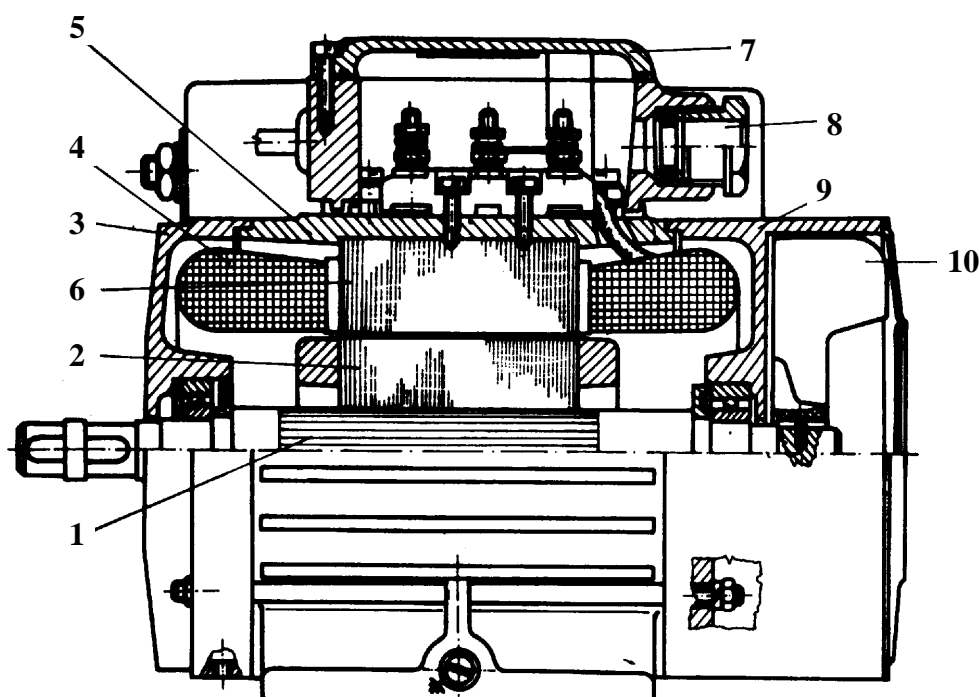


4. ASZINKRON GÉPEK

4.1. AZ ASZINKRON GÉPEK ELVI SZERKEZETI VÁZLATA ÉS MŰKÖDÉSI ELVE

A leggyakrabban, széles teljesítmény tartományban alkalmazott villamos forgógép az aszinkron gép, melynek oka az egyszerű felépítés, megbízható üzem, karbantartásmentesség, kedvező kW/kg arány.



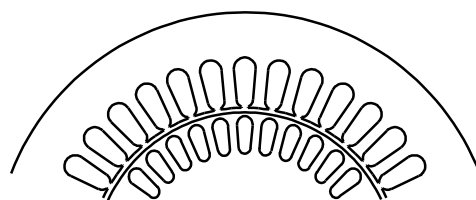
1	Tengely;	2	Forgórész vastest;
3	Pajzs;	4	Állórész tekercsek;
5	Állórész ház;	6	Állórész vastest;
7	Kapocsszekrény;	8	Kábelbevezetés;
9	Pajzs;	10	Szellőző.

4.1. fénykép Kis teljesítményű (egy fázisról táplált) aszinkron motor felépítése

Az általános szóhasználat szerint aszinkron gépen olyan villamos forgógépet értünk, amelynél:

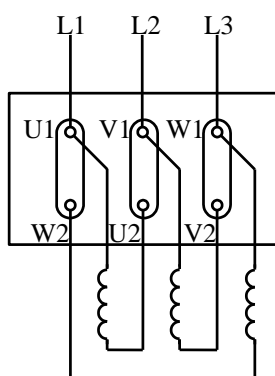
- a működéshez forgó mágneses térre van szükség;
- a forgórész fordulatszáma eltér a mágneses tér fordulatszámától (innen ered az aszinkron = nem szinkron elnevezés);
- az álló- és forgórész között az elektromágneses indukció teremt kapcsolatot, ezért ezeket a gépeket indukciós gépeknek is szokás nevezni.

Az aszinkron gépek álló- (sztátor) és forgórésze (rotor) dinamólemezekből készül (0,5...0,7 mm vastag, szén- és szilíciumszegény lakk-, vagy oxidréteg szigetelés). A lemezeknek a légrés felőli kerületére hornyokat sajtolnak (lásd a 4.1. fényképet és a 4.1. ábrát). Ezekben a hornyokban helyezkedik el az álló- illetve forgórész tekercselés.

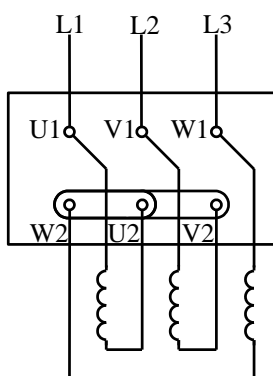


4.1. ábra Aszinkron gépek álló- és forgórész lemezkialakítása

Az állórész alumínium, vagy öntöttvas-öntvény házból, lemezelt vastestből és ennek hornyaiban elhelyezett tekercselésből áll. A háromfázisú $2p$ pólusú tekercselés kezdeteinek jelölése U1, V1, W1, a tekercs végeké pedig U2, V2, W2. A tekercsvégek a házhoz rögzített kapocstáblához vannak kivezetve. A tekercselés csillagba-, vagy háromszögbe kapcsolását itt végezhetjük el három darab vezetősín segítségével, annak érdekében, hogy az átkötéskor a sínek egymást ne keresztezzék. A tekercsvégeket a 4.2. ábrán látható módon kell kivezetnünk.



Háromszögkapcsolás

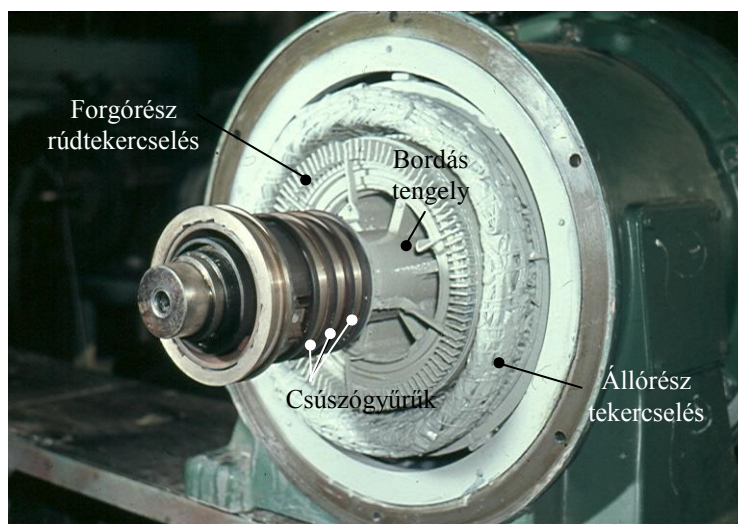


Csillagkapcsolás

4.2. ábra Aszinkron gépek állórész kapocstábla kialakítása

Az aszinkron gépeket általában az állórész oldalról tápláljuk villamos energiával, így a – transzformátorhoz hasonlóan – ezt nevezhetjük primer oldalnak.

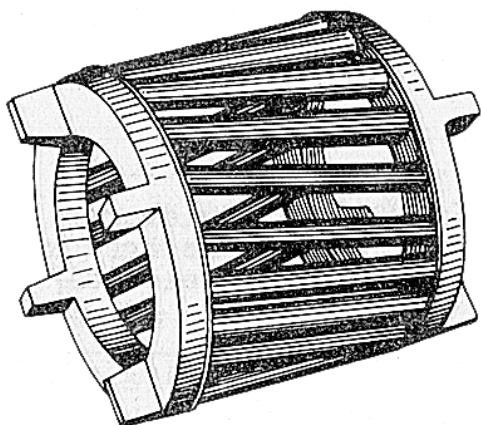
A forgórész tengelyre szerelt lemezttestből, ennek hornyaiban elhelyezett forgórész tekercselésből áll, a forgást a kétoldali csapágyazás biztosítja. Általában a tengelyre még ventilátort is szerelnek, a megfelelő hűtés elérése érdekében (4.2. fénykép).



4.2. fénykép Háromfázisú, csúszógyűrűs forgórész a három csúszógyűrűvel

A tekercselés kialakítása szerint megkülönböztetünk: csúszógyűrűs, illetve rövidrezárt forgórészt.

A csúszógyűrűs gépeknél (4.2. *fénykép*) a forgórész tekercselés végei a tengelyen rögzített sárgarézből, vagy bronzból készült csúszógyűrűkhöz csatlakoznak. A csúszógyűrűk számát a tekercselés fázisszáma (m_2) határozza meg. A gyakorlatban ez mindig három, csillagkapcsolásban, a csillagpont kivezetése nélkül. A csúszógyűrűket egymástól és a tengelytől (test) villamosan szigetelni kell. A forgórész pólusszáma megegyezik az állórésztekercselés pólusszámával: $2p_1 = 2p_2 = 2p$. A csúszógyűrűs aszinkron gépek esetén lehetőség van a forgórésztekercselés áramköréhez csatlakozni, mert a csúszógyűrűkre kefék fekszenek fel. Ezt a lehetőséget például indításnál használják fel. Ebben az esetben

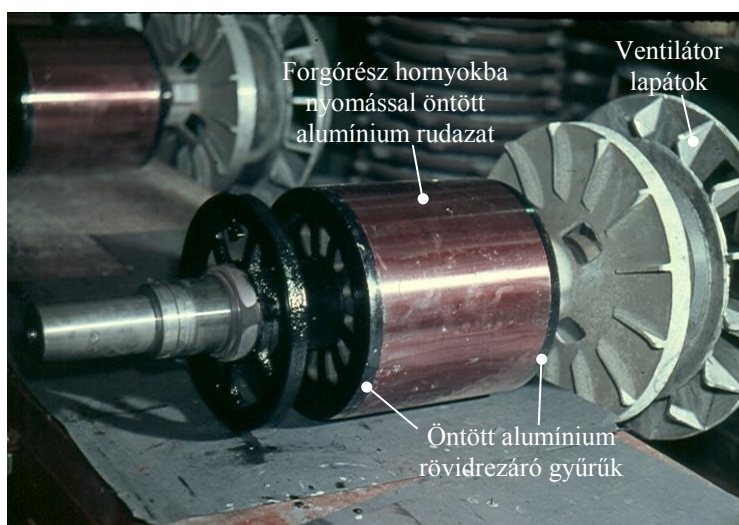


4.3. ábra Aszinkron gép forgórész kalicka

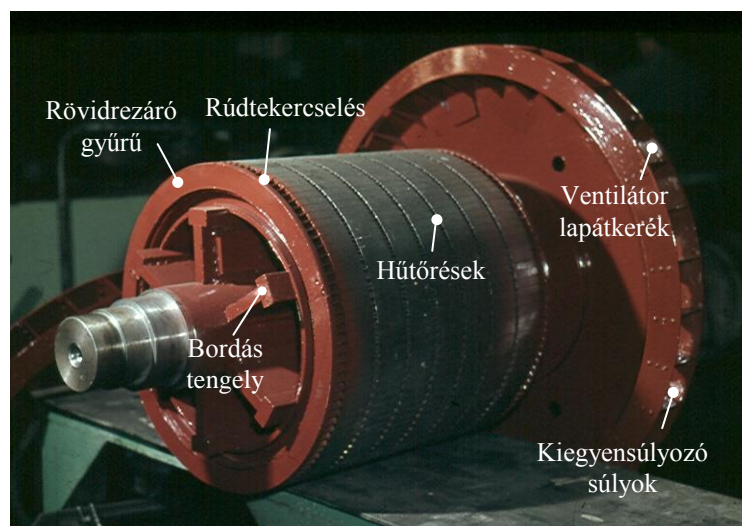
az indítás befejeztével célszerű a csúszógyűrűket rövidrezárni és a keféket a futófelületről felemelni, hogy a felesleges súrlódást és kopást elkerüljük. Ezt egy ún. kefeemelő szerkezettel oldják meg, amely egy kar elfordításával a keféket felemeli és a csúszógyűrűket egy rúddal rövidre-zárja.

A rövidrezárt forgórészű gépek esetén a vastest hornyaiban réz-, vagy alumínium rudak vannak. A rudak végeit a lemeztest két oldalán egy-egy gyűrű zárja rövidre. A rudak és a gyűrűk együttesen alkotják a kalickát, ezért ezeket a gépeket kalickás forgórészű aszinkron gépeknek

is szokták nevezni. A 4.3. ábra mutatja a lemeztest nélküli kalickát. A kalickatekercselésben működéskor kis feszültség indukálódik és a forgórész-vastest fajlagos ellenállása sokkal nagyobb, mint a rudaké, ezért a rudakat, illetve a gyűrűket nem szokták szigetelni. A kisebb teljesítményű kalickás gépek (4.3. *fénykép*) forgórésztekercselését alumíniumból készítik öntési technológiával. A nagyobb rövidrezárt forgórészű gépek rúdtekercseléssel (4.3. *fénykép*) készülnek.



4.3. fénykép Kisteljesítményű, kalickás motor forgórésze



4.4. fénykép Nagyteljesítményű, bordás tengelyes, rúdtekercselésű, kalickás motor forgórésze

Működés nyitott csúszógyűrűkkel:

Kapcsoljuk a háromfázisú aszinkron gép állórésztekercselését háromfázisú szimmetrikus, f_1 frekvenciájú hálózatra és a csúszógyűrűkhöz kivezetett forgórésztekercselés kapcsait hagyjuk üresen. Ilyenkor az állórész térben eltolt fázistekercselésében időben eltolt áram folyik, amely forgó mágneses teret hoz létre (lásd ezzel kapcsolatban a 3.1.2. pontot). Ennek percenkénti fordulatszáma:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (4.1)$$

ahol p a gép póluspárainak száma.

A forgó mágneses tér erővonalai metszik az álló-, és a forgórész vezetőit, így mindkét tekercselésben feszültség indukálódik, melyeknek fázisonkénti értékei az állórészben:

$$U_{i1} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \xi_1, \quad (4.2)$$

és a forgórészben, álló állapotban:

$$U_{i20} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \xi_2, \quad (4.3)$$

ahol Φ a kerület mentén szinuszos eloszlásúnak feltételezett forgó fluxus csúcsértéke, N_1 ill. N_2 az álló- és forgórész tekercselésének fázisonkénti menetszáma, ξ_1 ill. ξ_2 az álló- és forgórész tekercselési tényezője.

A forgórész álló helyzetében – az azonos pólusszámú tekercselések, és az erővonal-metszési sebesség azonossága miatt – az állórész és a forgórész indukált feszültségének a frekvenciája megegyezik, azaz: $f_1 = f_2$.

A frekvenciák egyenlőségét felhasználva és a két indukált feszültség egyenletének hányadosát képezve kapjuk az aszinkron gép áttételét:

$$a = \frac{U_{i1}}{U_{i20}} = \frac{N_1 \cdot \xi_1}{N_2 \cdot \xi_2}. \quad (4.4)$$

Ezek alapján mondhatjuk, hogy a nyitott tekercselésű csúszógyűrűs aszinkron gép úgy működik, mint az üresen járó transzformátor. A két tekercselés között azonban most a forgó mágneses mező teremt kapcsolatot és a lemeztetek közötti légrés miatt nagyobb mágnesező áram szükséges.

Az állórészben indukált feszültség a mágnesező áram okozta feszültségesések miatt kisebb a hálózati feszültségnél. Az állórész tekercselésének fázisonkénti ellenállása R_1 , csak az állórész vezetőit körülvevő Φ_{s1} szórás fluxusnak megfelelő reaktancia X_{s1} , így a primer kör feszültségegyenlete fázisértékekre felírva:

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_0 \cdot R_1 + \bar{I}_0 \cdot jX_{s1} + \bar{U}_{i1} \quad (4.5)$$

Az áttétel közelítő értékét a (4.4) egyenlet alapján feszültségméréssel is meghatározhatjuk, ha a feszültségeséseket elhanyagoljuk ($U_1 \cong U_{i1}$):

$$a \approx \frac{U_1}{U_{i20}}. \quad (4.6)$$

A rögzített és rövidrezárt forgórészű csúszógyűrűs gép viselkedése:

Ha az aszinkron gép tengelyét rögzítjük, a csúszógyűrűket rövidrezárjuk és ebben az állapotban az állórésztekercselést hálózatra kapcsoljuk akkor a forgórészben indukálódó U_i feszültség I_{z2} áramot hajt át a tekercselésen. Az állórész forgó mágneses mezeje és a forgórészáram egymásra hatása nyomatékot eredményez, ami a lefogott forgórészt elforgatni igyekszik. Ezt az üzemállapotot az aszinkron gépeknél rövidzárasnak nevezzük.

A rögzített forgórészű gépnél - a transzformátorhoz hasonlóan - háromféle fluxust különböztetünk meg. A Φ főfluxus az álló- és forgórész vezetőivel is kapcsolódik, a Φ_{s1} állórész szórfluxusok csak az állórész, a Φ_{s2} forgórész szórfluxusok pedig csak a forgórész vezetőit fogják körül.

Mivel a forgórész most is álló helyzetben van, a forgórész kör frekvenciája megegyezik az állórész frekvenciájával: $f_1 = f_2$.

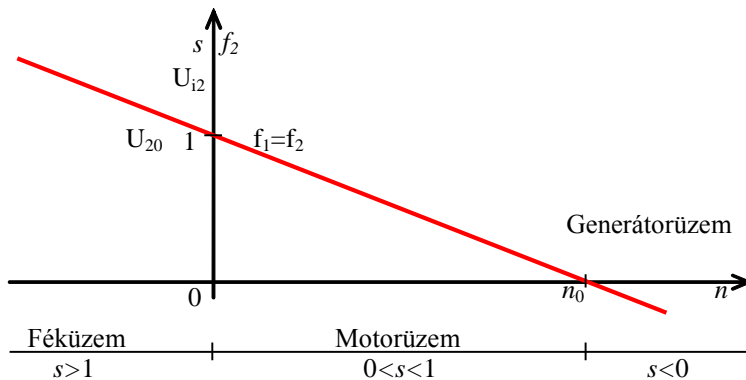
A névleges feszültségnél fellépő rövidzárási áram a névleges áram 4...7-szerese ($I_{zmax} = 4...7 \cdot I_n$), amely a transzformátorokénál jóval kisebb érték. Ennek oka, hogy az aszinkron gépek esetén a tekecsfejek és a viszonylag nagy légrés miatt megnövekednek a szór fluxusok, ami azoknak a szórás reaktanciáknak a növekedését is jelenti, amelyek a rövidzárási áramot korlátozzák.

Az aszinkron gép működése forgó állapotban:

Ha a forgórész tengelyének rögzítését megszüntetjük, akkor a forgó mágneses mező és a forgórész vezetőiben folyó áram kölcsönhatása következtében kialakuló nyomaték a forgórészt forgásba hozza. A forgó mágneses mező fordulatszáma továbbra is n_0 , a forgórészé pedig csak n , vagyis a forgómezőhöz képest $\Delta n = n_0 - n$. A forgórész vezetőiben indukált feszültség frekvenciája ilyenkor:

$$f_2 = \Delta n \cdot p = (n_0 - n) \cdot p. \quad (4.7)$$

Az $n_0 - n$ fordulatszám különbség viszonylagos értékét szlipnek nevezzük. Definíciója:



$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4.8)$$

A szlip értéke az aszinkron gépek üzemállapotait igen jól jellemzi.

Motoros üzembről beszélünk ha $0 < n < n_0$, azaz $1 > s > 0$.

Generátorüzemnek nevez-
zük, ha külső beavatkozással az aszinkron gép fordulatszámát a

4.4. ábra A szlip változása a fordulatszám függvényében

szinkron fölé emeljük. Ekkor, a szlip értéke negatív lesz: $s < 0$. Ilyenkor a gép a tengelyén mechanikai teljesítményt vesz fel és azt a tekercseléseken keresztül, villamos teljesítmény formájában a hálózat felé továbbítja.

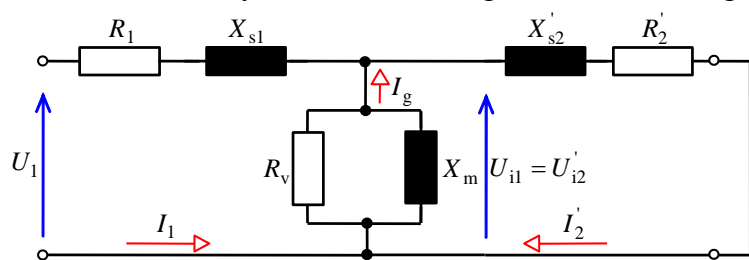
Ha a forgórészt külső nyomaték segítségével a forgó mágneses mező forgásával ellentétes irányba forgatjuk, akkor a gép a tengelyén mechanikai teljesítményt vesz fel. Mivel a forgómező a forgórészt a saját irányába akarja forgatni, ehhez a hálózathoz szintén teljesítményt vesz fel. A mindkét oldalról felvett teljesítmény az aszinkron gép tekercseléseiben hővé alakul. Ez féküzem, melynek esetében a forgórész fordulatszáma negatív $n < 0$, és a szlip: $s > 1$. A szlip változását a fordulatszám függvényében az 4.4. ábrán láthatjuk, ahol a különböző üzemmódok tartományait is bejelöltük.

Két kitüntetett pont az $s = 0$ és az $s = 1$. Az $s = 0$ az $n = n_0$ pontnál van, vagyis amikor az aszinkron gép forgórésze eléri a mágneses mező fordulatszámát. Ez csak akkor lehetséges, ha elhanyagoljuk a súrlódási veszteséget és a gép tengelye terheletlen. Ebben az esetben a forgórészben nem indukálódik feszültség, mert nincs erővonalmetszés és a forgórész körben emiatt nem folyik áram. Ezt az állapotot nevezzük ideális üresjárasnak. A valóságos üresjárás – a súrlódás figyelembe vételekor – közel esik az $s = 0$ -hoz, mert a gyakorlatban az üresjárási szlip értéke $s = 0,4...0,7\%$ körül van.

Az $s = 1$ pont a már ismertetett rövidzárási állapotot jelenti, mert ilyenkor a forgórész áll, azaz $n = 0$.

4.2. AZ ASZINKRON GÉP HELYETTESÍTŐ VÁZLATA, VEKTORÁBRÁK.

Az előző fejezet alapján megállapíthatjuk, hogy a rögzített tengelyű aszinkron gép olyan rövidrezárt transzformátorként működik, melynél az álló- és forgórész között a forgó mágneses tér valósítja meg a kapcsolatot. Ezért a háromfázisú aszinkron gép egy fázisára vonatkozó helyettesítő kapcsolási vázlatot a transzformátorhoz hasonlóan rajzolhatjuk fel (4.5. ábra).



4.5. ábra Az aszinkron gép helyettesítő vázlata rövidzárársban

A helyettesítő vázlat esetén az aszinkron gép szekunderkörü (forgórész-körü) mennyiségeit a primer oldalra kell redukálni.

A redukció alapfeltételei:

- ✚ gerjesztések azonossága, és a
- ✚ teljesítmények- és a veszteségek azonossága ($m_1 \neq m_2$ esetén is).

Az állórészre redukált forgórész indukált feszültség:

$$U'_{i2} = a \cdot U_{i2}. \quad (4.9)$$

A redukált áram számítását a gerjesztési feltételből határozhatjuk meg. A primer és a szekunder tekercselések pólusszámának azonosnak kell lennie. Az I_2 áram a forgórész m_2 fázisszámú, fázisonként N_2 menetszámú és ξ_2 tekercselési tényezőjű tekercselésben hoz létre gerjesztést. Az I'_2 redukált áramnak az m_1 fázisszámú, fázisonként N_1 menetszámú és ξ_1 tekercselési tényezőjű primer tekercselésben ugyanakkora gerjesztést kell létrehoznia, mint az előbb I_2 -nek. Ennek alapján írhatjuk, hogy:

$$I'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{N_2 \cdot \xi_2}{N_1 \cdot \xi_1} \cdot I_2,$$

az áttétel ismeretében pedig

$$I'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{I_2}{a}. \quad (4.10)$$

A redukált ellenállást és a szórási reaktanciát a veszteségek azonossága alapján számíthatjuk:

$$m_1 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2 = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2.$$

Innen:

$$R'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 \cdot R_2.$$

A (4.10) egyenletet felhasználva kapjuk:

$$R'_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot a^2 \cdot R_2. \quad (4.11)$$

A szórási reaktanciát hasonlóan redukálhatjuk:

$$X'_{s2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot a^2 \cdot X_{s2}. \quad (4.12)$$

Ezek a redukálási összefüggések általános érvényűek. A csúszógyűrűs gépekre általában igaz, hogy $m_1 = m_2$.

A rövidrezárt forgórészű gépeknél a kalicka rúdjai más-más hornyokban fekszenek és mindkét végükön egy-egy gyűrűvel vannak rövidrezárva, ezért a forgórész menetszáma $N_2 = 1/2$. Ha a forgórész horonyszámot (Z_2) elosztjuk a póluspárszámmal és az eredmény nem egész szám, akkor a forgórész fázisszáma $m_2 = Z_2$, mert minden rúd külön fázisúnak tekinthető. Ha Z_2/p egész szám, akkor a szomszédos póluspárok alatt a rudak szimmetrikusan helyezkednek el, és Z_2/p azonos fázisú rúd van a kerületen, tehát a forgórész fázisszáma is $m_2 = Z_2/p$.

A rövidrezárt forgórészű gépeknél a kalickában az állórésztekercselés pólusszámának megfelelően alakul ki a pólusszám, ezért elvileg egy forgórész más-más pólusszámú állórészben is felhasználható.

A forgórész frekvenciáját forgó állapotra az (4.7) és (4.8) egyenletek szerint a következő alakban is felírhatjuk:

$$f_2 = p \cdot n_0 \cdot s, \quad \text{de} \quad p \cdot n_0 = f_1,$$

$$\text{azaz:} \quad f_2 = s \cdot f_1. \quad (4.13)$$

Tehát a szekunder frekvencia a szlippel arányosan változik. A forgórészben indukált feszültség forgó állapotban:

$$U_{i2} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \xi_2.$$

Felhasználva az (4.13) összefüggést

$$U_{i2} = 4,44 \cdot \Phi \cdot s \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \xi_2. \quad (4.14)$$

A (4.3.) egyenlet értelmében

$$U_{i2} = s \cdot U_{i20} \quad (4.15)$$

Eszerint a szekunder indukált feszültség üresjárásban nulla és az álló állapotig, U_{i20} értékig a szlippel arányosan változik.

A forgórész körben a szórási reaktancia is függ a frekvenciától. Álló állapotban:

$$X_{s2} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{s2}, \quad (4.16)$$

forgó állapotban pedig:

$$X_{s2}(s) = s \cdot X_{s2}.$$

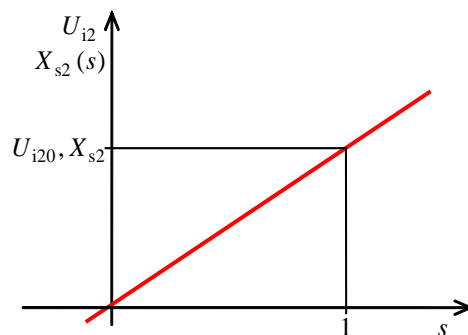
A szekunderkörü feszültség és szórási reaktancia változását a szlip függvényében a 4.6. ábrán láthatjuk.

A forgó aszinkron gépre nem alkalmazhatjuk módosítás nélkül az álló állapotra vonatkozó helyettesítő vázlatot, mert a szekunderkörü indukált feszültség a szlip függvénye. Az (4.3), (4.9) és (4.15) egyenleteket felhasználva írhatjuk, hogy:

$$U'_{i2} = a \cdot U_{i2} = a \cdot s \cdot U_{i20} = s \cdot \frac{N_1 \cdot \xi_1}{N_2 \cdot \xi_2} \cdot 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \xi_2 = s \cdot U_{i1}. \quad (4.17)$$

A szekunder szórási reaktanciánál szintén figyelembe kell venni a szlipfüggést. A többi szekunder mennyiséget is redukálva az összefüggéseknek megfelelően átrajzolt helyettesítő vázlatot a 4.7. ábra mutatja.

Az ábrán az álló- és forgórészt szét kellett választani, mert $U'_{i2} \neq U_{i1}$. A helyettesítő vázlat azonban így nehezen kezelhető. Továbbra is az lenne jó, ha összefüggő négy-pólust vizsgálhatnánk. Ennek érdekében írjuk fel a forgórész kör feszültségegyenletét:



4.6. ábra A forgórész kör feszültség és szórási reaktancia változása a szlip függvényében

$$s \cdot \bar{U}_{i1} = \bar{I}_2' \cdot (R_2' + j \cdot s \cdot X_{s2}').$$

Az egyenlet mindkét oldalát a szlippel osztva

$$\bar{U}_{i1} = \bar{I}_2' \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + j \cdot X_{s2}' \right). \quad (4.18)$$

Az egyenlet alapján azt mondhatjuk, hogy I_2' értéke nem változik, ha a tápfeszültség U_{i1} , és a forgórész kör impedanciáját $\frac{R_2'}{s} + j \cdot X_{s2}'$

impedanciával helyette-

sítjük. Így a forgórész kör már összekapcsolható az állórész körrel, mert az indukált feszültségek azonosak. Az összevont helyettesítő kapcsolást a 4.8. ábra mutatja.

A helyettesítő vázlatban szereplő R_2'/s ellenállást felbonthatjuk egy szliptől független R_2' és egy szliptől függő R_t' összetevőre. Ez a szétválasztás egyszerűsítheti a további

vizsgálatokat. Legyen

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_t',$$

amelyből R_t' -t kifejezve:

$$R_t' = R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right). \quad (4.19)$$

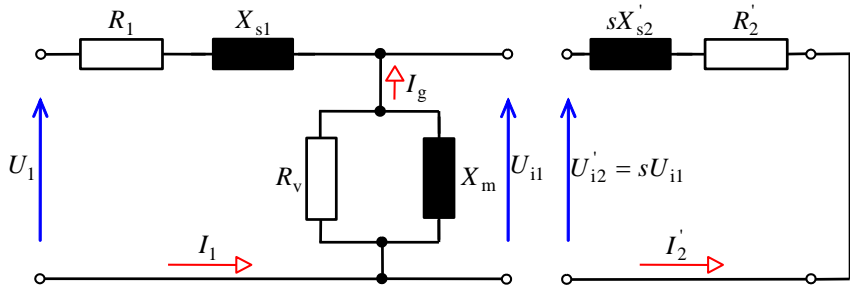
Az R_t' szliffüggő ellenállást tartalmazó helyettesítő

latot a 4.9. ábrán láthatjuk, az ellenálláson eső feszültséget U_2' -vel jelöltük. Ez a feszültség egy fiktív feszültség és csak a helyettesítő vázlatban jelentkezik.

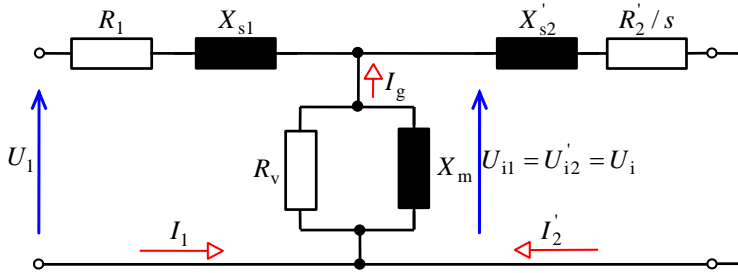
A 4.9. ábra alapján beláthatjuk azt, hogy az R_t' ellenálláson keletkező veszteség az aszinkron gép mechanikai teljesítményével egyenlő, mert az állórészen felvett wattos

teljesítményből levonódik az R_1 és R_2' ellenállásokon keletkező primer és szekunder tekercsveszteség, valamint az R_v -n keletkező veszteség, amely a vasveszteséget jelképezi. A levonások utáni

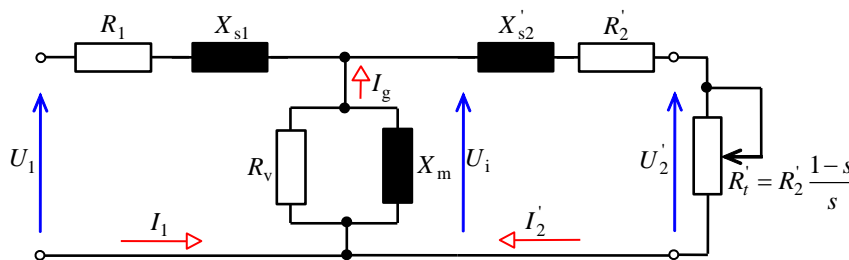
teljesítmény az aszinkron gép tengelyén leadott mechanikai teljesítmény.



4.7. ábra Az aszinkron gép helyettesítő vázlatának származtatása



4.8. ábra Az aszinkron gép forgó állapotára érvényes helyettesítő vázlat



4.9. ábra Az aszinkron gép általános helyettesítő vázlata

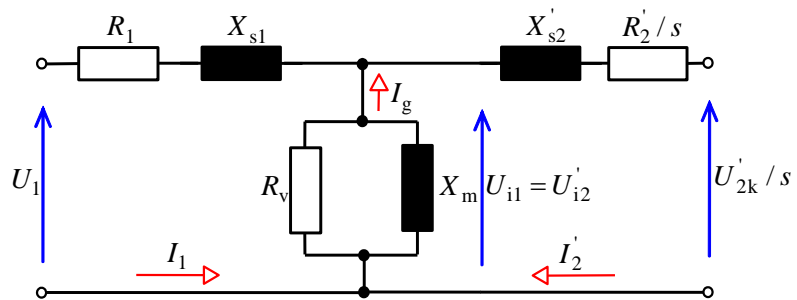
Vizsgáljuk meg, hogy az R_t' hogyan tükrözi az aszinkron gép üzemállapotait:

- ✚ Motorüzem: a szlip értéke $0 < s < 1$, ilyenkor a motor a hálózathoz teljesítményt vesz fel és a veszteségeken kívül a teljesítményt a tengelyen adja le. Ezt a teljesítményt jelképesen az R_t' ellenállás fogyasztja el, amelynek értéke pozitív és a szlip-től függően 0-tól ∞ -ig változhat.
- ✚ Generátorüzem: a szlip értéke $-\infty < s < 0$, a forgórészt külső nyomatékkal a szinkron fordulatszám fölé emeljük, ilyenkor a gép a tengelyén teljesítményt vesz fel és azt a veszteségeken kívül a hálózat felé továbbítja. R_t' értéke ebben az esetben negatív, ami azt jelenti, hogy energiatermelőként viselkedik.
- ✚ Féküzem: a szlip értéke $1 < s < \infty$, a forgórészt a forgó mágneses mező irányával szembe kell forgatni, a gép ezt a forgást megszüntetni igyekszik, a hálózathoz és a tengelyén keresztül is teljesítményt vesz fel. R_t' ilyenkor negatív és értéke 0 és $-R_2'$ között változik.

Álló állapotban $s = 1$, tehát $R_t' = 0$ mert nincs mechanikai teljesítmény, így a rövidzárási áramot a primer -ill. szekunder ellenállások és szórási reaktanciák korlátozzák.

Szinkron fordulatszám elérésénél $s = 0$ így $R_t' = \infty$, a forgórész kör tehát szakadt és $I_2' = 0$. Az állórész áram nagyságát X_m és X_{s1} fázisszögét R_v és R_l határozza meg.

Az aszinkron motorok fordulatszám-változtatásának egyik módja, hogy csúszógyűrűs motor esetén a forgórész kapcsok közé változtatható feszültségű és frekvenciájú áramforrást kapcsolunk. Az ilyen üzemre szintén felírhatjuk a szekunder kör feszültség-egyenletét a redukált értékekkel (4.7. ábra szekunder oldal nyitott csúszógyűrűvel):



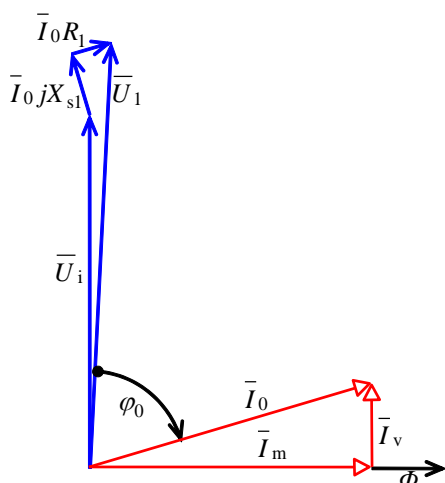
4.10. ábra Helyettesítő vázlat a szekunder kapcsokon külső feszültséggel

$$s \cdot \bar{U}_{i2}' + j \cdot s \cdot \bar{I}_2' \cdot X_{s2}' + \bar{I}_2' \cdot R_2' - \bar{U}_{2k}' = 0, \quad (4.20)$$

ahol U_{2k}' a kapcsok közé iktatott külső feszültség redukált értéke. Az egyenletet a szlippel osztva kapjuk, hogy:

$$\bar{U}_{i2}' + j \cdot \bar{I}_2' \cdot X_{s2}' + \bar{I}_2' \cdot \frac{R_2'}{s} - \frac{\bar{U}_{2k}'}{s} = 0. \quad (4.21)$$

Mivel $\bar{U}_{i2}' = \bar{U}_{i1} = \bar{U}_1$ a (4.21) egyenletnek megfelelő áramkör a primer oldallal most is összeköthető, így az érvényes helyettesítő vázlatot a 4.10. ábrán láthatjuk.

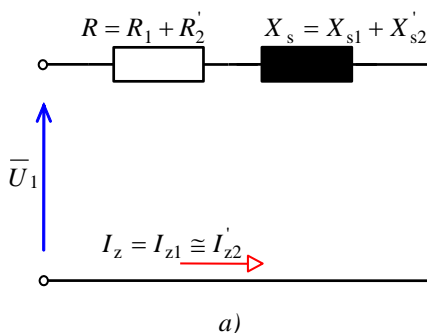


4.11. ábra Az aszinkron gép üresjárási vektorábrája

A szekunder kapcsokon megjelent a primer oldalra redukált külső feszültség szlippel osztott értéke. A teljesítményeket vizsgálva motorüzemben az $\frac{\bar{U}_{2k}'}{s} \cdot \bar{I}_2'$ teljesítményt a kapcsokra kötött feszültségforrásnak kell felvennie.

