

Tevékenység:

Rajzolja le a koordináta-rendszerek közti transzformációk blokkvázatait, az önvezérelt szinkronmotor sebességszabályozási körének néhány megjelölt részletét, a rezolver felépítését és kimenőjeleit, a mezőgyengítés hatását bemutató ábrát a sebesség függvényében.

Jegyezze meg a felsorolt ábrák tartalmát, a rezolver működési elvét a szögek meghatározásáig, a mezőgyengítés szükségességét és megoldását áramvektor-szabályozású, állandó-mágneses szinkronmotorban.

Tanulmányozza az 5. pontnál ismertetett MATLAB-modell felépítést és működését a leírás alapján.

1. A transzformációk szükségessége

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

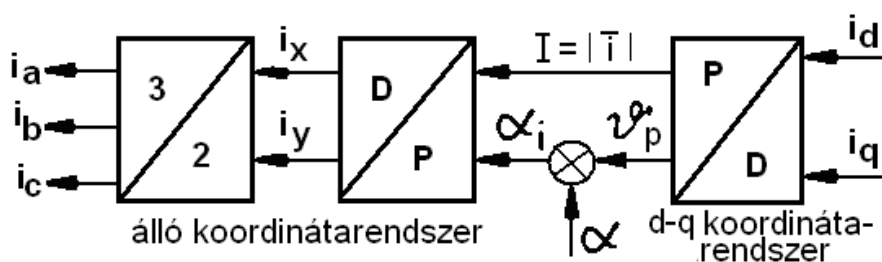
Ezeket fordítva is el kell végeztetnünk, hogy a forgórész α aktuális szöghelyzetéből, a megadott i_d és i_q áramok alapjeleiből, valamint az átszámítás után kapott i_x és i_y vektor-összetevőkből a három fázisáram megkapható legyen.

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 (közelebbről az azok áthajtásához szükséges feszültségek) meghatározásáig terjedő műveleteket az 1. ábrán, 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.

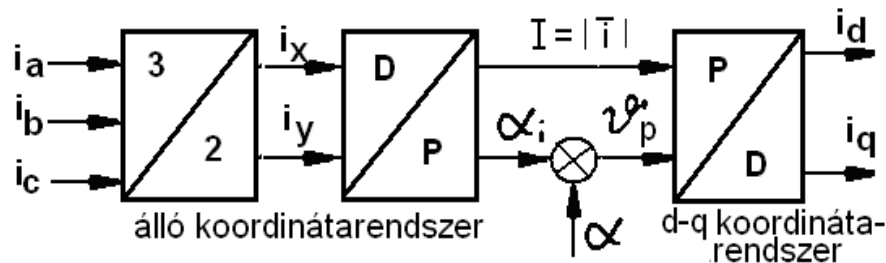
Az első műveletsort, de feszültséggel kimenetekkel találjuk beépítve a 9.170 ábrában, a felső sorban, mivel az áramok létrehozásához az inverter feszültségjeleket valósít meg.

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.



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_d - i_q mennyiségeket, a hossz- és keresztirányú áramok ellenőrző jeleit számítja ki.

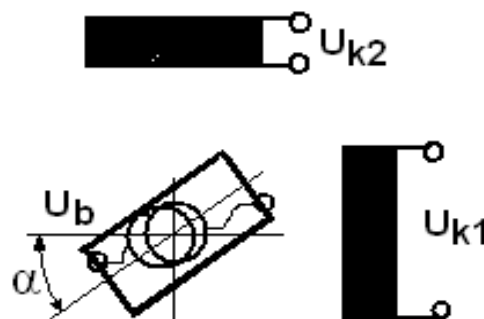


2. ábra: az ellenőrzőjelek képzése a fázisáramokból, az aktuális i_d - i_q értékek megállapításához

2. A szögelfordulás érzékelése

A szögelfordulás érzékelésére gyakran rezolvert használnak, mert ez az eszköz egy fordulaton belül abszolút jellegű, és szögfelbontása alapvetően csak a szinuszos-koszinuszos kimenőjelek feszültségmérésének pontosságától függ. A rezolver kimenőjeleiből visszaállított szögértékek a robothajtásokban a robot belső számításaihoz szükségesek, járműben nem, így itt a motor irányításához kevésbé finom szögfelbontás is elegendő. Robothajtáshoz legalább 16 bites szögfelbontás szükséges, még az ezt tovább javító mechanikai áttételek megléte esetén is. A felbontás az utóbbi években – hozzávetőlegesen 2000 óta, a pontossági igények növekedésével- már 32 bitre nőtt.

A 3. ábrán láthatóan a két, egymástól 90 villamos fokra lévő állórésztekercsben indukálódó feszültség a forgórész szöghelyzetétől függően változik, de mindkettőben az indukálódott feszültség jelalakja azonos a forgórészbe vitt feszültségével. A csúszógyűrűkön át történő táplálás általában 5 V effektív értékű váltakozó feszültség, 4-10 kHz közti frekvenciával. A feszültségjel alakja többnyire szinuszos, de más, periodikus jel is alkalmazható, így például négyszöghullám, amelynek előállítása egyszerűbb.



3. ábra. A rezolver elve

Mivel a két tekercs egymáshoz képest 90 fok szöghelyzetű, az első tekercsen az α szög szinusz-, a másodikon koszinusz függvény szerinti értékeinek megfelelően mérhető a feszültség:

$$U_{k1} = U_{be} K_1 \sin \alpha, \text{ illetve}$$

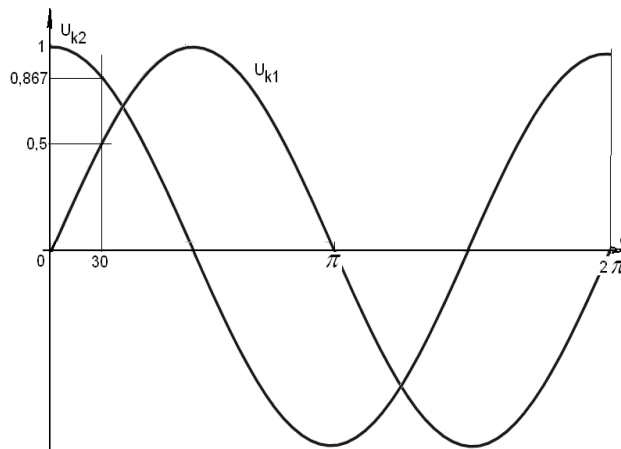
$$U_{k2} = U_{be} K_2 \cos \alpha,$$

ahol a K csatolási tényezőket méréssel állapítják meg.

