

A tananyag címe:

Dr Szénásy István: Villamos hajtások Egyenáramú állandómágnese motorok és hajtástechnikai alkalmazásai. Szinkron- és aszinkron motoros járműhajtások

3. modul: Állandómágnese szinkron motorok és hajtások.

1. lecke

1. A klasszikus szinkron gépek és az állandómágnese szinkron motorok főbb sajátosságai. Felépítés. A lüktetőnyomaték.

1. Az állandó mágnese, áramvektor-szabályozott szinkronmotor elve, szabályozása és tulajdonságai járműhajtásokban

1.1. A klasszikus szinkron gépek főbb sajátosságai

Tevékenység : tanulmányozza a klasszikus szinkron gép működési elvét.

Szinkron gép elvi felépítése és működése

Generátoros üzemben külső nyomatékkal forgatjuk a forgórészt, amelynek mágnesezést egyenáramú gerjesztőtekercs adja, csúszógyűrűn táplálva. A tekercselést úgy készítik, hogy az indukcióeloszlás a kerület mentén tovahaladva szinuszos, vagy ehhez közeli alakú. Állandó mágnesek hasonló eredménnyel használhatók, de mágnesezést nem változtatható.

A feszültség előállítására szolgáló vezetőkeretek az állórészben vannak, az aszinkron gépeknél bemutatott módon. Az ω szögsebességgel forgó szinuszos eloszlású fluxus az álló, N menetszámú tekercsben feszültséget indukál, melynek pillanatértéke:

$$u_i = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = N \cdot \frac{\Phi_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)}{dt} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) .$$

A térben eltolt három fázisú, itt U, V, W jelű tekercsekben indukálódó feszültségek időben 120 foknak megfelelő eltolódással követik egymást:

$$\begin{aligned} u_{iU} &= N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) , \\ u_{iV} &= N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t - 120^\circ) , \\ u_{iW} &= N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t - 240^\circ) . \end{aligned}$$

Tevékenység : indítsa el az alábbi demonstrációs modell-ábrát, (jobb egérrel kattintva: csomag-objektum, ismét: tartalom aktívra tétele) Figyelje meg a rotor szög helyzetét és a feszültség-értékek kapcsolatát!



ALTERNATOR.rtt

A gépet a háromfázisú hálózatra kapcsoláshoz külső erővel forgatva névleges sebességre gyorsítják, a tekercsekben indukált feszültséget a forgórész gerjesztés változtatásával a hálózatra beállítják, a forgatás kis módosításával az egyes tekercsekben lévő feszültségek maximumát a hálózatéihoz igazítják: szinkronozzák, majd a hálózatra rákapcsolják.

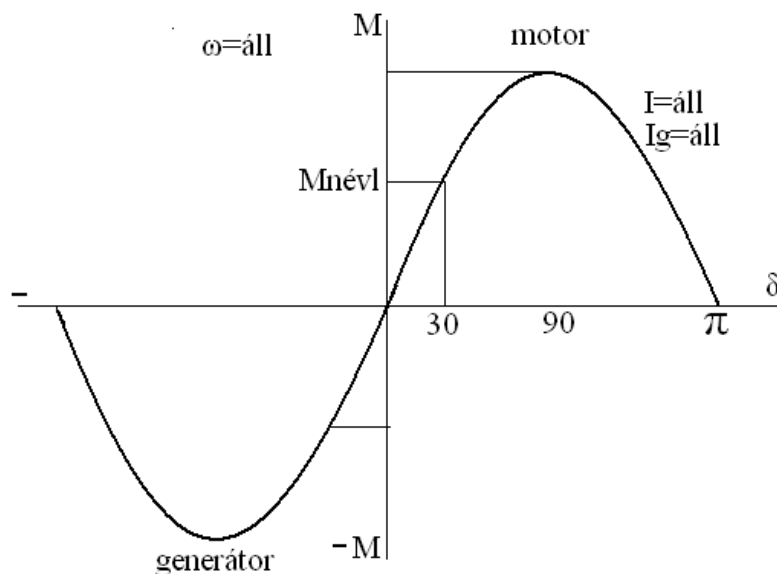
Ez a feszültségek azonossága miatt árammentes üresjárási állapot lesz névleges fordulatszámom, és az alábbi, nyomaték-terhelési szög, δ ábrában a zérus kezdőpont. Az ábrán az ω szögsebesség névleges értékű és állandó, a hálózati frekvenciához kötött. Csak frekvenciaváltóval változtatható.

Ha a hajtó gép növeli nyomatékát, az a forgórészt kissé előre fordítja, és az ábra alsó, 3. negyedében a berajzolt szinuszfüggvény szerint növekvő hajtónyomatékot a hozzá tartozó „-„ előjelű, növekvő δ terhelési szög melletti munkapontokat veheti fel változatlan sebesség mellett. A nyomaték maximumának meghaladása a szükségesnél nagyobb nyomatékkal történő forgatásnál következhetne be, -90 fok után. Ez instabil állapotú tartomány, nem megengedett.

Motoros üzemben a tengelyt nyomatékkal terheljük, és a rotor a szöghelyzetében le fog maradni. 30 foknál már névleges nyomatékát fejt ki.

Nyomaték-tartalékként szolgál a 90 fokig terjedő tartomány, hogy hirtelen és nagy nyomatéklökéseket a 90 fokos terhelési szög meghaladása nélkül felvehessen. Ha terheléslökés a 90 fokon túlra növelné a lemaradást, akkor igen gyors többletgerjesztéssel ez megakadályozható. Ekkor a nyomatékgörbe jóval nagyobb amplitúdójú lesz, és a munkapont visszább esik, a gép üzemben maradhat, de ez a beavatkozás csak rövid ideig engedhető meg.

A 90 fokon túli tartomány zárlatba viheti a gépet, mert a feszültségvektorok iránya megfordul, összeadódik a hálózatéval, és csak igen gyorsműködésű lekapcsolás védhetné meg az állórészt a zárlat következményeitől. Mindezek miatt a szinkron gépet valójában kétszeres névleges nyomatéokra tervezik és építik.