Vektorábrák:

Az üresjárási vektorábrát a 4.9. ábra helyettesítő kapcsolási vázlata alapján, a vonatkoztatási irányoknak megfelelően szerkeszthetjük meg. Üresjárásban az $\bar{I}_2' = 0$, ezért a hálózati feszültséggel az indukált feszültség és az \bar{I}_0 üresjárási áram által a primer körben ellenálláson és szórási reaktancián létrejövő feszültségesések tartanak egyensúlyt. Az üresjárási áram most megegyezik a gép gerjesztő áramával. A gerjesztőáram két összetevőre bontható, a fluxust létrehozó meddő (\bar{I}_m) és a vas, valamint a súrlódási és ventilációs veszteséget fedező valós (\bar{I}_v)-re. A vektorábra szerkesztésénél az áthidaló ág párhuzamos köréből indulunk ki, a valós tengelyen az indukált feszültség felrajzolásával, amelyhez képest a gerjesztőáram meddő összetevője $\pi/2$ szöggel késik. A gerjesztőáram valós összetevője az indukált feszültséggel megegyező fázishelyzetű. Az áthidaló ág két áramának vektoriális eredője adja meg az üresjárási áramot. Az \bar{I}_0 üresjárási áram által létrehozott feszültségesések a primer körben az $\bar{I}_0 \cdot R_1$ és a $\bar{I}_0 \cdot jX_{s1}$, ezeket a vektorokat a vonatkoztatási irányok értelmében folytonos nyíliránnyal kell az \bar{U}_i -hez fűzni. A három vektor eredője határozza meg az \bar{U}_1 kapocsfeszültség vektorát, melyhez képest φ_0 szöggel késik az \bar{I}_0 üresjárási áram. Az



4.12. ábra Egyszerűsített rövidzárási helyettesítő vázlat és vektorábra

üresjárási vektorábrát az 4.11. ábrában rajzoltuk fel.

A vektorábrában szereplő vektorok a szemléletesség kedvéért a valósághoz képest torzák, mert a gyakorlatban az \bar{U}_i csak egy-két százalékkal

tér el \bar{U}_1 -től és szinte azonos fázishelyzetűnek tekinthetőek, valamint a gerjesztőáram meddő összetevője közel egy nagyságrenddel nagyobb, mint a hatásos.

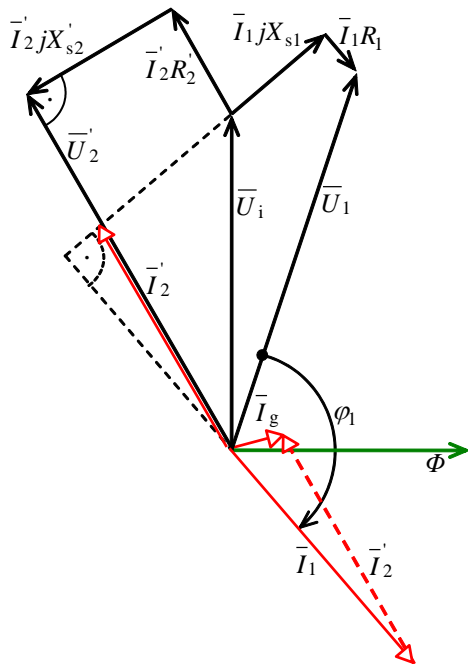
A rövidzárási állapotot a 4.5. ábrán bemutatott rövidzárási helyettesítő vázlat alapján vizsgálhatjuk. A primer- és szekunder oldalon folyó nagy rövidzárási áram értékét csak a soros impedanciák korlátozzák. Ezek a primer- és a szekunder oldalon közel azonos értékűek, ezért a feszültségosztás alapján az indukált feszültség gyakorlatilag az üresjárási érték felére csökken.

Ez fluxusváltozást is okoz, azaz a gerjesztőáram jelentősen csökken és a primer- és a redukált szekunder áram közel azonos értékű, ami az áthidaló ág elhanyagolását jelenti. Az áthidaló ág elhanyagolásával felrajzolt helyettesítő vázlatot az 4.12a ábrán láthatjuk, a hozzá tartozó rövidzárási vektorábrát a 4.12b ábra mutatja.

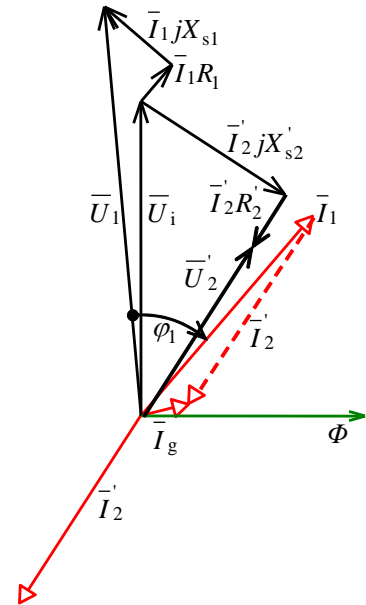
A rövidzárási impedancia:

$$Z_z = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{s1} + X_{s2}')^2} = \sqrt{R^2 + X_s^2}. \quad (4.22)$$

Az általános helyettesítő vázlatnak megfelelő motorüzemi vektorábra az 4.13. ábrán látható. A motor a primer oldalon induktív meddő és hatásos teljesítményt vesz fel a hálózathoz ($\varphi_1 < \pi/2$), a szekunder oldalon pedig hatásos teljesítményt ad le. Az \bar{I}_2' áramvektort az \bar{I}_1 és \bar{I}_g felrajzolása után kapjuk meg, amelynek a második negyedben kell elhelyezkednie. \bar{I}_2' ellenfázisban van a fiktív \bar{U}_2' feszültséggel, mert a helyettesítő vázlatban R_t' jelenti a terhelést. \bar{U}_2' feszültségvektor végpontjából kiindulva felrajzolhatjuk a szekunder feszültségesések vektorait az \bar{U}_i -hez csatlakoztatva, majd a primer feszültségesések felrajzolása után kapjuk meg a kapcsolófeszültség \bar{U}_1 vektorát.



4.14. ábra Az aszinkron gép generátorüzemi vektorábrája



4.13. ábra Aszinkron gépek motorüzemi vektorábrája

A generátorüzemi vektorábra szerkesztésénél figyelembe kell vennünk, hogy ilyenkor a gép a hálózat felé hatásos teljesítményt ad le, de a működéséhez szükséges meddőteljesítményt pedig onnan veszi fel. Az \bar{I}_1 állórész áram vektor ezért a harmadik negyedben helyezkedik el és nagysága, valamint fázishelyzete a szliptól függ. A gerjesztőáram nagysága és fázishelyzete a motorüzemivel közel megegyezik. Az \bar{I}_1 és \bar{I}_g vektorok meghatározzák az \bar{I}_2' helyzetét és nagyságát, amely a első negyedben van. A szerkesztést az \bar{U}_i vektorhoz képest az áramok felrajolásával kezdjük, majd a primer,

illetve szekunder áramok által okozott feszültségeseésekkel folytatjuk és így kiadódnak az \overline{U}_1 és \overline{U}_2 feszültségek. A vektorábra az 4.14. ábrán látható.

4.3. AZ ASZINKRON GÉP TELJESÍTMÉNYEI ÉS VESZTESÉGEI

A háromfázisú aszinkron motorok P tengelyteljesítmény leadásakor P_1 teljesítményt vesznek fel a hálózatról. A felvett teljesítmény fázismennyiségekkel kifejezve:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1f} \cdot I_{1f} \cdot \cos \varphi_1. \quad (4.23)$$

Az állórészben keletkező P_{v1} vasveszteség és a P_{t1} tekercsveszteség hővé alakul. A $P_{v1} = P_{k1} + P_{f1}$ vasveszteség az állórész-koszorúban és a fogakban keletkezik.

A primer tekercsveszteség a fázisértékekkel számolva:

$$P_{t1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1. \quad (4.24)$$

A fázisonkénti ellenállás értéke 75°C hőmérsékletre számolva:

$$R_1 = \rho_{75} \frac{l_{k1} \cdot 2 \cdot N_1}{a_1 \cdot c_1 \cdot q_1},$$

ahol l_{k1} a közepes vezetőhossz, a_1 a párhuzamos ágak, c_1 a párhuzamos szálak száma.

Az állórész-veszteségeket a felvett teljesítményből levonva megkapjuk a légrésteljesítményt (P_δ), ami elektromágneses indukció útján jut a forgórészbe:

$$P_\delta = P_1 - (P_{v1} + P_{t1}) = P_1 - P_{w1}. \quad (4.25)$$

A forgórészben keletkező veszteségek a P_{v2} vasveszteség és a P_{t2} tekercsveszteség, együtt $P_{w2} = P_{v2} + P_{t2}$. Csúszógyűrűs aszinkron gépeseten a külső fogyasztók (pl. ellenállások) kapcsolhatók a csúszógyűrűkre, amelyek által felvett P_k teljesítményt a gépen kívül hasznosíthatjuk. A gép mechanikai teljesítménye:

$$P_m = P_\delta - (P_{v2} + P_{t2} + P_k). \quad (4.26)$$

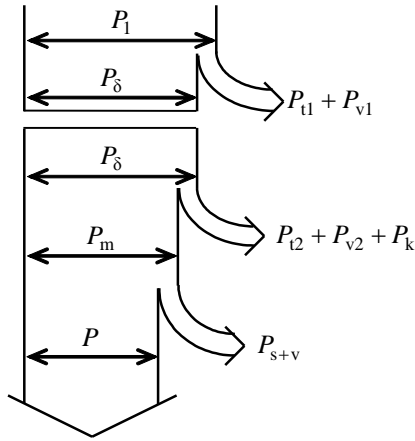
A tengelyen hasznosítható P teljesítmény a mechanikai teljesítménynél kisebb, mert a mechanikai teljesítményből még a P_{s+v} súrlódási és szellőzési (ventilációs) veszteséget le kell vonni, tehát:

$$P = P_m - P_{s+v}. \quad (4.27)$$

A forgórész körüli vasveszteség névleges szlipnél igen kis értékű, a rövidrezárási áram környékén pedig a forgórész tekercsveszteségnél nagyságrenddel kisebb, ezért általában elhanyagolhatjuk. A szekunder tekercsveszteséget az eredeti és a redukált értékekből is számíthatjuk az alábbiak szerint:

$$P_{t2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'. \quad (4.28)$$

Kalickás motoroknál külön-külön számíthatjuk ki a rudak és a gyűrűk veszteségeit, ha ismerjük a bennük folyó áramokat:



4.15. ábra. Az aszinkron gép motorüzemi teljesítményeloszlása

$$P_r = Z_2 \cdot I_r^2 \cdot \rho \cdot \frac{l_r}{q_r}, \text{ illetve} \quad (4.29)$$

$$P_{gy} = 2 \cdot I_{gy}^2 \cdot \rho \cdot \frac{D_{gy} \cdot \pi}{q_{gy}}, \quad (4.30)$$

ahol Z_2 a forgórész horonyszám, q_r és q_{gy} a rúd, ill. a gyűrű keresztmetszetek, és D_{gy} a gyűrűk közepes átmérője. A gyűrű- és a rúdáram közötti összefüggés:

$$I_{gy} = \frac{Z_2}{2\pi \cdot p} \cdot I_r,$$

a redukált forgórészáram pedig

$$I_2' = \frac{Z_2}{m_1 \cdot a} \cdot I_r.$$

Az előző két egyenletet és a veszteségek egyenlőségét figyelembe véve a forgórész redukált ellenállására azt kapjuk, hogy:

$$R_2' = \frac{4 \cdot m_1 \cdot (\xi_1 \cdot N_1)^2}{Z_2} \cdot \left(R_r + \frac{2 \cdot Z_2}{4 \cdot \pi^2 \cdot p^2} \cdot R_{gy} \right),$$

ahol R_r egy rúd-, R_{gy} pedig egy gyűrű ellenállása.

A forgórész veszteségre pedig írhatjuk, hogy:

$$P_{t2} = P_r + P_{gy}. \quad (4.31)$$

Az aszinkron motor teljesítményviszonyait a 4.15. ábra teszi szemléletesebbé.

A forgó mágneses mező, amely a légrésteljesítményt a forgórészre átviszi, ω_0 szögsebességgel forog. A légrésteljesítmény és a szögsebesség hányadosa a forgórészre ható nyomatékot adja:

$$M = \frac{P_\delta}{\omega_0}. \quad (4.32)$$

Ha eltekintünk a forgórész súrlódási és ventilációs veszteségétől, akkor a mechanikai teljesítmény az ω szögsebességgel forgó tengelyen szintén M nyomatékot fejt ki, tehát

$$M = \frac{P_m}{\omega}. \quad (4.33)$$

A két nyomatékegyenletet egyenlővé téve és a mechanikai teljesítményt kifejezve, valamint figyelembe véve ω és n összefüggését:

$$P_m = P_\delta \cdot \frac{\omega}{\omega_0} = P_\delta \cdot \frac{n}{n_0}.$$

A szlip fogalma értelmében $n/n_0 = 1 - s$, és így

$$P_m = P_\delta \cdot (1 - s). \quad (4.34)$$

Külső fogyasztó nélküli esetben

$$P_{w2} = P_\delta - P_m. \quad (4.35)$$

Az előbbi egyenletet behelyettesítve:

$$P_{w2} = s \cdot P_{\delta}. \quad (4.36)$$

Abban az esetben, ha a csúszógyűrűkön keresztül van kivezetett teljesítmény (P_k), és ennek megfelelő R_k akkor az egyenlet:

$$P_{w2} + P_k = s \cdot P_{\delta} \quad 4.37$$

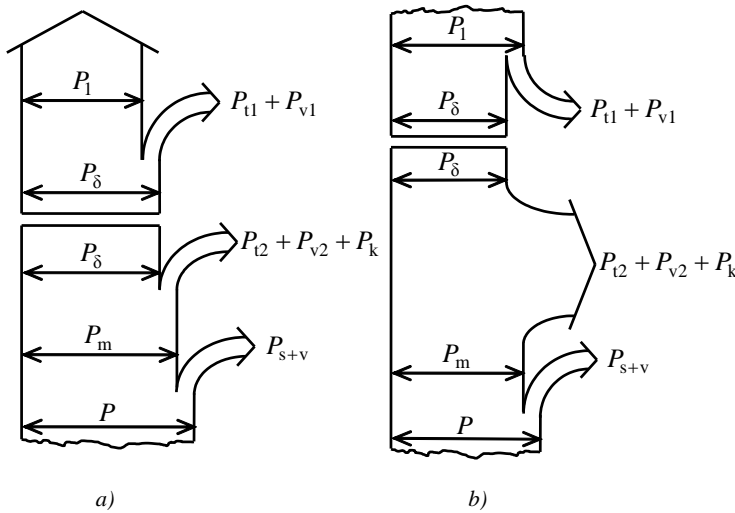
A forgórész-vasvesztés elhanyagolása esetén pedig

$$P_{t2} = s \cdot P_{\delta}, \quad (4.38)$$

illetve

$$P_{t2} + P_k = s \cdot P_{\delta}.$$

Tehát a forgórész teljesítményeinek (P_m, P_{w2}) alakulása a légrésteljesítménnyel és a fordulatszámmal (a szlippel) van szoros összefüggésben.



4.16. ábra Az aszinkron gép teljesítményeloszlása
a) generátor- és b) féküzemben

Ezek tudatában könnyen igazolhatjuk az előző fejezetben említett R'_1 és a mechanikai teljesítmény kapcsolatát. Az ellenálláson keletkező veszteség:

$$m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right).$$

A (4.28) egyenletet felhasználva:

$$m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) = P_{t2} \cdot \frac{1-s}{s}.$$

A (4.34) és a (4.38) egyenletek alapján viszont:

$$P_m = \frac{P_{t2}}{s} \cdot (1-s),$$

vagyis

$$P_m = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right).$$

A helyettesítő vázlat esetén már tárgyaltuk a különböző üzemmódokat. Az ott elmondottak értelmében az 4.16a ábrában a generátor, a 4.16b-ben pedig a féküzem teljesítményeloszlását rajzoltuk fel.

4.4. AZ ASZINKRON GÉP NYOMATÉKA

A villamos forgógépeknek – a felhasználó szempontjából – az egyik legfontosabb tulajdonsága a nyomaték változása a fordulatszám függvényében. Határozzuk meg az

aszinkron gépek nyomaték-fordulatszám jelleggörbáját! Az előző fejezetben már megismertük azt, hogy a légrésteljesítmény és a nyomaték közötti összefüggés

$$P_{\delta} = M \cdot \omega_0 = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_0.$$

Az (4.28) és az (4.38) egyenleteket felhasználva írhatjuk, hogy:

$$P_{\delta} = \frac{P_{12}}{s} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s}.$$

Fejezzük ki az előbbi két egyenlet alapján a nyomatékot:

$$M = \frac{m_1}{2 \cdot \pi \cdot n_0} \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s}. \quad (4.39)$$

Az I_2' áram meghatározása céljából térjünk vissza a 4.8. ábrán látható helyettesítő vázlatához! Az aszinkron gép terhelésével nő a szekunder-, ill. a gerjesztési egyensúly miatt a primer áram is. A primer áram növekedésével arányosan változik az R_1 -en és X_{s1} -en a feszültségesés. A feszültségesések miatt megváltozik az indukált feszültség, amely a fluxus, a gerjesztőáram változását vonja maga után. Jelentősen egyszerűsödik I_2' számítása, ha a primer feszültségesésektől eltekintünk és az R_v és X_m -ből álló áthidaló ágat közvetlenül a hálózatra kötjük. Ezzel az egyszerűsítéssel a gerjesztőáram terheléstől függő változásától eltekintünk, ebben az esetben $I_g = I_0$. Az egyszerűsített helyettesítő vázlatot az 4.17. ábrán láthatjuk.

Az ábrán az $X_s = X_{s1} + X_{s2}'$ összevonást is elvégeztük. Az egyszerűsítéssel elkövetett hibát csökkenti az, hogy az áthidaló ágban X_m -mel sorbakötjük az X_{s1} szórási reaktanciát.

Az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján a szekunder áram:

$$I_2' = \frac{U_{1f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_s^2}}, \quad (4.40)$$

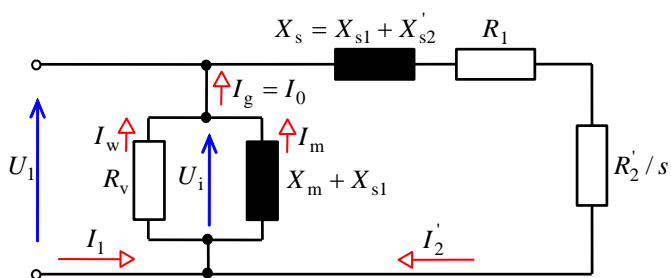
ahol:

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

Helyettesítsük be a szekunder áram kifejezését a (4.39) egyenletbe, így a nyomaték:

$$M = \frac{m_1}{2 \cdot \pi \cdot n_0} \cdot \frac{U_{1f}^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_s^2} \cdot \frac{R_2'}{s}. \quad (4.41)$$

A nyomaték közelítő egyenletéből láthatjuk, hogy egy adott aszinkron gép nyomatéka a hálózati feszültség négyzetétől; a helyettesítő vázlatban szereplő primer és szekunder ellenállásoktól és szórási reaktanciáktól; valamint a szliptől függ. Ha a feszültséget V-ban,



4.17. ábra. Az aszinkron gép egyszerűsített helyettesítő vázlata, $\Phi \approx \text{áll.}$ feltételezésével

az ellenállásokat és szórási reaktanciát Ω -ban, a fordulatszámot pedig 1/s-ban helyettesítjük az egyenletbe, akkor a nyomatékot Nm-ben kapjuk meg.

A nyomaték-fordulatszám, illetve a nyomaték-szlip jelleggörbén két, az üzemeltetés szempontjából fontos nyomatékértéket kell meghatároznunk.

Az indítónyomaték közelítő értéke ($s = 1$):

$$M_i = \frac{m_1}{2\pi \cdot n_0} \cdot I_{z2}'^2 \cdot R_2' \quad (4.42)$$

Rövidzárásban az áthidaló ág árama és a zárlati áramok nagyságrendi különbsége miatt I_g elhanyagolható, és ilyenkor

$$M_i = \frac{m_1}{2\pi \cdot n_0} \cdot I_{z1}'^2 \cdot R_2' \quad (4.43)$$

Az M_B billenőnyomaték az aszinkron motor maximális nyomatéka, amely s_B billenőszlipnél lép fel. A billenőszlipet a nyomatékegyenletből szélsőérték-keresés útján ($dM/ds = 0$) kapjuk meg:

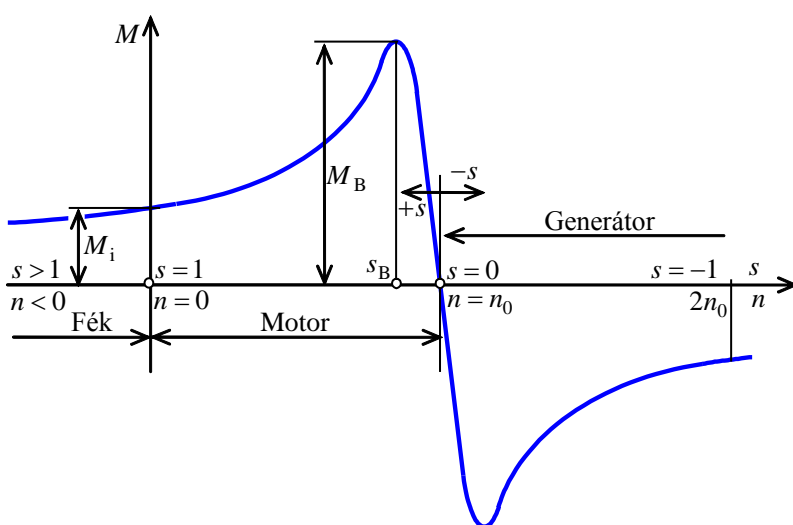
$$s_B = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1'^2 + X_s'^2}} \quad (4.44a)$$

Amennyiben R_1 elhanyagolható, akkor:

$$s_B = \pm \frac{R_2'}{X_s} \quad (4.44b)$$

A pozitív előjel motorüzemre, a negatív előjel generátorüzemre vonatkozik. A billenőszlip R_2' értéktől való függését a csúszógyűrűs motorok indításánál még hasznosítani fogjuk. A billenőnyomaték közelítő értékét a (4.41) nyomatékegyenletbe $s = s_B$ helyettesítéssel kapjuk meg (R_1 elhanyagolva):

$$M_B = \frac{m_1}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{U_{1f}^2}{2 \cdot X_s} \quad (4.45)$$



4.18. ábra Az aszinkron gép nyomaték-szlip jelleggörbéje

Az egyenletből látható, hogy a billenőnyomaték nem függ a szekunderkörü ellenállástól.

Valóságos esetben ugyanakkora szlip esetén generátorüzemben (az R_1 értékének figyelembevétele miatt) az aszinkron gép nagyobb nyomatékot tud kifejteni, mint motorüzemben.

Amennyiben a (4.41) egyenletben elhanyagoljuk

az R_1 ellenállást, akkor kapjuk, hogy:

$$M = \frac{m_1}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{U_{lf}^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_s^2} \cdot \frac{R_2'}{s} = \frac{m_1}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{U_{lf}^2}{\frac{R_2'}{s} + s \cdot \frac{X_s^2}{R_2'}}.$$

Ezt a nyomatékot a billenő nyomatékhoz viszonyítva:

$$\frac{M}{M_B} = \frac{2 \cdot X_s}{\frac{R_2'}{s} + s \cdot \frac{X_s^2}{R_2'}} = \frac{2}{\frac{1}{s} \cdot \frac{R_2'}{X_s} + s \cdot \frac{X_s}{R_2'}}.$$

Ha ebbe az egyenletbe behelyettesítjük a billenőszlip (4.44b) szerint meghatározott értékét, akkor:

$$\frac{M}{M_B} = \frac{2}{\frac{s_B}{s} + \frac{s}{s_B}}, \quad (4.46)$$

ahol ha $s \ll s_B$, akkor $M = \frac{2 \cdot M_B}{s_B} \cdot s$ illetve, ha $s \gg s_B$, akkor $M = 2 \cdot M_B \cdot s_B \cdot \frac{1}{s}$.

(4.46) az ún. *Kloss képlet*, amelynek vizsgálatából könnyen belátható, hogy a nyomaték-szlip jelleggörbe egy homlok oldali egyenessel és egy hátoldali hiperbolával közelíthető. A nyomaték-szlip jelleggörbét a 4.18. ábra mutatja.

Minthogy a fordulatszám és a szlip között a kapcsolat lineáris $n = n_0 \cdot (1 - s)$, a vízszintes tengelyen a fordulatszámot is feltüntettük.

Az aszinkron motor induláskor tehát M_i indítónyomatékot fejt ki, ennél kisebb terhelőnyomaték esetén a forgórész felgyorsul. A felgyorsulás alatt a motor eléri az M_B billenőnyomatékot, majd a merev, söntjellegű szakaszon a terhelésnek megfelelően beáll az állandósult állapot.

A motor billenőnyomatéka:

$$M_B = 1,6 \dots 2,5 \cdot M_n,$$

ahol M_n a névleges nyomatékot jelenti.

A nyomaték-fordulatszám jelleggörbét vizsgálva láthatjuk, hogy ha a terhelőnyomatékot növeljük, a fordulatszám a billenőnyomaték eléréséig csak kis mértékben változik (söntjellegű szakasz). A terhelőnyomatékot M_B fölé emelve viszont a fordulatszám jelentősen csökken, és a motor leáll. Állandó terhelőnyomaték esetén az n_0 és n_B fordulatszám közé eső szakasz stabilis, míg az n_B és $n = 0$ közötti labilis.

4.4.1. Felharmonikus nyomatékok

A nyomaték meghatározás során eddig azt feltételeztük, hogy a gépben a légrésidukció a kerület mentén szinuszos, és nem tartalmaz felharmonikusokat, vagyis az eredményeink a nyomaték alapharmonikusára vonatkoznak.

A valóságban a tekercsoldalak egymástól eltolt hornyokban történő elhelyezése, és a mágnesezési görbe telítődése miatt a mezőgörbe felharmonikusokat is tartalmaz. Továbbá

megjelennek a hornyok és a fogak eltérő mágneses vezetőképessége következtében fellépő horonyharmonikusok is.

Ezek a felharmonikusok a nyomatékban is jelentkeznek, és ez a jelenség problémákat okozhat az aszinkron motorok indításakor, illetve felfutásakor.

A *Fourier analízis* szabályait alkalmazva a gerjesztési görbét felírhatjuk egy alapharmonikus és páratlan rendszámú felharmonikusok összegével.

A gerjesztés felharmonikusainak amplitúdói:

$$\Theta_v = \frac{1}{v} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\Theta_m}{2} \cdot \xi_v, \quad (4.47)$$

ahol Θ_m a három fázis gerjesztésének maximuma és ξ_v az adott felharmonikusra vonatkozó tekercselési tényező.

Láthatjuk, hogy a (4.47) egyenlet értelmében a felharmonikusok amplitúdói a növekvő rendszámmal fordított arányban csökkennek, ezért a 13.-nál magasabb rendszámúakat nem szokták figyelembe venni.

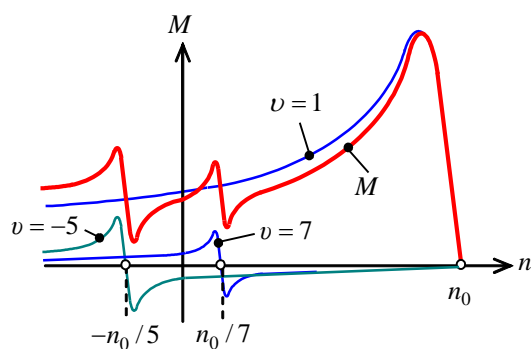
Háromfázisú gépeknél a forgómezőt létrehozó felharmonikusok lehetséges rendszámai:

$$v = 2 \cdot m \cdot k + 1, \quad m = 3 \text{ esetén:} \quad v = 6 \cdot k + 1. \quad (4.48)$$

Háromfázisú tekercselések esetén páros rendszámú felharmonikusok nem fordulhatnak elő, ezért $k = \pm 1$ esetén a $v = -5$ és a $v = +7$ rendszámú harmonikusokkal kell számolnunk.

A negatív előjel az alapharmonikussal ellentétes-, a pozitív pedig azzal megegyező forgásirányt jelent. A felharmonikus mágneses mezők szinkron fordulatszámai:

$$n_{0v} = \frac{f_1}{v \cdot p} = \frac{n_0}{v} \quad (4.49)$$



4.19. ábra Az aszinkron gép felharmonikusokat tartalmazó nyomaték-szlip jelleggörbéje

A felharmonikusok által keletkező nyomatékok jelleggörbéje az alapharmonikussal azonos jellegű.

A $v = -5$ rendszámú nyomaték jelleggörbe szinkron fordulatszáma és billenő nyomatéka is a féküzemi tartományba esik. Az eredő jelleggörbét az alapharmonikus és a felharmonikus görbék összegzéséből kapjuk, amelyet a 4.19. ábrán piros színnel ábrázoltunk.

A $v = +7$ rendszámú nyomaték problémát jelenthet motorüzemben, mert a motor a felgyorsulás közben esetleg beragadhat, ha a terhelő nyomaték az ábrán látható nyomaték nyergek közé esik.

A felharmonikus nyomatékok csökkenthetők a megfelelő tekercselési tényező (lépésrövidítés) választásával, a horonyharmonikusok pedig az ún. *horonyferdítéssel*. A horonyferdítés az állórész és a forgórész fogainak, azaz hornyainak egymáshoz viszonyított ferdítését jelenti, ami a forgórészen egyszerűen megoldható.

4.5. AZ ASZINKRON GÉP ÁRAM-MUNKADIAGRAMJA

Az 4.17. ábrán látható egyszerűsített helyettesítő vázlatban az áramokra felírt csomóponti törvény:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' = \bar{I}_g. \quad (4.50)$$

A feszültségekre felírt huroktörvény:

$$\bar{U}_{1f} = -\bar{I}_2' \cdot \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right) - j \cdot \bar{I}_2' \cdot X_s \quad (4.50a)$$

Komplex koordináta rendszerben rajzoljuk fel a vektorábrát úgy, hogy függőleges irányba az \bar{U}_{1f} feszültségvektor mutasson, és ez legyen a valós tengely! Ekkor a 4.20a ábra mutatja az (4.50) és (5.50a) egyenleteknek megfelelő vektorábrát.

A feszültségegyenlet mindkét oldalát osszuk el jX_s -sel, így:

$$\frac{\bar{U}_{1f}}{j \cdot X_s} = -\bar{I}_2' \cdot \frac{R_1 + \frac{R_2'}{s}}{j \cdot X_s} - \bar{I}_2'.$$

Rendezve:

$$\bar{I}_2' - j \cdot \frac{\bar{U}_{1f}}{X_s} = j \cdot \bar{I}_2' \cdot \frac{R_1 + \frac{R_2'}{s}}{X_s}. \quad (4.51)$$

Az egyenlet szerint, ha az \bar{U}_{1f} vektorhoz képest 90° -kal késő és $\frac{\bar{U}_{1f}}{X_s}$ nagyságú vektort hozzáadjuk \bar{I}_2' -hez, egy olyan vektort kapunk, amelynek nagysága:

$$\bar{I}_2' \cdot \frac{R_1 + \frac{R_2'}{s}}{X_s}.$$

és az \bar{I}_2' vektorhoz képest $+j$ -vel, azaz 90° -kal siet. A (4.51) egyenletnek megfelelő vektorábrát a 4.20b ábrán láthatjuk.

Az $\frac{\bar{U}_{1f}}{X_s}$ érték azonban az aszinkron gép különböző üzemállapotaiban mindig állandó, és az

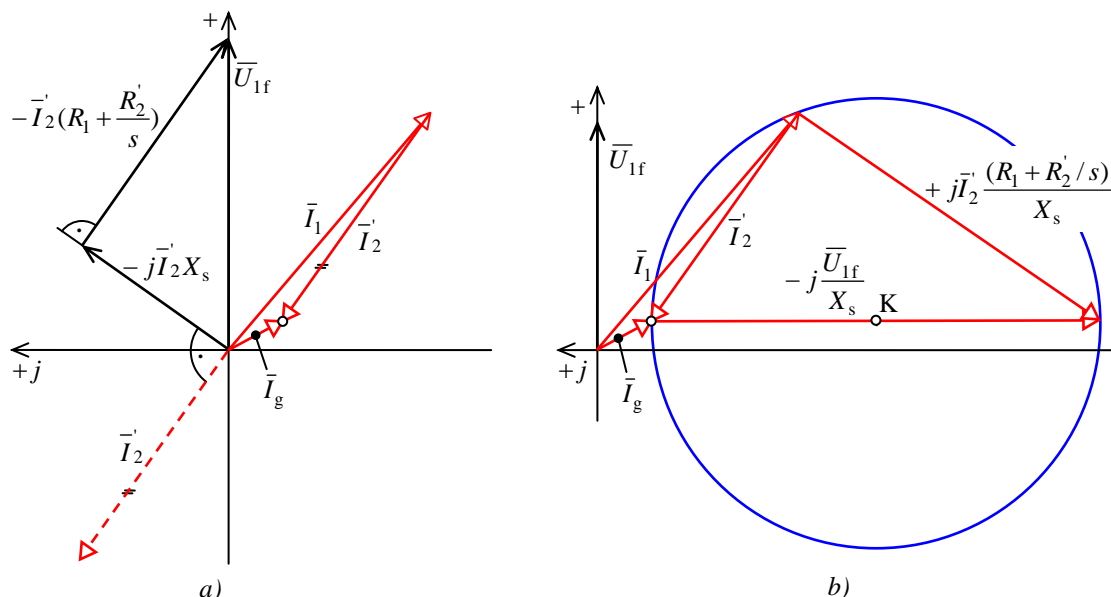
$$\bar{I}_2' \text{ és a } +j \cdot \bar{I}_2' \cdot \frac{R_1 + \frac{R_2'}{s}}{X_s}$$

vektorok pedig merőlegesek egymásra. A *Thales*-tétel értelmében a két utóbbi vektor talppontjai az $\frac{\bar{U}_{1f}}{X_s}$ átmérőjű körön helyezkednek el. A 4.20b ábrán ezt a kört is feltüntettük, a

kör középpontja a $-j \cdot \frac{\bar{U}_{1f}}{X_s}$ vektor felezőpontja (K-pont). Az aszinkron gép terhelésének

változása során az \bar{I}_2' vektor talppontja egy kör mentén változik, és a vektor az \bar{I}_g -hez csatlakozik, amelyet állandónak tételeztünk fel. Ugyanezen kör kerülete mentén változik az állórészáram vektora is. Az aszinkron gépek árammunkadiagramját állandó paraméterek

mellett kördiagramnak is nevezhetjük. A kördiagramot számítással a helyettesítő vázlat (4.9. ábra) elemeinek ismeretében határozhatjuk meg három nevezetes – a Q_0 üresjárási-, a Q_z rövidzárási- és a Q_∞ végtelen- – pont alapján.



4.20. ábra. A kördiagram származtatása

A kördiagramban – úgy, mint a helyettesítő vázlat esetén is – mindig fázisértékekkel számolunk. A három pontban ki kell számolnunk az áramok nagyságát és fázishelyzetét, azután megszerkeszthetjük a kördiagramot.

Üresjárásban ($s = 0$) az aszinkron gép a vas- és a súrlódási veszteségei miatt vesz fel hatásos áramot (I_w), a forgó mágneses mező fenntartása miatt pedig meddő áramot (I_m). Ha a hatásos részt elhanyagoljuk, akkor az I_0 üresjárási áram nagyságát a meddő komponens határozza meg:

$$I_0 = \frac{U_{1f}}{X_m + X_{s1}}. \quad (4.52)$$

Mivel a gerjesztőáram változását figyelmen kívül hagytuk: $I_g = I_0$. A fázishelyzetet az üresjárásban felvett teljesítményből számíthatjuk:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1f} \cdot I_0}. \quad (4.53)$$

Rövidzárársban ($s = 1$) a primer- és a szekunder áramok nagysága miatt a gerjesztőáramot és ezzel az áthidaló ágat elhanyagolhatjuk. Így a zárati áram:

$$I_{z1} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{s1} + X_{s2}')^2}}. \quad (4.54)$$

A teljesítménytényező:

$$\cos \varphi_{z1} = \frac{R_1 + R_2'}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{s1} + X_{s2}')^2}}. \quad (4.55)$$

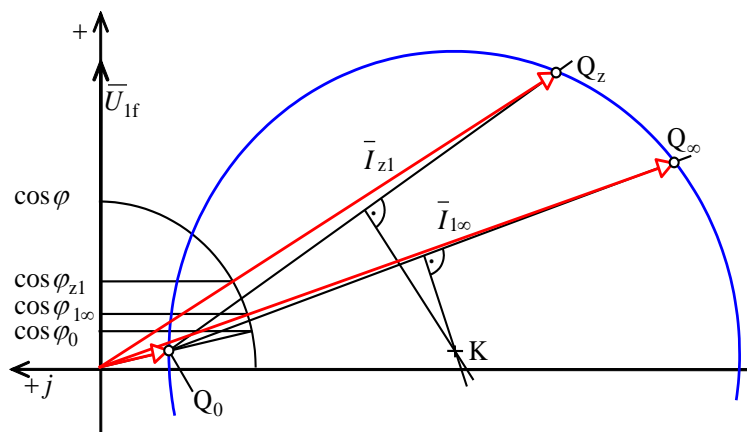
A végtelen ponthoz tartozó értékek ($s = \infty$) az áthidaló ág elhanyagolásával (mivel $I_{1\infty} > I_{z1}$):

$$I_{1\infty} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + X'_{s2})^2}}, \text{ és} \quad (4.56)$$

$$\cos \varphi_{1\infty} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + X'_{s2})^2}}. \quad (4.57)$$

A kördiagram szerkesztését az \bar{U}_{1f} vektor felrajzolásával kezdjük. A feszültségvektor talppontjához egységsugarú kört rajzolva, a $\cos \varphi$ -k ismeretében közvetlenül, a szögek kiszámítása nélkül berajzolhatjuk a három áramvektor fázishelyzetének megfelelő vonalakat. A rajzlapnak megfelelő áramléptéket (a_i) választva, a vonalakon a feszültség talppontjától felmérve, kijelöljük az áramvektorok végpontjait. A három ponthoz az ismert módszerrel szerkeszthetünk kört.