A egyes feszültségjelek az α szöghelyzet függvényében a 4. ábrán láthatók.

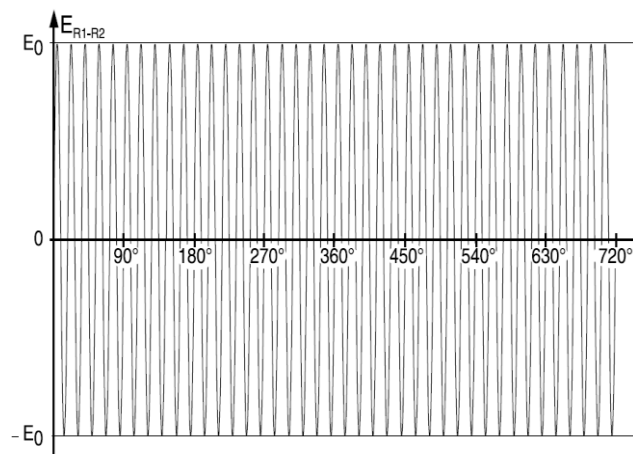
A szöghelyzetek számítására többféle módszert dolgoztak ki, a legegyszerűbb a mért feszültséget szögfüggvényértékként tekinteni, az inverz szinusz-koszinusz függvényekkel a szöget meghatározni, majd az ellenőrzéseket a szögfüggvények azonosságai szerint elvégezni, mivel két, egymástól független függvényérték keletkezik a mérésakor.

A rezolver egy körülfordulásig abszolút mérőeszköz, de a további 2π fordulatokat számlálni kell, azaz inkrementális is. Zavarbiztonsága nagy, mert túimpulzus alakú zavarjelek nem változtatják meg az egyes kimenőjelek feszültség-idő területét. Érzéketlen a fordulatszám és a tápfeszültség változásaira. Hátránya a jelfeldolgozással együttes készülék magas ára, emiatt Hall-jeladókkal kiegészített inkrementális eszközökkel is megoldották a szögek meghatározását. Itt a két Hall-jeladó a 90 fok helyzetét adja, így abszolút, azaz nem növekményes – inkrementális- értékek segítik a jelfeldolgozást.

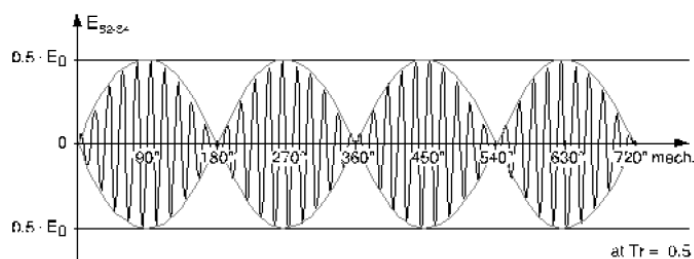
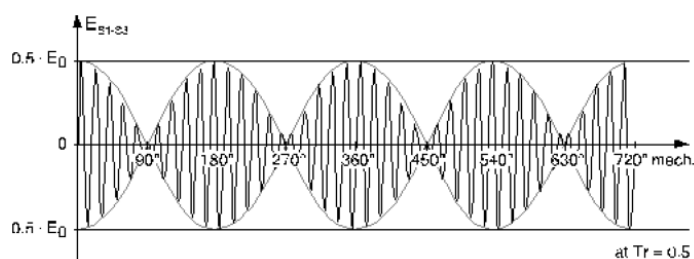


4. ábra. Az egyes feszültségjelek az α szöghelyzet függvényében

Rezolver gyári mérési görbéi láthatók az 5. ábrán.



5.a) ábra: az alkalmazott bemenőjel



5. b) ábra: a kapott kimenőjel alakja két teljes körülfordulásra, 20.000/perc fordulatszámon.



5.c) ábra. Egy rezolver fényképe. Az állórész külső átmérője kb. 25 mm.

3. A szabályozás felépítése és hatásvázlata

A jármű- és szervohajtásoknál igényelt rövidebb idejű nagy nyomatékok esetében energetikailag is kedvezőbb a $v_p = v_{pom}$ üzem a $v_p = 90^\circ$ üzemnél, ha az induktivitások különbsége $(L_q - L_d) > 0,2$. Kisebb különbségeknek nincs számottevő hatásuk.