Mivel elindulni nem tud, külső hajtó gép helyett építhetik aszinkron kalickával a rotort, de ekkor nem terhelhető, csak szinkronizálás után, vagy pedig frekvenciaváltó alkalmazható.

Nyomatékgörbéje adott frekvencián az M-tengellyel párhuzamos egyenes az ω -M ábrában. Kivételes előnye, hogy forgórész-tekercsének túlgerjesztésével jelentős nagyságú meddő teljesítmény leadására alkalmas, amelyet az összes induktív fogyasztó, főként az aszinkron motorok igényelnek. Anyagkihasználása valamennyi villamos forgógép közül a legjobb, így adott nyomatékhoz a legkisebb tömegű és térfogatú – ezek legvonzóbb adottságai.

A klasszikus szinkron motor összefoglalható fő tulajdonságai:

- mereven fordulatszám tartó,
- önmagától nem indul, s ezek miatt járműhajtásra teljességgel alkalmatlan, de
- a legnagyobb teljesítménysűrűségű villamos gép.

A szinkron gépek járműhajtásra alkalmassá tétele régen is vonzó volt.

Fő akadály a fordulatszámnak a frekvenciához való merev hozzárendelése volt - az inverterek megjelenése leküzdhetővé tette ezt az akadályt.

Az állandó mágnesekkel építhetőség csökkenő gépmérettel adhat ugyanakkora nyomatékot, és elhagyhatóvá válik a csúszógyűrűkön táplált forgórész konstrukciója, vele az egyenáramú gerjesztőrendszer.

Különleges elvi módosítás, és működésében irányítottá változtatás teszi lehetővé ezt az önmagában legmerevebb adottságú szinkron motort gyorsan változni képes sebességű és nyomaték-előjelű, rendkívül dinamikus üzemre alkalmassá, így szervo- és robothajtásokra, vagy éppen járműhajtásokra.

Az önvezérelt, számítógép-irányítású, áramvektor-szabályozású szinkron motor egy sajátos önirányítású rendszer (lásd később) a fenti hátrányoktól mentes tulajdonságokkal:

- megjelent villamos mozdonyban ($P > 2000 \text{ kW}$) : 1974
- robot- és ipari szervohajtásban ($P < 1 \text{ kW}$): 1986
- autóban ($P > 30 \text{ kW}$) : 1997

Az állandó mágneses szinkron motorok főbb sajátosságai. A mágnesek elrendezése.

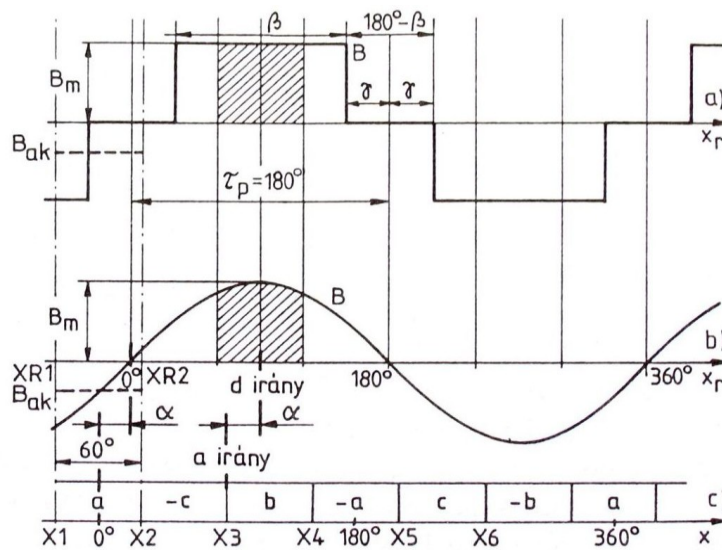
Villamos hajtású járművekben és szervo-, illetve robothajtásokban gyakorlatilag csak állandómágneses szinkron motorokat használnak, amelynek elvi elrendezését az 1. ábra szemlélteti. Egyszerűsített jelképi jelöléssel láthatók az *a*, *b*, *c* állórész-tekercek, amelyek valójában az állórész 1/6 szélességű sávjait foglalják le fázisonként és áramirányonként. Az állórész *a* jelű tekercsének szimmetriatengelye szokásosan az állórész függőleges tengelyvonala is.

Az ábrán lévő szinkronmotor 2 pólusúnak ábrázolt, állandómágnessel épült forgórésze az \hat{E} - \hat{D} irányt, egyúttal a rotor *d* tengelyét is jelzi, s ez a Φ főfluxus iránya is.

időben egyszerre jelentkeznek, és a névleges nyomaték 5-30 % közti értékét is elérhetik. Értékük nem függ az áramtól.

Az efféle lüktetőnyomaték jelentkezésének okait konstrukciós módosítások megszüntethetik, vagy elhanyagolhatóvá tehetik kutatási-fejlesztési, részben gyártási többlet-tevékenységek árán.

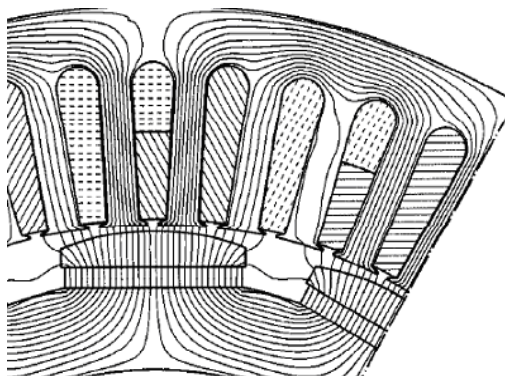
Szinkron gépekben az állórész fázisfeszültsége és árama ideális esetben szinuszosak. A fő-fluxust a rotor állandó mágnesei hozzák létre, ideális esetben szinuszos eloszlású légrésindukciót teremtve a légrésben, 2. b) ábra, vagy BLDC jellegű motor esetén ez négyszöghullámú lesz, 2. a) ábra.



2. ábra: kerületmenti indukcióeloszlás állandó-mágneses szinkron-jellegű motorokban

Tevékenység : tanulmányozza az állandó mágnesek alkalmazását és tulajdonságait.

A következő, 3. ábra a szinuszos indukcióeloszlás megvalósításának egy lehetséges módját szemlélteti változó légréssel.