A szerkesztés menetét és a kördiagramot a 4.21. ábrán láthatjuk. A kör képzetes tengely alá eső része generátoros üzemet jelent, mert U és I áram hatásos összetevője ellentétes fázisú ebben a negyedben.



4.21. ábra Kördiagram szerkesztése

4.5.1. Az aszinkron gép kördiagramjának szerkesztése mérési adatokból

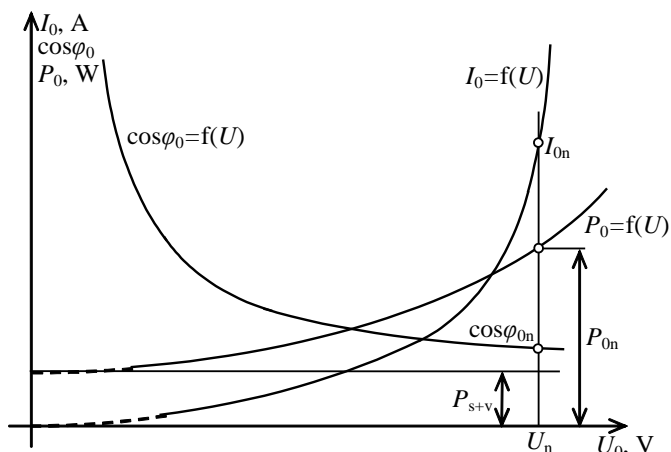
A kördiagram megszerkeszthető akkor is, ha a helyettesítő vázlat elemeit nem ismerjük. A szerkesztést ekkor az üresjárási-, és a rövidzárási mérés alapján végezhetjük. Mindkét pontnak névleges feszültséghez kell tartoznia. Az üresjárási áram végpontja a Q_0 -, a rövidzárási áram végpontja a Q_z pontot jelöli ki a kördiagramon. A Q_∞ pontot mérésrel nem tudjuk meghatározni.

Az aszinkron motor üresjárási mérése

Az aszinkron motor üresjárási mérésekor az állórész-tekercselésre névleges frekvenciájú, szinuszos, változtatható nagyságú, háromfázisú feszültséget kapcsolunk. Csúszógyűrűs motor esetében a forgórész-kört rövidre kell zárni. A motor kapocsfeszültségét 0-ról $1,2 \cdot U_n$ -ig növeljük. A motor tengelyén a leadott teljesítmény $P = 0$, így a motor igen kis szlippel, közel szinkron fordulatszámmal forog.

Az U_0 feszültséget csökkentve, a kapocsfeszültség függvényében mérjük a P_0 felvett teljesítményt, az I_0 üresjárási áramot, és számítjuk a teljesítménytényezőt:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0}, \quad (4.58)$$



4.22. ábra Az aszinkron gép üresjárási jelleggörbéi

lyozzuk (csúszógyűrűs gépnél a forgórészkapcsok rövidrezártak), és az állórész tekercselésre feszültséget kapcsolunk. A névleges frekvenciájú, szinuszos kapocsfeszültség nagyságát változtatva mérjük a felvett áramot (I_{z1}), a teljesítményt (P_z) és számítjuk a teljesítménytényezőt ($\cos \varphi_{z1}$). Rövidzárási állapotban a motor leadott teljesítménye nulla, a szlip értéke $s = 1$.

Az aszinkron gép helyettesítő vázlatában szereplő R_2'/s -tag rövidzárási állapotban R_2' -vel egyenlő. A rövidrezárt szekunder tekercselésben indukálódó, névleges primer frekvenciájú feszültség igen nagy szekunder áramot hajt át az áramkörben. Az áthidaló ágban szereplő tag nagy relatív értéke miatt a rövidzárási áramot gyakorlatilag csak az R_1 és R_2' ellenállások, valamint az X_1 és X_{s2}' reaktanciák korlátozzák. Mint már említettük, a rövidzárási áram névleges feszültségnél a motor névleges áramának 4...7-szerese.

A nagy áramok miatt fellépő káros melegedések elkerülésére a mérésnél a feszültséget csak addig növeljük, míg a névleges áram 1,5-szörösét el nem érjük.

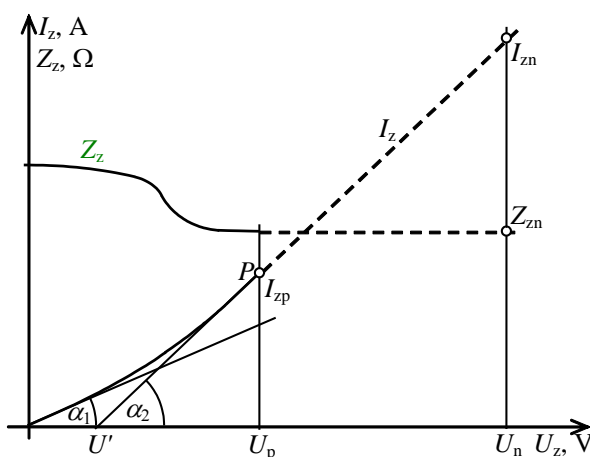
Az aszinkron gépeknél X_s értéke nagyobb, mint R , tehát a szórási reaktanciák összege jelentősen befolyásolja a zárlati áram nagyságát. A rövidzárási áram a feszültség függvényében általában két egyenes szakasszal és a két szakasz közötti görberésszel közelíthető. A kezdeti egyenes elhajlását a szórási utakon nagyobb áramoknál bekövetkező telítődés okozza.

ahol U_0 és I_0 vonali értékek.

A mérési adatok kiértékelése után nyert üresjárási jelleggörbéket a 4.22. ábra mutatja. A kördiagram felrajzolásához szükséges névleges feszültséghez tartozó pontokat a jelleggörbéken külön feltüntettük.

Az aszinkron motor rövidzárási mérése

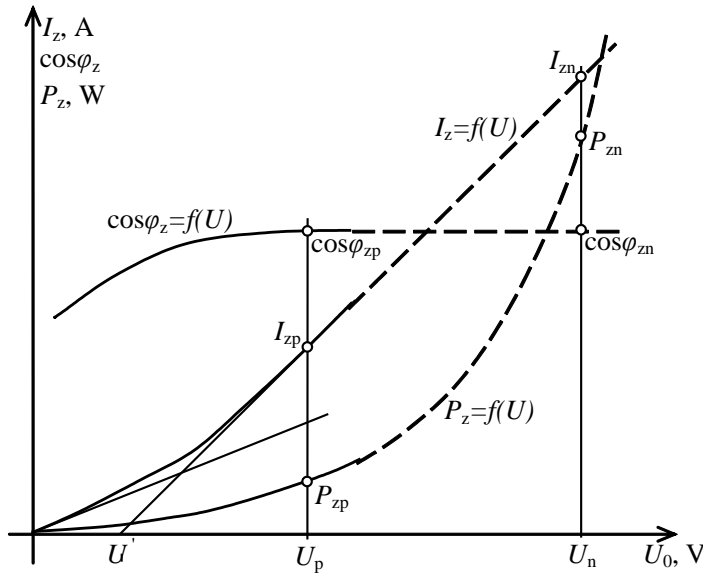
Az aszinkron motor rövidzárási állapotának azt nevezzük, amikor a forgórész elfordulását megakadályozzuk.



4.23. ábra A rövidzárási áram és impedancia változása

Az I_{z1} függvény kezdeti egyenes szakasza kisebb α_1 szöggel indul, majd a szórási utak telítődése után egy nagyobb α_2 szöggel nagyjából egyenes szakasszal folytatódik. A rövidzárási áram- és impedancia változását az 4.23. ábrán láthatjuk.

A rövidzárási jelleggörbét méréssel csak a P pontig vesszük fel. A névleges feszültséghez tartozó I_{zn} áramot úgy határozzuk meg, hogy a jelleggörbe utolsó felvett P pontjához húzott érintőt az $U_z = U_n$ -ben emelt függőlegesig meghosszabbítjuk, extrapoláljuk. Az érintőt a vízszintes tengelyig visszafelé is meghosszabbítva, az U' feszültségnél kapunk metszéspontot. Ha a mérés felvett P ponthoz U_p feszültség és I_{zp} áram tartozik, akkor az U_n névleges feszültséghez tartozó rövidzárási áram számítással is meghatározható:



4.24. ábra Az aszinkron gép rövidzárási jelleggörbéi

$$I_{zn} = I_{zp} \cdot \frac{U_n - U'}{U_p - U'} \quad (4.59)$$

Ha a szórási fluxusvonalak útjának mágneses vezetőképessége nem változna, akkor a rövidzárási áram végig α_1 hajlásszögű egyenes lenne. A telítődés következtében a mágneses vezetőképesség romlik, ugyanakkora feszültséghez nagyobb rövidzárási áram tartozik, tehát az U_z / I_z viszony, vagyis a rövidzárási impedancia (Z_z) csökken. A mért és számított értékeket a feszültség függvényében ábrázolhatjuk. A rövidzárási jelleggörbéket az 4.24. ábrán rajzoltuk fel.

A névleges rövidzárási teljesítményt az utolsó mérési pontból számíthatjuk:

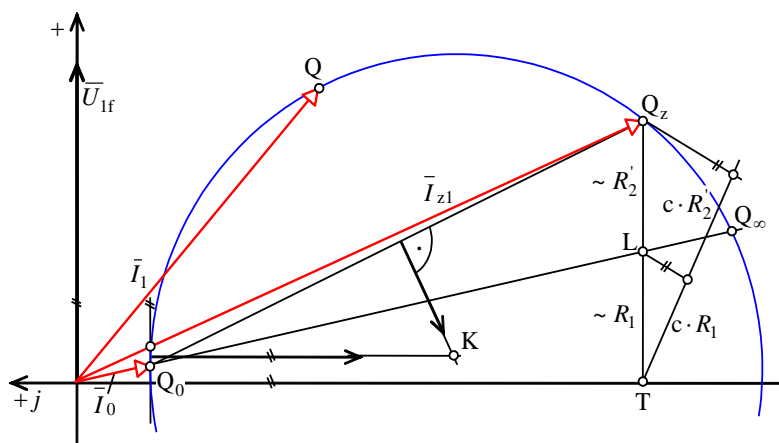
$$P_{zn} = \left(\frac{I_{zn}}{I_{zp}} \right)^2 \cdot P_{zp} \quad (4.60)$$

A teljesítménytényezőt az utolsó mért pont és a névleges feszültséghez tartozó értékek közötti szakaszon állandónak feltételezve a névleges rövidzárási teljesítménytényező:

$$\cos \varphi_{zn} = \cos \varphi_{zp} = \frac{P_{zp}}{\sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_{zp}} \quad (4.61)$$

Az áram-munkadiagram szerkesztésének menete mérési adatok alapján a következő: I_0 és $I_{z1} = I_z$ áramvektorokat felrajzoljuk, majd a Q_0 és Q_z közötti szakasz felező merőlegese és a Q_0 ponton az U_1 feszültségvektorral párhuzamosan húzott egyenes Q_0 és az I_{z1} -el kapott metszéspont közti szakasz felező merőlegesének metszéspontja megadja a kör

A mérési adatokból megrajzolt kördiagram esetén is lehetőségünk van a Q_∞ pont közelítő meghatározására. A $\overline{Q_z T}$ távolságot osszuk fel a rövidzárási tekercsveszteségek arányában! Az osztáspontot jelöljük L betűvel. Az L pontban a légrésteljesítmény nulla, mert nincs szekunder veszteség. A légrésteljesítmény a szinkron és a végtelen pontban is nulla. Tehát ahol a Q_z és az L pontokat összekötő egyenes a kört metszi, kapjuk a Q_∞ pontot. Mivel rövidzárással $I_{z1} \cong I'_{z2} = I_z$, ezért a $\overline{Q_z T}$ távolságot a redukált szekunder- és a primer ellenállások arányában kell felosztani, mert: $\frac{\overline{Q_z L}}{LT} = \frac{R'_2}{R_1}$. Az L pont szerkesztését szintén az 4.25. ábra mutatja.



4.25. ábra. Kördiagram szerkesztése mérési adatokból

$$P_z \approx P_{1t} + P_{2t}.$$

A (4.28) egyenletet behelyettesítve, majd R_2' -t kifejezve:

$$R_2' = \frac{P_z - P_{1t}}{3 \cdot I_{z1}^2}, \quad (4.62)$$

ahol a kifejezés jobb oldalán szereplő értékeket a rövidzárási mérési adatokból számíthatjuk, ha ismerjük az R_1 ellenállást.

4.5.2. A szlipskála szerkesztése

A kördiagramból az előbbieket szerint bármely terhelési üzemi állapotban leolvashatjuk a primer és szekunder áramok értékét. A különböző terhelési állapotoknak megfelelően a szlip is változik, a kördiagram kerületén lévő pontokhoz szlip értékek rendelhetők. Célszerű egy szerkesztési módszerrel a kör kerületén a szlip változását jelölni, ill. tetszőleges

A szlipsegyenesen tetszőleges értéket felvéve és azt a sorozóponttal összekötve, a kapott egyenes a kör kerületén megadja a kívánt értékű szlipet. A kör kerületén egy pontot, és a sorozópontot összekötő egyenes és a szlipsegyenes metszéspontja kijelöli a kör kerületének megfelelő szlipértéket. A szlipskála szerkesztését az 4.26. ábrán láthatjuk.

4.5.3. Az áram-munkadiagram kiértékelése

A szlip értékét a szlipskála segítségével határozzuk meg. A 4.26. ábrán felrajzoltuk a gép kördiagramját, amelyen a jellegzetes egyeneseket és a metszéseket bemutatjuk. A háromfázisú aszinkron gép felvett teljesítménye:

$$P_l = 3 \cdot U_{lf} \cdot I_{lM} \cdot \cos \varphi_l, \quad (4.63)$$

amelyben I_{IM} a motorüzemi áramot jelenti. Az áram hatásos összetevője:

$$I_{\text{IM}} \cdot \cos \varphi_1 = \overline{\text{QA}}, \quad (4.64)$$

tehát ha a \overline{QA} metszékét áramléptékben olvassuk le, akkor

$$P_1 = 3 \cdot U_{1f} \cdot \overline{\text{QA}}. \quad (4.65)$$

Az áramléptékkal kifejezve:

(4.66)

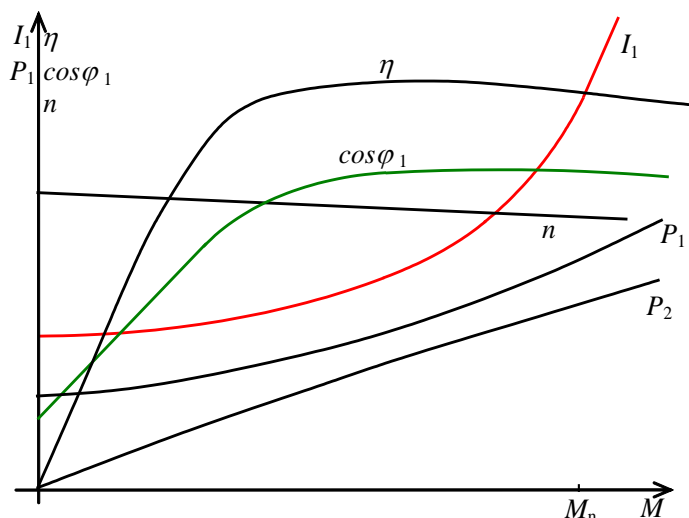
teljesítménnyel, a vízszintes (a feszültségre merőleges) metszések pedig a meddőteljesítmény-igénnyel arányosak.

A légrésteljesítmény nulla szinkron fordulatszám esetén
(mert ilyenkor a forgórészben nem indukálódik feszültség)

valamint végtelen nagy fordulatszámnál a (4.33) egyenlet értelmében, azaz $s = 0$ és $s = \infty$ szlipnél. A Q_0 és a Q_∞ pontokat összekötő egyenes tehát a légrésteljesítmény nullavonala.

$$P_{\delta} = 3 \cdot U_{\text{lf}} \cdot \overline{\text{QC}}. \quad (4.67)$$
$$P_m = 3 \cdot U_{lf} \cdot \overline{QD}. \quad (4.68)$$
$$P_v + P_t = P_l - P_m = 3 \cdot U_{lf} \cdot \overline{AD}. \quad (4.69)$$

Az üresjárási tekercsveszteség elhanyagolása esetén a $P_1 = 0$ egyenestől mért \overline{AB} távolság közelítéssel az állórész vasvesztésével arányos, így az \overline{AB} szakasz áramléptékben leolvasva:



4.28. ábra Aszinkron motor jelleggörbék

$$P_{v1} = 3 \cdot U_{1f} \cdot \overline{AB}. \quad (4.70)$$

A (4.63) és az (4.64) egyenleteket felhasználva az álló- és forgórész együttes tekercsvesztesége alatt a \overline{BD} szakaszt értve (a forgórész vasvesztés elhanyagolásával):

$$P_t = 3 \cdot U_{1f} \cdot \overline{BD}. \quad (4.71)$$

Így a szekunder tekercsveszteség:

$$P_{t2} = P_\delta - P_m = 3 \cdot U_{1f} \cdot \overline{CD}, \quad (4.72)$$

illetve az állórész-tekercsveszteség:

$$P_{t1} = 3 \cdot U_{1f} \cdot \overline{BC}. \quad (4.73)$$

A kördiagram a nyomaték változását is megadja, mert:

$$M = \frac{P_\delta}{2 \cdot \pi \cdot n_0} = \frac{3 \cdot U_{1f}}{2 \cdot \pi \cdot n_0} \cdot \overline{QC}, \quad (4.74)$$

tehát a légrésteljesítményhez tartozó metszések a nyomatékkal arányosak. A légrésteljesítmény nullavonala egyben a nyomaték nullavonala is. A nyomaték nullavonalával párhuzamos körérintőket meghúzva, motor- ill. generátorüzemben a billenőnyomaték értékét kapjuk, amely a $\overline{Q_B E}$ távolsággal arányos.

A hatásfokot a kördiagramból a felvett és a leadott mechanikai teljesítmény hányadosaként számíthatjuk:

$$\eta \cong P_m / P_1. \quad (4.75)$$

Az 4.28. ábrán egy közepes teljesítményű aszinkron gép jelleggörbéit rajzoltuk fel az M nyomaték függvényében.

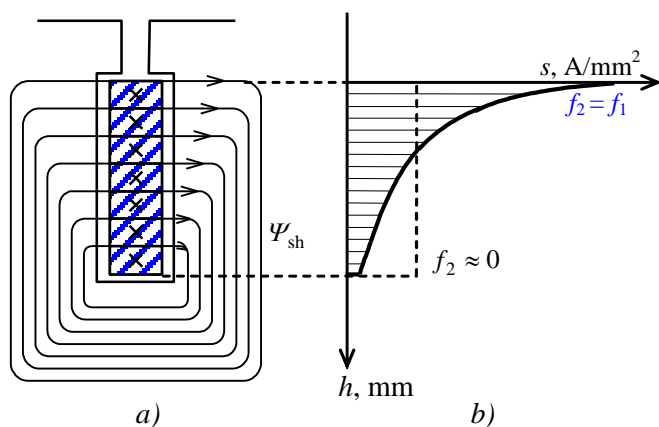
4.6. ÁRAMKISZORÍTÁSOS FORGÓRÉSZŰ MOTOROK

Az aszinkron motorok indításakor a lehető legkisebb indítási áram mellett a lehető legnagyobb indítónyomatékra törekszünk. A nagyobb teljesítményű aszinkron motorok indítónyomatékát és indítási áramlökését egyszerű kalickás forgórészrel már nem lehet összehangolni. Ezért különleges kialakítású forgórészeket alkalmaznak, amelyek az áramkiszorítás jelenségét használják fel.

Az áramkiszorításos forgórészű motorok indításakor az $f_2 = 50$ Hz miatt olyan jelenség lép fel, mintha indításkor a szekunderkörü ellenállás megnövekedne. A fordulatszám felfutásakor ez a látszólagos ellenállás növekedés kisebb lesz, illetve megszűnik.

A forgórész hornyainak kialakítása szerint megkülönböztetünk mélyhornyú, illetve két- vagy többkalickás motorokat.

Mélyhornyú aszinkron motorok esetén a forgórészre jellemző, hogy a hornyok mérete sugárirányban jóval nagyobb, mint érintőirányban. Ha a forgórész vezetőit több vezetőelemre bontjuk és a rudakban egyenáram folya, akkor az 4.29a ábrán látható horonyszórási erővonalkép alakulna ki.



4.29. ábra Mélyhornyú erővonalkép és árameloszlás

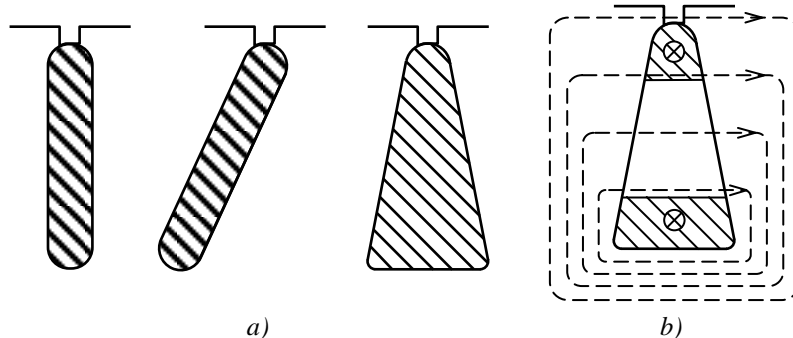
Az ábrából következtethetünk arra, hogy az alsó vezetőelemekkel kapcsolódik a legtöbb szórási indukciós vonal és kifelé haladva az erővonalkapcsolódás csökken. A legtöbb erővonallal körülvett alsó vezetőrésznek az induktivitása a legnagyobb, míg a külső rész felé haladva csökken az induktivitás. Mivel a reaktancia frekvenciafüggő, ezért nagyobb frekvenciákon az alsó vezetőrésznek az

árammal szembeni „ellenállása” megnő és az áram kiszorul a külső rész felé, amint ezt az 4.29b ábra szemlélteti, azaz a külső résznek nagyobb lesz az áramsűrűsége.

Aszinkron motorok indításakor a forgórész frekvencia megegyezik a hálózattal $f_2 = f_1$, az üzemi frekvencia pedig 1...2 Hz. Indításnál tehát az áramkiszorítás miatt a horony külső részében jelentősen megnő az áramsűrűség, és ez a szekunderkörü ellenállás fiktív növekedését eredményezi. Az ellenállásnövekedés pedig nagyobb indítónyomatékot jelent.

Üzem közben 1...2 Hz frekvenciájú áram folyik a forgórész vezetőiben, ilyenkor az áramkiszorítás gyakorlatilag megszűnik, a vezetőkben az áramsűrűség sugárirányban állandó lesz.

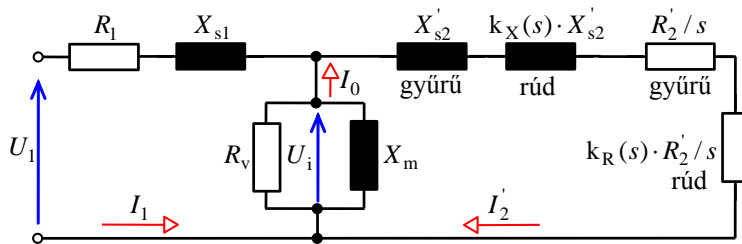
Mélyhornyú aszinkron motorok esetén alkalmazott horonyalakokat, valamint a



4.30. ábra Mélyhornyú motorok

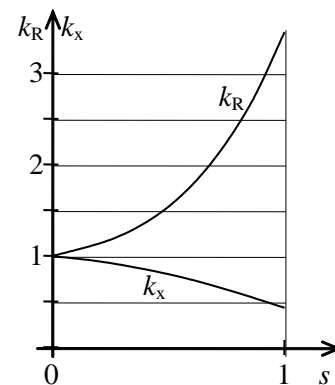
a) horonykialakítások; b) trapéz alakú rotorrúd szórási fluxusa

trapéz alakú rotorrúd szórási fluxusát láthatjuk az 4.30. ábrán. A trapéz keresztmetszetű horonyalak geometriai kialakítása miatt elősegíti a látszólagos ellenállás-növekedést, mert a légrés felé kiszoruló áram útjában egyre kisebb a vezetőkeresztmetszet.



4.31. ábra Mélyhornyú kalickás forgórészű aszinkron motor helyettesítő kapcsolási vázlata

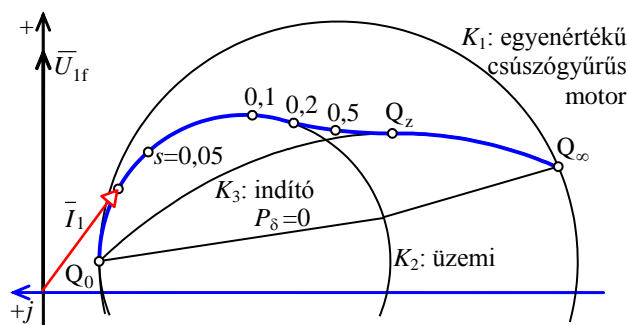
re eső részénél az ellenállás, és a szórási reaktancia is függ a szliptől. Ezért a szekunder oldalon az ellenállást és a szórási reaktanciát is két részre kell bontani: a gyűrűk áramkiszorítástól független X'_{s2} szórási reaktanciájára és R'_2/s ellenállására, valamint a rudak szliptől függő $k_x(s) \cdot X'_{s2}$ reaktanciájára, és $k_R(s) \cdot R'_2/s$ ellenállására. A mélyhornyú kalickás forgórészű motorokra érvényes helyettesítő kapcsolási vázlatot a 4.31. ábrán láthatjuk. A mélyhornyú motorok rotor-rúd k_R és k_x tényezőinek változását a szlip függvényében a 4.32. ábra mutatja.



4.32. ábra Mélyhornyú rotor-rúd k_R és k_x tényezőjének változása a szlip függvényében

Az áramkiszorítás jelenségének a hasznos indítónyomaték növelésén kívül káros hatása is van. Ez a hatás abban jelentkezik, hogy az álló, illetve üzemi állapot között a szórási erővonalak nem állandóak, emiatt a mélyhornyú gépeknél nem beszélhetünk kördiagramról.

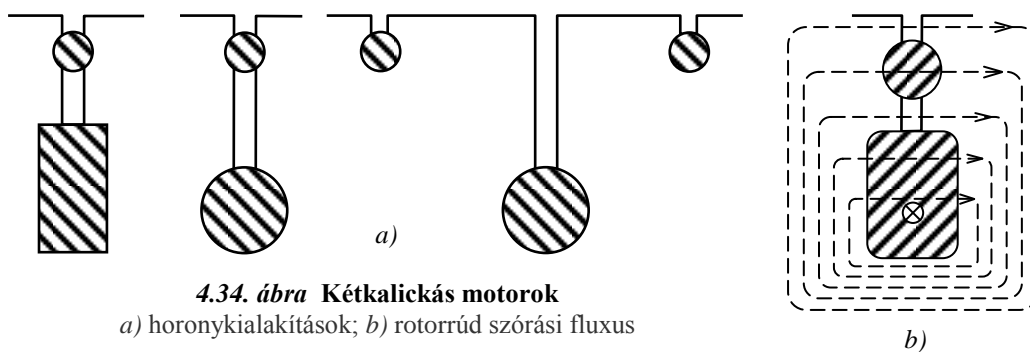
A mélyhornyú motor árammunkadiagramja magasabb rendű görbe, erre az 4.33. ábrán láthatunk példát. A K_1 jelű kör az $s=\infty$, a K_2 jelű az $s=0$ állapothoz tartozik. A K_3 jelű kör a Q_z és Q_∞ pontok között simul az árammunka-diagramhoz. A légrésteljesítmény nullavonala sem egyenes. A K_2 kör a névleges terhelés környezetében simul az árammunka-diagramhoz, ezért ezt a kört üzemi körnek is nevezzük. Láthatjuk, hogy a nagyobb indítónyomatéknak és kisebb indító áramlökéseknek mélyhornyú gépek esetén az a következménye, hogy a névleges- és a billenőnyomaték csökken, valamint romlik az üzemi teljesítménytényező.



4.33. ábra A mélyhornyú gép árammunkadiagramja

A kétkalickás aszinkron gépeknél a forgórészen két kalickát helyeznek el. A légrészhez közelebb fekvő külső kalicka nagyobb-, a belső pedig kisebb ellenállású. A vezető rudakat a két kalickánál elhelyezhetjük azonos-, illetve külön horonyban is. A belső-, ill. külső rudakat összekötő gyűrűk

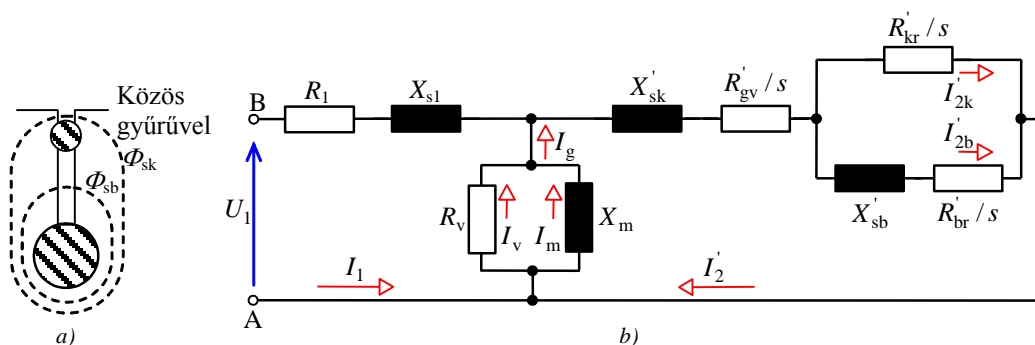
lehetnek külön is, de alumínium kiöntésű forgórészeknél gyakoribb a közös gyűrű. A 4.34. ábrán a kétkalickás forgórészű aszinkron motorok horonyalakjaira és a rotorrúd szórási fluxus



4.34. ábra Kétkalickás motorok
a) horonyalakítások; b) rotorrúd szórási fluxus

fluxusára láthatunk példát.

Ha a belső és külső rudakban egyenáram folyik, akkor az árameloszlás a rudak ellenállásával fordított arányú. Az árameloszlás névleges üzemállapotban is ehhez hasonló.

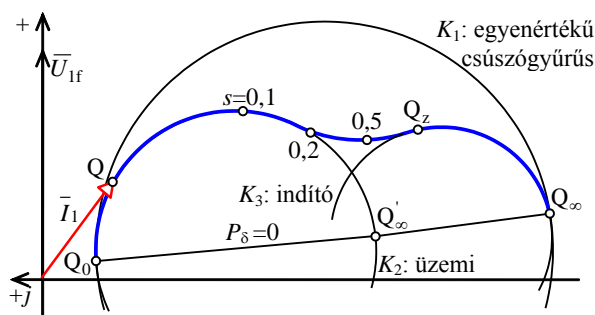


4.35. ábra Kétkalickás motor forgórészének szórási képe és helyettesítő vázlata

Bekapcsoláskor a belső rudakban folyó nagyobb áram, és a szórási erővonalak száma miatt az áram egyre jobban kiszorul a külső kalickába. Tehát a mélyhornyú motorokhoz hasonlóan itt is fellép az áramkiszorítás jelensége. A kalickák méreteinek és anyagainak megválasztásával a legkülönbözőbb igényeket kielégítő nyomaték-fordulatszám jelleggörbéjű motorokat lehet készíteni. A kétkalickás- és a mélyhornyú gépek esetén az eddig megismert helyettesítő vázlatok nem alkalmazhatóak.

Az 4.35b ábrában felrajzolt helyettesítő vázlat a kétkalickás motoroknál arra az esetre vonatkozik, amikor a közös horonyban lévő külső és belső rúd közös gyűrűvel van rövidrezárva. Az állórész kör és az áthidaló ág nem változik, mert ezeknél a részeknél nem jelentkezik az áramkiszorítás.

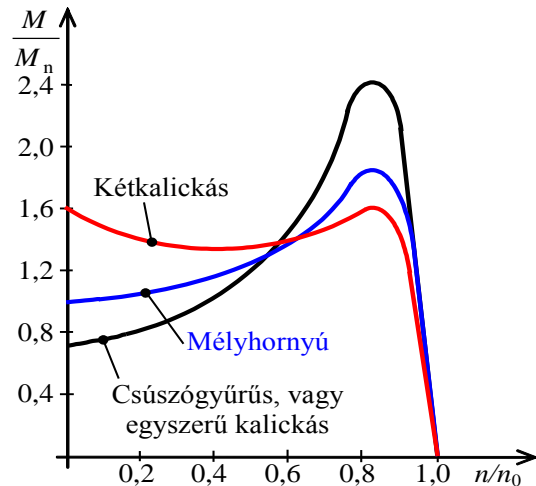
A forgórész körben a közös gyűrű a két kalicka rendszerét párhuzamosan kapcsolja. A párhuzamos ágak eredő árama folyik át a gyűrű ellenállásán.



4.36. ábra Kétkalickás motor
árammunkadiagramja

Az 4.35a ábrán a kétkalickás horony szórási fluxusainak alakulását láthatjuk. A Φ_{sk} szórt fluxusnak megfelelő X_{sk} szórási reaktanciát a belső- és a külső rudak áramai közösen hozzák létre. Tehát a szekunder körben az X'_{sk} ; és a gyűrűnek megfelelő R'_{gy}/s ellenállás sorba kapcsolható. Ezután felrajzolhatjuk az egyik párhuzamos ágban a külső rúdnak megfelelő ellenállás redukált értékét a szlippel osztva (R'_{kr}/s), a szórást már X'_{sk} -vel figyelembe vettük. A másik párhuzamos ágban a Φ_{sb} -nek megfelelő szórási reaktanciának (X_{sb}) és a belső rúd ellenállásának (R_{br}) kell szerepelnie redukálva.

A kétkalickás aszinkron motorok árammunkadiagramja szintén nem kör, hanem egy magasabb rendű görbe. Az áram-munkadiagramot az 4.36. ábrán láthatjuk. Az üzemi szlipnél az árammunkadiagram a mélyhornyú gépekéhez hasonlóan körrel helyettesíthető. A kalickás gépeknél ugyancsak hátrány a névleges és a billenőnyomaték csökkenése.



4.37. ábra Különböző forgórészű aszinkron motorok nyomaték-jelleggörbéi

Az 4.37. ábrán különböző forgórészű aszinkron motorok nyomaték-fordulatszám jelleggörbéi láthatók. A jelleggörbék esetén jól összehasonlíthatjuk az indító-, illetve a billenőnyomaték változásokat.

4.7. ASZINKRON MOTOROK INDÍTÁSI ÉS FÉKEZÉSI MÓDSZEREI

4.7.1. Aszinkron motorok indítása

Az aszinkron motorok közvetlen hálózatra kapcsoláskor a kezdeti időpillanatban a rövidzárási áramot veszik fel a hálózatról, melynek értéke négy-hétszerese a névleges áramnak. Ez a dinamikus áramlökés igénybe veszi a kiépített hálózatot; valamint a motor tekercseléseit, különösen a tekercsfejeket. Ezért a motoroknál különböző indítási módszereket alkalmazunk, különbséget téve a rövidrezárt forgórészű (ahol csak állórész köri beavatkozásra van lehetőség) és a csúszógyűrűs gépek között.

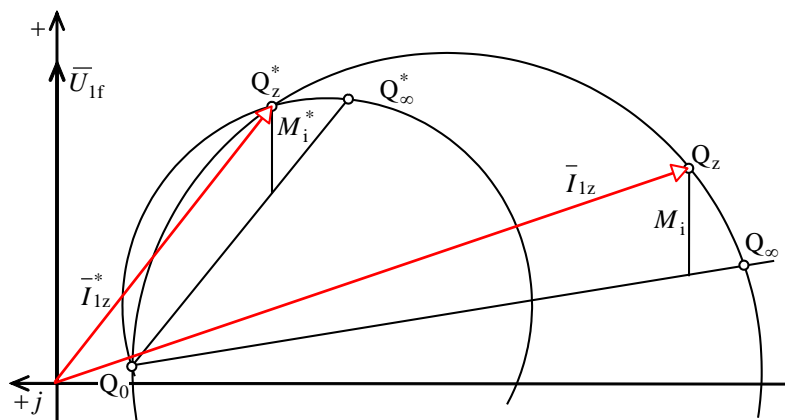
4.7.1.1. Rövidrezárt forgórészű motorok indítása

Ha a közvetlen indítás nem lehetséges, akkor a következő módszereket alkalmazhatjuk az indítási áram korlátozására:

- ✚ indítás előtét-impedanciával;
- ✚ transzformátoros indítás;
- ✚ csillag-háromszög indítás;
- ✚ előtét tirisztor párokkal történő indítás;
- ✚ frekvencia felfuttatás.

Indítás előttét impedanciával:

Amennyiben az aszinkron motor állórész körébe R_c előtétellenállást kötünk, akkor csökken a motorra jutó feszültség és a kördiagram átmérője.



4.38.ábra Előtétellenállás hatása a kördiagramra

lódott pontot jelöljük $Q_0^* \approx Q_0$, Q_z^* és Q_∞^* -gal. A légrésteljesítmény nulla vonala az új helyzetben a Q_0^* és Q_∞^* pontokat összekötő egyenes. Az állórész körbe iktatott ellenállás hatását a kördiagram pontjaira az 4.38. ábrán mutatjuk be.