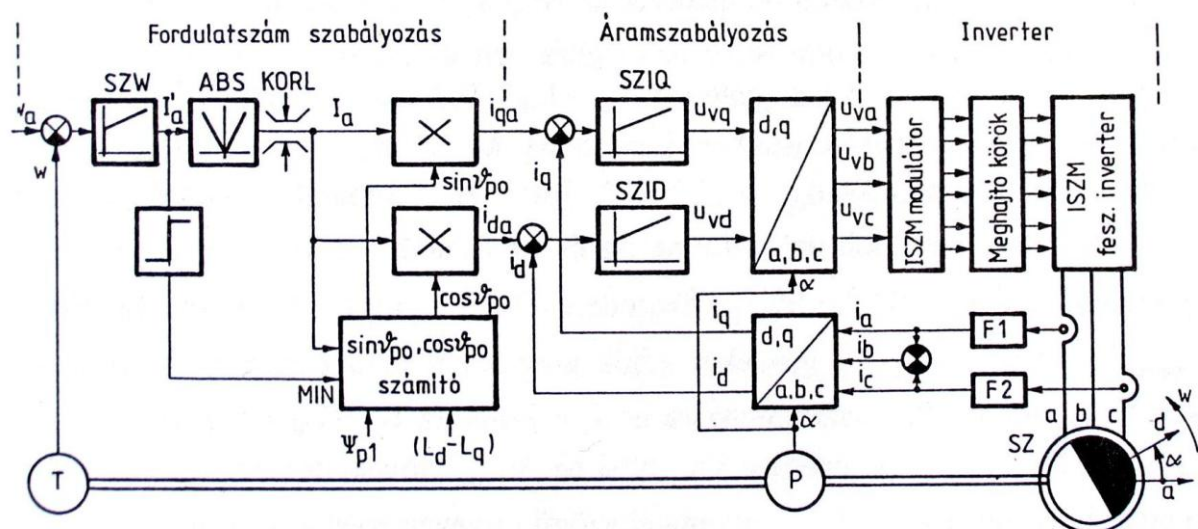
A 2. lecke 4. ábrájából kiolvasható, hogy relatív mennyiségekben $M = 3$ -hoz $v_p = 90^\circ$ mellett $I=3$ tartozik, (ezzel $I^2 = 9$). $v_p = v_{pom}$ mellett $L_q-L_d = 0,2$ -nél az áram szükséges értéke csak $I = 2,68$, és $I^2 \approx 7,18$.

Az $L_q-L_d = 0,4$ különbségnél $I \approx 2,35$, amivel az áramnégyzet már csak $I^2 \approx 5,52$ lesz, ez utóbbival már közel 40 %-os rézvesztés-csökkenés érhető el ugyanazon tekercsben, $M = 3$, azaz háromszoros nyomatékszinthez.

A $v_p = v_{pom}$ vezérlés az inverter számára is kedvezőbb, lévén annak árama is a legkisebb.

Az így beállított üzem a minimális áramú jelzőt kapja.

Egy fordulatszám-szabályozott szinkron motoros hajtás elvi blokkvázlata látható a 6. ábrán.



6. ábra. Az áramvektor-szabályozást realizáló szabályozási kör, baloldalon a nyomatékszög-számítást végző modulokkal

A szabályozókör felépítése lehetővé teszi a minimális áramú üzem beállíthatóságát, azaz ehhez szükséges előzetes számításokat, másként fogalmazva az áramtól is függő nyomaték-maximum helyének-, és az azzal kiadódó v_{pom} nyomatékszögnek a számítását.

Az SZW fordulatszám szabályozó I_a' kimenőjelének I_a abszolút értéke lesz az áramvektor I amplitúdójának alapjele. Az $s\omega$ szabályozónak van alárendelve az $s\omega$ kereszt-, és az $s\omega$ hosszirányú áramszabályozó. A v_{po} számító egység számítja ki a a minimális áramot eredményező v_{po} nyomatékszöget, valamint a $\sin v_{po}$, $\cos v_{po}$ függvényértékeket. A kereszt-, és hosszirányú áramalapjeleket szorzók számítják ki:

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

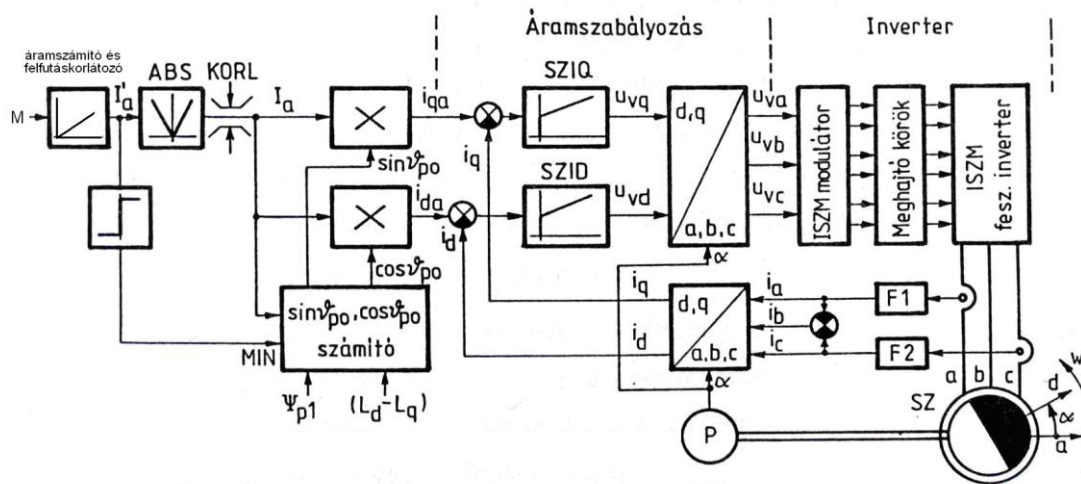
Az F1 és F2 szűrők eltávolítják az ISM vagy más néven PWM vezérlés vivőfrekvenciájának megfelelő komponenseket.

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 olvasható volt, valójában az 7. ábra szerinti blokkort tartalmazzák. Ezen műveletekhez szükséges a forgórész elfordulásának α jele is. A v_p aktuális értékei az alapjel-számításokkor képződnek. Az ábra sebességszabályozási kört tartalmaz, amely robotok pozíciószabályozásához kiegészítendő az útalapjel, α előírhatóságával, továbbá a körerősítés változtatásához szükséges blokkal és jelkorlátozási lehetőségekkel.

Járműhajtásban, amely csak ritkán működik sebességszabályozott üzemen, nem szabályozott, hanem csak vezérelt motorirányítás üzemel az alapjelet tekintve: a 9.170 ábrán látható kör úgy módosul, hogy

- a sebességjel visszacsatolása elmarad,
- az SZW sebességszabályozó-tulajdonságokat beállító blokk áram-, vagy praktikusan nyomatékelfutás-szabályozó vagy korlátozó funkciót kap, a többi változatlanul maradhat, lásd 7. ábra. A visszacsatolás nélküli működés hatását az irányító személy érzékeli, értékeli, ítéletet alkot, hasonlóan ahhoz, mint amikor az autó gázpedálját kezeljük.