3. ábra. Az indukcióeloszlás görbéi állandómágneses szinkron motorban

A mágnesek alakjára, elhelyezésére, beillesztésére több konstrukciós mód is lehetséges:

- rotorpalástra ragasztott köríves és „kenyér-vegni” alakú,
- mélyebbre beültetett, több egyenes-, esetleg íves szeletből álló módozatok stb. is ismertek.

Az alábbi képen, 5. ábra, az elvi ábrák szerinti konstrukciók egy lehetséges realizálása látható a két mágnes-részből álló pólusok kialakítására. Jobboldalt egy, a felszínig besüllyesztett („burried”) elnevezésű mágnes-elhelyezési módszer látható.



5. ábra. Besüllyesztett („burried”) elnevezésű mágnes-elhelyezés.

Az alkalmazott korszerű mágnesanyagokról

Az utóbbi évtizedekben elsősorban a ritkaföldfém alapú mágneseket gyártják, és mintegy 10 éve terjed a Nd-Fe-Br (neodímium-vas-bór) alapú mágnesek alkalmazása. Koercitív erejük (H_{rc}), amely a mágneses energiatartalomra is jellemző, 3-4-szerese a ritkaföldfém alapúakénak, remanens indukciójuk (Br) pedig 20-30 %-kal magasabb lehet azokénál. A Br értéke $1,05-1,35 \text{ Vs/m}^2$ között választható. Ennél az újfajta mágnesanyagnál szokatlanul fontos szempont az üzemi hőmérséklet megfelelő megválasztása és annak betartása, tekintettel arra, hogy remanens indukciójuk erősen negatív hőfokfüggő. Értéke változó, de akár több is lehet, mint $-1 \text{ \%}/^\circ$.

Ennek kellemetlen velejárója, hogy a tervezettnél magasabb hőmérsékleten történő üzemeltetéskor a Br indukció csökkenése a fluxust, és ugyanazon motoráramnál a nyomatékot is hasonló arányban csökkenti.

A remanens indukció végleges csökkenése, majd elvesztése a Curie-pont elérésekor, $260-300 \text{ }^\circ\text{C}$ körül történik, de lehűlés utáni felmágnesezéssel ismét visszaállítható az eredeti érték.

Nagy, jellemzően zárlati nagyságú áramerősségek lemágnesezhetik a neodímium alapú mágneseket is, amelyeket majd mágnesező készülékben lehet újra felmágnesezni.

A ferrit alapú mágnesek kisebb energiatartalmuk miatt jóval nagyobb térfogatúak ugyanazon indukció eléréséhez, és könnyebben lemágneseződhetnek– viszont kis költséggel előállíthatóak.

2. lecke:

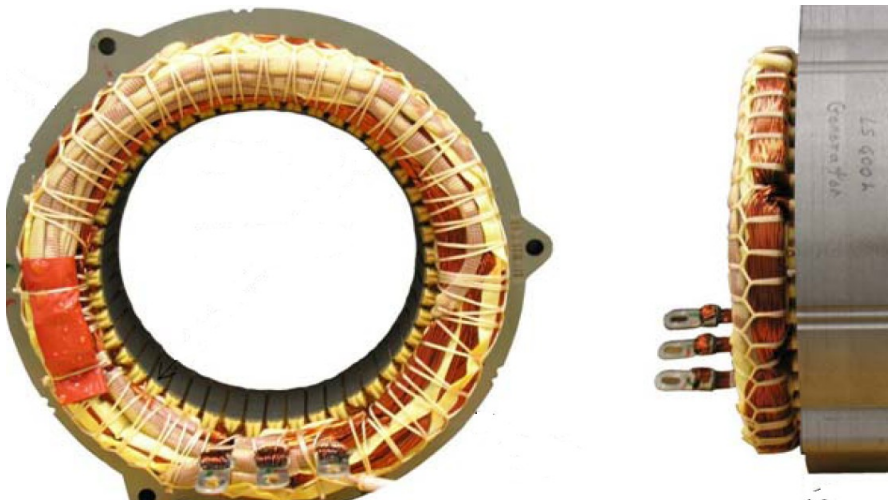
Szinkronmotorokban a reluktancianyomaték keletkezése. A Clark-transzformáció használata

Tananyag

A szinkronmotorok állórész tekercsének kialakításáról

Tevékenység: *Olvassa el az állórész kialakításának lehetőségeit.*

Az állórésztekercs kialakítási lehetőségei az aszinkron gépekével. A tipikusnak mondható nagy vezetőkeresztmetszetű tekercset kivitelezési okoknál fogva gyakran több, párhuzamosan fektetett szállal tekercselnek, így érven el a kívánt keresztmetszetet, 1. ábra.



1. ábra. Több párhuzamos szállal készült tekercselés.

Magasabb gyártási költségekkel elhagyható a párhuzamos szálak alkalmazása, és a nagyobb, például 2,6 x 3,8 mm-es vékony rudak, mint vezetők befektethetők, de végeik a nem eléggé hajlítható méretek miatt csak ívhegesztéssel zárhatók egybe, 2. ábra. A hegesztés előtti hajlításokat, amelyek a menetek folytatásához, a pólusosztásnyi lépéshez szükségesek, az átdugott, és még egyenes szálú vezetőkön csak célgép képes elvégezni.

Az ábrázolt megoldásban a vezetők egy rúdból való kivitele hővezetés szempontjából nagyon kedvező, mert a tekercs belsejében fejlődő hő kivezetése a vastesten kívülre a kisebb hőellenállás miatt nagyobb biztonságú, mint a tucatnyi vékony párhuzamos szállal készült tekercs. A tekercszerkezet hajlítással szembeni merevsége a dilatáció jelentkezésekor növeli az átütési szilárdságot és ezzel a gép üzembiztonságát.



2. ábra. Menetenként egy tömör rúddal készült hurkos tekercselés, a rudak meghajlított és egymás mellé illesztett végeinek hegesztésével

Szinkronmotorokban a reluktancianyomaték keletkezése.