Az indítónyomaték változását az (4.43) egyenlet felhasználásával vizsgáljuk. Ez alapján írhatjuk, hogy:

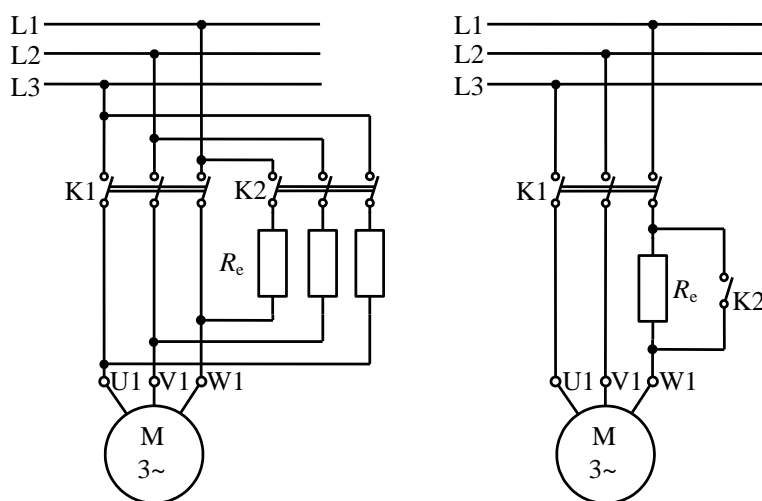
$$M_i = C \cdot I_{17}^2. \quad (4.76)$$

Ha az indítási áram I_{1z}^* -ra csökken, akkor a nyomaték:

$$M_i^* = C \cdot (I_{1z}^*)^2. \quad (4.77)$$

Legyen az áramváltozás viszonya $I_{17}^*/I_{17} = b$, ekkor a nyomatékváltozás:

$$M_i^* = M_i \cdot \left(\frac{I_{1z}^*}{I_{1z}} \right)^2, \quad \text{tehát} \quad (4.78)$$



4.39. ábra. Szimmetrikus és aszimmetrikus előtétellenállásos indítókapcsolás

A kördiagram két nevezetes pontja azonban a kör kerületén eltolódik. Ez a két pont a Q_z és a Q_∞ , mert a kördiagram szerkesztésénél említettek szerint ezen pontokhoz tartozó áramok és teljesítménytényezők számításában szerepel R_1 értéke, és Q_0 is kisebb és wattosabb lesz. A három elto-

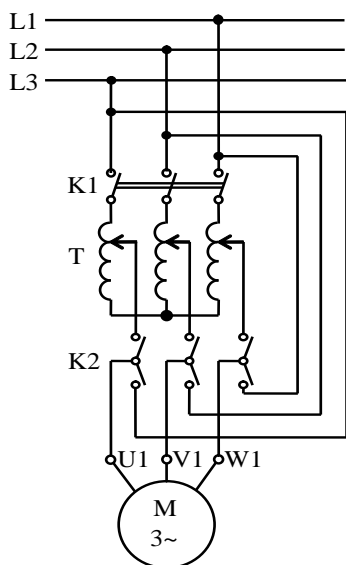
$$M_i^* = M_i \cdot b^2. \quad (4.79)$$

Az előtétellenállásos indítás veszteséges módszer, ezért általában csak kisteljesítményű gépek esetén használják. Az indítókapcsolás lehet szimmetrikus (fázisonként azonos értékű előtétellenállások), vagy aszimmetrikus (pl. egy fázisban van csak előtét) mint azt a 4.39. ábra mutatja.

Az állórész körbe kapcsolt fújtétekercs hatását a primer szórási reaktancia növekedéseként vehetjük figyelembe. A nagyobb szórási reaktancia miatt az aszinkron gép áram-munka-diagramjának átmérője csökken. A Q_z és a Q_∞ pontok pedig lefelé tolódnak el, mert a szórási reaktancia miatt csökken a teljesítménytényező. Ezt a módszert ma már csak ritkán alkalmazzák.

Transzformátoros indítás:

Ezt a módszert általában nagyfeszültségű motorok indítására használjuk. A transzformátoros indítás költségesebb, mint az előző módszer, de az indítási nyomatékviszonyok jobbak. Az indítás kapcsolási vázlatát az 4.40. ábrán láthatjuk. Az indításhoz célszerű az ábrában felrajzolt T jelű, takarékkapcsolású transzformátort használni.



4.40. ábra Transzformátoros indítás

Az indításnál először a K1 kapcsolóval a transzformátort feszültség alá helyezzük, majd a K2 kapcsolót abba az állásba állítjuk, ahol az aszinkron motor a transzformátor szekunder oldaláról kapja a csökkentett feszültségű táplálást. A motort a forgórész felfutása után a K2-vel átkapcsoljuk a hálózatra majd a K1 kapcsolót nyitjuk, ezzel feszültség-mentesítjük a transzformátort.

A motor rövidzárási áramának nagysága arányos a kapocsfeszültséggel, azaz $I_{1z} = C \cdot U_1$. Legyen a transzformátor áttétele a . Így a motor csökkentett rövidzárási árama:

$$\frac{I_{1z}^*}{I_{1z}} = \frac{1}{a}, \quad \text{azaz} \quad I_{1z}^* = \frac{I_{1z}}{a}. \quad (4.80)$$

A (4.43) egyenletet alkalmazva az indítónyomaték:

$$M_i^* = M_i \cdot \frac{1}{a^2}. \quad (4.81)$$

Az alkalmazott transzformátor miatt a motor árama azonban nem mindig egyezik meg a hálózat áramával. Ha közvetlenül a hálózatról indítunk, akkor $I_h = I_{1z}^*$, de ha transzformátorról, akkor az áttétel miatt $I_h^* = I_{1z}^* / a$. A (4.80) egyenlet felhasználásával:

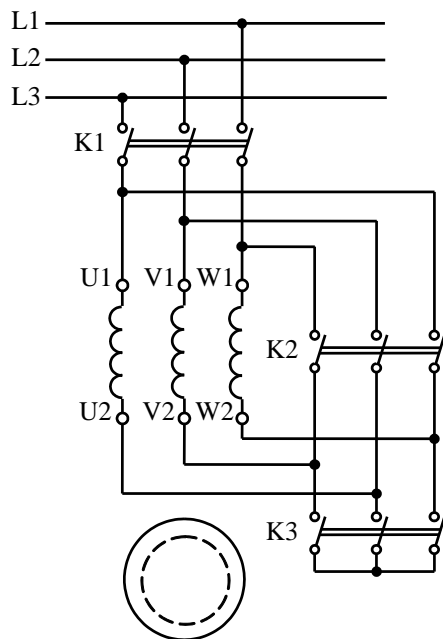
$$\frac{I_h^*}{I_h} = \frac{I_{1z}^*}{I_{1z}} \cdot \frac{1}{a} = \frac{1}{a^2}, \quad (4.82)$$

és (4.81) értelmében:

$$M_i^* = M_i \cdot \frac{1}{a^2} = M_i \cdot \frac{I_h^*}{I_h}. \quad (4.83)$$

A nyomaték tehát a hálózati árammal arányosan változik. Ha az áttételt például úgy választjuk meg, hogy a hálózat felé az indítási áramlökést felére csökkentjük, akkor az indítónyomaték is csak ilyen arányban változik. Olyan helyeken, ahol több kalickás motor van ott több gépet célszerű egy indító transzformátorról indítani.

Csillag-háromszög indítás:



4.41. ábra. Csillag-háromszög átkapcsolás vázlata

A kisfeszültségű (0,4 kV) motorokat igen gyakran csillag-háromszög átkapcsolással indítják. Ezek a motorok hat kivezetéssel készülnek, és az üzemi kapcsolásuk háromszög (delta).

Csillagkapcsolásban a felvett rövidzárási áram:

$$I_{zY} = \frac{U_{1Y}}{Z_z} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot Z_z}, \quad (4.84)$$

háromszög kapcsolásban pedig:

$$\begin{aligned} I_{zn} &= I_{z\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{1z\Delta} = \\ &= \sqrt{3} \cdot \frac{U_{1\Delta}}{Z_z} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_1}{Z_z}. \end{aligned} \quad (4.85)$$

Az utóbbi két kifejezésből adódik a rövidzárási áramok viszonya:

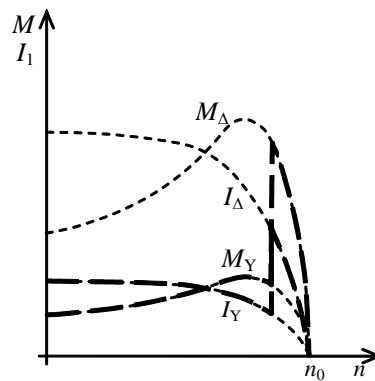
$$I_{zY} = \frac{1}{3} \cdot I_{z\Delta} = \frac{1}{3} \cdot I_{zn}. \quad (4.86)$$

Eszerint a közvetlen indításhoz képest a hálózati áramfelvétel a harmadára csökken. A indítónyomaték is hasonlóan változik, mert $M_i \propto C \cdot U^2$ és $U_{1Y} = U_{1\Delta} / \sqrt{3}$, és így:

$$M_{iY} = \frac{M_{i\Delta}}{3} = \frac{M_{in}}{3}. \quad (4.87)$$

A csillag-háromszög indítás kapcsolási vázlatát az 4.41. ábrán láthatjuk. A K1 jelű kapcsolóval helyezük feszültség alá a kapcsolást, és mivel a K3 jelű kapcsoló zárt, a motor csillag kapcsolásban indul. A felfutás után nyitjuk a K3-at és zárjuk K2-t, ekkor a motor háromszöghkapcsolásban üzemel tovább. Az átkapcsolás történhet időrelével, vagy áram-, esetleg fordulatszám érzékelő alkalmazásával.

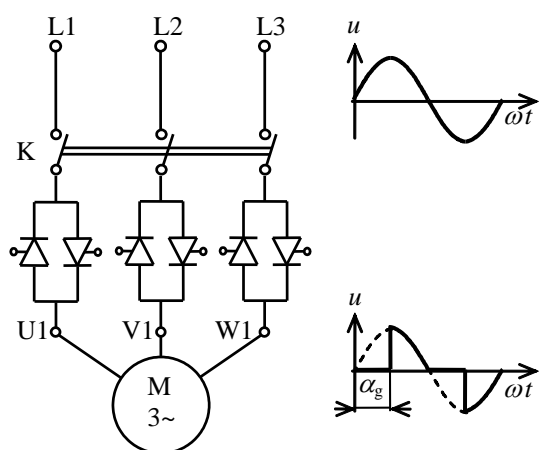
Csillag-, illetve háromszög kapcsolásnál a nyomaték és az áram változását a fordulatszám függvényében a 4.42. ábrán rajzoltuk fel. A vastagon kihúzott vonal az átkapcsolási folyamatot mutatja.



4.42. ábra A nyomaték és az áram változása csillag-háromszög kapcsolásnál

Indítás előtét tirisztorpárokkal:

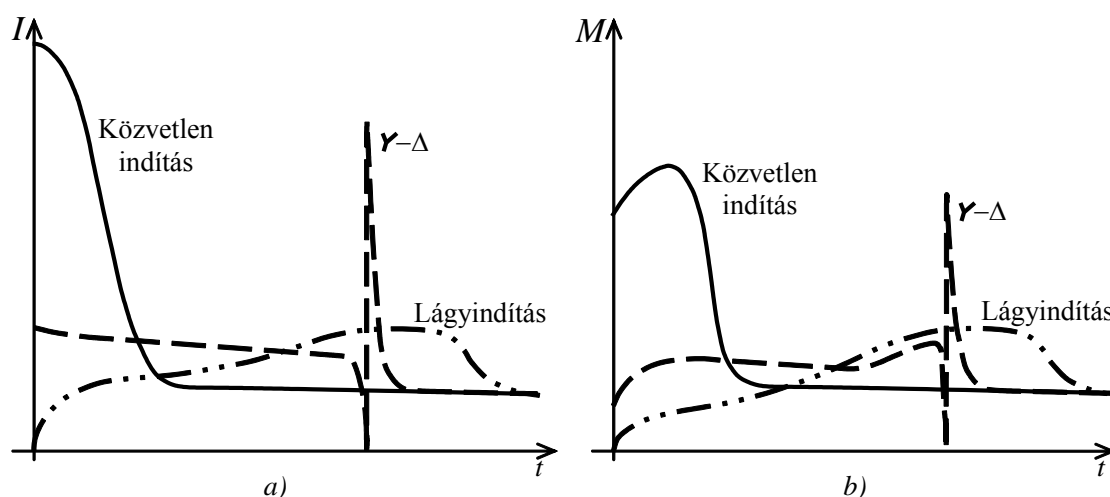
Az állórésztekercselés áramkörébe fázisonként tirisztorpárokat (TT antiduktor kapcsolás) iktatunk az 4.43. ábrán látható kapcsolásban.



4.43. ábra Indítás előtét tirisztorpárokkal

Ezeknek a háromfázisú szaggatóknak a szimmetrikus vezérlésével, az α_g gyújtásszög-késleltetéssel az állórészre jutó feszültség változtatható. Az alapharmonikus feszültség frekvenciája továbbra is megegyezik a hálózati frekvenciával, a felharmonikus tartalom miatt azonban megnő a réz- és a vasvesztés, valamint nyomatéklengések is keletkeznek, amelyeknek az indítás ideje miatt nincs nagy jelentőségük. A motor nyomatéka $M \propto C \cdot U^2$, tehát a feszültség alapharmonikusának értékével a nyomaték közel négyzetesen fog változni. A

gyújtáskésleltetés miatt nagy lesz a felvett meddő teljesítmény, a feszültség és az áram közötti fázisszög is változik, ezért a tirisztorpár az alapharmonikusokra nézve olyan fojtótekercsrel helyettesíthető, amelynek reaktanciája a gyújtáskésleltetési szöggel változik.



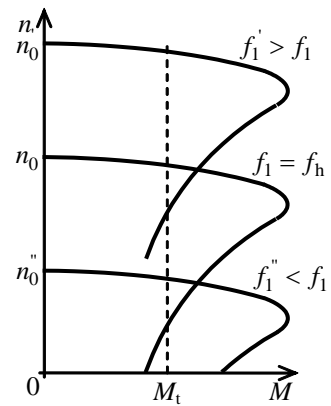
4.44. ábra Az áram és nyomaték változása különböző indítási módszereknél

Ezt az indítási módszert a szakirodalom elektronikus lágyindításnak nevezi. A korszerű elektronikával a felfutás ideje alatt az áramot illetve nyomatékot korlátozni lehet, vagy előírt felfutási jelleggörbék beállítására van mód. Az 4.44. ábrán különböző indítási módszerek esetén bemutatjuk az áram-, illetve a nyomaték változását az idő függvényében (a felfutás során $J_M \cong J_R$, lásd a 6.1.3 fejezetet). Látható, hogy a legkedvezőbb paraméterek az elektronikus lágyindítással érhetőek el. A beszerzési árakat tekintve ez az indítás a csillag-háromszög kapcsolással közel azonos költségű. Az elektronikus lágyindítás alkalmazási területe a technológiának megfelelően széleskörű (pl.: daruk, szellőző-berendezések, szállítószalagok és kompresszorok).

Frekvencia felfuttatás:

A 4.8. fejezetben fogjuk tárgyalni részletesen az aszinkron motorok fordulatszám változtatási lehetőségeit. A (4.1) egyenlet értelmében a szinkron fordulatszám arányos a

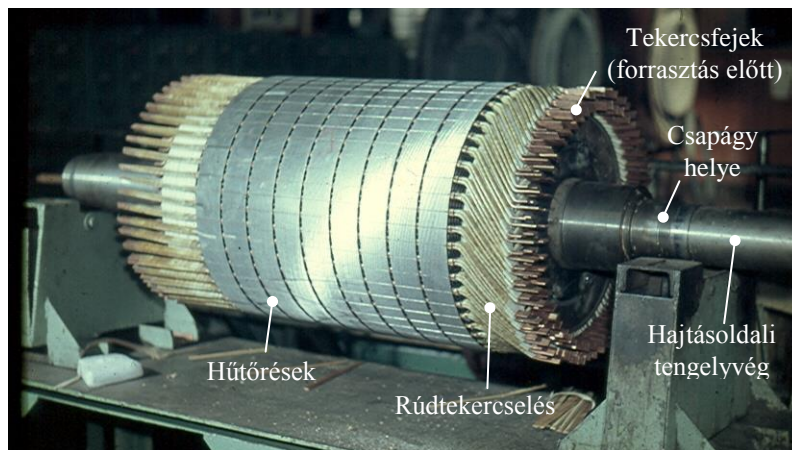
frekvenciával, tehát n_0 értékét 0-tól az f_1 frekvenciának megfelelő szinkron fordulatszámig, illetve a névleges fordulatszámig növelhetjük. Ha tudjuk biztosítani a közel állandó fluxust, akkor az $n = f(M)$ jelleggörbék közel párhuzamosan tolódnak el. Tehát az indítás az M_B billenő nyomatékkal is lehetséges. A felfutás idejét a frekvenciaváltóknál elektronikusan be lehet állítani, az áram korlátozásával együtt. Általában $2...3 I_n$ mellett történhet a felfutás.



4.45. ábra A fordulatszám és nyomaték jelleggörbe változása frekvencia felfuttatásnál

4.7.1.2. Csúszógyűrűs aszinkron motorok indítása

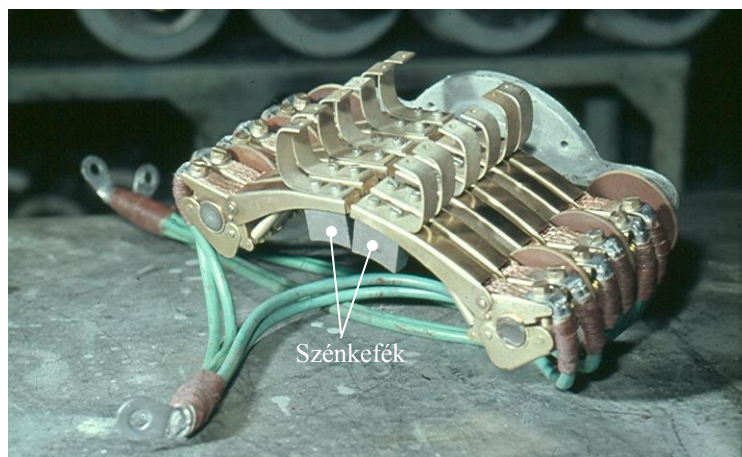
A csúszógyűrűs aszinkron motorok normál üzemmódban rövidrezárt csúszógyűrűkkel működnek. Indításkor ezeknél a gépeknél is fellép az indítási áramlökés. A rövidzárási áram értékének csökkentésére a forgórész körbe történő beavatkozás is lehetséges. A csúszógyűrűs motorok indítónyomatéka viszonylag kicsi, különösen a nagyobb teljesítményű motoroknál.



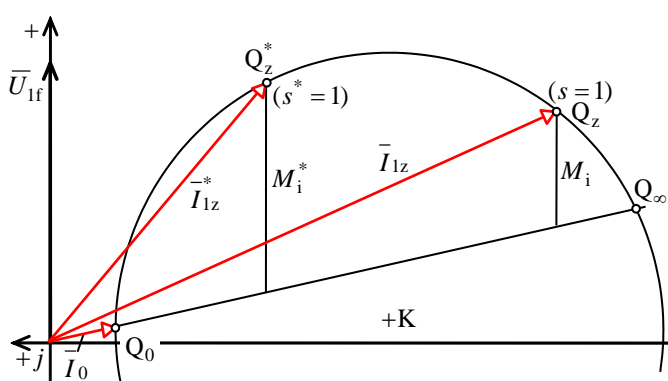
4.5. fénykép Nagyteljesítményű csúszógyűrűs, rúdtekercselésű motor forgórésze gyártás közben

Ha a forgórész körbe a csúszógyűrűkön keresztül ellenállásokat iktatunk be, akkor a szekunderkör fázisonkénti ellenállása $R_2' + R_l'$ lesz. A megnövekedett ellenállás az aszinkron motor kördiagramjának helyét és átmérőjét az áram-munkadiagramnál tanultak alapján nem befolyásolja. Az indítónyomatékot a (4.46) ill. (4.47) képleteket figyelembe véve a szekunder kör ellenállása jelentősen változtatja, a nyomaték értéke a billenőnyomatékig növekedhet. A (4.49) egyenlet értelmében a billenőnyomaték független az aszinkron motor forgórész körbe ellenállásaitól.

A rövidzárási áram az $R_2' + R_l'$ miatt kisebb lesz, a teljesítménytényező pedig javul, a kördiagramban tehát a Q_z pont a kör kerületén eltolódik. Ez a szlipskála zsugorodását jelenti a kör kerületén. Megnövekedett szekunder körbe ellenállás esetére a rövidzárási pont változását a kördiagramon a 4.46. ábrán láthatjuk. Az ábrában feltüntettük az indítónyomatékkal arányos metszéket is (M_i^*).



4.5. fénykép Csúszógyűrűs motor kefeszerkezete



4.46. ábra A megnövelt szekunderköri ellenállás hatása a kördiagramnál

Az aszinkron motor helyettesítő vázlatában a forgórész ohmos ellenállása az R_2'/s alakban szerepel. Indítás alatt minden változás ebben a tagban jelentkezik. Ha a rövidrezárt csúszógyűrűvel üzemelő motor egy adott szlipnél R_2'/s -nek megfelelő I_1 áramot vesz fel, akkor légrés-teljesítmény mellett M nyomatékot fejt ki. Ha változatlan terhelésnél a szekunderköri ellenállást $R_2' + R_1'$ -re

növeljük, akkor az állandó terhelés miatt az áramnak sem szabad változnia, ez azonban csak úgy lehetséges, ha a szlip más értéket vesz fel, így

$$\frac{R_2'}{s} = \frac{R_2' + R_1'}{s^*}. \quad (4.88)$$

Eszerint a csúszógyűrűs aszinkron gépnek ugyanakkora marad az áramfelvétele és a nyomatéka, ha a szlip a forgórész kör ellenállásával arányosan növekszik.

A valóságban egy adott nyomaték létesítéséhez meghatározott I_2' áram szükséges. Nagyobb ellenálláson keresztül azonban csak ugyanolyan arányban nagyobb indukált feszültség hajtja át az I_2' áramot. A forgórészben indukált feszültség viszont a szlippel arányos, tehát a szlip meg fog változni. A (4.88) képletben mindkét oldalon redukált érték szerepel, ezért az arány akkor sem fog megváltozni, ha redukálás nélküli, valóságos ellenállásokat használjuk:

$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2 + R_1}{s^*}. \quad (4.89)$$

A gyakorlatban az indító-ellenállás első fokozatát úgy választjuk meg, hogy az indítási állórészáram $I_{\max} = 1,5 \dots 2 \cdot I_n$ legyen. A maximális áramhoz a kördiagramban M_{\max} nyomaték és s_{\max} szlip tartozik rövidrezárt csúszógyűrűk mellett. Az indítást úgy végezzük el,

hogy az áram ill. nyomaték a kellő gyorsulás miatt egy adott érték alá ne csökkenjen (I_{\min} ill. M_{\min}). A minimális nyomatékhoz a kördiagramban ill. a természetes nyomaték-szlip jelleggörbén s_{\min} tartozik.

Ha ismerjük a motor természetes nyomaték- szlip (fordulatszám) jelleggörbét, vagy a kördiagramot, akkor az indító-ellenállás számításának menete a következő: először meghatározzuk az indítás alatti nyomaték maximális (M_{\max}) és a minimális (M_{\min}) értékét, majd a hozzájuk tartozó szlipeket, s_{\max} -t és s_{\min} -t.

Az első fokozat esetén M_{\max} nyomatékot akarunk elérni: ez $s = 1$ -et jelent az $R_2 + R_{i1}$ ellenállású, ill. s_{\max} -t az R_2 -hez tartozó természetes jelleggörbénél:

$$\frac{R_2}{s_{\max}} = \frac{R_2 + R_{i1}}{1} = \frac{R_{r1}}{1}, \quad (4.90)$$

ahol R_{r1} a forgórész teljes ellenállása az első fokozatnál. R_{i1} -t kifejezve:

$$R_{i1} = \frac{R_2}{s_{\max}} - R_2. \quad (4.91)$$

Az R_{i1} ellenállással a motor M_{\min} nyomatékig gyorsul, ahol s_1 a szlip, melynek értékét a következő arányból határozhatjuk meg: s_{\max}

$$\frac{R_2 + R_{i1}}{s_1} = \frac{R_2}{s_{\min}}.$$

Innen s_1 -et kifejezve és az (4.89) egyenletet felhasználva:

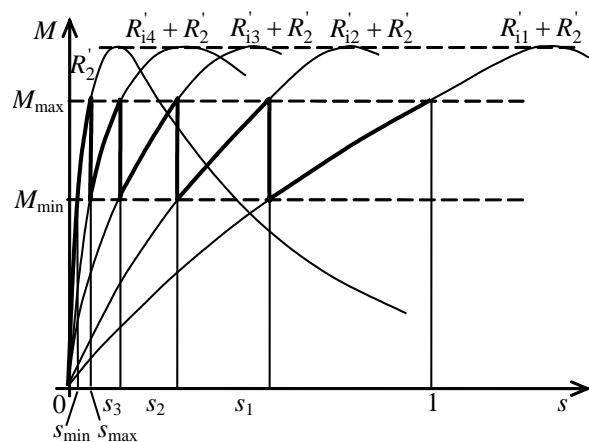
$$s_1 = \frac{R_2 + R_{i1}}{R_2} \cdot s_{\min} = \frac{s_{\min}}{s_{\max}} = \text{áll.} \quad (4.92)$$

A minimális- és maximális szlip hányadosát a továbbiakban jelöljük q -val

$$s_{\min}/s_{\max} = q. \quad (4.93)$$

Az M_{\min} nyomaték elérésekor a további gyorsulás érdekében egy következő fokozatra kell átkapcsolnunk, ahol a beiktatott ellenállás R_{i2} . Ha feltételezzük, hogy az átkapcsolás alatt a fordulatszám nem változik, akkor a maximális nyomaték mellett írhatjuk, hogy

$$\frac{R_2}{s_{\max}} = \frac{R_2 + R_{i2}}{s_1} = \frac{R_{r2}}{s_1}. \quad (4.94)$$



4.47. ábra Csúszógyűrűs aszinkron motor indítása ellenállásokkal, négy fokozatban

Az (4.90), (4.92) és (4.93) kifejezéseket felhasználva:

$$R_{r2} = s_1 \cdot R_{r1} = q \cdot R_{r1}. \quad (4.95)$$

A második fokozattal ismét elérünk az M_{\min} -hez, ahol a szlip legyen s_2 . Ebben a pontban felírva az ellenállások és szlipek arányát kapjuk:

$$\frac{R_2 + R_{i2}}{s_2} = \frac{R_2}{s_{\min}}.$$

Innen s_2 -t kifejezve és a (4.92), valamint az (4.94) egyenleteket felhasználva:

$$s_2 = \frac{R_2 + R_{i2}}{R_2} \cdot s_{\min} = \frac{s_1}{s_{\max}} \cdot s_{\min} = q^2. \quad (4.96)$$

A harmadik fokozatra felírva az összefüggéseket kapjuk, hogy

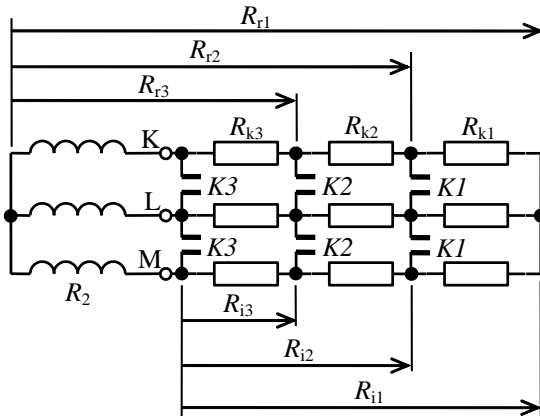
$$R_{r3} = q \cdot R_{r2} = q^2 \cdot R_{r1}. \quad (4.97)$$

Az eredményekből látható, hogy az indítóellenállások egyes fokozatai mértani sort alkotnak, amelynek hányadosa q . A mértani sort zárt alakban felírva:

$$R_{r1} \cdot q^m = R_2 \quad (4.98)$$

ahol m a fokozatok száma.

A számítást a természetes jelleggörbe eléréséig kell folytatni. A négyfokozatú indítás jelleggörbéit a 4.47. ábrán láthatjuk.



4.48. ábra Háromfokozatú indítóellenállás kapcsolása

Ha a számításnál a nyomaték ill. szlip maximális és minimális értékeiből indulunk ki, akkor a fokozatok száma általában nem egész számra adódik. Ilyenkor a legközelebbi egész számot választjuk a fokozatok számának.

Abban az esetben, ha meghatározott fokozatszámot kívánunk alkalmazni, akkor a számítás menete a következő:

- ✚ meghatározzuk az indítás alatt megengedett M_{\max} maximális nyomatékot és a hozzá tartozó szlipet (s_{\max});
- ✚ kiszámítjuk a mértani sor hányadosát:

$$q = s_1 = \sqrt[m]{s_{\max}}. \quad (4.99)$$

- ✚ az első fokozat a (4.90) alapján $R_{r1} = R_2 / s_{\max}$, amelyből a beiktatandó ellenállás $R_{i1} = R_{r1} - R_2$;
- ✚ a további ellenállás fokozatokat a mértani sor szerint számíthatjuk pl.: $R_{r2} = q \cdot R_{r1}$ és $R_{i2} = R_{r2} - R_2$;
- ✚ a számítást a fokozatok számaig végezzük, ellenőrzésként eggyel tovább számolva vissza kell jutnunk R_2 értékéhez.

A 4.48. ábrán háromfokozatú ellenállásos indítás kapcsolási vázlatát mutatjuk be a használt jelölésekkel. Az indításnál rövidrezárando fokozatok értékét R_{kn} -el jelöltük (pl.: $R_{k1} = R_{r1} - R_{r2}$, $R_{k2} = R_{r2} - R_{r3}$).

Az indító ellenállások méretezéséhez, vagy megrendeléséhez a motor névleges adatain kívül meg kell adni az indítási időt, a terhelést és az indítások gyakoriságát.

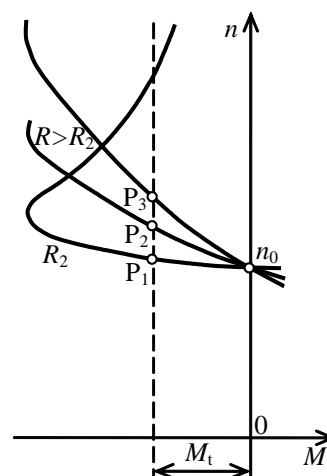
4.7.2. Aszinkron motorok fékezési módszerei

Az aszinkron motor féküzemben a tengelyén mechanikai teljesítményt vesz fel. Ez úgy lehetséges, hogy a nyomaték és a fordulatszám ellenkező előjelű, azaz szorzatuk negatív.

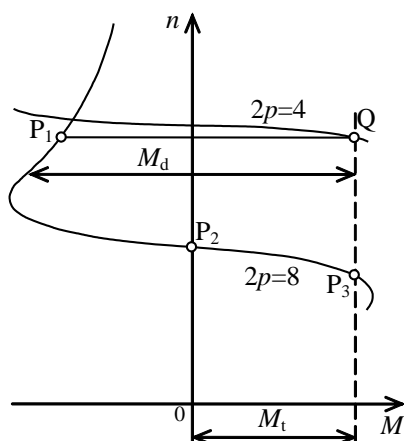
Ha az 4.18. ábrán felrajzolt nyomaték-fordulatszám jelleggörbét nézzük, akkor ez két tartományban lehetséges. Az egyik lehetőség a szinkron fordulatszám felett adódik $n > n_0$ és $s < 0$. Ez az üzemállapot a jelleggörbe generátoros szakaszára esik, ilyenkor a gép teljesítményt ad le a hálózatba, ezért nevezzük generátorüzemi-, vagy visszatápláló fékezésnek.

A másik lehetőség a negatív mechanikai teljesítmény elérésére akkor adódik, amikor a forgórész a forgó mezővel ellentétes irányban forog, tehát $n < 0$ és $s > 1$. Az aszinkron gép ilyenkor a hálózatról és a tengelyén is teljesítményt vesz fel. Ezt az üzemállapotot ellenáramú fékezésnek nevezzük.

Az aszinkron gépekkel tudunk még fékezni az ún. dinamikus féküzemben is. Ilyenkor az állórészt lekapcsoljuk a hálózatról, és egyenfeszültségről tápláljuk, a csúszógyűrűkhöz pedig fékellenállásokat kapcsolunk.



4.49. ábra Generátoros féküzem forgórész köri ellenállás változtatással



4.50. ábra Generátoros féküzem pólusváltással

4.7.2.1. Generátorüzemi, visszatápláló fékezés

Azt, hogy a forgórész fordulatszáma a szinkron fordulatszám fölé emelkedjen, kétféleképpen érhetjük el. Vagy a forgórészt gyorsítjuk valamilyen külső beavatkozással n_0 fölé (pl.: lejtőn lefelé haladó vonat), vagy a forgómező fordulatszámát csökkentjük a pólusszám, esetleg a frekvencia változtatásával az adott fordulatszám alá (pl.: sík pályán haladó vonat fékezése).

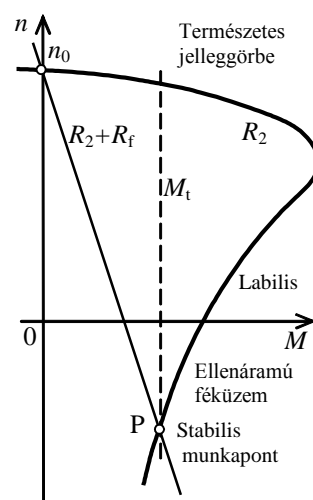
Az első esetben a gép jelleggörbéit az 4.49. ábra mutatja, csúszógyűrűs motor esetén, különböző forgórész köri ellenállásokra. Állandósult generátorüzemi állapotot a P_1 ,

P_2 , P_3 pontokban lehetséges, fékezni csak az n_0 szinkron fordulatszám eléréséig tudunk.

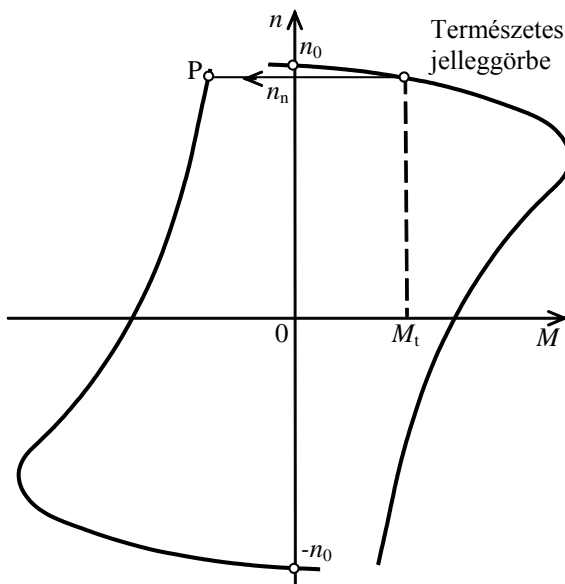
A második esetben, amikor a terhelőnyomaték állandó, akkor pl. kalickás motoroknál a pólusszám változtatással érhetünk el generátoros üzemet. Az 4.50. ábrán $2p = 4$ pólusról $2p = 8$ pólusra való átkapcsolást tüntettünk fel. A négypólusú kapcsolásnál a motor a Q pontban dolgozott, átkapcsolás után a gép a P_1 pontnak megfelelő fékezőnyomatékot fejt ki. Majd az M_d lassító nyomaték hatására először a P_2 szinkron pontig lassul, majd tovább lassulva motorrá válik, a P_3 pontban pedig az új fordulatszámon motorként hajtja tovább a terhelést.

4.7.2.2. Ellenáramú fékezés

Gyakori feladatként jelentkezik pl. daruknál, hogy a terhet egyenletes sebességgel kell süllyeszteni. Ezt a feladatot csúszógyűrűs aszinkron géppel tudjuk megoldani úgy, hogy a gép ellen-



4.51. ábra Ellenáramú féküzem



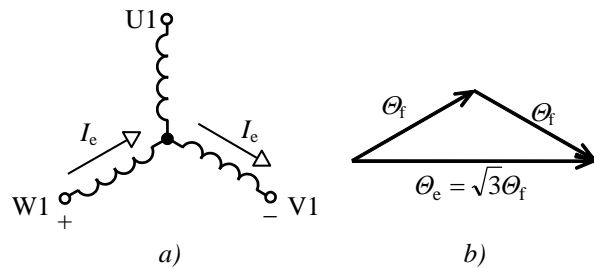
4.52. ábra Ellenáramú féküzem

Az ellenáramú fékezés megállításra is alkalmas, de a nulla fordulatszám után a gép elkezdene emelni a terhelést, ezért a terhet a leállás pillanatában mechanikai fékkel kell rögzíteni. Ellenáramú féküzemben a motorban keletkező nagy veszteségek miatt a melegedést ellenőrizni kell, különösen akkor, ha gyakori az indítás és leállás.

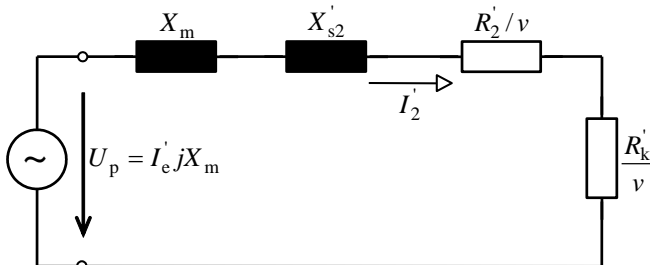
Az ellenáramú féküzemet kalickás motorok esetén is gyakran alkalmazzák reverzá-lással (forgásirányváltással), például szerszámgépeknél (lásd a 4.52. ábrát).

4.7.2.3. Dinamikus fékezés

Ezt a fékezési módszert csúszógyűrűs motoroknál alkalmazhatjuk. Az aszinkron gép motorüzemben hajtja a terhelést, majd az állórésztekercselés háromfázisú táplálását megszüntetjük és egyenfeszültségre kapcsolunk át, a forgórész körbe pedig fékező ellenállásokat kötünk. A tekercselést az 4.53a ábra szerint tápláljuk. Az eddigi forgó mező helyett most álló mágneses mező alakul ki. Az egyenáram által létesített gerjesztést az 4.53b ábrán láthatjuk.



4.53. ábra Az egyenárammal táplált állórész kapcsolása és gerjesztési ábrája



4.54. ábra Az aszinkron gép dinamikus féküzemre vonatkozó helyettesítő vázlata

áramú féküzemben dolgozik.

Az aszinkron motor természetes fordulatszám-nyomaték jelleggörbét és a terhelőnyomatékot az 4.51. ábrában rajzoltuk fel. Az ábrából láthatjuk, hogy ellenáramú féküzemben a természetes jelleggörbe és a terhelőnyomaték a P pontban metszi egymást. Ebben a munkapontban azonban nem üzemelhetünk a természetes jelleggörbével, mert nem stabil munkapont. Ezért a csúszógyűrűkhöz nagy értékű fékező ellenállásokat kell kapcsolni, és így már stabilis munkapontot kapunk. Kalickás forgórészű motorral ezt az üzemet ebben a P pontban nem tudjuk megvalósítani.

