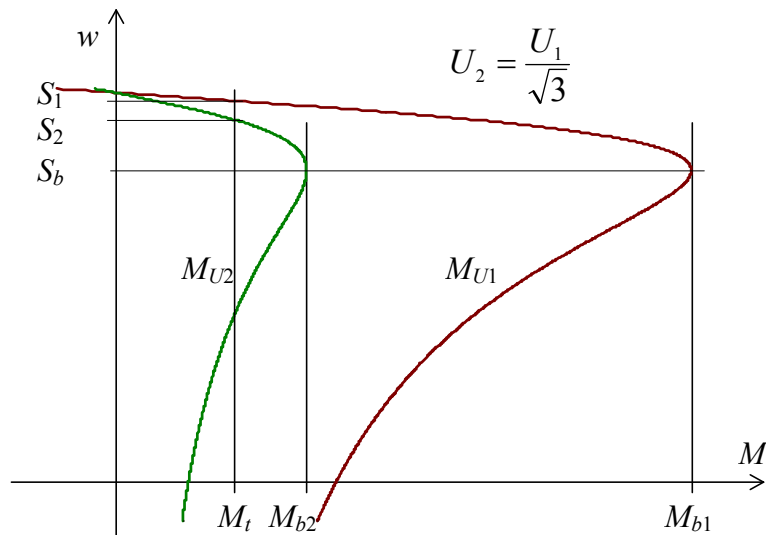
Ezt az arányt legelterjedtebb formában a Kloss¹ képlet fejezi ki:

$$\frac{M}{M_b} = \frac{\pm 2}{\frac{S_b}{S} + \frac{S}{S_b}} \quad (+ \text{ motor-, } - \text{ generátor üzemben})$$

Az R_1 állórész ellenállás elhanyagolása miatt a motor- és (generátoros) féküzemi billenő nyomaték értéke megegyezik. Ténylegesen az M_{bm} motor üzemi billenő nyomaték kisebb, mint az M_{bg} generátor üzemi.

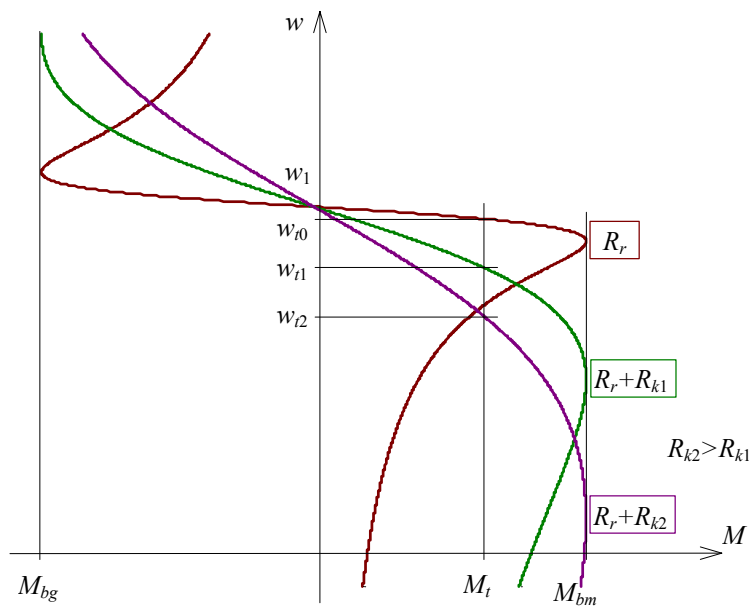
A billenő nyomaték nagysága erősen függ a tápfeszültségtől, de független a forgórész ellenállástól. Például Y/ Δ indításnál, amikor a motort Y-ba kapcsolt állórész tekercsekkel indítják és a felfutás során kapcsolják Δ -ba az indítási áram csökkentése érdekében, a $\sqrt{3}$ -szoros feszültség változás 3-szoros nyomaték változást okoz.

¹ Kloss, Max német professzor, 1873-1961



A tápfeszültség változtatás hatása a mechanikai jellegörbére és a szlipre (Y/Δ átkapcsolásnál)

Csúszógyűrűs motoroknál megfelelő nagyságú ellenállás forgórész körbe iktatásával az indító nyomaték akár a billenő nyomaték értékéig növelhető.