Az állandó-mágneses szinkronmotor nyomatéka az állandó-mágnesekkel fenntartott Ψ főfluxus és az állórészáram vektoriális szorzatával számítható, és 90 fokos térbeli irányoknál skalárszorzattal helyettesíthető:

$$M = \Psi I \sin \nu_p + M_r,$$

ahol az M_r reluktancianyomaték:

$$M_r = (I^2/2)(L_d - L_q) \sin 2 \nu_p, \text{ melynek értéke a konstrukciótól függ. } L_d = L_q \text{ esetben zérus.}$$

L_d és L_q a hossz- és keresztirányú induktivitások értékei, melyek hengeres forgórésznél azonosak. Kiálló pólusúaknál, illetve változó légrésnél, vagy változó mágneses ellenállásnál az eltérés többszörös értékű is lehet.

Az I áramérték a szimmetrikus háromfázisú rendszer adott időponthoz tartozó fázisáramok vektoraiból számított eredő áramvektornak, i_1 értékének abszolút nagysága:

$$I = |i_1|,$$

tehát itt i_1 az eredő vektor vagy Park-vektor, az egyes fázisáramokból meghatározhatóan:

$$i = i_{re} + i_{im} = 2/3 [i_a + [-1/2 + j(\sqrt{3}/2)]i_b + [-1/2 - j(\sqrt{3}/2)]i_c].$$

Alkalmazásának előnye, hogy általa kifejezhető mindhárom fázisáramból adódó rész-összetevője.

A Clark-transzformáció során egy 2×3 -as méretű, meghatározott tényezőket tartalmazó transzformációs matrix az általa szorzott három elemű oszlopvektorral egy kételemű vektort eredményez.

Ezzel a művelettel az állórész a - b - c tekercseinek 120 fokos eltérésű irányjaival értelmezett koordináta-rendszerből az aktuális i_a, i_b, i_c áramokat a forgórészhez rendelt d - q , vagy más jelöléssel például α - β derékszögű koordináta-rendszerbe számítja át, i_α és i_β komponensekként. Itt az f betű áramokra vagy feszültségekre vonatkozhat:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

Az a, b, c fázisáramok forgás közben állandóan változó értékűek, így az eredő vektor x és y , vagy másként jelölve α és β összetevői is.

Inverz Clark-transzformáció az előbbi feladatok inverze, Clark^{-1} . Derékszögű α - β -ből 3 fázisú tekercseléshez tartozó a - b - c koordináta-rendszerbe számítja át:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix}$$

Ezeket a transzformációs számításokat a szabályozó két oknál fogva is elvégzi.

Tevékenység: Olvassa el a reluktancianyomaték keletkezését és hasznosságát!

A ν_p nyomatékszög a klasszikus szinkron gép δ terhelési szögének megfelelő előretartási szög motoros üzemben, amely a háromfázisú tekercsek közül általában az a jelű tekercsben folyó áram amplitúdó maximumának pillanatnyi helye, és a póluskerék vagy rotor északi pólusának középvonala közti szög, villamos fokokra átszámolva. (Kétpólusú gép 360, 4 pólusú gép két pólusára 180 fokos térbeli szöget fog át, de mindkettőben két pólus lesz 360 villamos fok ívhosszúságú.)

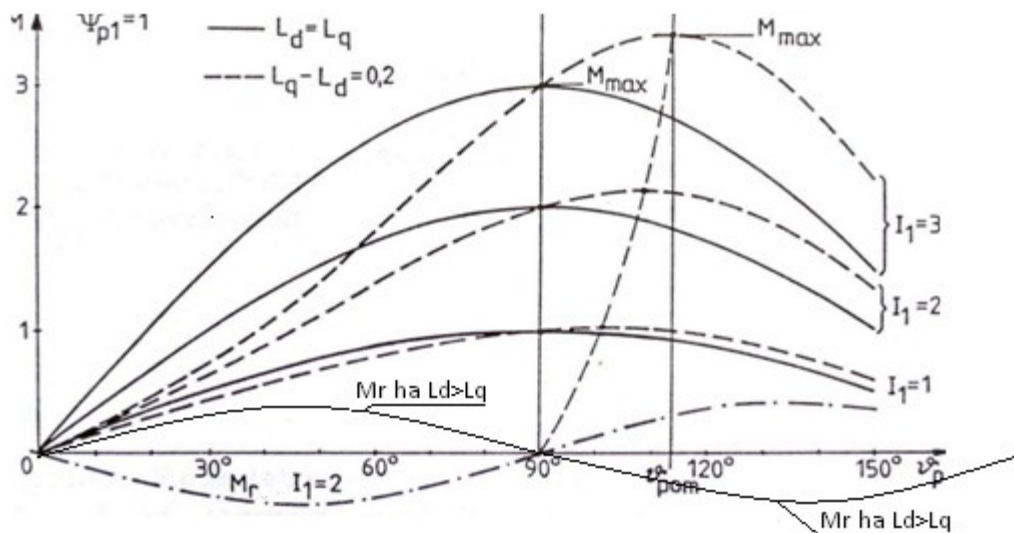
Az állandó-mágneses szinkron motorokban a nyomatékszög előírt és szabályozott mennyiség, és nem a terhelési állapot függvénye, mint a klasszikus szinkron gépben. Ezt a tartalmi eltérést hivatott jelezni a ν_p nyomatékszög jelölés használata a δ terhelési szög helyett.

A szokásos, hagyományos felépítésű és kiálló pólusú szinkrongépeknél a pólusok közti szakaszon – keresztirányban, tehát a q tengely mentén - a nagy légréssel megnövekedett mágneses ellenállás miatt az induktivitás lecsökken, kisebbé válik, mint a pólusok alatti íven, és a keletkező M_r reluktancianyomaték a 0-90 fok szögtartományban pozitív előjelű, lásd 3. ábra. Ez érdemi hozzájárulást jelent a motoros nyomatékhoz a ~30-60 fok közötti tartományban, a klasszikusnak mondható szinkron gépek motoros üzemében, míg a nem használható 90-180 fok közötti instabil tartományban negatív előjelű lévén, a munkapont nem kívánt oda kerülése esetén még inkább gyorsítaná a szinkronizmusból kiesés folyamatát.