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

Ha a jármű alkalmas sebességszabályozott üzemre, akkor ennek érvényesítésével az eredeti szabályozási kör funkciói visszaállnak.

A szabályozás tanulmányozásához, jobb megismeréséhez és megértéséhez a MATLAB Simulink könyvtárában található PMSM motor modellje, futtatási- és módosítási-változtatási lehetőségei érhetők el.

4. A sebességtartomány kiterjesztése, mezőgyengítés.

Amint erről már az 1.2 pontban szó esett, fordulatszám-tartomány kiterjesztésére, azaz a névleges sebességet jelentősen meghaladóan is alkalmazandó motorváltozatoknál mezőgyengítés is szükséges, a belső feszültség korlátozására. Az

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

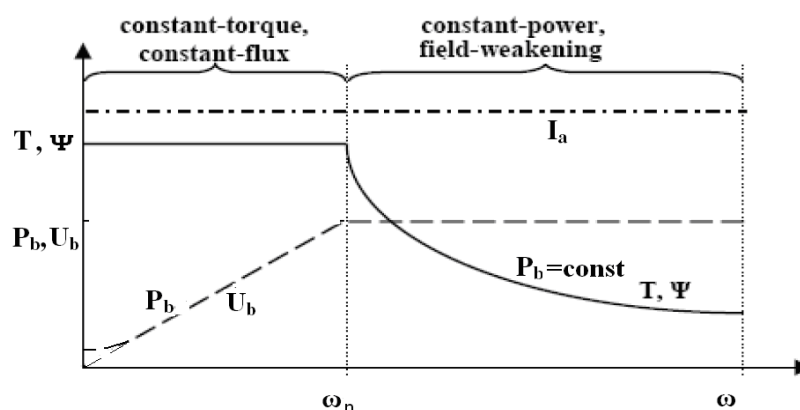
feszültségegyenlet érvényessége nem fordulatszám-függő, tehát az elért névleges, tervezési fordulatszám felett is a belső feszültség sebességarányosan nő.

Amíg az aszinkronmotor fluxusa az állandó kapcsolófeszültség mellett a növelt sebességtartományban csökkenni kezd, PM szinkron motornál az állandó mágnesek biztosította mágnesmező fluxusa nem változik. A névleges sebesség eléréséig a kapcsolófeszültség frekvencia-, vagyis sebességarányosan növelendő, ha változatlan árammal kívánjuk táplálni.

Ha nincsenek tervezési tartalékok, akkor névleges feletti sebességen, de a kapcsolófeszültség további növelése nélkül az áram és a nyomaték gyorsan csökken, a motor nem lesz további sebességnövelésre használható, legfeljebb erősen csökkent nyomaték mellett.

A 8. ábrán a szaggatott vonal a teljesítmény és a feszültség változását mutatja az ω függvényében. Az ω_n , névleges, alatt a fluxus és a nyomaték állandó, éppúgy, mint az aszinkron motorban. Az ω_n feletti tartományban csak teljesítmény tud állandó maradni, állandó feszültségű táplálással, míg a fluxus és a nyomaték hiperbolikusan csökkennek - amennyiben ez a szándék végrehajtható.

Ha a kapcsolófeszültség névleges értékén akarunk jelentős sebességnövelést végezni, miközben $I = \text{const}$, lásd az ábra felső vonalát, ω_n felett is fenn kell tartani a kapcsoló-, és a belső feszültség különbségét. Ehhez viszont a belső feszültség növekedését meg kell akadályozni, valamilyen fluxuscsökkentési eljárással.



8. ábra. a sebesség növelésének lehetőségei és követelményei. A fluxus itt Ψ -vel jelölt. (feliratok: állandó nyomaték, -fluxus, állandó teljesítmény, mezőgyengítés)

Ez nem könnyű feladat, ha gép állandó mágnesekkel épült. Gerjesztőtekercsekkel épült egyenáramú motorokban a fluxuscsökkentés gyakorlata 1870-től ismert és máig alkalmazott módszer az adott feszültségű táplálásnál a sebesség növelésére, a tekercsben folyó áram csökkentésével:

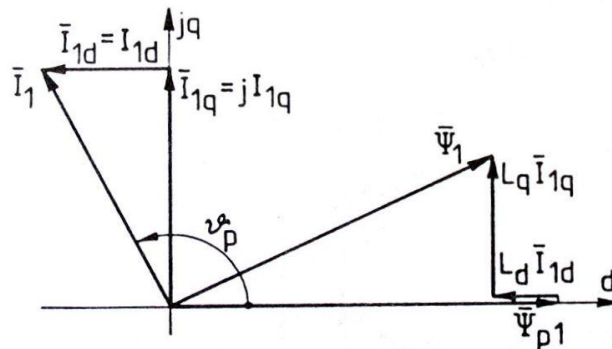
$$\omega = U_b / k \Phi,$$

ami szerint a fluxusnak egy, a kommutációt és kefészikrázást még eltűrhető mértékben rontó határig való csökkentése a sebességet jelentősen emeli. Állandó mágnesek alkalmazásánál ezek fluxusa csökkentendő valamilyen használható megoldással.

Az áramvektor szabályozású szinkron motorok állórészárama eredő vektorának i_d összetevője az áramvektor-szabályozás elvi ábráján, 2. lecke 2. ábrája, is ellentétes irányú az állandó mágnesek által létrehozott Φ fluxusával. Ennek fluxuscsökkentő hatása nem jelentős, mivel a

nyomatékképzésben csak a q irányú összetevő vesz részt, és ha az $(L_q - L_d)$ különbség jelentős, akkor a 90 foktól való eltérés az eredő nyomatékban mégis jelentős többletet eredményez.

Tovább előre forgatva az áramvektort, nő az i_d értéke, és a fluxus érdemben is csökkenni kezd. Növekvő sebességeken változó, növekvő mértékű i_d -összetevő beállítása szükséges, 9. ábra, amely analitikusan is számítható, és motorszimulációs számításokkal is vizsgálható.