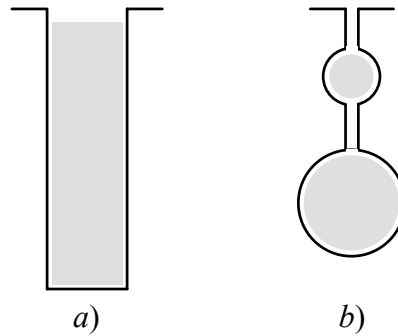


A külső ellenállás hatása a mechanikai jellegörbére

Míg csúszógyűrűs motoroknál a külső ellenállás beiktatása egyszerűen megoldható, kalickás gépek forgórész ellenállásának változtatását a horony geometriai kialakításával érik el. Az ún. áramkiszorításos motorok forgórész körbe ellenállása ténylegesen szlipfüggő (nem az egyenlet matematikai átalakítása miatt).

Az áramkiszorítás hatása

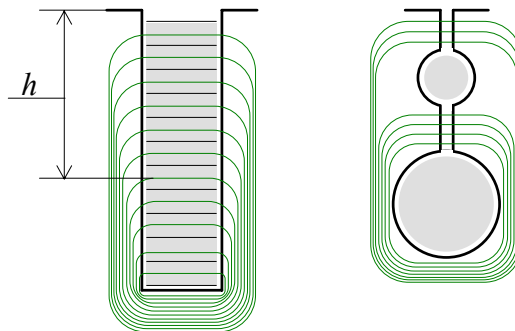
Az f_2 forgórész frekvencia szliptől (fordulatszámától, szögsebességtől) való függését figyelembe véve és kihasználva a kalickás forgórész konstrukciós kialakításával megtervezhető a forgórész körbe ellenállás szlipfüggése, ezzel a nyomaték alakulása a feljutás során.



Kalickás forgórész tipikus horonyalakja a) mélyhornyú b) kétkalickás

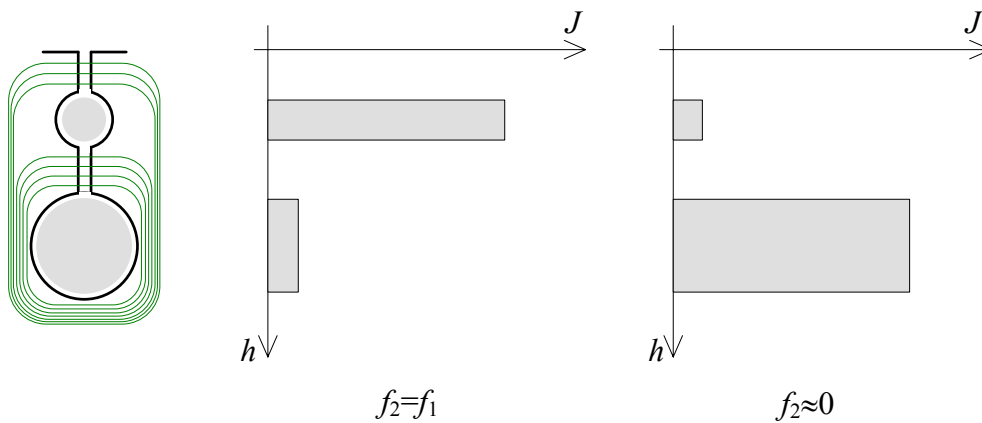
Az áramkiszorítás jelensége miatt a forgórész horonyba helyezett vezetőkön belül az árameloszlás függ a forgórész áram frekvenciájától. A jelenséget az magyarázza, hogy a vezető egyes részeivel, rétegeivel kapcsolódó fluxus – és ennek következtében a különböző rétegek

$L_{réteg} = \frac{\Psi}{i}$ önindukciós tényezője és $z = \sqrt{r^2 + (2\pi f_2 L_{réteg})^2}$ impedanciája is – változik a horonyszájtól való h távolsággal (az elképzelt réteg r ellenállását állandónak feltételezve). A frekvencia-függés növelése érdekében legtöbbször kétkalickás vagy mélyhornyú forgórészt alkalmaznak.



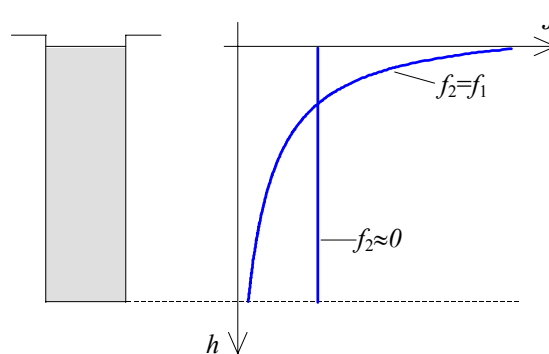
Mély horonyba helyezett, áramot vivő vezető és kétkalickás forgórész szórt mágneses tere