Az autókba kerülő állandó-mágneses szinkron gépek többségében megfelelő konstrukciós kialakítással az induktivitások aránya az előzőekben említettnek fordítottja lehet. A mágneses ellenállások megváltoztatott eltéréseinek köszönhetően a reluktancianyomaték kezdeti előjele negatív, és csak a 90 foktól (a reluktancianyomaték görbéjén a kétszeres frekvencia miatt 180

foktól) kezdődően válik pozitívvá (4. ábra), majd 180 foknál lesz ismét zérus értékű. Ilyenkor az eredő, összegzett nyomaték értéke a 90 foknál lévő szinusz-függvény maximumánál is magasabb, 3. és 5. ábrák.

Ennek a módosításnak az alkalmazása jelentős hatással lehet a motorban keletkező nyomaték nagyságára, ezzel a motor méreteire.



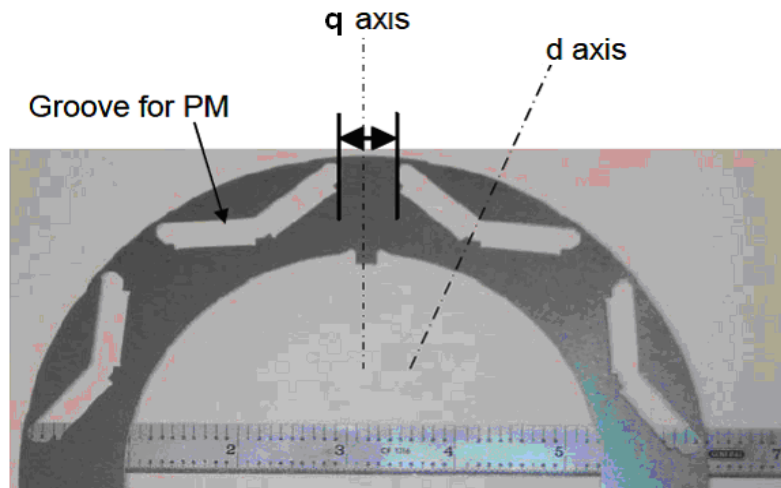
3. ábra. A szinkron motor nyomatéka a nyomatékszög (terhelési szög) függvényében. A reluktancianyomaték keletkezése. A vékony vonallal rajzolt görbe a kiálló pólusú szinkron gépé, a pont-vonalas tükörképe a tudatosan létrehozott reluktancianyomaték görbét mutatja

A 3. ábrán a névleges áramhoz, valamint annak 2- és 3-szoros értékeihez tartozó nyomatékgörbékét és az utóbbihoz tartozó reluktancianyomaték-görbét láthatjuk.

Az ábrán a folytonos görbék egyenlő értékű inductívitasokra vonatkoznak, a szaggatottak ($L_d - L_q = 0,2$ aszimmetrikus forgórészhez tartoznak. Ez utóbbi esetben megnő a maximális nyomaték és a hozzátartozó nyomatékszög $\psi_{pom} > 90^\circ$ lesz. A $\psi_p = 90^\circ$ -hoz tartozó nyomaték mindig független ($L_d - L_q$)-tól, tehát az itt ébredő nyomaték értéke a reluktancianyomaték képzésével nem befolyásolható.

A motorfejlesztés során a mágneses ellenállások irány- és hely szerinti tudatos választása szerint képződő reluktancianyomaték a megvalósult járműhajtások motorjainak nyomatékgörbékét tekintve jelentős hatású nyomatéknövelést, illetve méretcsökkenést eredményez az eltérő „d” és „q” irányú inductívitas-értékek következtében.

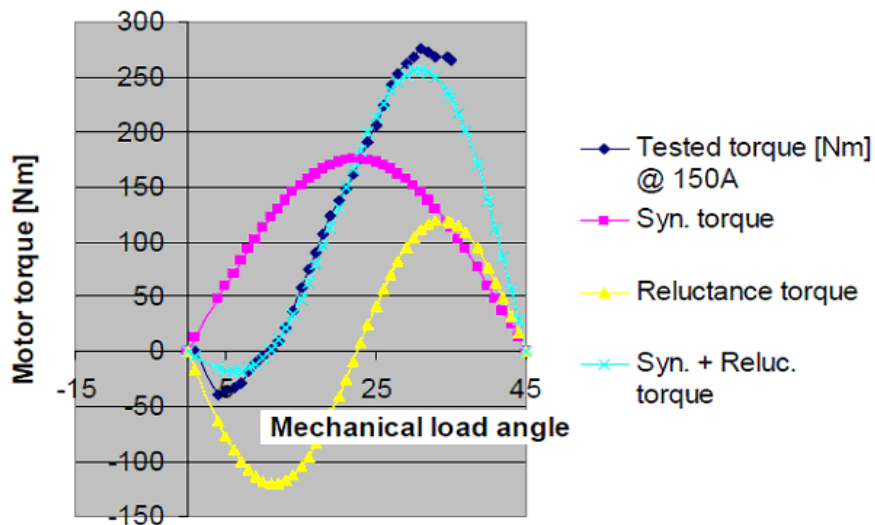
Az alábbi 4. ábrán egy nyolcpólusú szinkronmotor forgórész lemezalakja látható, a bejelölt d , hossz-, és q keresztmennyekkel, valamint egy-egy pólus állandó mágnesének helyeivel.



4. ábra. A vastestbe helyezendő mágnesekkel épülő motor forgórészlemeze. A V-alakú kivágások oldalaiba 1-1 mágneshasáb kerül majd.

Tevékenység: tanulja meg lerajzolni a nyomaték (lila) és a reluktancianyomaték (sárga) görbéinek menetét és az azok összegzését jelölő eredő (türkiz) görbét az 5. ábrán! Figyelje meg, hogy az ábrán 90 villamos foknál a reluktancianyomaték értéke zérus.

A járműhajtásra kifejlesztett szinkronmotoroknál már elérték a közel 50 százaléknyi hozzájárulást a reluktancianyomaték által, 5. ábra.