.9. ábra. az áramvektor előbbre forgatása, v_p további növelése az i_d -összetevő balra meghosszabbodását eredményezi, amely algebrailag csökkenti az itt ψ_{p1} -el jelölt, jobbra mutató főfluxus hatását.

A mezőgyengítés megvalósítására tehát a névleges feletti sebességtartományban van szükség. A tovább már nem növelhető kapcsolófeszültségen a v_p még tovább, előbbre forgatandó, akár 150-160 fokig is, hogy az i_d irányú összetevő növekedjen, és ezzel csökkentse a beépített állandó mágnesek által létrehozott fluxust.

A v_p változtathatósága tehát az áramszabályozás kiterjeszthetőségét igényli, és emiatt már a motor, illetve a hajtás tervezésekor eldöntendő kérdés - amennyiben a vele járó rendszer-bonyolultság növekedése főként a motor-tömeg csökkenésében megtérül.

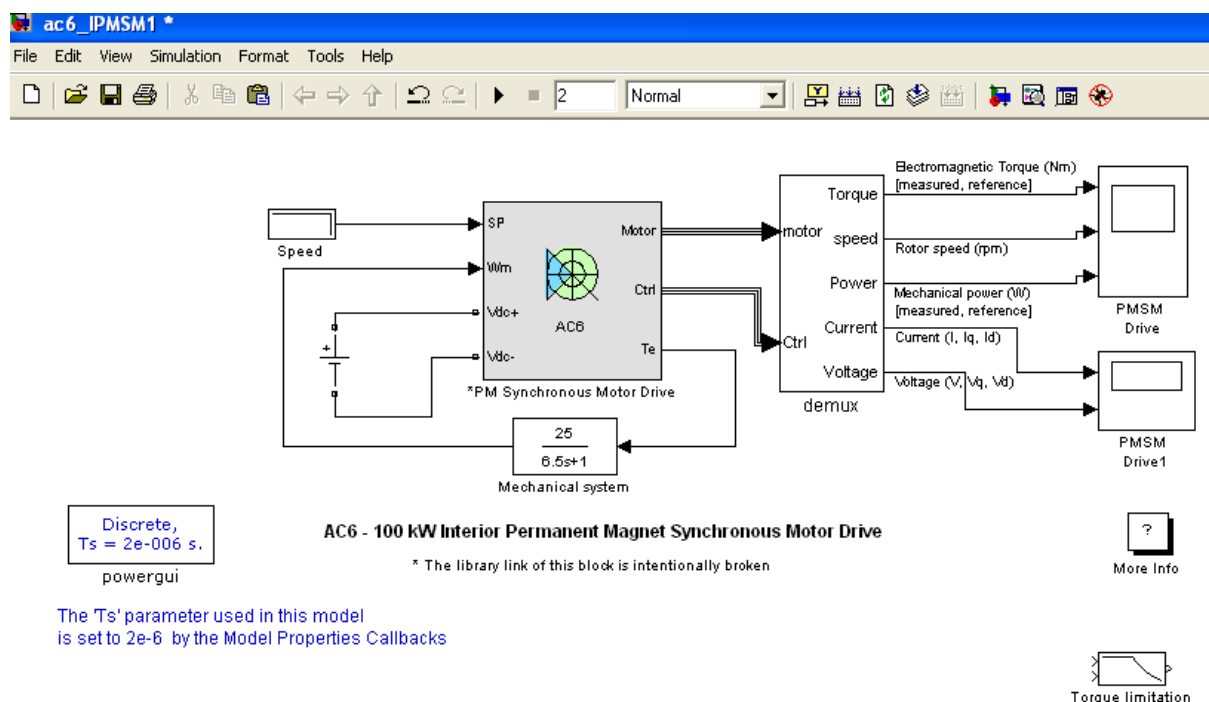
Meg kell jegyezni, az egyes eltérő mágnes-elrendezésű motorkonstrukciók eltérő módon reagálnak a mezőgyengítési szándékra, az áramvektor jelentős elforgatására. A szimulációs vizsgálatok szerint az eltérő mágneses ellenállásoknak, és eltérő induktivitásoknak köszönhetően, különösen a mélyen befektetett mágnesek változó elrendezései esetén mindezekre jól és rosszul reagáló változatok is lehetségesek. Köztük egyesek 300% sebességű üzemre is alkalmasakká válnak névleges kapcsolófeszültségen.

5. MATLAB-modellvizsgálatok állandómágneses szinkronmotoros hajtásokra

Az újabb MATLAB-Simulink programcsomagokban már több állandómágneses szinkron motoros hajtás-modell található, amelyek közül itt egy 100 kW teljesítményű, 12500/p legnagyobb fordulatszámú, tehát mai villamos autókban alkalmazott kategóriájú motor modell, AC6 IPMSM jelzéssel, szimulációs vizsgálataiba tekintünk be.