Az I_e egyenáramú gerjesztőárammal egyenértékű háromfázisú áram effektív értéke I_e' amely ugyanakkora gerjesztést hoz létre:

$$\sqrt{3} \cdot I_e = \frac{3}{2} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_e'),$$

ahol figyelembe vettük, hogy a szimmetrikus háromfázisú áramok gerjesztése 3/2-szer nagyobb, mint egy

fázis maximuma. A váltakozó áramot kifejezve:

$$I_e' = I_e \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (4.96)$$

A forgórész kör veszteségeit a tengelyen felvett mechanikai teljesítmény fedezi:

$$-P_{f\acute{e}k} = -M_{f\acute{e}k} \cdot \omega = P_{l2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2', \quad \text{teh\AA{t}:}$$

$$M_{f\acute{e}k} = -\frac{3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2'}{\omega} = -\frac{3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \nu}, \quad (4.97)$$

ahol $\nu = \omega/\omega_0$ viszonyszám és ω_0 az a szögsebesség, amelynél a forgórész f_2 frekvenciája egyenlő a gép f_1 névleges frekvenciájával.

A 4.54. ábra alapján a forgórész árama:

$$I_2' = \frac{U_p}{\frac{R_2' + R_k'}{\nu} + j \cdot (X_m + X_{s2}')} = \frac{I_e' \cdot j \cdot X_m}{\frac{R_2' + R_k'}{\nu} + j \cdot (X_m + X_{s2}')}.$$

Az álló mező az n fordulatszámú forgórészben $f_2 = p \cdot n$ frekvenciájú feszültséget indukál és áramot hoz létre. Ilyenkor az aszinkron gép úgy működik, mint egy kifordított

szinkron generátor. Ezért dinamikus féküzemre a 4.54. ábrán látható, ellenállásra dolgozó szinkron gép helyettesítő vázlata érvényes.

Az egyenletek és a helyettesítő vázlat alapján mondhatjuk, hogy a szlip szerepét most ν veszi át. A nyomaték jelleggörbét a ν függvényében a 4.55. ábrán láthatjuk.

A billenőnyomaték a ν_B értéknél lép fel:

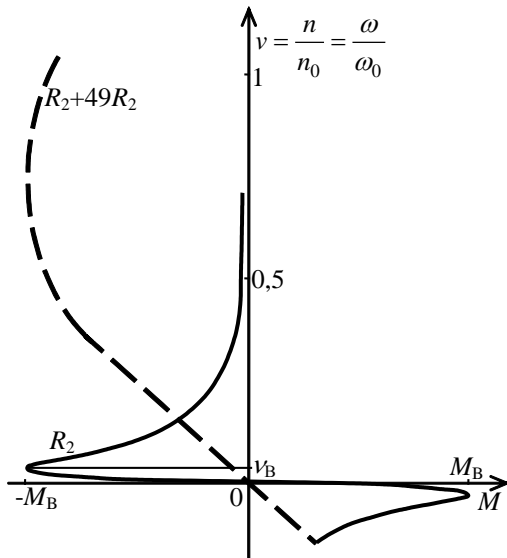
$$\nu_B = \frac{R_2'}{X_m + X_{s2}'}. \quad (4.98)$$

A viszonylagos fordulatszám billenő értéke tehát nem csak a szórási reaktanciától, hanem a főmező X_m reaktanciától is függ. Ezért ha a fékezés megkezdésekor nagy nyomatékkal akarunk

4.55. ábra Dinamikus féküzemi jelleggörbék

fékezni, akkor a forgórész kör ellenállást közel 50-szeresére kell növelni, hogy $\nu_B \cong 1$ legyen. A fordulatszám csökkenése közben a fékező ellenállást fokozatosan kell kiiktatni.

Kalickás motorok esetén is fékezhetünk ezzel a módszerrel, de ebben az esetben nem tudjuk a forgórész kör ellenállást növelni. A korszerű frekvenciaváltóknál opciósan kérhető az egyfázisú, vagy az egyfázisú lüktető kimenet.



4.7.3. Indítási és fékezési veszteségek

A kalickás forgórészű aszinkron motorok esetén a gépben keletkező veszteségek hővé alakulnak. Ezek a veszteségek hosszú ideig tartó, vagy túl gyakori indításkor veszélyesek lehetnek a gép melegedésére, ezért célszerű ebben az üzemi állapotban is vizsgálni a melegedést (az állandósult üzemi melegedéssel a következő, 4.7.4 fejezetben foglalkozunk). Az indítás ideje alatt gyakorlatilag a hőleadás elhanyagolható, így az indítási áram hatására keletkező hő a forgógép hőmérsékletét növeli.

A forgórészben keletkező hőt a $P_{w2} = s \cdot P_\delta$ és a $P_\delta = M \cdot \omega_0$ összefüggések alapján tudjuk meghatározni, és ebből tudunk következtetni a gép összes veszteségére:

$$W_2 = \int_{t_1}^{t_2} P_{w2} \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} s \cdot P_\delta \cdot dt = \omega_0 \cdot \int_{t_1}^{t_2} s \cdot M_M \cdot dt.$$

A mozgásegyenletet (lásd később) felhasználva, az idő szerinti integrálás helyett a szlip szerinti integrálásra térhetünk át, J_Σ a rendszer tehetetlenségi nyomatéka:

$$M_M - M_T = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad \text{illetve}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{M_M - M_T}{J_\Sigma},$$

ahol $\omega = (1-s) \cdot \omega_0$ és $d\omega/ds = -\omega_0$, tehát

$$dt = -\frac{J_\Sigma \cdot \omega_0}{M_M - M_T} ds.$$

Ezt az eredményt visszahelyettesítve az integrálba, s_1 , ill. s_2 kezdő- és végállapotnak megfelelő szlipértékekkel kapjuk, hogy:

$$W_2 = -J_\Sigma \cdot \omega_0^2 \cdot \int_{s_1}^{s_2} s \cdot \frac{M_M}{M_M - M_T} ds = J_\Sigma \cdot \omega_0^2 \cdot \int_{s_2}^{s_1} \frac{M_M}{M_M - M_T} \cdot s \cdot ds. \quad (4.99)$$

Ha $M_T = 0$, akkor tisztán a tömegek gyorsításáról beszélhetünk, ebben az esetben $M_M / (M_M - M_T) = 1$ és

$$W_2 = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_0^2}{2} \cdot (s_1^2 - s_2^2). \quad (4.100)$$

Terhelés nélküli indítás esetén $s_1 = 1$, ill. $s_2 \approx 0$, így $(s_1^2 - s_2^2) = 1$, azaz

$$W_2 = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_0^2}{2},$$

vagyis a forgórészben hővé alakuló energia megegyezik a rendszer kinetikus energiájával.

Ellenáramú fékezés esetén $s_1 \approx 2$ és $s_2 = 1$, így $(s_1^2 - s_2^2) = 3$, forgásirányváltáskor (reverzálás) $s_1 \approx 2$ és $s_2 \approx 0$, ekkor $(s_1^2 - s_2^2) = 4$. Tehát az ellenáramú fékezés a hőfejlődést tekintve három, a reverzálás pedig négy indítással egyenértékű.

Ha a terhelő nyomaték nem zérus ($M_T \neq 0$), akkor a (4.99) egyenletben az $M_M / (M_M - M_T)$ hányados a fordulatszám, ill. a szlip függvénye, ezért az integrálás

elvégezése bonyolulttá válhat. Egyszerűsödik a helyzet, ha a középérték-tételt alkalmazva a tört középértékét az integrál elé kiemeljük, így:

$$W_2 = \left(\frac{M_M}{M_M - M_T} \right)_k \cdot \frac{J_\Sigma \cdot \omega_0^2}{2} \cdot (s_1^2 - s_2^2). \quad (4.101)$$

Ezt az egyenletet vizsgálva láthatjuk, hogy ha $M_T > 0$, akkor nő az indítási veszteség (ilyenkor a mozgásegyenlet alapján az indítási idő is nő). A nyomatékok törtjénél láthatjuk még azt is, hogy az indítási veszteségek csökkennek, ha nagy az M_M/M_T arány. Ez azt jelenti, hogy célszerű a névleges feszültségről indítani a motort, mert $M_M \approx c \cdot U^2$.

A csillag-háromszög indítást vizsgálva feltételezzük, hogy $M_T = 0,2 \cdot M_n$ és a motort közvetlenül indítva (háromszög kapcsolás) $M_M = 1,2 \cdot M_n$, illetve csillag kapcsolásban ennek a harmada, $M_{MY} = 0,4 \cdot M_n$. Ekkor írhatjuk, hogy:

$$\text{közvetlen indításnál:} \quad \frac{M_M}{M_M - M_T} = \frac{1,2}{1,2 - 0,2} = 1,2;$$

$$\text{csillag indításnál:} \quad \frac{M_M}{M_M - M_T} = \frac{0,4}{0,4 - 0,2} = 2.$$

Ez azt mutatja, hogy csillag kapcsolásban a hőfejlődés $2/1,2 = 1,67$ -szeres. Ennek az oka, hogy a veszteségek a $\sqrt{3}$ -szor kisebb motoráramok miatt 3-szor kisebbek, de a gyorsítónyomaték csillag kapcsolásban $0,4 - 0,2 = 0,2$ az $1,2 - 0,2 = 1$ helyett, azaz 5-ször kisebb, ami 5-ször nagyobb indítási időt jelent.

Az állórészben fejlődő hőt könnyen meghatározhatjuk, ha elhanyagoljuk a mágnesező áramot, mert ilyenkor az állórész árama és a redukált forgórészáram egyenlő, ezért a tekercsveszteségek és a keletkező hőmenyiségek az ellenállásokkal arányosak:

$$W_1 \cong W_2 \frac{R_1}{R_2}. \quad (4.102)$$

Amikor a csúszógyűrűs motorokat ellenállásokkal indítjuk, akkor a külső ellenállások értéke nagyobb, mint a forgórészé és így a veszteségek jelentős része ezeken fog kialakulni.

$$W_1 \cong W_2 \frac{R_1}{R_2 + R_k}$$

Aszinkron motoroknál gyakran előfordul, hogy a technológia megköveteli a többszöri indítást, fékezést esetleg reverzálást. Ilyenkor a gépben keletkező veszteségek jelentős részét a kapcsolási veszteségek adják, ezért a kalickás motorok jellemzésére meg szokták adni az ún. ideális kapcsolási számot, a z_0 -t.

Kalickás motorok esetén általában az állórész túlmelegedése okoz problémát, a kialakult gyakorlatnak megfelelően azonban a forgórész adatokkal számolhatunk, mert az álló- és a forgórész veszteségek között az (4.102) összefüggés szerinti kapcsolat van.

A z_0 ideális kapcsolási szám megadja az óránként megengedhető kapcsolások számát, ha a motor csak a saját forgórész tömegét gyorsítja (J_M) úgy, hogy nincs terhelőnyomaték

($M_T = 0$) és a hűtési viszonyok, valamint a melegedés megfelel a névleges terhelési állapotnak.

Névleges üzemben időegység alatt a forgórész a P_{w2n} veszteséget adja le hőteljesítményként. Azonos viszonyok között a $z_0 \cdot W_2$ -nek ezzel egyenlőnek kell lennie, így írhatjuk, hogy:

$$z_0 = \frac{P_{w2n}}{W_2} = \frac{2 \cdot P_{w2n}}{J_M \cdot \omega_0^2}, \quad (4.103)$$

ahol felhasználtuk azt az előzőleg kapott eredményt, hogy terhelés nélküli indításnál a forgórész körben keletkező hővé alakuló energia megegyezik a rendszer kinetikus energiájával. A $P_{t2n} = s_n \cdot P_\delta = s_n \cdot M_n \cdot \omega_0$ alkalmazásával:

$$z_0 = \frac{2 \cdot s_n \cdot M_n}{J_M \cdot \omega_0}. \quad (4.104)$$

A $T_{in} = J_M \cdot \omega_n / M_n$ névleges indítási időállandó fogalmát, és az $\omega_0 \approx \omega_n$ közelítést alkalmazva:

$$z_0 = \frac{2 \cdot s_n}{T_{in}}. \quad (4.105)$$

A névleges indítási időállandó egy villamos gépre jellemző adat, amely általában a gyári katalógusok adataiból meghatározható. Pl. egy 10 kW-os kétpólusú aszinkron motornál $T_{in} = 0,4$ sec és ennek a gépnek a névleges szlipje $s_n = 0,04$, akkor az ideális kapcsolási gyakorisága:

$$z_0 = \frac{2 \cdot 0,04}{0,4} = 0,2 \frac{1}{s} = 720 \frac{\text{kapcsolás}}{\text{óra}}.$$

Valóságos üzemviszonyok mellett tételezzük fel, hogy T_c periódus idő alatt i -számú indítás, f -számú ellenáramú fékezés és r -számú reverzálás történik, és az ezekhez tartozó $M_M / (M_M - M_T)$ értékeket rendre k_i , k_f ill. k_r -rel jelöljük. Ha továbbá a terhelés redukált tehetetlenségi nyomatéka J_R , akkor meghatározhatjuk az időegységre eső redukált indítások számát:

$$z_{\text{red.}} = \frac{i \cdot k_i + 3 \cdot f \cdot k_f + 4 \cdot r \cdot k_r}{T_c} \cdot \frac{J_M + J_R}{J_M}. \quad (4.106)$$

Indítási veszteségek szempontjából igen kedvező a pólusátkapcsolásos motor alkalmazása. Legyen pl. egy 4/8 pólusú motor, amelynek a kisebb pólusszámmal tartozó szinkron szögsebessége ω_0 , a nagyobb pólusszámnál ez az érték $\omega_0 / 2$. A (4.100) egyenletet felhasználva írhatjuk, hogy

$$W_2 = \frac{J_M \cdot (\omega_0 / 2)^2}{2} \cdot (1^2 - 0) + \frac{J_M \cdot \omega_0^2}{2} \cdot (0,5^2 - 0) = \frac{1}{2} \cdot \frac{J_M \cdot \omega_0^2}{2},$$

vagyis ebben az esetben feleannyi hő fejlődik, mint közvetlen indításkor.

4.8. AZ ASZINKRON MOTOR FORDULATSZÁM-VÁLTOZTATÁSA

Az aszinkron motorok fordulatszáma a szlip egyenletéből kifejezve:

$$n = n_0 \cdot (1 - s) = \frac{f_1}{p} \cdot (1 - s). \quad (4.107)$$

Az aszinkron motorok fordulatszámát tehát a szlip, a póluspárok száma és a primer frekvencia határozza meg. A három jellemző közül bármelyiket megváltoztatva az aszinkron motorok fordulatszáma is megváltozik. Vizsgáljuk meg külön-külön az egyes jellemzők hatását a fordulatszám-változásra!

4.8.1. A szlip változtatása

a) Az előző fejezetben már láttuk, hogy a forgórész köri ellenállás növelésével egy adott terhelésnél a szlip is arányosan nő. A csúszógyűrűs aszinkron motornál láthattuk azt az esetet, amikor ellenállást iktattunk a forgórész körbe. Ez a módszer a legegyszerűbb szlipváltoztatás. Hátrányként jelentkezik, hogy az ellenállás miatt növekednek a veszteségek is. A szekunder tekercsveszteség a (4.38) egyenlet szerint:

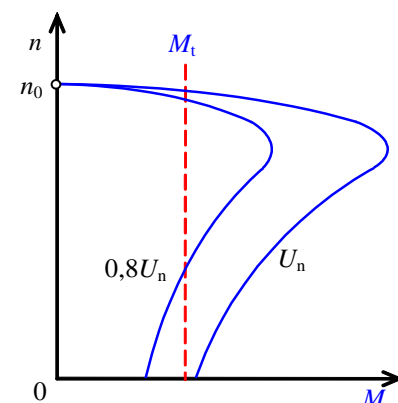
$$P_{12} = s \cdot P_{\delta},$$

tehát a szlip növekedésével a légrésteljesítmény egyre nagyobb része alakul hővé a forgórész körben. Emiatt ezt a fordulatszám-változtatási lehetőséget nem használjuk az egész tartományban, n_0 -tól nulláig. Így kisebb teljesítményű motorok esetén – ahol a veszteség nem olyan jelentős abszolút értékben – 50 %-os tartományt is átfoghatunk.

Ellenállásos fordulatszám-változtatáskor nem szabad figyelmen kívül hagynunk, hogy az aszinkron gép nyomaték-fordulatszám jelleggörbéje veszít sönt jellegéből és emiatt terhelésváltozásnál a fordulatszám-változás is jelentősebb lesz.

A fordulatszám-változtató ellenállásokat az indító ellenállásokhoz hasonlóan számíthatjuk, de a méretezésnél a tartós üzemállapot a mérvadó.

b) A szlip növelésének másik lehetősége az aszinkron motorok kapocsfeszültségének csökkentése. Ismeretes, hogy a nyomaték a kapocsfeszültséggel négyzetesen változik. A 4.56. ábrán egy aszinkron gép névleges feszültségéhez-, ill. a $0,8 \cdot U_n$ -hez tartozó nyomaték-jelleggörbéit láthatjuk. A nyomaték a teljes fordulatszám-tartományban megközelítőleg 0,64-szeresére csökken. Az ábrából kitűnik, hogy állandó terhelőnyomatéknál nő a szlip. A kapocsfeszültséggel történő szlipváltoztatást csak kis teljesítményű gépeknél alkalmazzuk, mert a feszültséggel arányosan csökken a motor fluxusa is. Ebben az esetben vigyáznunk kell, mert a billenőnyomaték is kisebb lesz, így nem szabad megengednünk az erős, lökészerű terheléseket.



4.56. ábra Aszinkron motor $n(M)$ jelleggörbéje csökkentett feszültségnél

A kapcsolófeszültséget többféle módszerrel csökkenthetjük: pl. indukciós szabályozóval, háromfázisú szaggatóval. Ez egy elvi lehetőség, gyakorlati alkalmazásának csak csúszógyűrűs motorok esetén, forgórészközi ellenállásokkal együtt van értelme.

c) Harmadik lehetőségként megemlítjük a kaszkádkapcsolást. A fordulatszám változtatását veszteség-mentessé tehetjük, ha a szlipenergiát valamilyen másik villamos gép (esetleg több villamos gép) hasznos mechanikai energiává alakítja, vagy – mint villamos energiát – a hálózatba visszatáplálja.

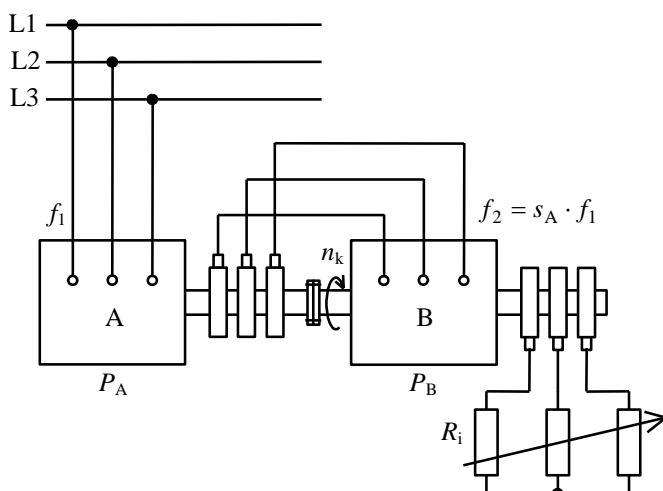
A legegyszerűbb kaszkádkapcsolásban az A főmotor és a B segédgép egymással tengelykapcsolatban van, és a főmotor csúszógyűrűiről levett szlipenergia táplálja a segédgép állórészét, amint azt a 4.57. ábra mutatja.

Ha az A gép póluspárszáma p_A , szlipje s_A ; a B gép póluspárszáma p_B , szlipje s_B ; a hálózati frekvencia f_1 ; a csúszógyűrűről levett feszültség frekvenciája f_2 ; akkor az A gép fordulatszáma:

$$n_A = \frac{f_1}{p_A} \cdot (1 - s_A),$$

a B gépé pedig

$$n_B = \frac{f_2}{p_B} \cdot (1 - s_B).$$



4.57. ábra Hagyományos kaszkádkapcsolás

Másrészről tudjuk, hogy

$$f_2 = s \cdot f_1, \text{ ezért:}$$

$$n_B = \frac{s_A \cdot f_1}{p_B} \cdot (1 - s_B).$$

Mint hogy a két gép egymással tengelykapcsolatban van, csakis egyféle fordulatszám, az ún. n_k kaszkád fordulatszám lehetséges. Ezért:

$$n_A = n_k = \frac{f_1}{p_A} \cdot (1 - s_A),$$

$$n_B = n_k = \frac{s_A \cdot f_1}{p_B} \cdot (1 - s_B).$$

A két egyenlet összeadva és rendezve:

$$n_k \cdot (p_A + p_B) = f_1 \cdot (1 - s_A \cdot s_B),$$

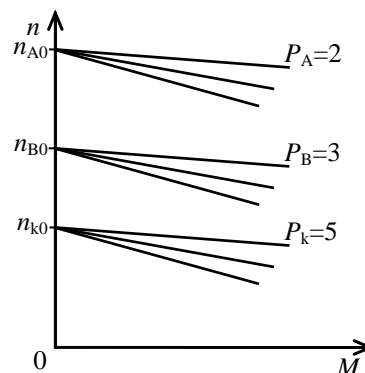
és végül

$$n_k = \frac{f_1}{p_A + p_B} \cdot (1 - s_A \cdot s_B). \quad (4.108)$$

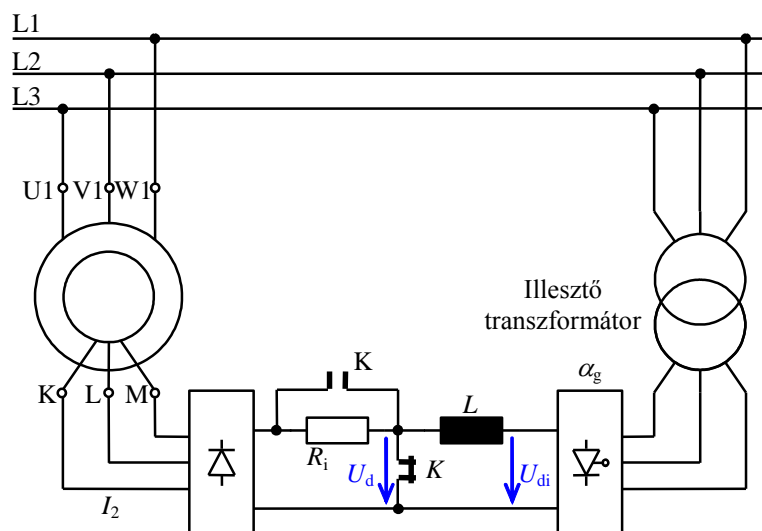
A gépcsoport akkor járna szinkron fordulatszámmal, ha a B gép szlipje nulla ($s_B = 0$). Tovább a gépcsoport már nem gyorsulhat, mert ebben az esetben a B motornak generá-

$$n_{\text{k0}} = \frac{f_1}{p_{\text{A}} + p_{\text{B}}} . \quad (4.109)$$

A két géppel három szinkron fordulatszámot lehet előállítani.

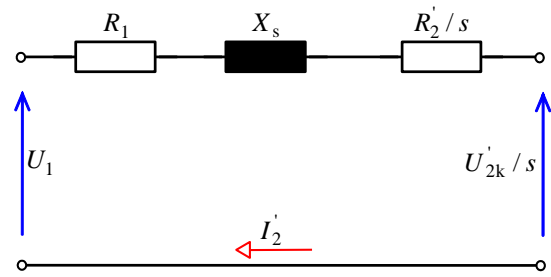
$$n_{\text{k0}} = \frac{f_1}{p_{\text{A}} + p_{\text{B}}}.$$
$$n_{A0} = \frac{f_1}{p_A}.$$
$$n_{\text{B0}} = \frac{f_1}{p_{\text{B}}}.$$


A gépcsoport fordulatszám-nyomaték jelleggörbéit **kapcsolás jelleggörbéi** négy-, ill. hatpólusú gépre az 4.58. ábrán láthatjuk, a természetes jelleggörbék közötti területet az ellenállás változtatással tudjuk átfogni. Ezt a fajta kaszkádot alkalmazta Kandó Kálmán az első villamos mozdonyban.



Ma már igen elterjedtek az áramirányítós kaszkádhajtások, ezeknél a segédgép szerepét egy-, vagy több készlet áramirányító veszi át, és a szlipenergiát a hálózatba továbbítják. A leggyakrabban előforduló ilyen kaszkádkapcsolás az ún. vezérelt áramirányítós kaszkád (*Scherbius-kaszkád*), ahol a forgórészhez háromfázisú diódás híd csatlakozik. Az egyenirányított oldalon egy szintén háromfázisú váltóirányító (tirisztoros hálózati kommutációjú

inverter) helyezkedik el, amely általában illesztő transzformátoron keresztül az energiát visszatáplálja a hálózatba. A hídkapcsolás után az egyenáramú közbenső körben köráramkorlátozó fojtótekercs szükséges. A kaszkád kapcsolási vázlatát az 4.59. ábrán láthatjuk. Ezt a kaszkádtípust a gyakorlatban a vízművek-, illetve a kaszkád rendszerű szélgenerátorok esetén alkalmazzák.



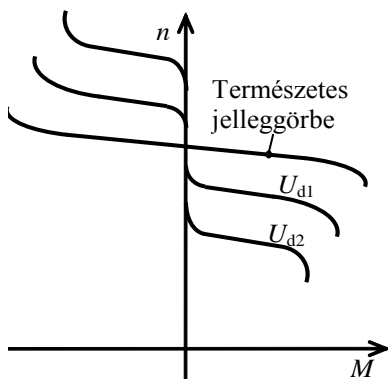
4.60. ábra A kaszkád-kapcsolás egyszerűsített helyettesítő vázlata

A visszatáplált teljesítmény az $s \cdot P_g$ -val lesz arányos, és ez a teljesítmény határozza meg a félvezető berendezések, valamint az illesztő transzformátor típus teljesítményét. Azért, hogy ezt a teljesítményt mérsékeljük, általában csak $s = 0,2 \dots 0,5$ tartományban célszerű az ilyen berendezések használata.

A motor fordulatszámát a közbensőkör egyenfeszültségének nagyságával tudjuk módosítani. Az egyenfeszültséget az inverter α_g gyújtásszögével változtatjuk. Ha $\alpha_g = 90^\circ$, akkor $U_d \cong 0$, tehát ideális félvezetők esetén a motor a természetes jelleggörbével fog üzemelni. A legnagyobb egyenfeszültség $\alpha_{g \max} = 150 \dots 160^\circ$ (az invertertartalék miatt kisebb, mint 180°) mellett adódik, ez határozza meg az s_{\max} értékét.

Az indítást ($s > 0,5$) továbbra is ellenállással végezzük, amely a csúszógyűrűknél, vagy az egyenáramú körben (lásd 4.59. ábrán R_1 -t) helyezhető el, és felfutás után rövidre zárjuk.

A 4.10. ábrán felrajzoltuk az aszinkron motor helyettesítő vázlatát a csúszógyűrűkhez kapcsolt külső feszültség esetére. Az áthidaló ágat elhanyagolva kapjuk az 4.60. ábrán látható helyettesítő vázlatot.



4.61. ábra Az áramirányítás kaszkád mechanikai jelleggörbéi

A helyettesítő vázlat alapján az áram:

$$\bar{I}_2' = \frac{\frac{\bar{U}_{2k}'}{s} - \bar{U}_1}{R_1 + \frac{R_2'}{s} + j \cdot X_s} \quad (4.110)$$

Üresjárásban $I_2' \cong 0$, ekkor a fenti egyenletből az üresjárási szlipre azt kapjuk, hogy:

$$s_{\bar{u}} \cong \frac{U_{2k}'}{U_1} \quad (4.111)$$

Ez azt jelenti, hogy az aszinkron motor üresjárási szlipje a csúszógyűrűkre kényszerített feszültséggel arányosan változik: ha nő a feszültség, nő a szlip is, vagyis csökken a fordulatszám.

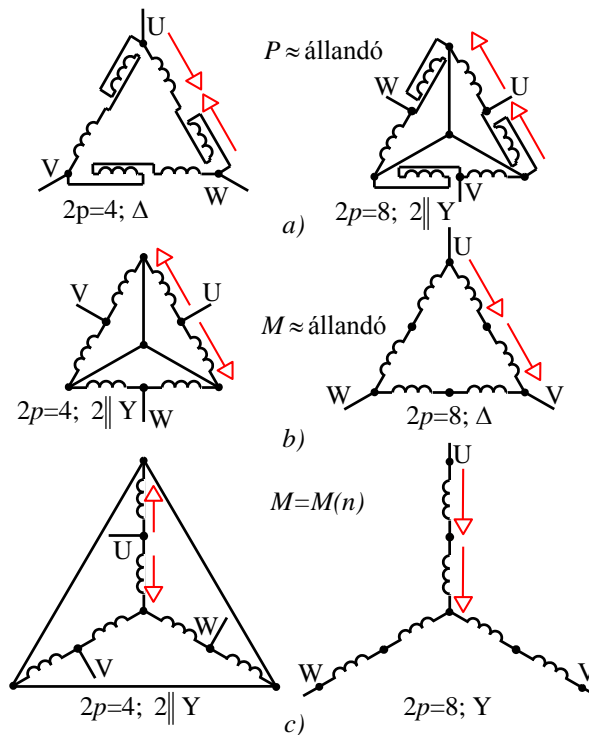
Az 4.61. ábrán felrajzoltuk a kaszkád hajtás mechanikai jelleggörbéit különböző közbensőkörü egyenfeszültségekre. Az áramirányító hatására növekvő egyenfeszültségnél

a szlip csökkenésén túl a motor billenőnyomatéka is csökken, valamint nő a jelleggörbék meredeksége.

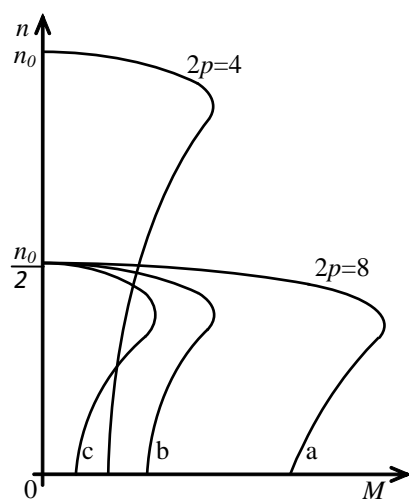
4.8.2. Póluspárszám-változtatás

Veszteségmentesen lehet fordulatszámot változtatni, ha különböző pólusszámú tekercselés(ek)e)t helyezünk el a gépben. A különböző pólusszámot elérhetjük egymástól független, több tekercseléssel, vagy egyetlen átkapcsolható tekercseléssel. A több tekercseléssel készült gépek kihasználása igen rossz, mert egyszerre csak az egyik tekercselés lehet üzemben. Sokkal jobb kihasználást biztosít az átkapcsolható tekercselés. Az átkapcsolható tekercselések közül igen jól bevált a *Dahlander-féle* kétréteges tekercselés.

A pólusszám változtató motorok rövidrezártak, ugyanis a kalickás forgórész bármely állórész pólusszámra megfelelő. A Dahlander-féle póluskapcsolással 1:2 arányban lehet a pólusszámot- és így a fordulatszámot megváltoztatni. Ennek a megoldásnak a lényege az, hogy minden fázis-tekercs két félből áll, és ha a két félben a kölcsönös áramirányt megváltoztatjuk, akkor a motor pólusszáma is 1:2 arányban változik. Az 4.62. ábrán láthatók a 4:8 pólusú Dahlander-kapcsolások, egy fázis két féltekercsében feltüntetjük az áramok kölcsönös irányát.



4.62. ábra. 4:8 pólusú Dahlander-kapcsolások



4.63. ábra Pólusátkapcsolás jelleggörbéi

A fordulatszám-változtatás kívánt jellegétől függően a pólusátkapcsolásos motorokat általában három csoportba sorolhatjuk:

1. Állandó teljesítményszükséglet, azaz kisebb fordulatszámon nagyobb nyomatékigény. Ezt az igényt soros háromszögből kétszer párhuzamos csillagba való átkapcsolással biztosíthatjuk (4.62a ábra).
2. Állandó nyomatékszükséglet, azaz a fordulatszámmal arányosan növekvő teljesítmény (pl. daruhajtás). Ezt soros háromszögből kétszer párhuzamos csillagba való átkapcsolással valósíthatjuk meg (4.62b ábra).
3. A fordulatszámmal növekvő nyomatékszükséglet (pl. centrifugahajtás). Ezt az igényt megvalósíthatjuk a soros csillagból kétszer párhuzamos csillagba való átkapcsolással (4.62c ábra).

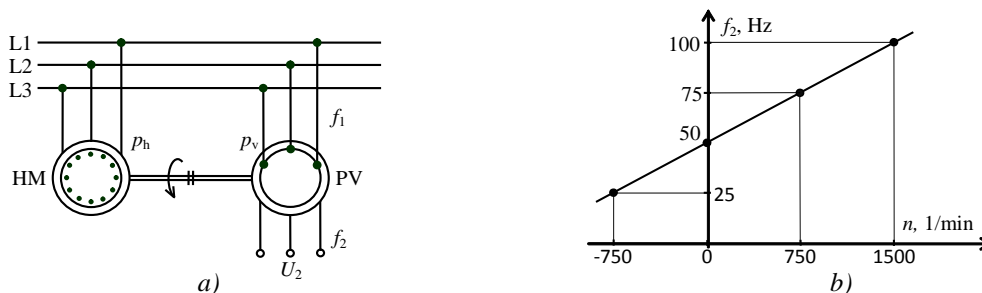
A 4.63. ábrán a 4.62. ábra kapcsolásainak megfelelő nyomaték-fordulatszám jelleg-görbéket láthatjuk. Pólusátkapcsoláskor a fázissorrendet is meg kell változtatni, különben a forgómező – és vele együtt a forgórész – forgásiránya is megváltozik.

A pólusátkapcsolós motorok tervezésénél ügyelni kell arra, hogy az átkapcsoláskor megváltozik a hatásos menetszám, a fluxus és a pólusosztás, ezért gondosan ellenőrizni kell az indukciók értékét.

Célszerű úgy számítani a gépet, hogy a nagyobb nyomatékot igénylő kapcsolatban a légrésindukció is nagyobb legyen. A pólusátkapcsolós motorok előállítási költsége – a nagyobb fordulatszámra végezve az összehasonlítást – kb. 1,3...1,7-szeres, kihasználtságuk rosszabb, kisebb a hatásfokuk és a teljesítménytényezőjük. Ezért minden esetben meg kell fontolni, hogy nem előnyösebb-e a kétmotoros hajtás, vagy változtatható mechanikus áttétel alkalmazása. Nagyobb fordulatszámról a kisebbre való áttérés esetén energiavissza-nyeréses fékezésre van lehetőség.

4.8.3. A primer frekvencia változtatása

Az (4.107) képlet szerint az aszinkron motor fordulatszáma a primer frekvenciával arányosan változik. Az állórész frekvenciával veszteségmentesen tudjuk a fordulatszámot változtatni, és lehetőség van 3000 1/min-nél nagyobb fordulatszámok elérésére is.



4.64. ábra Peridusátalakító kapcsolási vázlata
a) kapcsolási vázlat; b) jelleggörbe

A frekvencia változtatására szolgálnak az aszinkron frekvenciaátalakítók, vizsgáljuk meg ezeknek a működését.

Az aszinkron periódusváltó (PV) tulajdonképpen egy csúszógyűrűs indukciós motor, amelynek a forgórészét egy szinkron-, vagy egy rövidrezárt forgórészű aszinkron motor (HM) állandó fordulatszámmal hajtja (4.64a ábra).

A periódusváltó szekunder oldalán levehető feszültség f_2 frekvenciája:

$$f_2 = s_{pv} \cdot f_1 = \frac{n_{opv} - n}{n_{opv}} \cdot f_1, \quad (4.112)$$

ahol s_{pv} a periódusváltó szlipje, n_{opv} a mező fordulatszáma a periódusváltóban, n a forgórész fordulatszáma, amelyet a hajtógép határoz meg.

Az (4.112) egyenletbe behelyettesítve a forgórész $n = f_1 / p_h \cdot (1 - s_h)$ és a mező $n_{opv} = f_1 / p_{pv}$ fordulatszámát, a szekunderoldali frekvencia:

$$f_2 = f_1 \cdot \left(1 - \frac{p_{pv}}{p_h} \cdot (1 - s_h) \right), \quad (4.113)$$

ahol p_{pv} , ill. p_h a periódusváltó, ill. a hajtógép póluspárjainak száma, az s_h pedig a hajtógép szlipje.

Ha a hajtógép a mező ellen forgatja a forgórészt, akkor az (4.112) egyenletben az n negatív lesz, tehát a számlálóban a két fordulatszám összeadódik, aminek következtében az (4.113) egyenletben a szögletes zárójelben levő két tagot szintén össze kell adni.

Ha a hajtógép szinkron motor, akkor az $s_h = 0$, de s_h -t aszinkron hajtómotor esetén is rendszerint elhanyagolhatjuk. Ebben az esetben az (4.113) egyenlet tovább egyszerűsödik:

$$f_2 = f_1 \cdot \left(1 \mp \frac{p_{pv}}{p_h} \right). \quad (4.114)$$

Az aszinkron periódusváltó szekunder tekercsében indukált feszültségnek nemcsak a frekvenciája, hanem nagysága is a periódusváltó szlipjével arányos. Ha az álló periódusváltó ($s_{pv} = 0$) szekunder tekercsében U_{20} feszültség indukálódik, akkor s_{pv} szlip esetében:

$$U_2 = s_{pv} \cdot U_{20} \quad (4.115)$$

nagyságú feszültséget kapunk.

A periódusváltó szekunder tekercselése elvileg az álló- és a forgórészen egyaránt lehet, de gyakorlati okokból az állórészre teszik.

Ha a hajtómotor tekercselését 1:2 arányban átkapcsolható Dahlander-tekercseléssel készítjük, akkor a csúszógyűrűkről négy különböző nagyságú frekvenciát tudunk levenni (pl. 25, 50, 75, 100 Hz, 4.64b ábra).