5. ábra. Valóságos, 8 pólusú szinkronmotor nyomatéki görbéi. A vízszintes tengely itt geometriai szögben jelölt. A fekete vonal a mért erdő nyomatékgörbe, a számítottnál kissé magasabb

Megfelelő irányítással, a v_p realizálására vonatkozó zárt szabályozáskör kialakításával a motorok tervezetten a mindenkor legmagasabb nyomatéki ponton üzemelnek.

3. lecke

Az állandó-mágneses szinkronmotor irányítása. Az áramvektor-szabályozás elve

Tananyag

Az önvezérlés elve

Tevékenység: tanulmányozza és jegyezze meg az önvezérlés elvét, tartalmát, lefolyását.

A klasszikus szinkron géphez képest igen jelentős üzemi és működésbeli eltéréseket, megváltoztatott tulajdonságokat egy addig nem alkalmazott irányítási megfontolás és annak teljes irányítástechnikai kiépítése teszi lehetővé: a szinkron gép önvezérlésének alkalmazása.

Létrejöttéhez előfeltétel volt a megfelelően nagy reagálási sebességű háromfázisú inverter-vezérlésnek, valamint a számítógépes hajtásirányítás hardver- és szoftver eszközrendszerének megléte.

Az önvezérlés az inverter megfelelő vezérlésével az éppen fennálló forgórész-szöghelyzethez állítja be az állórész-áramvektor irányát, a sebességtől függetlenül. Másként fogalmazva olyan kezdeti szöghelyzetű áram-színuszfüggvényeket hoz létre az állórész tekercseiben, amelyek i_1 eredő áramvektora az állórészben a kívánt v_p szöghelyzetben van a d tengelyhez képest.

Megindulás előtt álló motorban akár tartósan is ezt az értéket veszi fel, amely egy indulni-mozdulni készülő jármű, vagy robot nyomaték-kifejtésének időbeni folyamatában fontos üzemi követelmény. Ugyanakkor a felgyorsulás közben is ezt az értéket tartja.

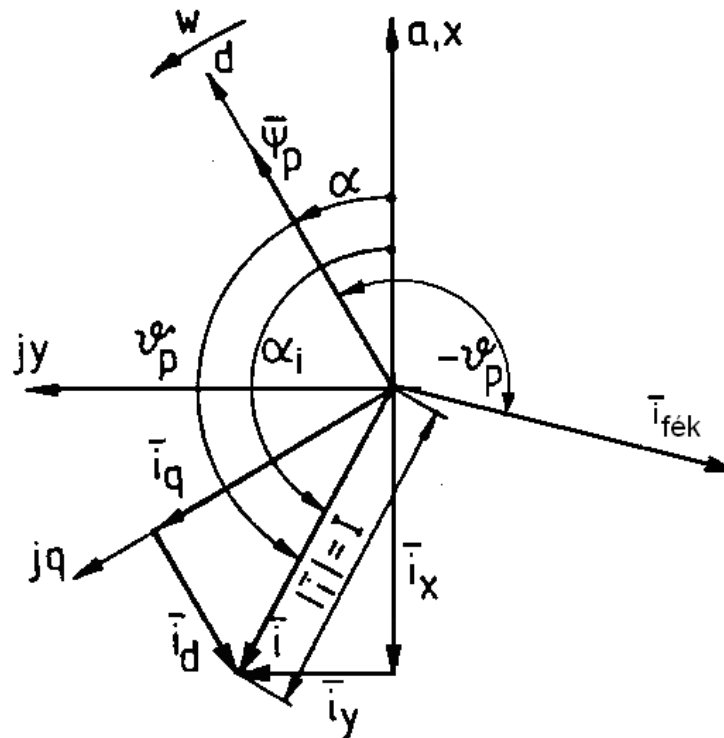
Azon motoroknál, amelyeknél a nyomatékszög 90 foknál nagyobb is lehet, a nyomatékszög áramfüggése miatt növekvő áramokhoz növekvő v_p állítandó be, irándó elő.

Motoros üzemben a nyomatékszöggel előbbre kell járnia a rotor d tengelyénél az állórészáram eredő vektorának. Generátorosban, ami járműhajtásnál az energetikailag fontos visszatápláló üzem, a nyomatékszöggel hátrábbra, fordulatszámától függetlenül.

Tevékenység: Olvassa el áramvektor-szabályozás jelölés rendszerét és működési elvét.

Az áramvektor-szabályozás elve

Az önvezérelt szinkron motor fentiek szerinti működését az ún. áramvektor szabályozásának megvalósítása teszi lehetővé. Ennek elve az alábbi vektorábrán követhető, 2. ábra:



2. ábra: az áramvektor-szabályozás elve a motoros- és a féküzemi áramvektor helyzetekkel

Az ábrán

- a jelöli az állórész a tekercsének szimmetriatengelyét, egybeesvén a motor függőleges tengelyével,
- α jelöli a rotor d tengelyének elfordulását az állórész a tengelyétől,
- α_i jelöli az áramvektor szöghelyzetét az állórész a tengelyéhez viszonyítva,
- $\vec{i}_1 = I e^{j(\alpha + \nu_p)}$ az állórész-áram vektora,
- i_d és i_q vektorok az előbbi áramvektornak a rotorhoz rendelt koordinátarendszer szerinti összetevői,
- i_x és i_y vektorok az áramvektor összetevői az állórészhez rendelt x - y koordinátarendszer irányai szerint.

Tevékenység: tanulmányozza az áramvektor kialakulását és változásait a motor megindulása előtti és utáni állapotokban.

A motor indításakor lejátszódó események az alábbiak:

- a motor megmozdulni csak a mozgásegyenlet által is leírtan, az $(M - M_t) > 0$ gyorsító nyomaték létrejöttével tud:

$$d\omega/dt = (M - M_t)/\Theta,$$

azaz a már ismertek szerint, az M_t terhelő nyomatéknál nagyobbak kell lennie a motor M nyomatékának. Ez utóbbi növelése szükséges. A feszültségegyenlet szerint

$$U_b = 4,44 f N \Phi \xi,$$

azonban álló állapotban ω illetve f értéke 0, így $U_b = 0$, ezzel a szükséges kapocsfeszültség állandó értékű áramnál csak a fázistekercs ohmos ellenállásával lesz arányos, $U = I R$.