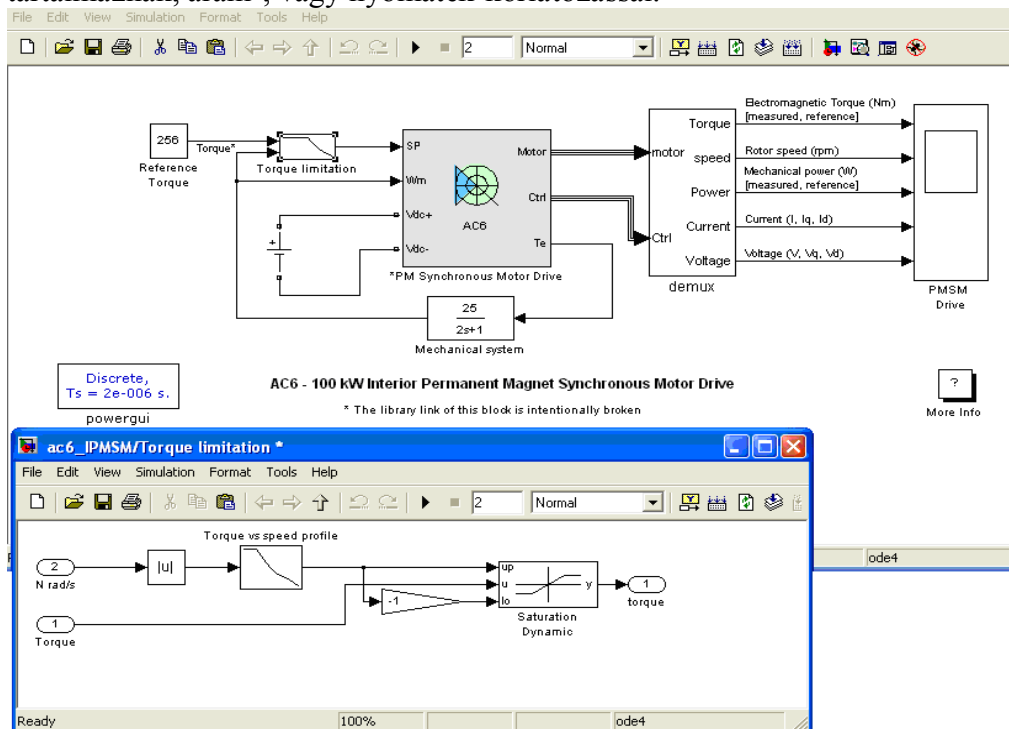
A modell főbb adottságai

A modell egy mezőgyengítésre is alkalmas áramvektor-szabályozást tartalmaz. A szinkronmotor hossz- és keresztirányú induktivitásai eltérőek, ez reluktancia-nyomaték képzésére alkalmassá teszi a motort.



1. ábra. Az állandómágneses szinkronmotoros hajtásmodell fő ábrája.

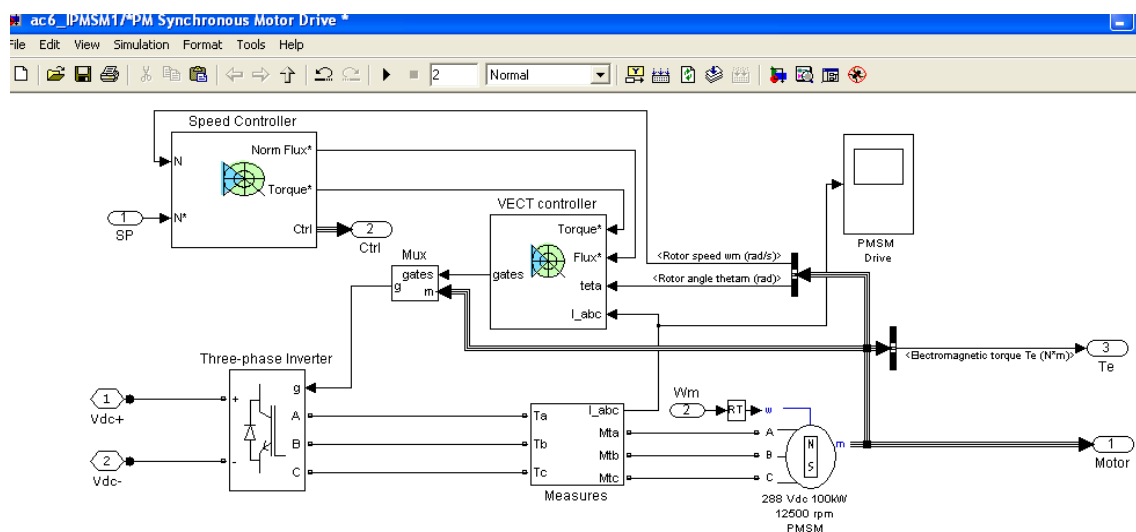
Az eredeti modell nyomaték-alapjelle sebességfüggő korlátozást kapott, amelynek jelölése a 2. ábrán látható. A sebesség-, vagy nyomaték-alapjel használata a hajtás rendeltetésétől függ – szerszámgép-, és robot- stb. hajtások pozíciószabályozásai sebességszabályozást tartalmaznak, áram-, vagy nyomaték-korlátozással.



2 ábra. A nyomaték-alapjel és annak sebességfüggő korlátozása a nyomaték-korlátozó blokk kinyitásával írható át. A függvényvonal adatai táblázatosan írhatóak.

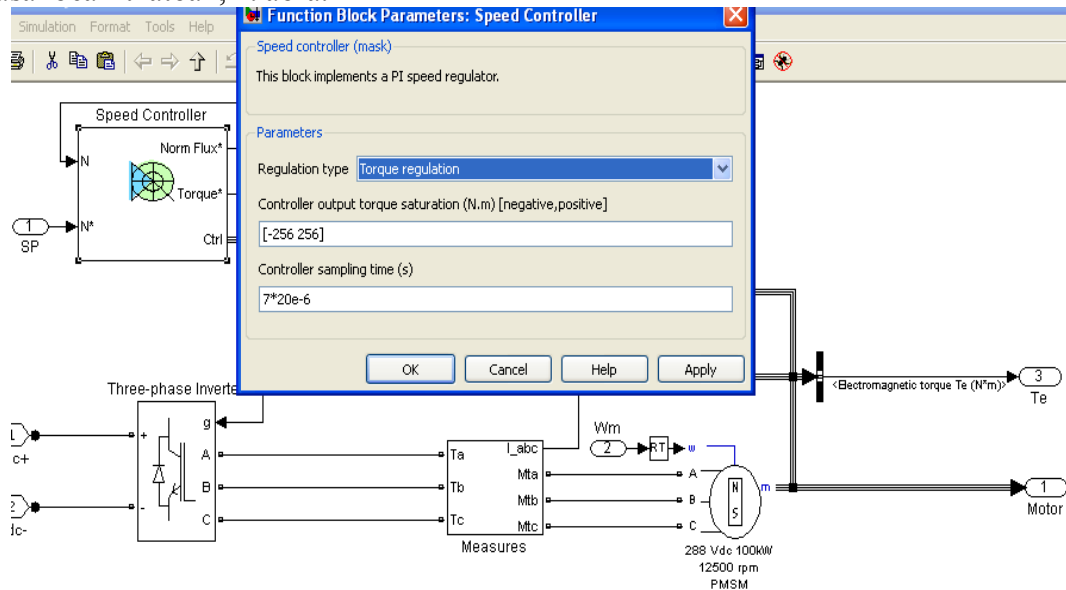
Járműhajtások alapvetően nyomatékszabályozott vagy nyomatékszint-vezérelt üzemben dolgoznak, esetenként sebesség-korlátozással, a sebességszabályozott alkalmazások gyakorisága kisebb. Ebben a modellben a sebesség-vagy nyomatékszabályozott jelleg átírása a 3. ábrában látható sebességszabályozó blokk kinyitása után lehetséges.