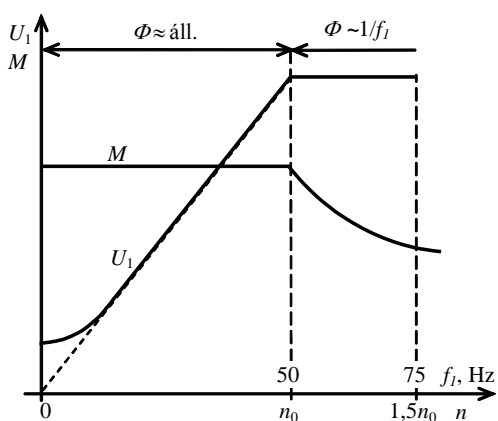
Vizsgáljuk meg, hogy a tápláló frekvencia megváltoztatásakor mekkora feszültséget kell az aszinkron motorra kapcsolni, és hogyan alakul a nyomaték-fordulatszám jelleggörbe, illetve a kördiagram.

Az aszinkron motor feszültségét az (4.2) egyenlet határozza meg. Ha elhanyagoljuk az állórész tekercselésben fellépő feszülteségeket, akkor a kapocsfeszültség közelítőleg megegyezik a főmező által az állórészben indukált feszültséggel:

$$U_1 \approx U_i = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi \cdot \xi_1. \quad (4.116)$$

Mivel a névleges állapothoz tartozó fluxust célszerű a lehető legnagyobb értéken tartani (a minimális fluxus értékét a gép kihasználása, a maximális értékét pedig a telítődés határozza meg), az indukált feszültséget a frekvenciával arányosan kell változtatni, mert ebben az esetben a fluxus állandó marad (4.65. ábra).

Növelt frekvenciáról való táplálás esetén ellenőrizni kell a vasvesztéseket, ami adott fluxus, tehát adott maximális indukciók esetén részben a frekvenciával, részben annak négyzetével arányos. A frekvencia növelésével tehát nő a vasvesztés, ez csak akkor engedhető meg, ha a nagyobb fordulatszámmal járó jobb hűtés eredményeként a gép melegedése nem haladja meg az alkalmazott szigetelőanyagra megengedett maximális hőmérsékletet. Ellenkező esetben a frekvencia növelésekor a feszültséget csak az arányosnál kisebb mértékben növelhetjük, hogy csökkenjenek az indukciók.



4.65. ábra Aszinkron motor $U(f)$ és $M(n)$ jelleggörbéi

A nyomaték kialakulásának fizikai képletéből következik, hogy adott fluxus, és adott $n_0 - n$ relatív fordulatszám esetén a nyomaték ugyanakkora, bármekkora is a mező n_0 szinkron fordulatszáma. Ebből következik, hogy az egyes frekvenciákhoz tartozó nyomaték-fordulatszám jelleggörbéket a fordulatszám-tengely irányában való eltolással kapjuk (4.66. ábra). Egészen kis frekvenciákra az (4.116) egyenletben felírt közelítés már nem alkalmazható, mert az állórésztekercselés ellenállásán fellépő feszültségesés viszonylag nagy.

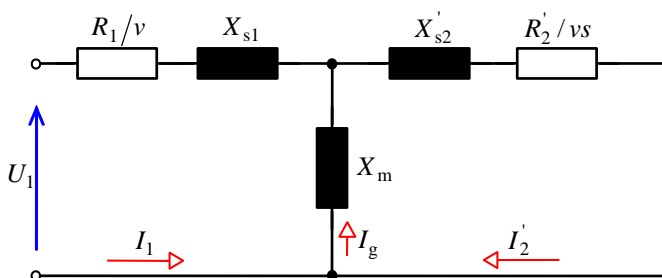
Ha a kapcsolófeszültség frekvenciáját ν -szerezésre változtatjuk, akkor az előbbieket szerint a névleges U_1 feszültség helyett $\nu \cdot U_1$ nagyságú kapcsolófeszültséget

kell alkalmaznunk. Az aszinkron motor ismert helyettesítő kapcsolási vázlatában (4.8. ábra) $\nu \cdot U_1$ nagyságú és $\nu \cdot f_1$ frekvenciájú tápláló feszültség esetén a feszültségek és a reaktanciák is ν -szerezésre változnak. Mind az I_1 mind pedig az I_2' áram változatlan marad, ha a feszültségeket és az impedanciákat ν -vel osztjuk, így kapjuk az 4.67. ábrán látható helyettesítő kapcsolási vázlatot.

A 4.8 és 4.67. ábra összehasonlításából megállapíthatjuk, hogy R_1 elhanyagolásával ($\nu > 1$ esetén) a két ábra azonossá válik, ha az f_1 frekvencia esetében levő s szliphez $\nu \cdot f_1$ frekvencia esetén $s \Rightarrow s/\nu$ szlipet rendelünk. Ebből következik, hogy az áramok is megegyeznek, tehát a nyomatékok és a kördiagramok is azonosak, csak a szlipeskála változik meg, ν arányában.

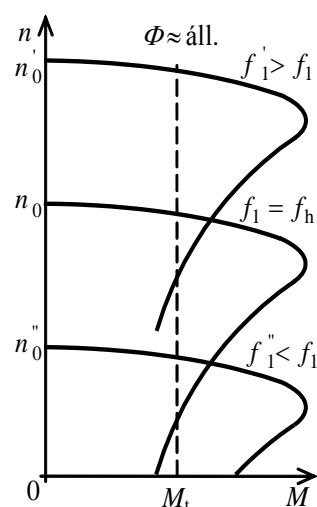
Kis frekvenciák ($\nu \ll 1$) esetén az állórész ellenállását nem lehet elhanyagolni, mert a helyettesítő kapcsolás vázlatban (4.67. ábra) az R_1/ν tagon létrejövő feszültségesés a kapcsolófeszültség tetemes része.

Ha pl. a frekvenciát a névleges érték 5 %-ára csökkentjük, akkor állandó fluxus esetén a belső feszültség is 5 %-ára csökken, az állórész ellenállásán névleges áram esetén viszont



4.67. ábra Változó frekvenciára érvényes helyettesítő kapcsolási vázlat

kezik, mert a frekvencia fokozatos növelése jelentősen csökkenti az indítási veszteségeket.



4.66. ábra A frekvencia változtatásának hatása az $n(M)$ jelleggörbe alakulására

2...3 %-os (tehát relatíve kb. 50 %-os) feszültségesés jön létre, ami már semmiképpen sem hanyagolható el. Ezért ilyen kis frekvenciákon már nem kell a frekvenciával arányosan csökkenteni a kapcsolófeszültséget, hogy állandó fluxust kapjunk.

A változó frekvenciáról való táplálás másik előnye indításkor jelentkezik, mert a frekvencia fokozatos növelése jelentősen csökkenti az indítási veszteségeket.

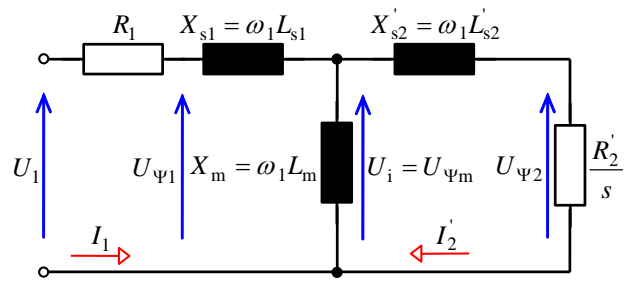
4.9. ASZINKRON MOTOROK EGYSZERŰSÍTETT HATÁSVÁZLATA

Az aszinkron gépek eddigi, állandósult állapotra vonatkozó vizsgálatánál nem tárgyaltuk részletesen a fluxusok képét, csak megemlítettük, hogy vannak szórási fluxusok és ezeket a helyettesítő vázlatban a szórási reaktanciákkal vettük figyelembe. A valóságban azonban az állórész (Ψ_1), az álló- és forgórész szórási (Ψ_{s1} , ill. Ψ_{s2}), a főmező (Ψ_m) és a rotor (Ψ_2) tekercsfluxusok vektoriális eredői alakulnak ki, és hozzák létre a nekik megfelelő feszültségeket. Az 4.68. ábrán rajzoltuk fel az aszinkron gép közelítő helyettesítő kapcsolási vázlatát (az áthidaló ágban a vasvesztéset elhanyagoltuk) az álló- és forgórész fluxusoknak megfelelő feszültségeket feltüntetve.

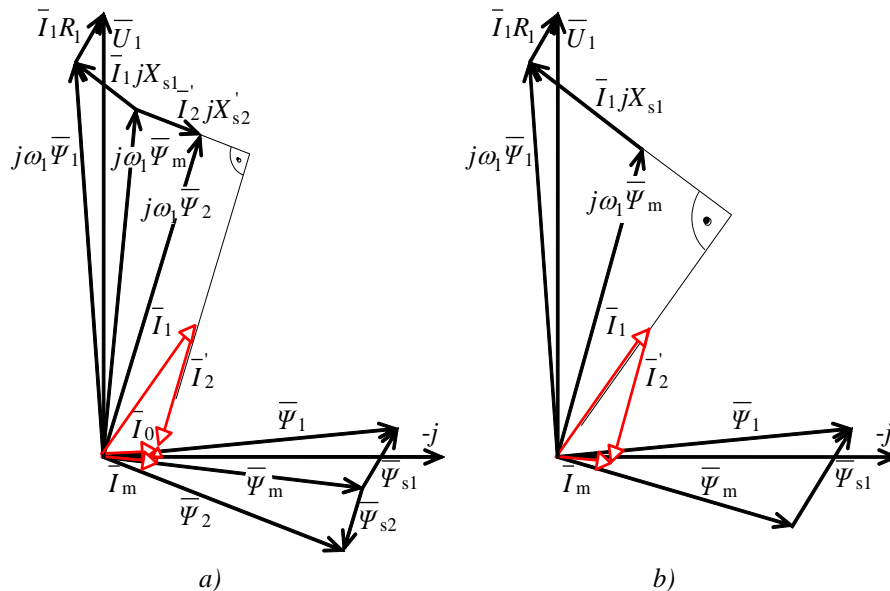
A szórási fluxusok az azokat létrehozó álló- ill. forgórész árammal vannak fázisban. A helyettesítő vázlat (4.68. ábra) alapján felrajzolhatjuk a gép vektorábráját (4.69a ábra).

Az egyszerűsített hatásvázlat felrajzolásának feltételei:

- ✚ a főmező fluxusa állandó,
- ✚ a forgórész szórási reaktanciája X'_{s2} elhanyagolható R'_2/s -hez képest vagyis a forgórészáram és indukált feszültség ellenfázisban van, mert ekkor az áram merőleges a főmező fluxusra.
- ✚ az \bar{I}'_2 forgórészáram és a Ψ_m főmező fluxus merőleges egymásra (ez a feltétel csak az egyenáramú gépek esetén teljesül mindig), lásd a 4.69b ábrát.



4.68. ábra Aszinkron gép közelítő helyettesítő kapcsolási vázlata



4.69. ábra Az aszinkron gép fluxusait tartalmazó vektorábra

A forgórész kis változásokra linearizált feszültség-egyenletét a szekunder oldalra felírva:

$$u_{i2} = c \cdot \Psi_m \cdot (\omega_0 - \omega) = i_2 \cdot R_2 + L_s \cdot \frac{di_2}{dt} + u_{2k} + I_2 \cdot r_2, \quad (4.117)$$

ahol $L_s = L_{s1} + L_{s2}$, mert ha Ψ_m állandó, akkor I_m sem változik, így a szekunder és a primer áram együtt változik és a közös induktivitás befolyásolja az időbeni változást, határozza meg az időállandót.

A (4.117) egyenlet Laplace transzformáltját véve és az áramot kifejezve:

$$i_2 = \frac{c \cdot \Psi_m \cdot (\omega_0 - \omega) - u_{2k} - I_2 \cdot r_2}{R_2 + s \cdot L_s} = \frac{c \cdot \Psi_m \cdot (\omega_0 - \omega) - u_{2k} - I_2 \cdot r_2}{R_2 \cdot (1 + s \cdot T_v)}, \quad (4.118)$$

ahol $T_v = L_s / R_2$, és most s a Laplace operátor.

A nyomatékot a légrésteljesítményből számítva:

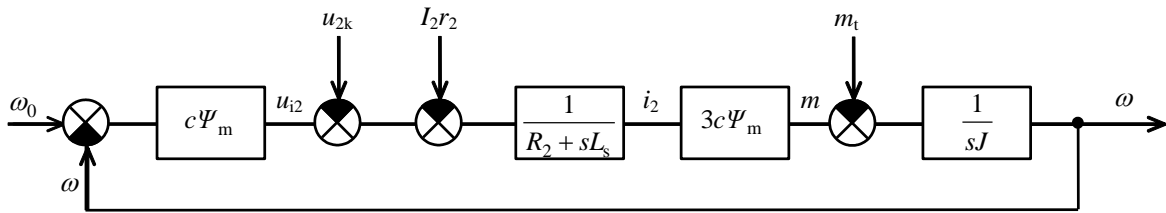
$$M = \frac{P_\delta}{\omega_0} = \frac{P_{w2}}{s \cdot \omega_0} = \frac{3 \cdot c \cdot \Psi_m \cdot (\omega_0 - \omega) \cdot I_2}{\omega_0 - \omega} = 3 \cdot c \cdot \Psi_m \cdot I_2. \quad (4.119)$$

Kis változásokra áttérve ($\Delta \Psi_m = 0$):

$$m = 3 \cdot c \cdot \Psi_m \cdot i_2. \quad (4.120)$$

Az $m - m_T = m_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ mozgásegyenlet Laplace transzformált alakban:

$$m - m_T = m_d = J \cdot s \cdot \omega(s). \quad (4.121)$$



4.70. ábra Az aszinkron gép egyszerűsített hatásvázlata

A fenti egyenletek alapján felrajzolhatjuk az aszinkron gép egyszerűsített hatásvázlatát (lásd az 4.70. ábrát) a különböző bemenő jeleket feltüntetve.

Ha a $c \cdot \Psi_m$ szorzótényezőt előre visszük az összegzés elé, az ω és ω_0 ágába, akkor a hatásvázlat felépítése nagyon hasonló az egyenáramú motorokra felrajzolt hatásvázlathoz. Az aszinkron gépeknél az elektromechanikai időállandó:

$$T_m = \frac{J \cdot R_2}{3 \cdot c^2 \cdot \Psi_m^2}. \quad (4.122)$$

A hatásvázlat alapján felírható átviteli függvények is hasonlóak az egyenáramú gépnél megismertekhez.

A közelítő hatásvázlattal jól tárgyalhatóak a következő beavatkozási módok:

- ✚ forgórészkeri ellenállás változtatás;
- ✚ beiktatott forgórészkeri feszültség változtatás (kaszád kapcsolások);
- ✚ primer frekvenciaváltoztatás;
- ✚ terhelő nyomatékváltoztatás.

4.10. ÁRAMIRÁNYÍTÓS ASZINKRON MOTOROS HAJTÁSOK ÜZEMVISZONYAI

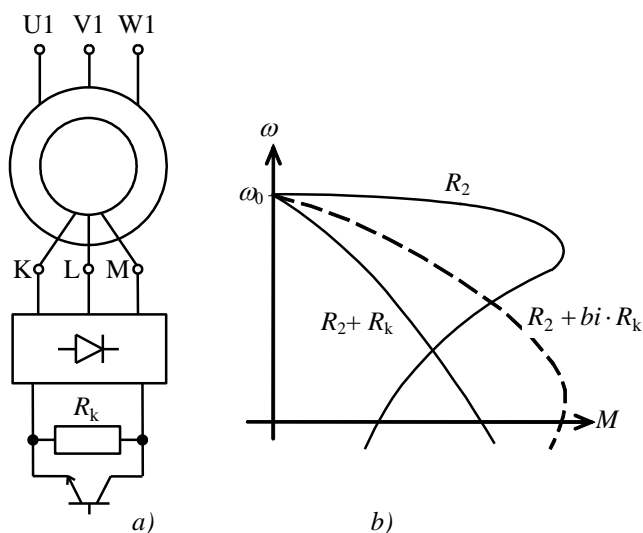
Az aszinkron motoroknak mind az állórész-, mind a forgórész tekercseléséhez kapcsolódhat áramirányító berendezés. Az áramirányító segítségével a motor fordulatszám-nyomaték jelleggörbáját módosíthatjuk.

4.10.1 Aszinkron motor forgórész köri áramirányítás beavatkozással

Az 4.8. fejezetben már volt szó az áramirányítás kaszkádajtásról, ahol a forgórészhez diódás egyenirányító-híd csatlakozik, és ennek egyenfeszültségével tudjuk a szlip értékét változtatni. Az egyenirányító hatására azonban a normál üzemhez képest a motor veszteségei megnövekednek, és ezért a motorteljesítményt csökkentenünk kell.

A veszteséget növelő tényezők:

- ✚ Az egyenirányító kommutációs meddő teljesítményét a motornak kell fedeznie, emiatt romlik a motor teljesítménytényezője és nő a rézvesztés.
- ✚ Az egyenirányító az aszinkron motor forgórészébe felharmonikus áramokat kényszerít, és ezek szlipszeres értékei az állórészben is megjelennek, amelyek további rézvesztéseket okoznak.
- ✚ Az egyenáramú kör ellenfeszültsége is tartalmaz felharmonikusokat: ezek is növelik a veszteségeket.



4.71. ábra Forgórész köri ellenállás változtatás az egyenáramú körben

A felsorolt okok miatt az aszinkron motor teljesítményét kaszkád üzemben 4...8 %-kal kell csökkenteni.

Az áramirányítás kaszkádajtás esetén figyelembe kell vennünk még azt is, hogy az egyenirányító híd üzele miatt a motor billenő nyomatéka 0,827-szeresére csökken, ami a túlterhelhetőségi tartalék (M_B / M_n) csökkenését is jelenti.

A felharmonikus áramok hatásai a gép nyomatékában is megjelennek, és ún. lüktetőnyomatékokat hoznak létre, amelyek frekvenciája $f_m = 6 \cdot k \cdot s \cdot f_1$, ahol $k = 1, 2, 3, \dots$

Az így kapott felharmonikus frekvenciák nem tartalmazzák az állórész tekercselés által létrehozott felharmonikusokat, tehát csak szinuszos U_{i2} -re igazak (például $k = 1$ és $s = 1$ -nél $f_m = 300$ Hz. Kis szlipseknél a lüktető nyomatékok kellemetlen üzemzavarokat okozhatnak, ha egybeesnek a gép mechanikai rendszerének saját frekvenciájával.

Ha az áramirányítós kaszkádajtások esetén a gépoldali egyenirányítót vezérelhetőre cseréljük, vagy közvetlen áramirányító (ciklokonverter) csatlakozik a csúszógyűrűkhöz, akkor a gép fordulatszámát a szinkron alatti- és feletti tartományban egyaránt tudjuk változtatni. Ilyenkor lényegében két oldalról táplált aszinkron gépről beszélhetünk.

Áramirányítós forgórészközi beavatkozás még a forgórész körbe beiktatott ellenállás értékének szaggatós változtatása. Ebben az esetben a csúszógyűrűkhöz csatlakozó egyenirányító-híd egyenáramú oldalára egy ellenállást kötünk és ennek nagyságát egy szaggatóval folyamatosan tudjuk változtatni (lásd a 4.71a ábrát). A fordulatszám-nyomaték jelleggörbe változása hasonló, mint a hagyományos forgórészközi ellenállásos beavatkozásnál (4.71b ábra), ahol *bi* szakaszos üzemben a bekapcsolási viszonyszám. Ez a módszer azonban biztosítja a folyamatos fordulatszám változtatás lehetőségét.

4.10.2. Aszinkron motor állórészközi áramirányítós beavatkozással

Az aszinkron motorok indításánál már említettük a váltakozó áramú szaggatók alkalmazását. A szaggató kapcsolások azonban jól alkalmazhatóak a motor feszültségének változtatására állandósult üzemiállapotban is. Az állórészfeszültség a tirisztorok gyújtásszögének késleltetésével változtatható, ezért az állórészfeszültség és az állórészáram felharmonikusokat fog tartalmazni. A felharmonikusok a réz- és a vasveszteség növekedését eredményezik, valamint itt is fellép nyomatéklükteség, amely kis fordulatszámokon a hajtás egyenletes járását befolyásolhatja. A szaggatók alkalmazásánál a gyújtásszög késleltetés miatt a meddő teljesítmény növekedésével is számolnunk kell.

Az aszinkron motorok leggyakrabban alkalmazott fordulatszám változtatási módszere a frekvencia változtatása. Állórészközi beavatkozó szervként a statikus frekvencia átalakítók terjedtek el. Az aszinkron motorok fordulatszám változtatási lehetőségeinél (4.8. fejezet) már említettük, hogy a motor nyomatékának közel állandó értéken tartásához a gép fluxusának sem szabad változnia. Ez azt jelenti, hogy a frekvencia változtatásakor a kapocsfeszültséget is arányosan változtatnunk kell, mert az indukált feszültség egyenlet (4.2) értelmében a gép fluxusa:

$$\Phi = k \cdot \frac{U_i}{f_1} \approx k \cdot \frac{U_1}{f_1}. \quad (4.123)$$

A feszültség növelésének azonban határt szab a gép szigetelési rendszere és a vasveszteség növekedése, ezért a frekvenciával arányos növelést csak a névleges feszültség eléréséig célszerű betartani. A frekvencia további emelésekor a feszültséget állandó értéken tartjuk. Ez az előbbi egyenlet szerint azt jelenti, hogy a fluxus $\Phi \sim \frac{1}{f_1}$ arányban csökkenni fog.

A fluxus ilyen irányú változása (mezőgyengítés) a nyomaték csökkenését eredményezi. Ha a billenő nyomatékot vizsgáljuk (4.45 egyenlet) beláthatjuk, hogy

$$M_B \cong k \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (4.124)$$

mert a szinkron fordulatszám és a szórási reaktanciák összege is függ a frekvenciától.

A frekvencia és a feszültség arányos változtatásakor $M_B \cong \text{áll.}$, a névleges feszültség elérése után pedig ($U_1 \cong \text{áll.}$), a billenő nyomaték az

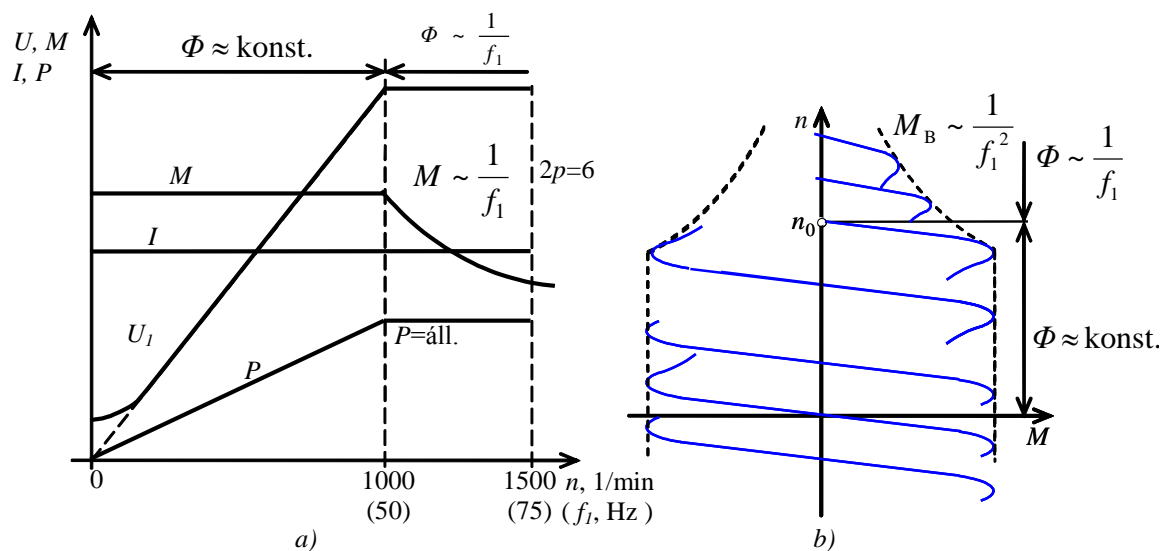
$$M_B \cong \frac{k_u}{f_1^2}, \quad \text{a terhelhetőség pedig az} \quad M \cong \frac{k_u}{f_1} \quad (4.125)$$

összefüggés szerint csökken.

Az 4.72a ábrában egy 6 pólusú motor esetére a frekvencia függvényében felrajzoltuk a feszültség, a billenő nyomaték, az áram és a teljesítmény változását, a 4.72b ábrában pedig a fordulatszám-nyomaték jelleggörbék alakulását.

Az aszinkron motorok táplálására szolgáló statikus frekvencia-átalakítók lehetnek:

- ✚ közvetlen frekvencia átalakítók,
- ✚ közbensőkörös feszültséginverterek,
- ✚ közbensőkörös áraminverterek.



4.72. ábra Aszinkron motorjellemzők változó frekvenciánál

A közvetlen frekvencia-átalakítóknál (ciklokonverterek) az aszinkron motor mindhárom fázisának kivezetését egy-egy ellenpárhuzamosan kapcsolt háromfázisú tirisztoros, természetes kommutációjú áramirányítóról tápláljuk. Hatütemű áramirányító-kapcsolás esetén a kimeneti frekvencia 0...25 Hz tartományban változhat.

A közbensőkörös inverterek esetén a hálózati feszültséget először egyenirányítjuk, majd ebből az egyenszintből állítunk elő (különböző inverter kapcsolásokkal) változó frekvenciát.

A feszültséginverterek esetén a motorra kényszerített jel a feszültség, az áraminvertereknél pedig az áram. A feszültség frekvenciával arányos változtatását impulzus-szélesség modulációval (ISZM) lehet elérni (lásd a 6.5. fejezetet).

Az áramirányítóknál fellépő felharmonikusok mind az álló-, mind a forgórészben jelentős többletveszteségeket okoznak: mind az állórészben, mind a forgórészben közel 10...20 %-os veszteségnövekedés jelentkezik a motor terhelésétől függetlenül.

A villamos gépekhez alkalmazott közbensőkörös invertereknél a szokásos frekvencia-tartomány 1...100 Hz (esetleg 1...400 Hz).

4.11. KÜLÖNLEGES ASZINKRON GÉPEK

4.11.1. Egyfázisú aszinkron motorok

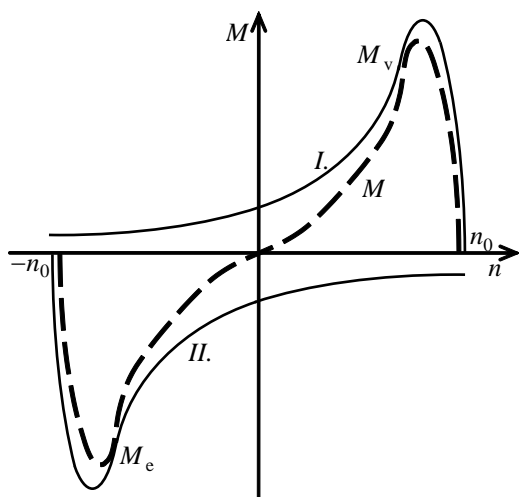
Az egyfázisú aszinkron motorok felépítése hasonló, mint a háromfázisúké. Különbség az állórész tekercselésnél adódik, mert az egyfázisú gépnél általában két tekercselés van: a

fő- és a segédfázis. A főfázis a kerület kétharmadát, a segédfázis pedig a maradék egyharmadot tölti ki. A tekercselések mágneses tengelye fél pólusosztásra, 90 villamos fokra helyezkedik el.

A segédfázis feladata az, hogy az egyfázisú váltakozó mágneses mező helyett a gépben forgó mező alakuljon ki. A ilyen gépek forgórésze rövidrezárt, mélyhornyú, vagy kétkalickás forgórész nem alkalmazható.

Az egyfázisú motorok alkalmazási területe igen széles: pl. háztartási gépek, ventilátorok, szivattyúk. Teljesítményük nem szokta meghaladni az 1...1,5 kW-ot.

Amikor csak a főfázist tápláljuk a hálózatról, akkor ez a tekercselés a gépben váltakozó



4.73. ábra Az egyfázisú aszinkron motor nyomaték jelleggörbéje

mágneses teret hoz létre. A váltakozó mágneses tér felfogható mint két, egymással szemben forgó, fél amplitúdójú forgó fluxus eredője. Amikor a két forgó fluxus azonos helyzetben van, akkor a változó (lűktető) mező amplitúdója maximális, amikor egymással ellenfázisban vannak a mező éppen zérus.

Amíg a forgórész áll, hozzá képest mindkét forgó mező azonos fordulatszámmal forog, és ugyanakkora feszültséget indukál, és áramot hoz létre. Mindegyik mező a forgórészt a saját forgásirányába akarja elfordítani, de a teljes szimmetria miatt a fellépő nyomatékok azonosak, vagyis a forgórész állva marad. Ezért az egyfázisú motornál nem alakul ki indítónyomaték.

Az egyfázisú motor működését könnyen megérthetjük, ha a motort két azonos, közös tengelyű, háromfázisú motorral helyettesítjük. Az I-es gép fázissorrendje ellentétes a II-es gép sorrendjével, ezért a két forgó mező ellentétes irányba akarja forgatni a két forgórészt, a gépcsoport nem tud elindulni.

Az 4.73. ábrán a két háromfázisú gép nyomaték-fordulatszám jelleggörbáját előjel-helyesen rajzoltuk fel. Pontvonallal az eredő nyomaték jelleggörbét jelöltük.

Látható, hogy ha valamelyik irányban forgásba hozzuk a forgórészt, akkor az eredő nyomaték már nem zérus és a motor a terhelésnek megfelelő fordulatra fut fel. A forgórészrel egyirányban „vele” forgó mező hajtónyomatékot ad, az „ellene” forgó pedig fékezőnyomatékot.

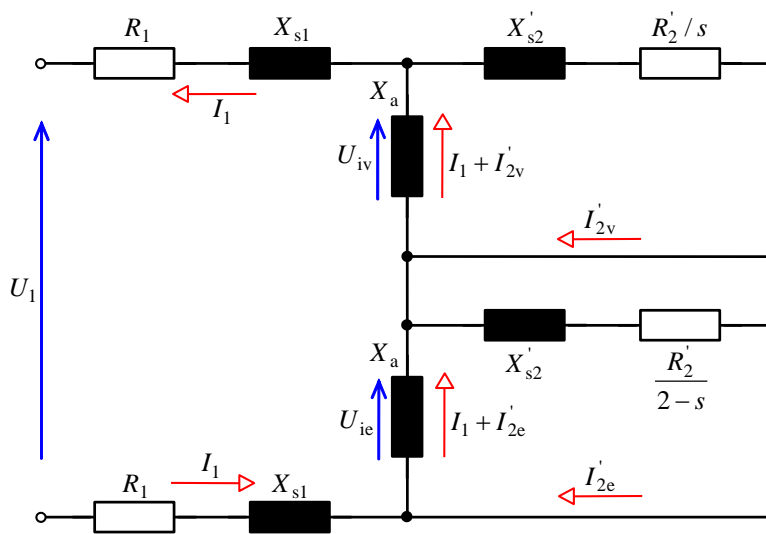
Ha a forgórész valamelyik irányban n fordulatszámmal forog, akkor a vele forgó mezőhöz képest a szlip:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad \text{és} \quad n = n_0 \cdot (1 - s).$$

Az ellene forgó mezőhöz képest a szlip:

$$s_e = \frac{n_0 + n}{n_0} = \frac{n_0 + n_0 \cdot (1 - s)}{n_0} = 2 - s. \quad (4.126)$$

Az egyfázisú gépre a helyettesítő vázlatot felépíthetjük úgy, hogy az s szlippel és a $2-s$ szlippel járó motorok helyettesítő vázlatát sorbakötjük, amint ez az 4.74. ábrán látható.



4.74. ábra Az egyfázisú aszinkron motor helyettesítő vázlata

Az I'_{2v} és az I'_{2e} forgórészáram a két forgómezővel összesen négy nyomatékosztetőt hoz létre. Ebből kettő, mégpedig az I'_{2v} áram és az ellenforgó mező, valamint az I'_{2e} áram és az együttforgó mező nyomatéka középértékben nullát ad. A két megmaradó összetevő: az I'_{2v} áram és az együttforgó mező, valamint az I'_{2e} áram és az ellenforgó mező nyomatékának e-

lőjelhelyes összege adja az egyfázisú motor eredő nyomatékát. Az egyes összetevőket a légrésteljesítményből (a vasvesztéget elhanyagolva) határozhatjuk meg:

$$M_v = \frac{R_2'}{\omega_0} \cdot \frac{I_{2v}'^2}{s}, \quad \text{és} \quad M_e = -\frac{R_2'}{\omega_0} \cdot \frac{I_{2e}'^2}{(2-s)}. \quad (4.127)$$

Az eredő nyomaték:

$$M = M_v + M_e = \frac{R_2'}{\omega_0} \left(\frac{I_{2v}'^2}{s} - \frac{I_{2e}'^2}{2-s} \right). \quad (4.128)$$

Ebből az egyenletből is láthatjuk, hogy $s=1$ esetén az egyfázisú motornak nincs nyomatéka, ezért van szükség a már említett segédfázisra.

A segédfázis a főfázissal a térben 90° -os villamos szöget zár be. Ebben az esetben (ha az áramok között is biztosítjuk a 90° -os időbeni eltolást, valamint a gerjesztések azonoságát akkor) forgómező jön létre. Ez a fáziseltolás a legkönnyebben a segédfázis áramkörébe iktatott kondenzátorral valósítható meg.

A kondenzátoros motorokat és az alkalmazott kondenzátorokat kétféle üzemre lehet méretezni:

✚ Üzemi kondenzátoros motorok: a segédfázisba a kondenzátor állandóan be van kötve, így a névleges nyomaték 30...50 %-át kitevő indítónyomatékot lehet elérni. E megoldás előnye, hogy nincs szükség érzékelőre és kapcsolóra. Az 4.75. ábrán láthatjuk a motor kapcsolását és a szimmetrikus üzemre vonatkozó vektorábrát.

Az üzemi kondenzátor kapacitása az alábbi képlettel becsülhető:

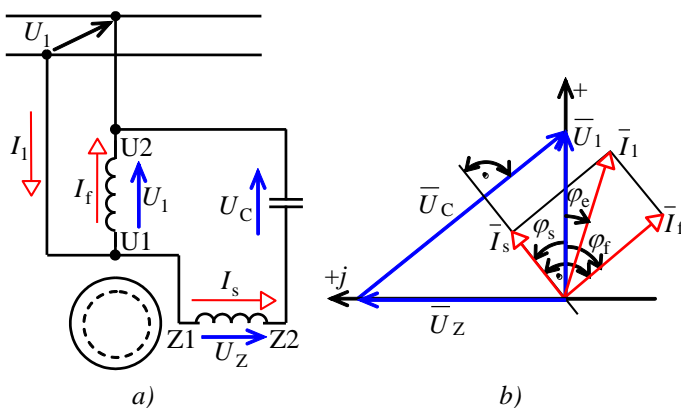
$$C_{\text{ü}} = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2} \cdot \quad (4.129)$$

✚ Indítókondenzátoros motorok: a kondenzátor kapacitása az üzeminél jóval nagyobb lehet a rövid ideig történő bekapcsolás miatt. Az indítónyomaték ekkor a névleges érték kétszerese is lehet. A forgórész felgyorsulása után a kondenzátort ki kell kapcsolni. Ezt általában a főfázistekercseléssel sorbakapcsolt áramrelével oldják meg. A nagy bekapcsolási áram hatására a relé meghúz és a segédfázis áramkörét zárja, majd a forgórész felgyorsulása után (az áram csökkenésekor) a beállított elengedési értéknél a segédfázist kiiktatja. Az indítókondenzátor értékét az alábbi tapasztalati képlettel becsülhetjük meg:

$$C_i \approx 5 \cdot \frac{P}{100}, \quad (4.130)$$

ahol C_i az indítókondenzátor kapacitása μF -ban, P a tengelyteljesítmény W-ban.

A háromfázisú aszinkron motorok esetén előfordulhat, hogy az egyik fázisvezető megszakad. Ilyenkor a motornak olyan üzemi tulajdonságai lesznek, mint az egyfázisú motoroknak. A háromfázisú üzemhez képest csökken a nyomaték, a hatásfok és a teljesítménytényező, a motor gyakorlatilag a névleges teljesítményének csak közel 60 %-ával terhelhető.



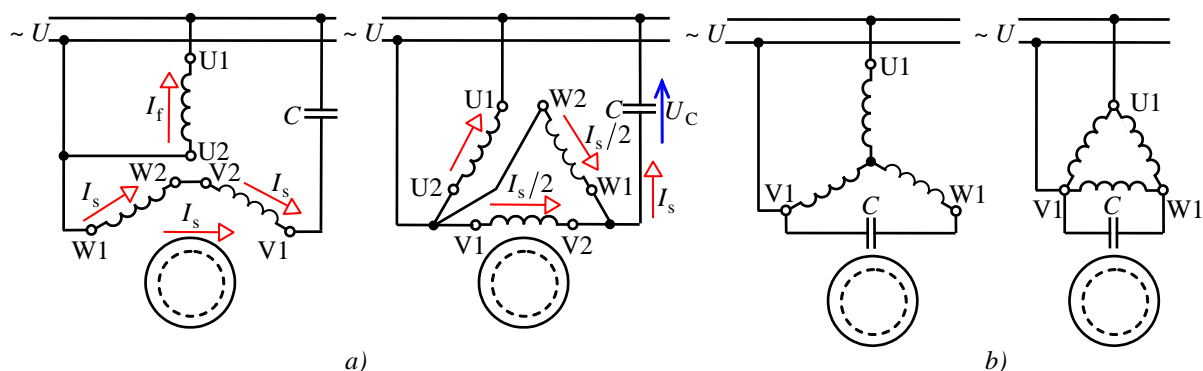
4.75. ábra A segédfázisos motor kapcsolási vázlata és a szimmetrikus üzemre vonatkozó vektorábrája

Az is előfordul, hogy a háromfázisú motorhoz nem áll rendelkezésünkre a háromfázisú hálózat, hanem csak az egyfázisú. Ekkor célszerű a motor kapcsaira kondenzátort kötni, mert közel szimmetrikus üzem hozható létre és javulnak az üzemi viszonyok.

Háromfázisú, 400 V-os motor segédfázisosként való üzemeltetésénél az állórész fluxus értékének közelítő megtartására kell törekedni,

azaz a fázisfeszültség értéke lehetőleg maradjon meg. Hat kivezetéses állórész tekercselésnél erre megvan a lehetőség. A 4.76a ábrán az Y kapcsolású motornál a normál segédfázisos motorhoz hasonló helyzet van, Δ kapcsolásnál a fluxus csökken.

Az 4.76b ábrán tüntettük fel három kivezetés esetén a csillag-, illetve a delta kapcsolásnál alkalmazható kondenzátoros kapcsolást.