Az inverter az egyes fázistekercsekbe az áramvektor aktuális szöghelyzete szerinti, a Park vektorból (inverz Clark transzformációval) is visszaszámolható i_a , i_b , i_c áramokat vezeti, amelyek amplitúdóját PWM vezérléssel állítja be. Ezen áramok a rotor megmozdulásáig az áram-idő függvényt tekintve lassan növekvő egyenáramokként jelennek meg, mert az álló rotor miatt szöghelyzetük a tekercsek helyzetéhez képest nem változik, értékük valamilyen felfutási sebességjel szerint nő, de más változás nincs bennük.

Az inverter kapcsolási frekvenciája által is létrehozott feszültség-idő-, illetve áram-idő terület a feszültség, illetve az áram effektív értékének felel meg. Utóbbi az eredő vektor abszolút értékét, hosszát jelenti.

Ha az eredő áramvektor hossza, és a vele képződő nyomaték meghaladja az M_t értékét, a $d\omega/dt = 0$ állapot megszűnik, megmozdul a forgórész.

Az α szöghelyzetet érzékelő jeladó az áramvektor szabályozásában ezt megjeleníti, és az inverter vezérlése a szöghelyzet-változásnak megfelelően átrendezi az a, b, c tekercsek táplálását. Az i_a , i_b , i_c áramok új értékei az új v_p nyomatékszögénél az új i_x és i_y vektoroknak megfelelően egyenként újabbakká válnak, az inverz Clark-transzformáció számítása szerint. Ez fizikailag az állórészben a mágneses tér forgásának megkezdődését jelenti, és az a rotor szöghelyzet-változását követi, kis sebességeknél 1/10 foknál is kisebb hibával.

Ez az önvezérlés realizálódása. A számítások egy teljes ciklusban mintegy 1/10 ms alatt lezajlanak, tehát meglehetősen nagy szögfelbontással, elegendően pontosan képes követni az áramvektor helyzete a rotoréval előírtat - természetesen a nyomatékszögnek megfelelően előretolt értéket követve.

A követés 16 ezer/perc fordulatszámú robothajtásokban is sikeres, és azok gyorsulásai több nagyságrenddel nagyobb értékűek, mint egy járműé.

Ha a terhelőnyomaték megnő, és ha a szabályozás nem fordulatszám-tartó, vagy a kifejthető áram és nyomaték nem növelhető, a mozgásegyenlet előjele negatívvá válik, a fordulatszám esni kezd. Az áramvektor szöghelyzet-követése most is működik, együtt lassul a rotor és a forgó mágneses tér, egészen a megállásig, de akár a negatív fordulatszámok felé is.

Féküzem kapcsolásakor az inverter néhány ciklus alatt átáll, azaz megszünteti a volt áramvektort. Az áramok az időállandók miatt késlekedéssel megszűnnek, majd a negatív előjelű $v_{pfék}$ nyomatékszögnek megfelelően újra felépülnek. A rotor most megelőzi az eredő áram vektorát, magával húzza az állórész mágneses terét. Megjelenik a féknyomaték, a motorosból generátoros üzem jön létre, akkumulátorba táplálva, ha fogadóképes a rendszer, vagy ha nem, fékellenállásra dolgozva.

A transzformációk szükségessége

Amint az előzőekben láttuk, az áramvektor-szabályozás elvégezhetősége szükségessé teszi az egyes koordinátarendszerek közti átszámításokat, valamint a szimmetrikusnak feltételezett háromfázisú áramok eredő vektorának meghatározását annak érdekében, hogy egyetlen áramvektor-értékkel jellemezhessük a három fázisáramot, bármely szöghelyzetben.

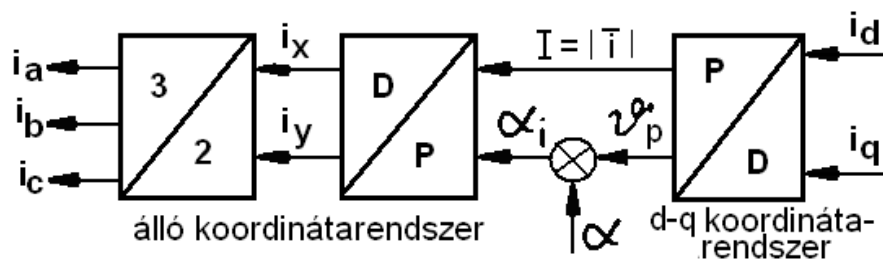
Ezeket fordítva is el kell végeztetnünk, hogy a forgórész α aktuális szöghelyzetéből, a megadott i_d és i_q áramok alapjeleiből, valamint az átszámítás után kapott i_x és i_y vektorösszetevőkből a három fázisáram megkapható legyen.

Az alábbi művelet-sorok, 1. ábra, a két irányban szükséges transzformációs számításokat mutatják. Az i_d - i_q alapjelekből az i_a , i_b , i_c áramok (valójában az azok áthajtásához szükséges feszültségek) meghatározásáig terjedő műveleteket az 1. ábrán láthatjuk. A másik blokkvázlaton, 2. ábra, pedig a mért i_a , i_b , i_c áramok jeleiből meghatározandó pillanatnyi i_d - i_q áramértékeket, mint áram-ellenőrző jeleket számító műveletsort láthatjuk. Mindkét számítás tartalmazza a

- derékszögűből a polárkoordináta-rendszerbe átszámításokat, valamint
- a derékszögűből a 3-szor 120 fokos eltolódású vektorok (Clark illetve Clark⁻¹ transzformációk) számítását az egyes állórész-tekercek számára,
- az elfordulás α szögét és
- a nyomatékszög ψ_p értékét.