A kinyitott hajtásszabályozás fő egységei láthatóak az alábbi, 3. ábrán.



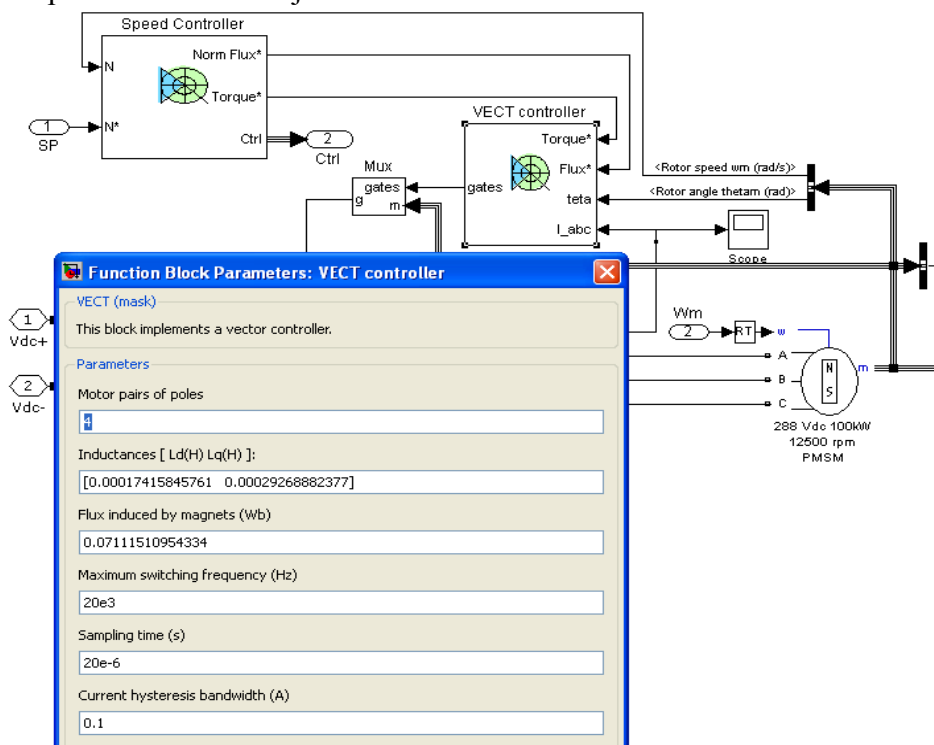
3. ábra. A kinyitott hajtásszabályozás fő egységei: inverter, sebességszabályozó, amely nyomatékszabályozásra átírható, az áramvektor-szabályozó, és jobbra alul a szinkron motor

A sebességszabályozó blokk kinyitásával, a választható szabályozási feladat és annak korlátozásai beállíthatók, 4. ábra.



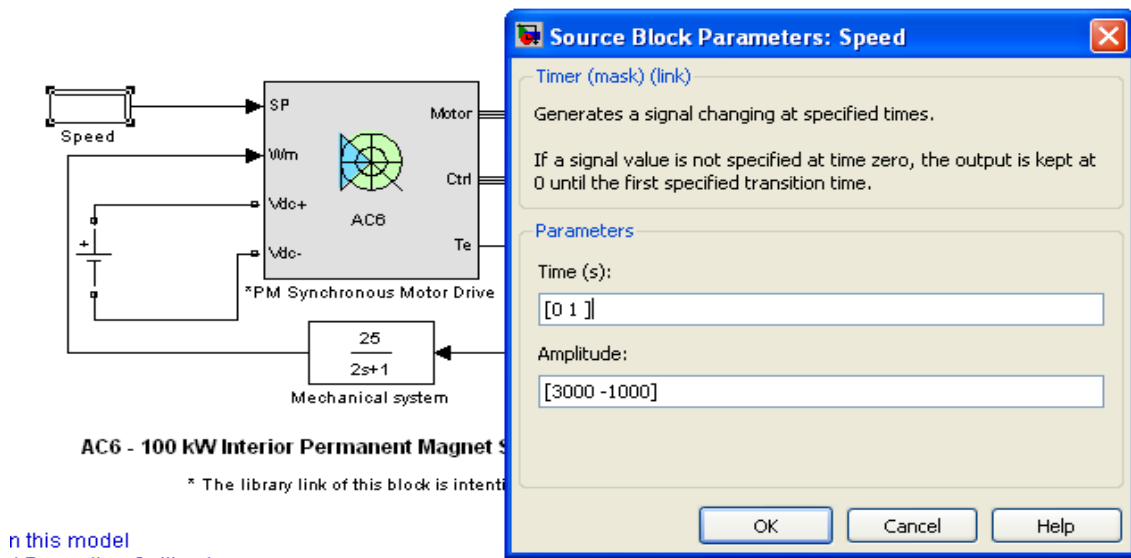
4. ábra. A sebességszabályozó blokk nyitva, a választható szabályozási feladattal és annak beállítható korlátaival. Az eredeti program nyomatékszabályozó körének nyomaték-korlát értékei láthatóak az ablakban. A mintavételezési idő a valós folyamatban 140 μ s értékre beállított.