Az áramkiszorítás hatása legegyszerűbben a kétkalickás forgórésznél szemléltethető. Áramkörileg párhuzamosan kapcsolt vezetőkről van szó. A horonyszáj közelében lévő (felső) kalicka rendszerint kisebb keresztmetszetű és nagyobb fajlagos ellenállású anyagból (pl. sárgaréz) készül, míg az alsó kalicka nagyobb keresztmetszetű és kisebb ellenállású anyagból (pl. vörösréz) készül. Indításkor ($S=1, f_2=50$ Hz) a forgórész áram frekvenciája megegyezik a tápfrekvenciával, ilyenkor az áram főleg a nagyobb ohmos ellenállású (kisebb reaktanciájú és impedanciájú) kalickában folyik, míg a névleges munkapont környezetében ($S \approx 0,03-0,05, f_2=1,5-2,5$ Hz) a reaktancia elhanyagolható, a két kalicka ohmos ellenállása közötti arány határozza meg az árameloszlást. Ilyen módon valósítható meg konstrukciós eszközökkel, hogy indításkor nagyobb, a névleges üzemi fordulatszámon kisebb legyen a hatásos forgórész körüli ellenállás, biztosítva a névleges jelleggörbéhez képest megnövelt indító nyomatékot.

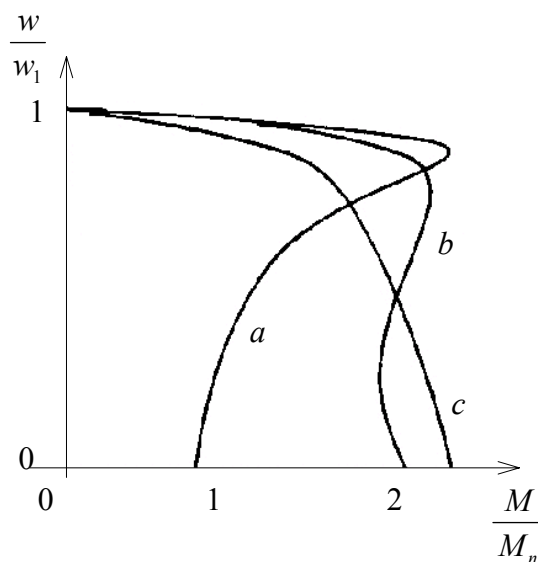


Áramsűrűség eloszlás vázlata egy kétalkás forgórész vezetőiben

Mélyhornyú forgórésznel a jelenség és hatása hasonló, de a J áramsűrűség eloszlás változása folyamatos a horonyszájtól való h távolság függvényében.



Áramsűrűség eloszlás vázlata egy mélyhornyú forgórész vezetőjében



Áramkiszorításos motorok tipikus nyomaték jelleggörbéi

a) terhelés nélkül induló motorok legmegfelelőbb nyomatékgörbéje, b) névleges nyomatékkal induló motor, a felfutás alatt közel 2-szeres nyomatékú görbéje, c) a névlegesnél nagyobb kezdeti indító nyomatékot adó görbe.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen mágneses teret hoz létre az aszinkron gép álló- és forgórésze?
2. Melyek a forgórész legfontosabb kialakítási típusai, mi az eltérés közöttük?
3. Mi a csúszógyűrű szerepe?
4. Milyen árammal gerjesztik az álló- és a forgórész tekercselését?
5. Mi a szlip, hogyan számítható, ábrázolja a szlip-szögsebesség összefüggést.
6. Állandósult állapotban mekkora a forgórész áram frekvenciája?
7. Milyen kapcsolat van az aszinkron motor pólusszáma és szinkron fordulatszáma között?
8. Milyen matematikai átalakítások vezetnek az álló- és a forgórész egyesített áramköri vázlatához?
9. Rajzolja fel állandósult állapotra az álló- és a forgórész egyesített áramköri vázlatát és vektorábráját.
10. Állandósult állapotban hogyan számítható az aszinkron motor felvett- légrés- és mechanikai teljesítménye a helyettesítő áramkör alapján?
11. Állandósult állapotban hogyan számítható az aszinkron motor álló- és forgórész tekercsvesztése, állórész vasvesztése a helyettesítő áramkör alapján?
12. Hogyan számítható az aszinkron motor állandósult állapotú nyomatéka a légrés teljesítményből?
13. Rajzolja fel az aszinkron gép névleges üzemi statikus $M(S)$ és $\Omega(M)$ jelleggörbéjét, melyek a görbék a jellemző értékei?
14. Hogyan függ a billenő szlip és a billenő nyomaték a tápfeszültségtől és a forgórész kör ellenállásától?
15. Milyen hatása van az áramkiszorításnak a kétkalickás és a mélyhornyú forgórésznél?

Összeállította: Kádár István
2019. december