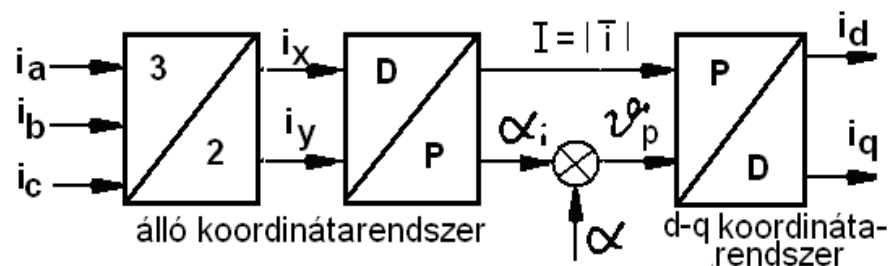
Az első műveletsort, de feszültségjel kimenetekkel találjuk beépítve a teljes szabályozási körben, a .. ábrában, a felső sorban, mivel az áramok létrehozásához az inverter feszültségjeleket valósít meg.

A második műveletsort szintén egy blokkba összevontan a szabályozási kör jobb alsó részén találjuk, amint a mért áramokból az α szögelfordulás figyelembevételével az i_{de} - i_{qe} mennyiségeket, a hossz- és keresztirányú áramok ellenőrző jeleit számítja ki.



1. ábra: az aktuális i_d - i_q igényekből, mint alapjelekből az egyes fázisáramok meghatározása

A második műveletsort szintén egy blokkba összevontan a szabályozási kör jobb oldali alsó részén találjuk, amint a mért áramokból és az α szögelfordulás figyelembevételével az i_{de} - i_{qe} mennyiségeket, a hossz- és keresztirányú áramok ellenőrző jeleit számítja ki.



2. ábra: az ellenőrzőjelek képzése a fázisáramokból, az aktuális i_d - i_q értékek megállapításához

A szabályozás felépítése és hatásvázlata járműhajtásban, a nyomatéknak megfelelő áram szabályozott értékének megvalósításához

Járműhajtásban, amely csak ritkán működik sebességszabályozott üzemben, nem szabályozott körben lévő, hanem csak vezérelt motorirányítás üzemel a beadott M nyomaték-jelre vonatkoztatva.

Visszacsatolás csak az áramvektor-szabályozáshoz, a rotor szöghelyzetről történik, a transzformációk elvégzéséhez, és ezek révén az áramvektor értékének zárt körben történő szabályozásához, sebességtől függetlenül állandó értéken tartásához.

A gázpedálhelyzetnek megfelelő nyomatékjel után áram-, vagy praktikusán nyomatékfelfutás-beállító illetve korlátozó blokk következik, 7 ábra.

A 90 foknál nagyobb nyomatékszögűre tervezett hajtásokban a v_{po} számító egység számítja ki a megfelelő v_{po} nyomatékszöget, valamint a $\sin v_{po}$, $\cos v_{po}$ függvényértékeket a nyomatékszögnek már említett áramfüggése miatt.

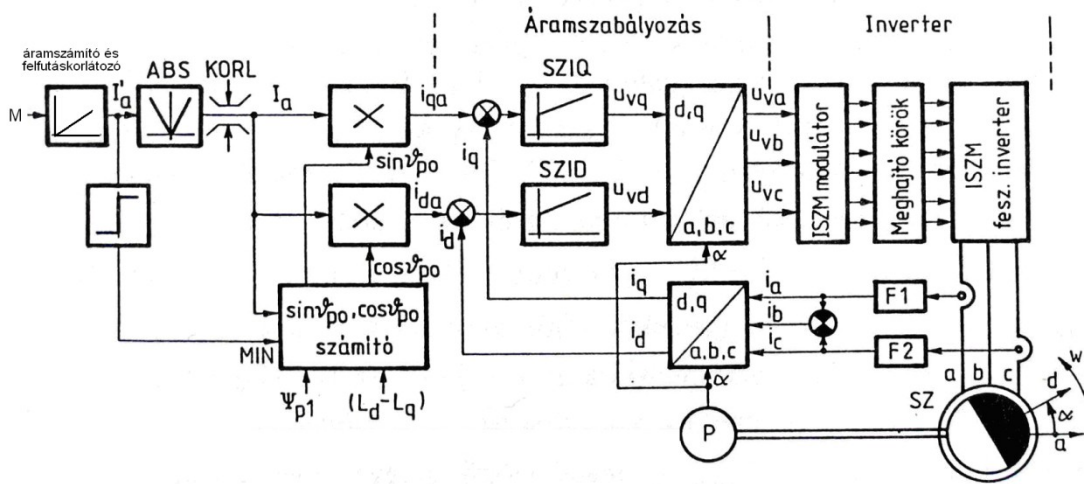
A kereszt-, és hosszirányú áramalapjeleket szorzók számítják ki a nyomatékszögből:

$$i_{qa}=I_a \sin v_{po}, \text{ és } i_{da}=I_a \cos v_{po}.$$

Az áramok érzékelésénél az F1 és F2 szűrők eltávolítják az ISZM impulzus-szélesség modulált vagy más néven PWM vezérlés vivőfrekvenciájának megfelelő komponenseket. Az egyes fázisáramok mérésekor bármely kettő - itt az i_a és i_c - mérése elegendő, ha a rendszert szimmetrikus háromfázisúnak tarthatjuk. Ekkor a fázisáramok algebrai összege zérus, és i_c a kettő különbsége.

A koordináta transzformációk összevont blokkjai, $(d,q/a,b,c$ és $a,b,c/d,q)$ mint már láttuk, valójában az 7. ábra szerinti blokkosort tartalmazzák. Ezen műveletekhez szükséges a forgórész elfordulásának α jele is. A v_p aktuális értékei az alapjel-számításokkor képződnek.

A nyomaték-kivezérlés működésének áram- és nyomaték-változtató hatását a járművezető személy érzékeli. Értékeli és ítéletet alkot, hasonlóan ahhoz, mint amikor a nem villamos hajtású autó gázpedálját kezeljük. Ha a nyomatéket például nagynak tartjuk, a gázpedál visszavételével egy új, kisebb értéket írunk elő, amely viszont itt ebben a hajtásban igen rövid idő, késleltetés nélkül néhány ms alatt realizálódna. A késleltetésre, a benzines autókhoz hasonló nyomaték-változtatási időállandóra a túlzott reagálási sebesség nem kívánt következményei miatt van szükség.



7. ábra: áramvektor-szabályozás elve vezérelt nyomatékérték megvalósításához, amikor nincs sebességszabályozási funkció