4.76. ábra A háromfázisú aszinkron motor egyfázisú alkalmazása

A kondenzátor kapacitásának gyakorlati értéke $75 \mu\text{F/kW}$ a leadott teljesítményre vonatkoztatva. Ekkora kondenzátor értéknél elérhető, hogy $M_i \approx 0,5 \cdot M_n$, és üzem közben a motor a háromfázisú névleges nyomaték közel 80 %-ával terhelhető.

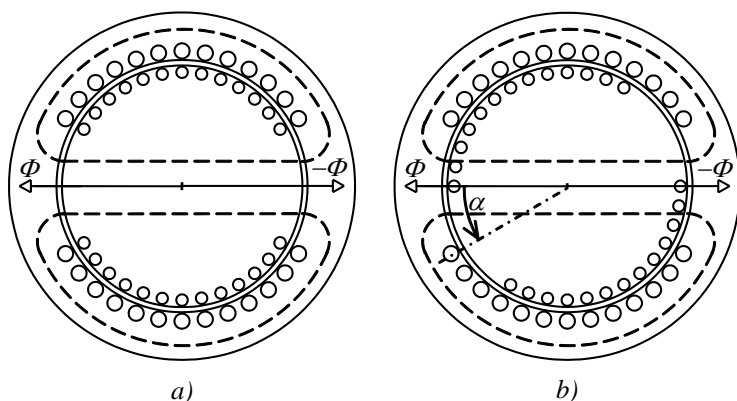
4.11.2. Indukciós szabályozók

Az indukciós szabályozók egy-, vagy háromfázisú feszültség nagyságának és fázis-helyzetének fokozatmentes változtatására alkalmas forgómezős transzformátorok. Felépítésükben hasonlítanak egy rögzített forgórészű aszinkron géphez. A forgórészt önzáró csigahajtással lehet a kívánt helyzetbe forgatni.

Az indukciós szabályozók – amennyiben a forgórészen vesszük le a szabályozott feszültséget – nem csúszógyűrűs kivitelben készülnek, mert az álló állapot miatt a kefék hozzásültnének a gyűrűhöz. Ezért a forgórész tekercseléséhez hajlékony kábelek csatlakoznak, amelyek a szükséges elfordulást még követni tudják.

Figyelem! Az indukciós szabályozók hűtéséről külön kell gondoskodni, általában a primer feszültségről táplált, motorral hajtott ventilátorokkal.

4.11.2.1. Egyfázisú indukciós szabályozók



4.77. ábra Egyfázisú indukciós szabályozó

górészben a maximális feszültség indukálódik (4.77a ábra).

Mind az állórész, mind a forgórész egyfázisú tekercseléssel készül (azaz csak a kerület 2/3-a van betekercselve). Ha a forgórész és az állórész tengelye azonos helyzetű, akkor az állórésztekercselés lüktető mágneses mezeje – a szórási fluxusokat kivéve – kapcsolódik a forgórésztekercselés meneteivel, így a for-

Amennyiben a forgórészt α szöggel elfordítjuk, akkor a forgórész tekercselésében indukált feszültség $\cos\alpha$ -val arányos (4.78b ábra). Tehát a legnagyobb a szekunder kör indukált feszültsége, ha $\alpha = 0^\circ$. Nem indukálódik feszültség, ha $\alpha = 90^\circ$, majd a forgórészt tovább forgatva a feszültség iránya megfordul és $\alpha = 180^\circ$ -nál kapjuk a negatív maximumot. A feszültség $+U_2$ -től $-U_2$ -ig változik.

A forgórészt terhelve és a forgórészgerjesztést két összetevőre bontva egy keresztmező jön létre a gépben, melyet célszerű megszüntetni. Az állórészben elhelyezett csillapítótekercs, amelynek tengelye merőleges a primer tekercselés tengelyére, a keresztmezőt lényegesen csökkenti, mert gerjesztése a mágneses mezőt megszüntetni igyekszik. Az egyfázisú indukciós szabályozókat általában takarékkapcsolásban használjuk, ilyenkor a szabályozott feszültség:

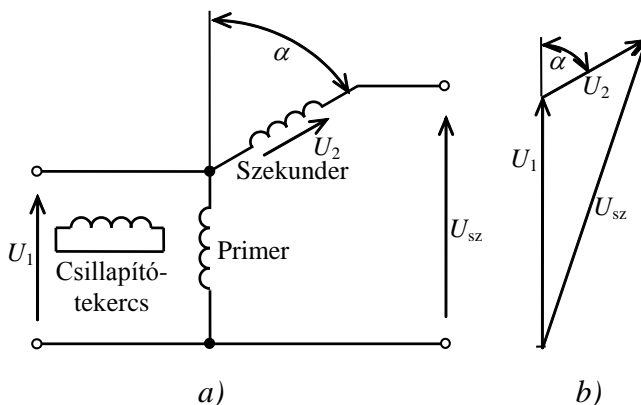
$$\bar{U}_{sz} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 \quad \text{és} \quad \bar{U}_{sz} = \bar{U}_1 - \bar{U}_2$$

között változtatható. A takarékkapcsolású, egyfázisú indukciós szabályozó kapcsolását és vektorábráját egy helyzetben az 4.78. ábrán láthatjuk.

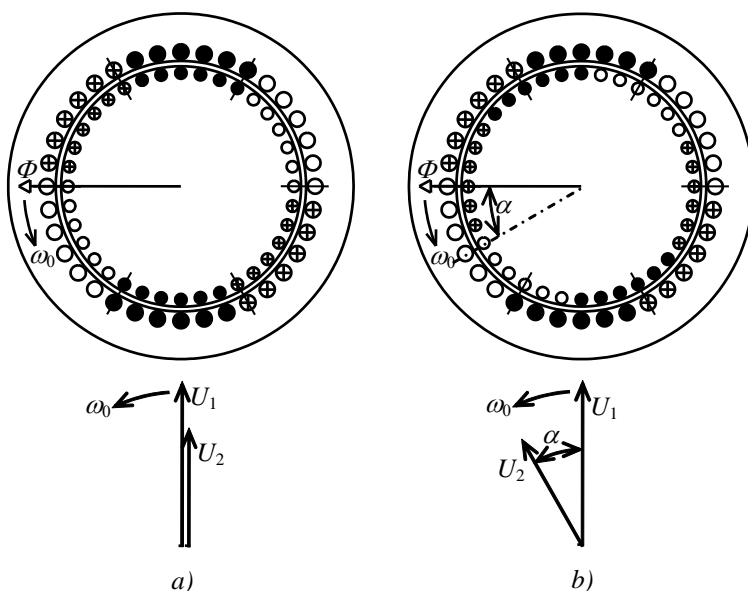
4.11.2.2. Háromfázisú indukciós szabályozók

Mind az állórész, mind a forgórész háromfázisú tekercseléssel készül. Alaphelyzetben az összetartozó fázisok tekercsei szemben állnak egymással (4.79a ábra). Az állórészre kapcsolt háromfázisú feszültségrendszer forgó fluxust gerjeszt. A forgó fluxus a forgórész tekercselésében az áttételnek megfelelő feszültséget indukál. Az alaphelyzetben az álló- és forgórész feszültsége fázisban van egymással.

Forgassuk el α szöggel a forgó fluxus irányában a forgórészt. Amennyiben a gép kétpólusú, akkor az α szög nem csak térbeli, hanem villamos elfordulási szöget is jelent (4.79b ábra). Az elforgatásnak az lesz a következménye, hogy

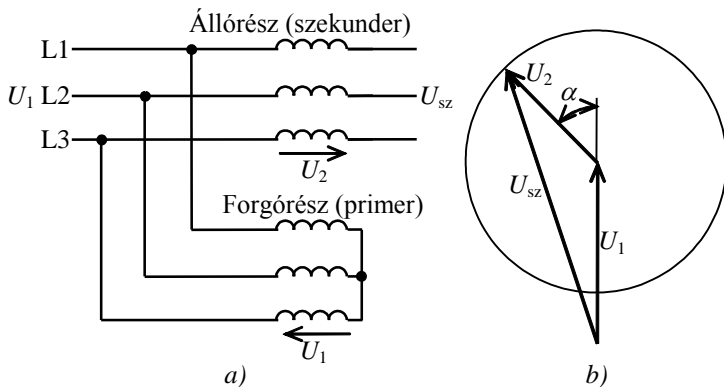


4.78. ábra Egyfázisú indukciós szabályozó kapcsolása és vektorábrája



4.79. ábra. Háromfázisú indukciós szög szabályozó

a forgó fluxus a forgórész egyes fázistekercseit α villamos szöggel később metszi, mint alaphelyzetben. A forgó fluxus most is az áttételnek megfelelő feszültséget indukál, mert nagysága nem változik, de ez a feszültség most α szöggel késik az állórész feszültségéhez képest. Természetesen, ha a forgó fluxussal ellentétes irányban forgatjuk el α szöggel a forgórészt, akkor nem késni, hanem sietni fog a forgórészben indukált feszültség.



4.80. ábra Háromfázisú indukciós feszültség szabályozó kapcsolása és vektorábrája

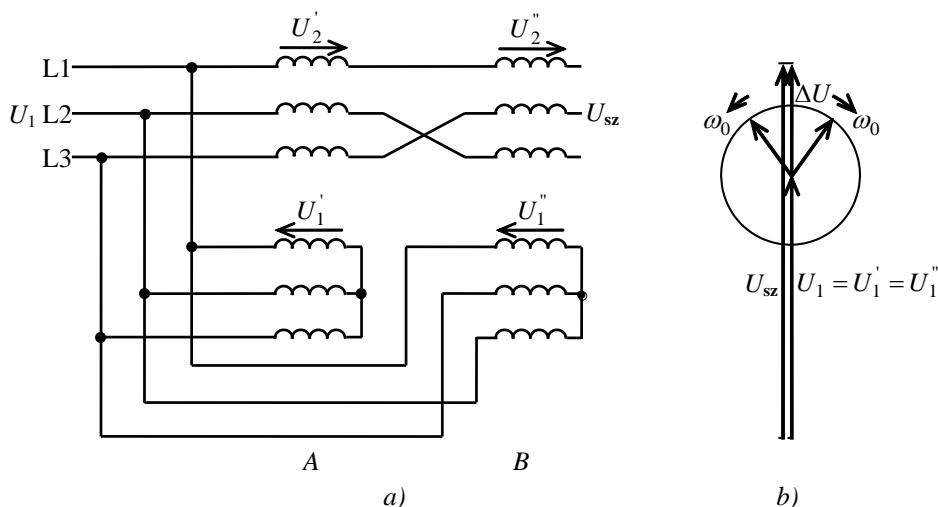
Az indukciós szabályozónak ezt a fázisforgató hatását hasznosítjuk, ha mérési vagy szabályozástechnikai céllal folyamatosan kell a feszültség fázisszögét változtatni. Így pl. a wattmérők és fogyasztásmérők hitelesítésekor, amikor „műterheléssel” más és más $\cos\varphi$ -t kell előállítanunk. Ilyenkor a hitelesítendő műszer áramtekercsét kis feszültségről tápláljuk, a feszültségtekercset

pedig az indukciós szabályozó forgórészére kapcsoljuk.

Az indukciós szabályozó folyamatos feszültségszabályozásra is alkalmas. Ilyenkor az álló- és forgórész tekercseit takarékkapcsolásba kötjük, mégpedig úgy, hogy a forgórész tekercseit rákötjük a hálózatra, az állórész tekercseit pedig a hálózattal sorbakapcsoljuk (4.80. ábra). Az állórészben indukált \bar{U}_2 feszültség vektorosan hozzáadódik a hálózat \bar{U}_1 fázisfeszültségéhez. A fogyasztó így $\bar{U}_{sz} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2$ feszültséget kap.

A fogyasztó feszültsége akkor a legnagyobb, amikor $\alpha = 0^\circ$ és legkisebb, amikor $\alpha = 180^\circ$. A vektorábrából (4.80. ábra) az is kitűnik, hogy a szabályozott feszültség csak $\alpha = 0^\circ$ és $\alpha = 180^\circ$ esetén van fázisban a betáplálási feszültséggel (\bar{U}_1).

Az ismertetett egyszerű indukciós szabályozónak nemcsak az a hibája, hogy a szabályozandó és a szabályozott feszültség nincsen fázisban egymással, hanem az is, hogy a terhelt szabályozó tengelyén nagy nyomaték keletkezik. Ezt a nyomatékot a csigahajtásnak



4.81. ábra Háromfázisú ikerindukciós szabályozó

kell ellensúlyoznia. Ezért a csigahajtást erősen kell méretezni, és a forgórész nehezen mozgatható.

E hibák egyszerűen kiküszöbölhetők az ún. ikerindukciós szabályozóval. Két háromfázisú indukciós szabályozót tengelykapcsolóval kötünk össze, az A szabályozót normális fázissorrendben, a B szabályozót pedig fordított fázissorrendben kötjük a hálózatra. Annak érdekében, hogy a szekunder feszültségek fázissorrendje ne változzék, a B szabályozó forgórész körében is fel kell két fázist cserélni (4.81a ábra).

A két szekunder feszültség összege $\Delta \bar{U} = \bar{U}_2' + \bar{U}_2''$, és most mindig fázisban van a szabályozandó \bar{U}_{sz} feszültséggel (4.81b ábra), minthogy a két gép nyomatéka egymással szembe mutat, a forgórészek állításához szükséges csigahajtás könnyű szerkezet lehet, és kis nyomatékkal állítható a forgórész helyzete.

4.11.3. Lineáris motorok

Az első lineáris motort Andre- Marie Amper készítette el 1821-ben kísérletezés közben. Két higannyal töltött vályút fémvezetővel hidalt át, és a vályúk végét egy telephez csatlakoztatta. Az áthidalás a telep polaritásától függetlenül mindig egy irányban mozdult el. Ez után a kísérlet után hosszú évtizedek teltek el, a forgó gépek ipari alkalmazásának elterjedését követően a századforduló környékén foglalkoztak újra a lineáris motorokkal. A szövöszék vetélőjénél alkalmaztak lineáris aszinkron motort, majd felvetődött a vasúti vontatásban történő alkalmazás lehetősége. Az következő lökés a technikai fejlődésben az 1950-es évektől következett, különböző testek felgyorsítására, folyékony fémek továbbítására szolgáló lineáris motorokat fejlesztettek, és 1971-ben megépült az első közforgalmi közlekedési eszköz, amit lineáris motor hajtott a Tokyo és Osaka közötti vasútvonalon. Azóta a lineáris motorok fejlődése töretlen és egyre többféle kialakítással találkozhatunk. A 2003-ban üzembe helyezett lineáris motorral hajtott, mágneses lebegtetésű Sanghai-i Transrapid felállította a közforgalmú vasutak új sebességi világrekordját 501 km/h-val.

A lineáris motor olyan villamos motor, amely a felvett villamos energiát – kiegészítő mechanizmusok közvetítése nélkül – alakítja át haladó mozgás mechanikai energiájává.

A lineáris motorok elvi kialakításai:

Sík lineáris motorok: A sík lineáris motor keletkezését szemléletesen úgy képzelhetjük el, hogy a közönséges motort a tengelyéig terjedő félsíkkal felvágjuk, majd a lemeztestet kiterítjük úgy, hogy légréssel elválasztott sík aktív felületek jönnek létre.

Tehát a lineáris motor primer része téglatest alakú lemezelt vasmagból áll, amelynek hornyaiban helyezkedik el a háromfázisú elosztott tekercselés. A szekunder rész pedig szintén téglatest alakú lemezsomagot tartalmaz, amelynek hornyaiban a forgórész kalicka rúdjai kapnak helyet. A primer részt háromfázisú árammal táplálva a sík felépítés következtében haladó mágneses tér keletkezik. A haladó mágneses tér a szekunder rész kalickáiban áramot indukál. A szekunder rész kalicka áramainak és a haladó mágneses térnek az egymásra hatásából olyan erő keletkezik, amely a mozgórész egyenes vonalú mozgását eredményezi. A mozgórész szekunder-, de akár a primer rész is lehet.

A lineáris motoroknak eddig legalább 232 különböző típusa létezik, amelyek közül többnek még nincs ipari kivitele. Ezt a jelentős típusszámot három fő csoportba sorolhatjuk:

- ✚ lineáris indukciós-, vagy aszinkron motorok;
- ✚ lineáris szinkron motorok;
- ✚ lineáris léptető- és felületi motorok.

A továbbiakban a lineáris indukciós (aszinkron) motorokkal foglalkozunk.

A szekunder rész lehet:

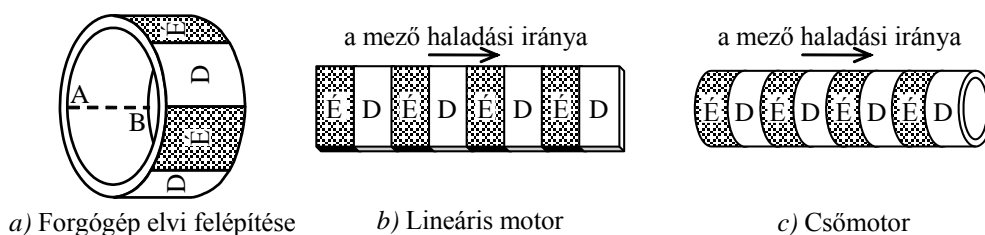
- ✚ lemezelt vasmagú, kalickás;
- ✚ tömör ferromágneses anyagú;
- ✚ alumínium-, vagy vörösréz sín.

A mozgó primer, illetve mozgó szekunder részű lineáris motorok esetén lehetőség van arra, hogy a munkaterület növelése érdekében nyújtott primer-, illetve nyújtott szekunder részű motorokat készítsünk.

További szerkezeti kialakítási lehetőség, hogy a primer rész a szekunder rész egyik oldalán helyezkedik el, vagy lehetőség szerint mindkét oldalra teszünk primer részt. A kétoldalú motorok előnye, hogy megszűnik a mágneses vonzás a primer és szekunder rész között, amely az egyoldalú motornál igen jelentős. A kétoldalú lineáris motornál a B mágneses indukció értéke azonos Θ gerjesztés mellett az egyoldalúnak kétszerese, ezért azonos nagyságú légrés és azonos konstrukciós paraméterek mellett a kétoldalú motor teljesítménye az egyoldalúnak négyszerese.

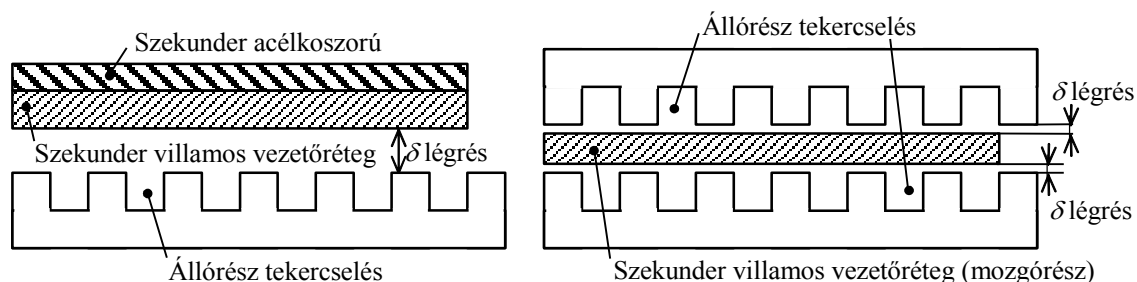
Cső mozgórészű lineáris motorok: a forgó indukciós motort úgy is átalakíthatjuk, hogy az előzőek szerint sík lineáris motorrá alakítjuk, majd a kapott síkot a mágneses tér irányával párhuzamos tengely körül hajtjuk össze, ekkor az állórész cső alakú lesz. Az állórész most újra hengeres felépítésű lesz, de a szekunder rész nem forgó, hanem haladó mozgást végez. A cső mozgórészű motornak az előnye, hogy kis légréssel működhet. Ez egy lehetőség, hogy a mozgó vasmagra egy rézhengert helyezve kapjuk a szekunder részt.

A 4.82 ábrán a lineáris- és a csőmotor származtatását láthatjuk. A 4.83 ábra pedig az egyoldalú-, illetve a kétoldalú lineáris motor vázlatát mutatja.



4.82. ábra A szinkron lineáris motor származtatása forgó gépből

A lineáris motorok esetén a mozgórész visszatérítését a haladó mágneses tér irányának megfordításával, a fázissorrend megváltoztatásával érhetjük el.



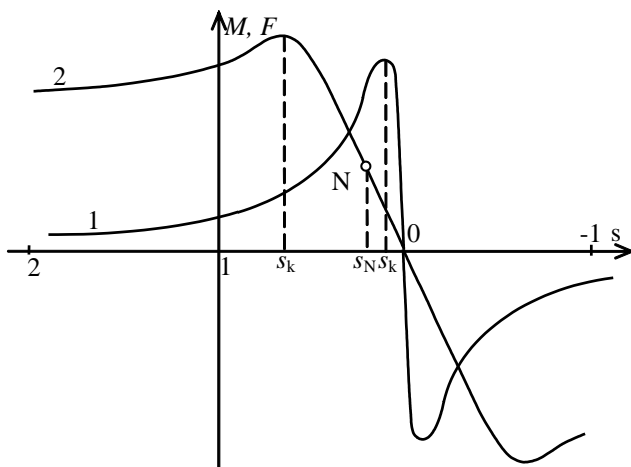
4.83. ábra Az aszinkron lineáris motor felépítése

a) egyoldalú motor; b) kétoldalú motor

Lineáris szerkezetnél a primer rész által létrehozott haladó mezőnek van kezdete, ahol ez a keletkezik, és vége, ahol megszűnik, valamint a szekunder résznek egy pontja, ahol belép a gerjesztett részbe, majd onnan kilép. Ezek a jelenségek az ún. véghatások, melyeknek oka a mágneses kör szerkezeti elrendezése, és a szekunder rész mozgása.

A véghatások következményei:

- ✚ a légrés mentén a mágneses indukcióeloszlás egyenlőtlen és a sebességtől függ;
- ✚ járulékos veszteségek lépnek fel;
- ✚ csökken a vonóerő, és ez a csökkenés a motor sebességétől valamint a pólusok számától függ.



1 forgógép jelleggörbéje; 2 nem ferromágneses vezető rétegű lineáris motor jelleggörbéje

4.84. ábra Mechanikai jelleggörbe: a nyomatéknak és a vonóerőnek a szliptól való függése

nikai jelleggörbéje hasonlít a forgógép nyomaték-szlip jelleggörbéjéhez, mint azt a 4.84. ábrán láthatjuk.

A lineáris motorok előnyei:

- ✚ gyakorlatilag korlátlan lökethossz;
- ✚ nagy sebesség (10...20 m/sec.);
- ✚ nagy gyorsulás (kb. 10 g);
- ✚ nagy pontosság (mikron nagyságrend);
- ✚ nincs kopás;
- ✚ karbantartás-mentesség.

A lineáris motorok működési elve megegyezik a forgó motorokéval, amiből származtattuk. Felépítésük miatt azonban nem forgatónyomatékról és fordulatszámokról beszélhetünk, hanem kifejtett erőről és sebességről.

A szinkron sebesség:

$$v_0 = 2 \cdot f \cdot \tau_p, \quad (4.131)$$

ahol τ_p a pólusosztás.

Most is beszélhetünk szlipről:

$$s = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (4.132)$$

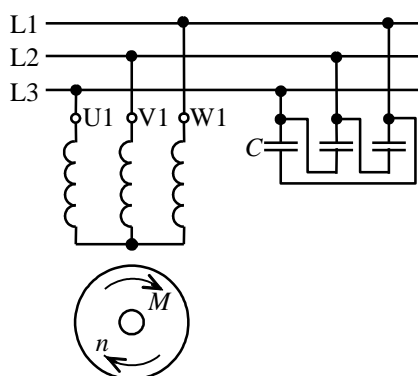
A lineáris indukciós motor mecha-

A lineáris motorok hátrányai:

- ✚ a gerjesztett részben jelentős veszteségek keletkeznek;
- ✚ burkolattal kell védekezni a szennyeződések ellen.

4.11.4. Aszinkron generátorok

A 4.7.2 fejezetben már foglalkoztunk az aszinkron gépek generátoros üzemével. Amennyiben a gép a hálózatra van kapcsolva, és a tengely fordulatszáma meghaladja a



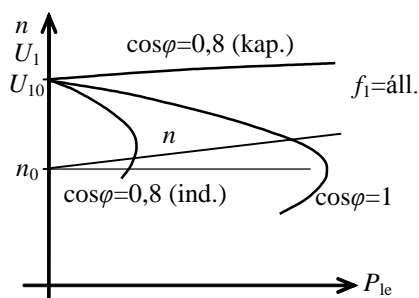
4.85. ábra Önálló üzemű aszinkron generátor kapcsolása

szingron fordulatszámot, akkor a gép generátor üzembe kerül. A meghajtómotor wattos teljesítményét továbbítja a hálózatba, de a gép működéséhez, a fluxus fenntartásához meddő teljesítmény szükséges. Ezt a meddő teljesítményt a gép a hálózatról veszi fel, ahol szinkron generátorokkal dolgozik együtt.

Az aszinkron gép azonban önállóan működő generátorként is üzemelhet. Ez a gép is rendelkezik remanens fluxussal, és ha kapcsaira kondenzátorokat kötünk és a forgórészt a szinkron fordulatszámmal forgatjuk, akkor a gép felgerjed az üresjárási jelleggörbe és a kondenzátor X_C reaktanciája által meghatározott egyenes közös pontjába, hasonlóan az egyenáramú söntgenerátorhoz. A fluxus fenntartásához szükséges meddő teljesítményt a kondenzátor szolgáltatja. Az indukált feszültség frekvenciáját az $f_1 = \frac{p \cdot n}{1 - s}$ egyenlet határozza meg.

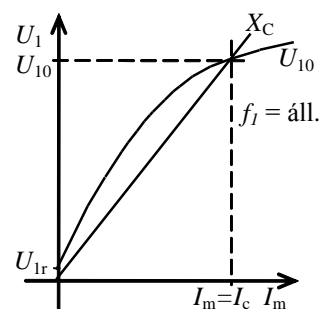
A 4.85 ábrán láthatjuk az önálló üzemű aszinkron gép kapcsolását, míg a 4.86 ábra a feszültség beállítását mutatja.

Terhelésnél a kondenzátornak kell fedeznie a fogyasztó meddőigényeit is, emiatt a gép egy adott terhelőáramnál legerjedhet.



4.87. ábra Önálló üzemű aszinkron generátor terhelési jelleggörbéi

Az aszinkron gép azonban önállóan működő generátorként is üzemelhet. Ez a gép is rendelkezik remanens fluxussal, és ha kapcsaira kondenzátorokat kötünk és a forgórészt a szinkron fordulatszámmal forgatjuk, akkor a gép felgerjed az üresjárási jelleggörbe és a kondenzátor X_C reaktanciája által meghatározott egyenes közös pontjába, hasonlóan az egyenáramú söntgenerátorhoz. A fluxus fenntartásához szükséges meddő teljesítményt a kondenzátor szolgáltatja. Az indukált feszültség frekvenciáját az $f_1 = \frac{p \cdot n}{1 - s}$ egyenlet határozza meg.

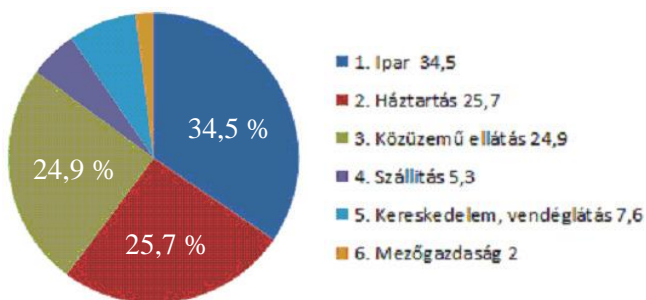


4.86. ábra Önálló üzemű aszinkron generátor felgerjedése

A 4.87 ábra mutatja az önálló üzemű aszinkron generátor terhelési jelleggörbéit $U_1 = f(P_{1e})$. Látható, hogy a feszültség változása erősen függ a terhelés jellegétől. A feszültséget nehéz egy adott értéken tartani, mert ehhez a fordulatszámot és a kondenzátorok által szolgáltatott meddőteljesítményt is változtatni kell. Ezért az ilyen generátorokat kisebb teljesítménynél használjuk, ahol nem támasztanak nagy igényeket a feszültség minőségi jellemzőivel szemben.

4.12. ENERGIATAKARÉKOS MOTOROK

Az Európai Unióban 1986 óta a termelési folyamat szerves részévé vált a környezetvédelem. Az Unió 1997-ben célul tűzte ki a fenntartható fejlődést, ami tulajdonképpen a közel harminc évvel korábban a Római Klub által megfogalmazott cél újradefiniálása. 2008-ban pedig jóváhagyta az úgynevezett „energia-klíma csomagot”, amelyben vállalta, hogy a szén-dioxid gázok kibocsátását 20 százalékkal (nemzetközi egyetértés esetén 30 százalékkal), az energia fogyasztását pedig szintén 20 százalékkal csökkenti a megújuló energiák alkalmazása révén. Ennek kapcsán az Unió csökkenteni kívánja a közlekedésből származó kibocsátásokat és elkötelezte magát az energiahatékonyság növelése mellett.



4.88. ábra A Magyarország-i energiafelhasználás %-os megoszlása

Ennek eredményeként hozzáfogtak az energiatakarékos világítási berendezések és aszinkron motorok bevezetéséhez.

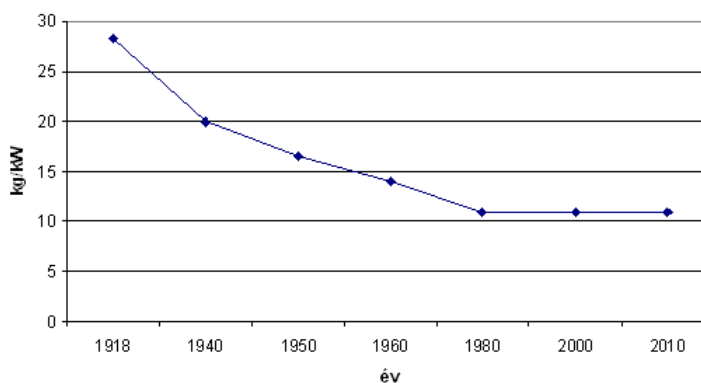
A továbbiakban bemutatjuk ezt az energetikai szempontból igen jelentős területet, a villamos motorok hatékonyságával kapcsolatos előírásokat, eredményeket.

Magyarország energiafelhasználását mutatja be a 4.88. ábra, amiből láthatjuk, hogy az ipar 34,5 %-al szerepel. A felmérések szerint az ipari energiafelhasználás 70 %-át a villamos motorokkal ellátott hajtástechnikai berendezések fogyasztják el.

Tovább növeli a villamos motorok energiahatékonyságának fontosságát, hogy a második legnagyobb fogyasztóként megjelenő háztartásokban szintén jelentős mennyiségben szerepelnek a háztartási villamos gépek (25,7 %).

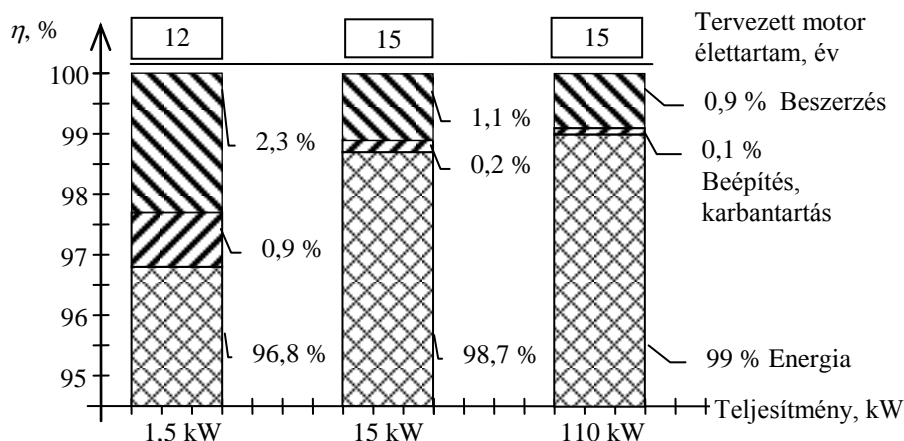
A jó hatásfokú motorok tulajdonképpen azt biztosítják, hogy egy adott feladatot kevesebb energiafelhasználással végezhetünk el.

A villamos gépek gyártását a 70-es évek végéig a kihasznált-ságra való törekvés jellemezte, az 1910-es évektől kezdve a kg/kW érték folyamatos csökkenését láthatjuk az első, illetve a második olajválság bekövetkeztéig. Az elméleti minimumot akkor az 5 kg/kW értékre becsülték. A 4.89 ábrából láthatjuk, hogy a trend megállt, valószínűleg egy kis növekedés is befog következni.



4.89. ábra Az 5,5 kW-os IP44-es aszinkron gépek kihasználtságának változása

Az energiatakarékosság még fontosabb szerepet kap, ha vizsgáljuk a villamos hajtások életciklusát. A hajtás életciklusa alatt összehasonlítjuk a beszerzés, a beépítés és karbantartás, valamint az élettartam alatt a felhasznált energia költségeit. A 4.90. ábra mutatja három különböző teljesítményű gépnél az életciklus költségeinek megoszlását.



4.90. ábra A villamos hajtások életciklus költsége %-os bontásban

Láthatjuk, hogy az életciklus alatt a felhasznált energia költségei meghaladják az összes költség több mint 96...99 %-át, tehát elsődleges szempont az energiahatékonyság.

Az energia megtakarítás főbb előnyei:

- A magas hatásfokú motorok biztosítják, hogy a megtakarított energiát nem fogyasztjuk el, tehát azt elő sem kell állítani.
- Amennyiben a hajtásokat elektronikával együtt alkalmazzuk (inverterről táplált aszinkron motorok, vagy állandómágnesű szinkron szervomotorok), akkor az üzemeltetés során további, nagyon jelentős energiamegtakarítás érhető el.
- Fontosnak tartjuk, ismereteink szerint egy eddig elhanyagolt harmadik szempont vizsgálatát is. Ennek lényege, hogy a magas hatásfokú motorok melegevése átlagosan 30 °C-al kisebb (ez vonatkozik a tekercselésre és a csapágyak hőmérsékletére egyaránt), ennek pedig egyenes következménye az élettartam jelentős növekedése.

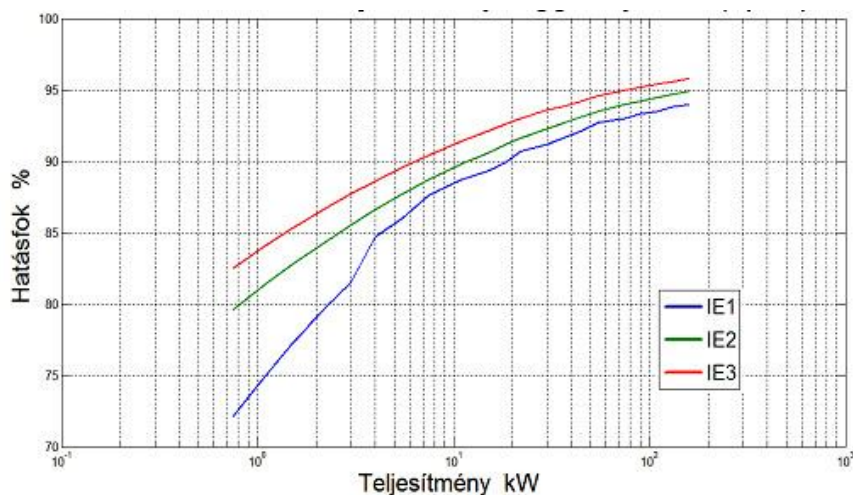
A hatásfok osztályok jelölése		Összehasonlítás a CEMEP osztályozással	
Hatásfok	Kód	Hatásfok	Logo
Super Premium	IE4	-	-
Premium	IE3	-	-
Magas	IE2	magas	EFF1
Standard	IE1	javított	EFF2
Standard alatt	nincs jelölés	normál	EFF3

4.1. táblázat Az új IEC és a régi CEMEP előírások összehasonlítása

A 2008. évben elfogadott új IEC 60.034-30 szabvány szerint négy új csoportba osztották a villamos motorokat a minimálisan szükséges hatásfok értékek szerint. Elképzelhető, hogy a kidolgozás alatt lévő negyedik csoportban előírt hatásfok értékeket csak állandómágneseű motorcsaláddal tudják teljesíteni a motor gyártók.

A 4.1. táblázat mutatja az új IEC és régi CEMEP előírásokat, valamint azok összehasonlíthatóságát.

A későbbiekben megadott 4.3. táblázatból kiemeltük a $2p = 4$ pólusú, 50 Hz-es motorokra vonatkozó értékeket és a 4.91. ábrában a tengely teljesítmény függvényében ábrázoltuk a három IE-s jelleggörbét.



4.91. ábra Az új IE sorozatú jelleggörbék a tengelyteljesítmény függvényében

4.12.1. Az energiatakarékos villamos motorok típusai

4.12.1.1. Aszinkron (indukciós) motorok

Az iparban leggyakrabban előforduló gépek. Az aszinkron gépek veszteségeinek megoszlása egy adott motortípusnál (4.2. táblázat):

Üresjárási veszteségek	Vasvesztés	18 %
	Súrlódási- és ventilációs veszteség	10 %
Terheléstől függő veszteségek	Állórész tekercselési veszteség	34 %
	Forgórész veszteségek	24 %
	Szórt- és járulékos veszteségek	14 %

4.2. táblázat Egy kisteljesítményű motor veszteségeinek eloszlása

Röviden vizsgáljuk meg, hogyan lehet növelni a hatásfok értékét:

- ✚ a vasvesztés csökkentésével, kisebb veszteségi számú (1,7 W/kg) dinamó-lemez alkalmazásával.
- ✚ a tekercsvesztés csökkentésével (az állórészen kisebb névleges áramsűrűséggel (kisebb ellenállással). A jobb állórészhorony kihasználást (a nagyobb betekercselhető réz/horony aránnyal), egyes gyártók a horonyalak és a behúzószerszám fejlesztésével (módosításával) érték el (kb. +10%).
- ✚ a forgórészen több gyártó az Al kalicka helyett rézrudazást alkalmaz.

- ✚ a kisebb alapveszteségek miatt kevesebb hő keletkezik, ehhez kisebb méretű ventilátor szükséges, így a ventilációs veszteség is csökken.
- ✚ a járulékos veszteségek (jelentős a fogpulzációs) csökkentésére kialakult egy gyakorlati módszer. A forgórész átmérőjének megmunkálását kis lépésekben kell végezni, az utolsó megmunkálási lépés egészen kis értékű, így a hatásfokot akár 0,5 %-al is lehet növelni egy „durva” esztergálású forgórészszel rendelkező változathoz képest!

4.12.1.2. Frekvenciaváltós aszinkron motorok

A magas hatásfokú aszinkron motorok nagy részét frekvenciaváltóról üzemeltetik. A nagy motorgyártóknál kétféle változatban.

Kompakt frekvenciaváltós aszinkron motorok

A kisebb teljesítménytartományban (azonban itt készülnek nagyobb darabszámban aszinkron motorok) kompakt kivitelű alkalmaznak, a motor és a frekvenciaváltó egy egységet képez. A frekvenciaváltót ráépítik a motorra

Nem kompakt frekvenciaváltós aszinkron motorok

A frekvenciaváltó külön egység. Ebben az esetben sokszor nem követelmény, hogy a frekvenciaváltó védettsége ugyanolyan magas legyen, mint az aszinkron motor védettsége.

A frekvenciaváltós motorok jelentős előnye az üzemeltetés során elérhető energia-megtakarítással jelentkezik. Összehasonlítva az állandó fordulatszámmal járó motorok villamos energiafogyasztásával, szivattyús és ventilátoros hajtások esetén az elérhető megtakarítás a hagyományos fordulatszám változtatáshoz képest akár 50 % is lehet.

4.12.1.3. Állandómágnesű motorok

Az állandómágnesű motorok az elérhető magas hatásfok tekintetében néhány előnnyel rendelkeznek az aszinkron motorokhoz képest:

- ✚ a forgórészveszteség elmarad;
- ✚ a fogpulzációs veszteség elmarad;
- ✚ magasabb részterhelési hatásfok;
- ✚ jobb teljesítménytényező.

Ezen előnyök mellett jelentkező hátrányok:

- ✚ a forgórész sorozatgyártása és a motorszerelés nehezebb;
- ✚ az állandómágnesek ára magas.

Igen jelentős fejlődést hozott a villamos gépek tervezésének számítógépes háttére. A véges elemes számítások elterjedésével az igen pontos tervezésen túl lehetőség nyílik a gyártási szórások következményeinek elemzésére. Ilyen gyártási szórások lehetnek például az állandó mágnesű szervomotoroknál:

- ✚ a forgórész excentricitás;
- ✚ a mágneses ragasztás pozícióhibája;
- ✚ a mágnes pólusok erősségének eltérése;
- ✚ a lokális telítések.

4.12.1.4. Az energiatakarékos villamos motorok élettartama

Mivel az energiatakarékos motorokról szóló közlemények elsősorban az energia-megtakarításról szólnak, röviden vizsgáljuk meg az élettartam várható alakulását és a belőle levonható fontos következtetéseket.

A szigetelési rendszer élettartama

Egy villamos motor szigetelési rendszerének élettartama a rendszerre megengedett hőfok esetén minimum 20.000 üzemóra.

Az általánosan alkalmazott „F” osztálynál ez azt jelenti, hogy amennyiben a tekercselés hőfoka folyamatosan 155 °C (a szabvány által előírt 40 °C-os környezeti hőfok esetén), akkor a motornak az előbb említett ideig üzemképesnek kell maradnia.

Montsinger kísérletei azt mutatják a szigetelési rendszerek élettartamára vonatkozóan, hogy minden 10 °C-os csökkenés duplázza a szigetelési rendszer élettartamát.

Az energiatakarékos aszinkron motorok tekercselésének hőmérséklete (mérési adatok alapján az IE3 motoroknál) a kisebb veszteségek miatt átlagosan 105 °C alatti az „F” osztályú motoroknál. A nem energiatakarékos motorok átlagos élettartama (szakirodalmi közlés szerint) ~12 év. Ilyen módon azt kapjuk, hogy az energiatakarékos motorok élettartama ennek akár többszöröse is lehet.

4.12.1.5. A csapágyazás

A csapágyazás élettartamát a helyes szerelési technológia betartása esetén, nagymértékben a csapágyzsír hőmérséklet-állósága határozza meg.

Az energiatakarékos motorok kisebb veszteségei, kisebb tekercselési hőfokai, alacsonyabb csapágy- és így csapágyzsír hőmérsékletet eredményeznek. Az energiatakarékos motorok átlagos csapágy (csapágyzsír) hőfoka 50 °C alatti (az előbbieken említett mérési adatok alapján).

A csapágy élettartama is jelentősen emelkedik a csapágyzsír megengedettnél (ez normál csapágyzsírnál kb. 95 °C) alacsonyabb hőmérséklete

P _N , kW	IE1 (normál)	IE2 (magas)	IE3 (premium)
0.75	72.1	79,6	82,5
1.1	75	81,4	84,1
1.5	77.2	82.8	85,3
2.2	79.7	84,3	86,7
3	81.5	85,5	87,7
4	83.1	86,6	88,6
5.5	84.7	87,7	89,6
7.5	86	88,7	90,4
11	87.6	89,8	91,4
15	88.7	90,6	92,1
18.5	89.3	91,2	92,6
22	89.9	91,6	93,0
30	90.7	92.3	93,6
37	91.2	92.7	93,9
45	91.7	93,1	94,2
55	92.1	93,5	94,6
75	92.7	94.0	95,0
90	93	94,2.	95,2
110	93.3	94,5.	95,4
132	93.5	94,7	95,6
160	93.8	94,9	95,8
200-370	94	95,1	96,0

4.3. táblázat Az energiatakarékos aszinkron motorok IEC szabványban rögzített hatásfoka

esetén. Megjegyzés: különleges kérésre igényelhetik a magas hőmérsékletű (130 °C) csapágyzsírral rendelkező csapágyak beépítését.

4.12.1.6. Frekvenciaváltós üzem

Az energiatakarékos motorok jelentős része frekvenciaváltóról üzemel. A szigetelésre, elsősorban a fázis és horonyszigetelésre gyakorolt fokozott igénybevétel miatt, nagyon fontos a megfelelő méretű és helyzetű fázisszigetelők alkalmazása. Ezek állapotát az

Bevezetés 2017. 01. 01.	Legalább IE3 hálózati, vagy IE2 áramirányítós motorokra $P_n=0,75\dots375\text{ kW}$
Bevezetés 2015. 01. 01.	Legalább IE3 a hálózati, vagy IE2 áramirányítós motorokra $P_n=7,5\dots375\text{ kW}$
Bevezetés 2011. 06. 16.	Legalább IE2 motorokra $P_n=0,75\dots375\text{ kW}$

4.4. táblázat Az IEC szabvány bevezetésének ütemterve

léis élettartama növekedni fog. A csapágyakban kialakuló járulékos melegedés megelőzhető a csapágyáramok kialakulásának megelőzésével.

Szivattyúk motorjainak egy részénél, ahol a motortengely a víz révén nulla potenciálra kerül, nem alakul ki csapágy áram. A többi esetben szigetelt külső gyűrűvel rendelkező csapágyakat (kerámia csapágy) kell alkalmazni.

A frekvenciaváltós motor esetén a motor fordulatszáma az üzemeltetés által megkívánt fordulatszámokhoz igazítható. Mivel a motor sokszor kisebb fordulatszámokon üzemel, ez és a megfelelő időtartamonként előírt csapágycsere a csapágyak élettartamát növeli.

4.12.1.7. Az energiatakarékos aszinkron motorok hatásfoka

Az új IEC szabványban megadták az első 3 csoportba tartozó hatásfok értékeket 50 és 60 Hz-re. Mi ezt a könnyebb összehasonlítás érdekében a 4.3. táblázatban foglaltuk össze 50 Hz-re és a $2p=4$ pólusú gépekre, amelyeknél legnagyobbak a követelmények.

Végül a 4.4. táblázat az energiahatékony motorok bevezetésének ütemtervét mutatja.

4.13. ASZINKRON GÉP SZÁMPÉLDÁK

4.13.1. Számpélda. Egy háromfázisú aszinkron motor névleges adatai: névleges feszültség $U_{1n} = 3 \times 400\text{ V}/\Delta$; névleges áram $I_{1n} = 20,3\text{ A}$; névleges teljesítmény $P_n = 10\text{ kW}$; a frekvencia $f = 50\text{ Hz}$; a motor $2p = 4$ pólusú, hatásfoka $\eta = 87\%$.

A helyettesítő vázlat elemei: $R_1 = 1,135\ \Omega$; $R_2' = 1,28\ \Omega$; $X_{s1} = 2,7\ \Omega$; $X_{s2}' = 3,8\ \Omega$ és $X_m = 79\ \Omega$. A motor vasvesztése: $P_v = 382\text{ W}$; a súrlódási- és ventilációs veszteség: $P_{s+v} = 0,01 \cdot P_n$.

Feladatok: Határozzuk meg a kördiagram felrajzolásához szükséges adatokat!

Megoldás:

A motor üresjárási árama:

$$I_{10} \cong \frac{U_{1n}}{X_m + X_{s1}} = \frac{400}{79 + 2,7} = 4,9 \text{ A}.$$

Az üresjárási teljesítménytényező meghatározásához ismerni kell az üresjárási teljesítményt:

$$P_0 = P_v + P_{s+v} + P_{t0},$$

ahol

$$P_{t0} = 3 \cdot I_{10}^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 4,9^2 \cdot 1,135 = 81,7 \text{ W}.$$

Behelyettesítve:

$$P_0 = 382 + 0,01 \cdot 10^4 + 81,7 = 563,7 \text{ W}.$$

Az üresjárási teljesítménytényező:

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1n} \cdot I_{10}} = \frac{563,7}{3 \cdot 400 \cdot 4,9} = 0,096.$$

A rövidzárási impedancia, az áthidaló ág elhanyagolásával:

$$Z_z = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{s1} + X_{s2}')^2} = \sqrt{(1,135 + 1,28)^2 + (2,7 + 3,8)^2}.$$

$$Z_z = \sqrt{2,41^2 + 6,5^2} = \sqrt{48,06} = 6,93 \Omega.$$

Névleges feszültségre kapcsoláskor alakul ki a maximális rövidzárási áram:

$$I_{1zmax} = \frac{U_{1n}}{Z_z} = \frac{400}{6,93} = 57,7 \text{ A}.$$

A rövidzárási teljesítménytényező:

$$\cos \varphi_{1z} = \frac{R_1 + R_2'}{Z_z} = \frac{2,41}{6,93} \cong 0,35.$$

A végtelen szliphez tartozó impedancia:

$$Z_\infty = \sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + X_{s2}')^2} = \sqrt{1,13^2 + 6,5^2} = \sqrt{43,53} \cong 6,6 \Omega.$$

A Q_∞ -hez tartozó áram:

$$I_{1\infty} = \frac{U_{1n}}{Z_\infty} = \frac{400}{6,6} = 60,6 \text{ A}.$$

A teljesítménytényező:

$$\cos \varphi_{1\infty} = \frac{R_1}{Z_\infty} = \frac{1,135}{6,6} = 0,172.$$

A kördiagram a számított három pont, Q_0 , Q_z és Q_∞ felhasználásával az ismert módon megszerkeszthető.

4.13.2. Számpélda. Háromfázisú aszinkron motor névleges feszültsége: $U_n = 400 \text{ V/Y}$; a motor $2p=4$ pólusú és a hálózati frekvencia $f = 50 \text{ Hz}$.

A rövidzárási mérés adatai: $U_z = 83 \text{ V}$; $P_z = 260 \text{ W}$ és $I_{1z} = 5,1 \text{ A}$.

Az üresjárási mérés adatai: $I_0 = 1,4 \text{ A}$ és $P_0 = 92 \text{ W}$.

Feladatok:

Határozzuk meg:

- a) az üresjárási teljesítménytényezőt,
- b) névleges feszültségen a rövidzárási áramot,
- c) az áthidaló ág elemeit,
- d) a motor összes ellenállását és szórási reaktanciáját!

Megoldás

a) Az üresjárási teljesítménytényező:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{92}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1,4} = 0,095.$$

b) A rövidzárási teljesítménytényező:

$$\cos \varphi_{1z} = \frac{P_z}{\sqrt{3} \cdot U_z \cdot I_{1z}} = \frac{260}{\sqrt{3} \cdot 83 \cdot 5,1} = 0,355.$$

A névleges feszültségre átszámított rövidzárási áram feltételezve a rövidzárási jelleggörbe linearitását:

$$I_{z\max} = \frac{U_{1n}}{U_z} \cdot I_z = \frac{400}{85} \cdot 5,1 = 24,0 \text{ A}.$$

c) A vasveszteséget jelképező R_v ellenállás:

$$R_v \approx \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 1,4 \cdot 0,095} = 1738 \Omega.$$

Az üresjárásban a főmezőn átfolyó áram:

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 1,4 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = 1,4 \cdot 0,995 = 1,393 \text{ A}.$$

A főmező reaktancia:

$$X_m \cong \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_m} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 1,393} = 163,3 \Omega.$$

d) A rövidzárási impedancia: $Z_z = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_{z\max}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 24,0} = 9,63 \Omega,$

a motor összes ellenállása: $R = Z_z \cdot \cos \varphi_{1z} = 9,63 \cdot 0,355 = 3,42 \Omega,$

a szórási reaktanciák összege: $X_s = Z_z \cdot \sin \varphi_{1z} = 9,63 \cdot 0,937 = 9,02 \Omega.$

4.13.3. Számpélda. Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor névleges feszültsége:

$U_{1n} = 400 \text{ V}$; frekvenciája $f = 50 \text{ Hz}$; az állórész kapcsolása Y, a pólusszám $2p = 4$.

A gép rövidzárási méréséből kapott adatok: $U_{zn} = 92 \text{ V}$; $I_{1z} = 14 \text{ A}$; $\cos \varphi_z = 0,42$.

Nyitott csúszógyűrűk esetén a forgórész feszültsége $U_{20} = 250 \text{ V/Y}$, a forgórész fázisellenállása $R_2 = 0,28 \Omega$.

Feladatok:

Határozzuk meg:

- a) A motor R összes ellenállását és X_s szórási reaktanciáját rövidzárasban,
 b) Az M_i indítónyomatékot közvetlen indításnál,
 c) Az M_i^* indítónyomatékot, ha a forgórész körbe iktatott ellenállás $R_i = R_2$.

Megoldás

a) A rövidzárási impedancia:

$$Z_z = \frac{U_{1z}}{\sqrt{3} \cdot I_{1z}} = \frac{92}{\sqrt{3} \cdot 14} = 3,79 \, \Omega.$$

A motor ellenállásainak összege:

$$R = R_1 + R_2' = Z_z \cdot \cos \varphi_{1z} = 3,79 \cdot 0,42 \cong 1,6 \, \Omega.$$

A szórási reaktanciák összege:

$$X_s = Z_z \cdot \sin \varphi_{1z} = 3,79 \cdot 0,907 = 3,43 \, \Omega.$$

b) A közvetlen indításnál fellépő áram:

$$I_i = I_{zmax} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot Z_z} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 3,79} = 61 \, A.$$

A gép áttétele: $a = U_{1n} / U_{20} = 400 / 250 = 1,6$.

A forgórész kör redukált ellenállása:

$$R_2' = a^2 \cdot R_2 = 1,6^2 \cdot 0,28 = 0,717 \, \Omega.$$

Az indításnál a légrésteljesítmény: $P_{\delta i} = 3 \cdot I_i^2 \cdot R_2' = 3 \cdot 61^2 \cdot 0,717 = 8003 \, W$.

A motor forgómezejének fordulatszáma négypólusú gép esetén

$$n_0 = 1500 \, 1/min,$$

illetve a szögsebesség: $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157 \, r/sec$.

Az indítónyomaték: $M_i = \frac{P_{\delta i}}{\omega_0} = \frac{7978}{157} \cong 50,8 \, Nm$.

c) Indítás forgórész körbe iktatott ellenállással:

Ekkor a motor összes ellenállása ($R_i = R_2$):

$$R^* = R + R_i' = 1,6 + 0,717 = 2,317 \, \Omega,$$

a rövidzárási impedancia:

$$Z^* = \sqrt{R^{*2} + X_s^2} = \sqrt{2,317^2 + 3,43^2} = 4,14 \, \Omega,$$

az indítási áram:

$$I_i^* = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot Z^*} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 4,16} = 55,9 \, A.$$

Ebben az esetben a légrésteljesítmény:

$$P_{\delta i}^* = 3 \cdot I_i^{*2} \cdot 2R_2' = 3 \cdot 55,9^2 \cdot 2 \cdot 0,717 = 13443 \, W,$$

így az indítási nyomaték:

$$M_i^* = \frac{P_{\delta i}^*}{\omega_0} = \frac{13443}{157} = 85,6 \text{ Nm}.$$

4.13.4. Számpélda. Háromfázisú csúszógyűrűs, Y kapcsolású aszinkron motor adatai:

névleges feszültség $U_{1n} = 400 \text{ V}$; névleges teljesítmény $P_n = 20 \text{ kW}$; a frekvencia $f = 50 \text{ Hz}$; a motor négypólusú.

A névleges pontban a hatásfok $\eta = 80 \%$; a teljesítménytényező $\cos \varphi_1 = 0,78$.

A névleges fordulatszám $n_n = 1440 \text{ 1/min}$. Nyitott csúszógyűrűknél a forgórész feszültség $U_{20} = 215 \text{ V}$. A súrlódási veszteség $P_s = 650 \text{ W}$.

Feladatok:

Határozzuk meg:

- A névleges áramot és nyomatékot.
- A forgórész frekvenciáját névleges üzemben.
- A légrésteljesítményt és az állórész összes veszteségét.
- Névleges üzemben a forgórészben indukált feszültség értékét.

Megoldás

a) A felvett teljesítmény: $P_1 = \frac{P_n}{\eta} = \frac{20}{0,8} = 25 \text{ kW}.$

A névleges áram: $I_n = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_1} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,78} = 46,2 \text{ A}$

A motor szögsebessége: $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} = \frac{n_n}{9,55} = \frac{1440}{9,55} = 150,8 \text{ r/s}.$

A névleges nyomaték: $M_n = \frac{P_n}{\omega} = \frac{20000}{150,8} = 132 \text{ Nm}.$

b) A szinkron fordulatszám:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ 1/min} = 25 \text{ 1/s},$$

a szlip: $s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 4 \%$.

A forgórész frekvenciája: $f_2 = s \cdot f_1 = 0,04 \cdot 50 = 2 \text{ Hz}.$

c) A motor mechanikai teljesítménye:

$$P_m = P_n + P_s = 20000 + 650 = 20650 \text{ W},$$

a légrésteljesítmény: $P_{\delta} = \frac{P_m}{1-s} = \frac{20650}{1-0,04} = 21510 \text{ W}.$

Az állórész összes vesztesége: $P_{w1} = P_1 - P_{\delta} = 25000 - 21510 = 3490 \text{ W}.$

A forgórész indukált feszültsége névleges üzemben:

$$U_{i2} = s \cdot U_{20} = 0,04 \cdot 215 = 8,6 \text{ V}.$$

4.13.5. Számpélda. Egy négyfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor forgórész körének adatai: $U_{20} = 3 \times 500 \text{ V/Y}$; $I_{2n} = 25 \text{ A}$; $n_n = 1440 \text{ 1/min}$.

Feladatok:

Határozzuk meg:

- a) a motor forgórész körének ellenállását,
- b) az indító ellenállások értékeit, ha $m = 3$, $M_i = M_B$ és $s_B = 0,3$.

Megoldás

a) A motor névleges szlipje:

$$s_n = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04.$$

A forgórész kör fázisellenállását jó közelítéssel meghatározhatjuk az

$$R_2 \cong \frac{s_n \cdot U_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}}$$

egyenlet alapján, mert névleges üzemben az indukált feszültség fázisértéke $s_n \cdot U_{20}/\sqrt{3}$, és a megadott áram szintén a névleges állapotra vonatkozik (az 1...2 Hz-es frekvencia esetén X_{s2} forgórész kör szórási reaktancia elhanyagolható).

Tehát:
$$R_2 \cong \frac{0,04 \cdot 500}{\sqrt{3} \cdot 25} = 0,462 \text{ } \Omega.$$

b) Indításnál a megadott feltételek esetén $s_{\max} = s_B = 0,3$. Az első fokozatra

felírhatjuk, hogy:
$$\frac{R_2}{s_{\max}} = \frac{R_2 + R_{r1}}{1} = \frac{R_{r1}}{1},$$

tehát
$$R_{r1} = \frac{R_2}{s_{\max}} = \frac{0,462}{0,3} = 1,54 \text{ } \Omega.$$

A mértani sor egyenlete:
$$q^m \cdot R_{r1} = R_2.$$

Innen a hányados:
$$q = \sqrt[m]{\frac{R_2}{R_{r1}}} = \sqrt[m]{s_{\max}} = \sqrt[3]{0,3} \cong 0,67.$$

A további fokozatok:

$$R_{r2} = q \cdot R_{r1} = 0,67 \cdot 1,54 = 1,03 \text{ } \Omega.$$

$$R_{r3} = q^2 \cdot R_{r1} = 0,67^2 \cdot 1,54 = 0,69 \text{ } \Omega.$$

Ellenőrzésképpen kiszámítjuk R_{r4} -et, mert értékének meg kell egyeznie R_2 -vel:

$$R_{r4} = q^3 \cdot R_{r1} = 0,67^3 \cdot 1,54 = 0,462 \text{ } \Omega = R_2,$$

tehát a számításunk jó.

A fokozatonként beiktatandó ellenállások:

$$R_{i1} = R_{r1} - R_2 = 1,54 - 0,462 = 1,078 \text{ } \Omega,$$

$$R_{i2} = R_{r2} - R_2 = 1,03 - 0,462 = 0,568 \text{ } \Omega,$$

$$R_{i3} = R_{r3} - R_2 = 0,69 - 0,462 = 0,228 \text{ } \Omega.$$

Az indítás alatt a rövidrezárando ellenállásértékek:

$$\begin{aligned}R_{k1} &= R_{r1} - R_{r2} = 1,54 - 1,03 = 0,51 \, \Omega, \\R_{k2} &= R_{r2} - R_{r3} = 1,03 - 0,69 = 0,34 \, \Omega, \\R_{k3} &= R_{r3} - R_2 = 0,69 - 0,462 = 0,228 \, \Omega.\end{aligned}$$

A jelölések megfelelnek a 4.48. ábra jelöléseinek.

4.13.6. Számpélda. A háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor adatai: névleges feszültség $U_n = 400/231 \, \text{V}$; névleges áram $I_n = 8,5/15 \, \text{A}$; névleges teljesítmény $P_n = 3,6 \, \text{kW}$. A forgórészkeri ellenállás fázisértéke $R_2 = 1,8 \, \Omega$. Az indítást $I_{\max} = 17 \, \text{A}$ és $I_{\min} = 12 \, \text{A}$ állórészáramok közötti feltételek mellett kell végrehajtani. Az áramokhoz a kördiagramból $s_{\max} = 24 \, \%$ és $s_{\min} = 15 \, \%$ adódik.

Feladatok: határozzuk meg az indítóellenállások értékeit, és az átkapcsolási szlipeket.

Megoldás

Az első fokozat értéke:

$$R_{r1} = \frac{R_2}{s_{\max}} = \frac{1,8}{0,24} = 7,5 \, \Omega.$$

A mértani sor hányadosa:

$$q = \frac{s_{\min}}{s_{\max}} = \frac{0,15}{0,24} = 0,625.$$

A mértani sor egyenlete alapján írhatjuk, hogy: $q^m = \frac{R_2}{R_{r1}}$.

A fokozatok számát kifejezve és felhasználva az első fokozat egyenletét:

$$m \cdot \lg q = \lg \frac{R_2}{R_{r1}} = \lg s_{\max}.$$

Rendezve és behelyettesítve:

$$m = \frac{\lg s_{\max}}{\lg q} = \frac{\lg 0,24}{\lg 0,625} = \frac{-0,62}{-0,204} = 3,04.$$

Ezt figyelembe véve a fokozatok számát $m = 3$ -ra választjuk.

Az indítóellenállások:

$$\begin{aligned}R_{r2} &= q \cdot R_{r1} = 0,625 \cdot 7,5 = 4,69 \, \Omega, \\R_{r3} &= q^2 \cdot R_{r1} = 0,625^2 \cdot 7,5 = 2,93 \, \Omega.\end{aligned}$$

Az egyes fokozatok esetén beiktatandó ellenállások:

$$\begin{aligned}R_{i1} &= R_{r1} - R_2 = 7,5 - 1,8 = 5,7 \, \Omega; \\R_{i2} &= R_{r2} - R_2 = 4,69 - 1,8 = 2,89 \, \Omega; \\R_{i3} &= R_{r3} - R_2 = 2,93 - 1,8 = 1,13 \, \Omega.\end{aligned}$$

Az átkapcsolási szlipek: $s_1 = q = 0,625$;

$$s_2 = q^2 = 0,39; \quad \text{és} \quad s_3 = q^3 = 0,244.$$

4.13.7. Számpélda. A háromfázisú, csillag kapcsolású, kalickás forgórészű aszinkron motor helyettesítő kapcsolási vázlatának elemei:

$R_1 \cong R_2' = 1,5 \, \Omega$ és $X_{s1} \cong X_{s2}' = 1,5 \, \Omega$. A motor névleges árama $I_n = 10,6 \, \text{A}$; a névleges szlip $s_n = 5 \, \%$. A motort 400 V-os hálózatra kapcsolva a megengedett áramlökés $I_{\max} = 1,5 \, I_n$.

Feladatok:

- Milyen áttételű transzformátort illetve mekkora fázisonkénti előtét ellenállást kell beiktatnunk, hogy az indítási feltétel teljesüljön?
- Milyen arányban csökken az indítónyomaték a közvetlen hálózatra kapcsoláshoz képest?
- Mekkora szlipnél kapcsolhatunk át a hálózatra, hogy a másfélszeres áramlökést ne lépjük túl?

Megoldás

a) A motor maximális rövidzárási árama:

$$I_{1z\max} = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{Z_i} = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + X_s^2}} = \frac{231}{\sqrt{3^2 + 3^2}} = 54,5 \, \text{A}.$$

A megengedett áramlökés:

$$I_{\text{meg}} = 1,5 \cdot I_n = 1,5 \cdot 10,6 = 15,9 \, \text{A}.$$

A transzformátoros indításnál a hálózati áramlökés

$$I_h^* = I_{\text{meg}} = \frac{I_{1z\max}}{a^2},$$

amelyből az áttétel:
$$a = \sqrt{\frac{I_{1z\max}}{I_h^*}} = \sqrt{\frac{54,5}{15,9}} = 1,85.$$

Amikor előtétellenállással indítunk, az előírt feltételek mellett, akkor a következő feszültségegyenletből határozhatjuk meg R_e értékét:

$$U_{1f} = 1,5 \cdot I_n \cdot \sqrt{(R_e + R_1 + R_2')^2 + X_s^2}, \text{ amiből } R_e = 11,21 \, \Omega \text{ adódik.}$$

b) Transzformátoros indításnál: $M_{it} = \frac{M_i}{a^2} = 0,226 \cdot M_i.$

Előtétellenállásos indításkor a motorra jutó feszültség:

$$U_{iR} = 1,5 \cdot I_n \cdot Z_i = 1,5 \cdot 10,6 \cdot 4,243 = 67,46 \, \text{V}.$$

A nyomaték a feszültségek négyzetének arányában csökken:

$$M_{iR} = \left(\frac{67,46}{231} \right)^2 \cdot M_i = 0,0853 \cdot M_i.$$

c) Az áthidaló ág elhanyagolása esetén az alábbi feszültségegyenletet írhatjuk fel:

$$U_{1f} = 1,5 \cdot I_n \cdot \sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + X_s^2},$$

amiből a szlipet kifejezve, majd behelyettesítve az értékeket $s = 0,0358$ adódik az átkapcsolási szlipre, azaz 3,58 %.

4.13.8. Számpélda. Egy 231 V-os, $f = 50$ Hz-es egyfázisú kondenzátoros motor segédfázisának ellenállása $R_{sf} = 21 \Omega$; a teljesítménytényezője $\cos \varphi_{sf} = 0,44$.

Feladatok:

- Mekkora kondenzátort kell sorbakötni a segédfázissal, hogy az eredő teljesítménytényező 0,92 (kapacitív) értékre változzon?
- Határozza meg kondenzátor bekapcsolása után a segédfázis áramát (I_{sf}^*) valamint a feszültségesések értékeit (U_R , U_L , U_C).
- Rajzolja fel a segédfázis vektorábráját a kondenzátor bekötése előtt és után!

Megoldás

- a) A segédfázis induktív reaktanciája kapacitás nélkül, álló helyzetben: $X_L = R \cdot \operatorname{tg} \varphi_{sf}$, a $\cos \varphi_{sf} = 0,44$ -hez tartozó $\operatorname{tg} \varphi_{sf} = 2,04$, így:

$$X_L = 21 \cdot 2,04 = 42,84 \Omega \text{ (induktív).}$$

Az előírt 0,92 (kap.) teljesítménytényezőhöz tartozó segédfázis eredő reaktancia, ha a $\cos \varphi_e = 0,92$ -höz tartozó $\operatorname{tg} \varphi_e = 0,426$:

$$X_e = R_{sf} \cdot \operatorname{tg} \varphi_e = 21 \cdot 0,426 = 8,94 \Omega \text{ (kapacitív).}$$

A szükséges kondenzátor reaktanciája tehát:

$$X_C = X_L + X_e = 42,84 + 8,94 = 51,78 \Omega;$$

kapacitása:
$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{3,14 \cdot 51,78} = 61,4 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 61,6 \mu\text{F}.$$

- b) A segédfázis eredő impedanciája:

$$Z_{sf}^* = \sqrt{R_{sf}^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{21^2 + 8,94^2} = 22,83 \Omega.$$

A segédfázis árama:
$$I_{sf}^* = \frac{U_1}{Z_{sf}^*} = \frac{231}{22,83} = 10,12 \text{ A}.$$

A feszültségesések:

$$U_C = I_{sf}^* \cdot X_C = 10,12 \cdot 51,78 \cong 524,0 \text{ V};$$

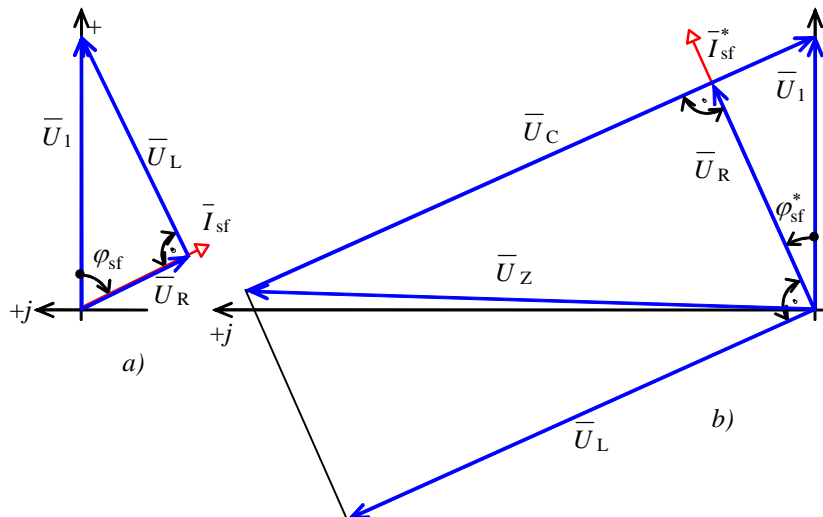
$$U_L = I_{sf}^* \cdot X_L = 10,12 \cdot 42,84 \cong 433,5 \text{ V} \text{ és}$$

$$U_R = I_{sf}^* \cdot R_{sf} = 10,12 \cdot 21 = 212,5 \text{ V}.$$

- c) A segédfázis impedanciája alaphelyzetben:

$$Z_{sf} = \sqrt{R_{sf}^2 + X_L^2} = \sqrt{21^2 + 42,84^2} = 47,7 \Omega.$$

Így a segédfázis árama:
$$I_{sf} = \frac{U_1}{Z_{sf}} = \frac{231}{47,7} = 4,8 \text{ A}.$$



4.92. ábra Egyfázisú kondenzátoros motor vektorábrái

A feszültségesések: $U_R = I_{sf} \cdot R_{sf} = 4,8 \cdot 21 = 100,8 \text{ V}$ és

$$U_L = I_{sf} \cdot X_L = 4,8 \cdot 42,84 = 205,6 \text{ V}.$$

Alaphelyzetben a $\cos \varphi_{sf} = 0,44$, azaz $\varphi_{sf} = 63,9^\circ$. Ezekkel az adatokkal az álló állapotú vektorábra felrajzolható, amint azt a 4.92a ábrán láthatjuk.

A kondenzátor beiktatása után a $\cos \varphi_{sf}^* = 0,92$, így a $\varphi_{sf}^* = 23,1^\circ$ (kapacitív).

A további adatok az előző pontokban rendelkezésre állnak így a kondenzátor beiktatása utáni vektorábrát a 4.92b ábrán láthatjuk.

4.14. ELLENŐRZŐ KÉRDÉSEK ÉS FELADATOK

1. Röviden ismertesse az aszinkron gép szerkezeti felépítését!
2. Röviden ismertesse az aszinkron gép működési elvét!
3. Hogyan számítja ki az aszinkron gép állórészében indukálódó feszültséget?
4. Mitől függ az aszinkron gép forgórészében indukálódó feszültség nagysága?
5. Definiálja az aszinkron gép hatásos menetszámának fogalmát!
6. Hogyan redukáljuk a forgórész feszültséget az állórészre aszinkron gép esetén?
7. Hogyan redukáljuk a forgórész áramot az állórész oldalra aszinkron gép esetén?
8. Hogyan redukáljuk a forgórész körű szórásos reaktanciát az állórész oldalra?
9. Rajzolja fel az aszinkron motor helyettesítő kapcsolási vázlatát álló állapotban!
10. Rajzolja fel az aszinkron motor helyettesítő kapcsolási vázlatát forgó állapotban!
11. Rajzolja fel az aszinkron gép vektorábráját üresjárásban!
12. Rajzolja fel az aszinkron gép vektorábráját rövidzárlásban!
13. Rajzolja fel az aszinkron gép vektorábráját motorüzemben!
14. Rajzolja fel az aszinkron gép vektorábráját generátorüzemben!
15. Rajzolja fel az aszinkron gép üresjárási jelleggörbét!
16. Rajzolja fel az aszinkron gép rövidzárlási jelleggörbét!
17. Végezze el egy rövidzárlási mérési pont átszámítását névleges feszültségre!

18. A mért adatokból számítsa ki a rövidzárási teljesítménytényezőt névleges feszültségen!
19. Rajzolja fel az aszinkron gép energiaszalagját motoros üzemben!
20. Rajzolja fel az aszinkron gép energiaszalagját generátoros üzemben!
21. Rajzolja fel az aszinkron gép energiaszalagját ellenáramú féküzemben!
22. Milyen összefüggést ismer a légrésteljesítmény és a mechanikai teljesítmény között?
23. Rajzolja fel az aszinkron gép egyszerűsített helyettesítő kapcsolási vázlatát!
24. Miből kiindulva számítható ki az aszinkron gép nyomatéka?
25. Adja meg, hogy milyen jellemzőktől függ az aszinkron gép nyomatéka?
26. Mi határozza meg az aszinkron gép billenőszlipjét?
27. Mi határozza meg az aszinkron gép billenőnyomatékát?
28. Mitől függ az aszinkronmotor indítónyomatéka?
29. Milyen adatok szükségesek az aszinkron gép áram-munkadiagramjának szerkesztéséhez?
30. Milyen pontokat köt össze a nyomaték 0-vonala?
31. Milyen pontokat köt össze a mechanikai teljesítmény 0-vonala?
32. Milyen adatok szükségesek áram-munkadiagram nyomatékléptékének meghatározásához?
33. Definiálja az áram-munkadiagram egy kiválasztott pontjában a metszékeket, és adja meg a kiértékelésük módját!
34. Milyen kompromisszumot kell kötnünk a aszinkron motorok indításakor?
35. Milyen módszereket ismer a rövidrezárt forgórészű aszinkron motorok indítására? Hasonlítsa össze a megnevezetteket indítási szempontból!
36. Határozza meg a csúszógyűrűs gép forgórész körébe iktatandó ellenállás értékét, ha billenőnyomatékkal kívánjuk a gépet indítani ($s_b = 0,15$; $R_2 = 0,1 \Omega$)!
37. Mekkora áttételű transzformátoros indításnak felel meg a csillag-delta indítás?
38. Rajzolja fel egy mélyhornyú és egy kétkalickás motor forgórész rúdjaik kialakítását!
39. Rajzolja fel egy kétkalickás motor helyettesítő kapcsolási vázlatát!
40. Rajzolja fel egy kétkalickás áram-munkadiagramját!
41. Rajzolja fel egy normál-, egy mélyhornyú és egy kétkalickás motor $M(s)$ jelleggörbét egy diagramban!
42. Milyen módszereket ismer az aszinkron gépek fékezésére?
43. Rajzolja fel az ellenáramú féküzem energiaszalagját!
44. Milyen gépeknél alkalmazható tartós üzemben az ellenáramú fékezés, és miért?
45. Milyen módszereket ismer az aszinkron motorok fordulatszámának megváltoztatására?
46. Rajzolja fel a *Dahlander*-tekercselés egy fázisát és magyarázza el a pólusátkapcsolást!

47. Mekkora teljesítményt kell eltávolítani maximálisan a csúszógyűrűs gép forgórészéből, ha a 10 kW-os teljesítményű gépet a forgórész túlmelegedése nélkül, névleges árammal, és $s = 0,5$ szlippel kívánjuk járatni?
48. Rajzolja fel egy frekvenciaváltóról táplált motor feszültség-frekvencia diagramját!
49. Mire szolgálnak a forgórész körüli kaszkádok? Rajzoljon fel egy kaszkád-megoldást!
50. Milyen összetevőkre bontható egy lüktető mező?
51. Mi a körforgó mező kialakulásának feltétele fő- és segéd fázissal rendelkező gépeknél?
52. Hogyan számítható ki szlip vele- és az elleneforgó esetben?
53. Milyen kapcsolású egy fázisról táplált gépeket ismer?
54. Hogyan fordítható meg egy egyfázisról táplált motor forgásiránya?
55. Mi végzi és mikor az indító kondenzátor be- és kikapcsolását?