Az áramvektor-szabályozó blokk kinyitásával, 5. ábra, majd a motor blokkjának nyitásával a motor néhány fontosabb adatát írhatjuk be vagy át. Láthatóan közel kétszeres az arány a szinkronmotor hossz- és keresztirányú induktivitás értékei között. Az inverter beállítható legnagyobb kapcsolási frekvenciája 20 kHz.



5. ábra. az áramvektor-szabályozó körbe illesztett szinkronmotor eredeti motorparaméterei láthatóak a motor blokkjának kinyitása után

A modell sebességszabályozott jelleg esetén ere vonatkozó alapjel-beállítási lehetőséget kapott, 6. ábra. A feladat szerint kezdetben, $t=0$ időponttól a sebesség értékét 3000/p, majd az 1.s-től kezdődően -1000/p-re írtuk elő, hogy a féküzemre átállás folyamata vizsgálható legyen.



6. ábra. A sebesség-alapjel beállítása az ábra bal felső részén lévő sebesség-alapjel-blokk kinyitása után táblázatoson megadható módon lehetséges, tetszőleges részletezettséggel

A modell futtatásai

A nyomatékszabályozott-, illetve korlátozott üzemben a motor és a hozzákapcsolt rendszer gyorsulása 2 s ideig tart, amely időtartam alatt a nyomaték előírt értékei a fenti, 2. ábrán látható nyomaték-sebesség függvény szerint változnak.

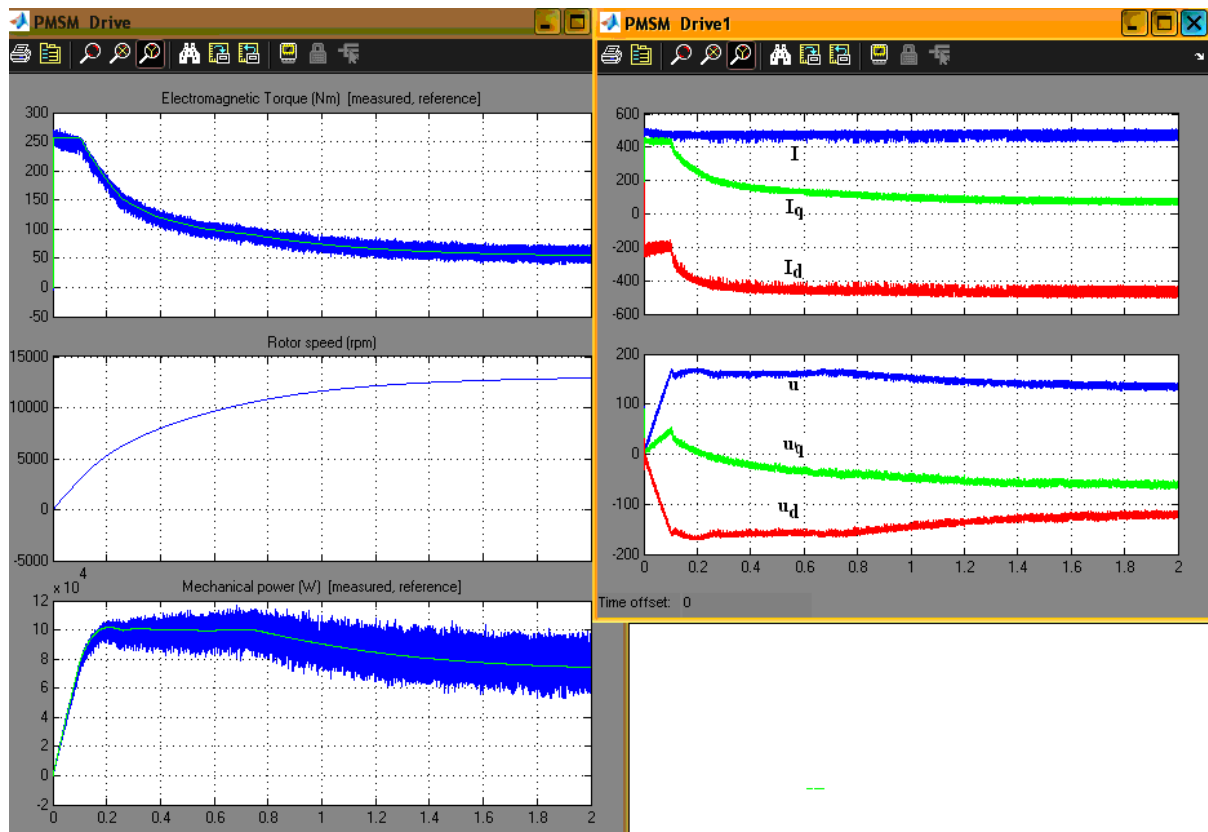
A gyorsítási folyamat jellegét a 2. ábrán látható egytárolós P-tag most 2 s időállandója szabja meg, valamint a sebesség növekedésével előírt nyomaték-csökkenés függvénye.

A kirajzolt időfüggvény-görbék a két diagram-rajzról a 7. ábrán követhetők.

A sebesség a névleges 3000/p értéket a kis tömegterhelésnek köszönhetően kb. 0,1 s alatt eléri, ettől kezdve határozott mezőgyengítési folyamat figyelhető meg a hossz- és keresztirányú áramvektorok értékeinek változásában.

A nyomatékszög növelésével, az eredő vektornak a d tengelyhez képest értelmezett előbbreforgatásával az ugyanazon hosszúságú áramvektor q irányú összetevőjének csökkenése és a -d irányúnak a növekedése valósul meg.

A q irányú komponens rövidülése a nyomaték csökkenését jelenti még azonos fluxusnál is, de a negatív előjelű d összetevő növekedése az állandómágnesek által létrehozott fluxussal szemben hat és lerontja azt. Így a nyomaték értéke kettős hatás következtében csökken, és éri el a 7. ábramező bal felső ábráján látható nyomatékgörbe csökkenő értékeit.



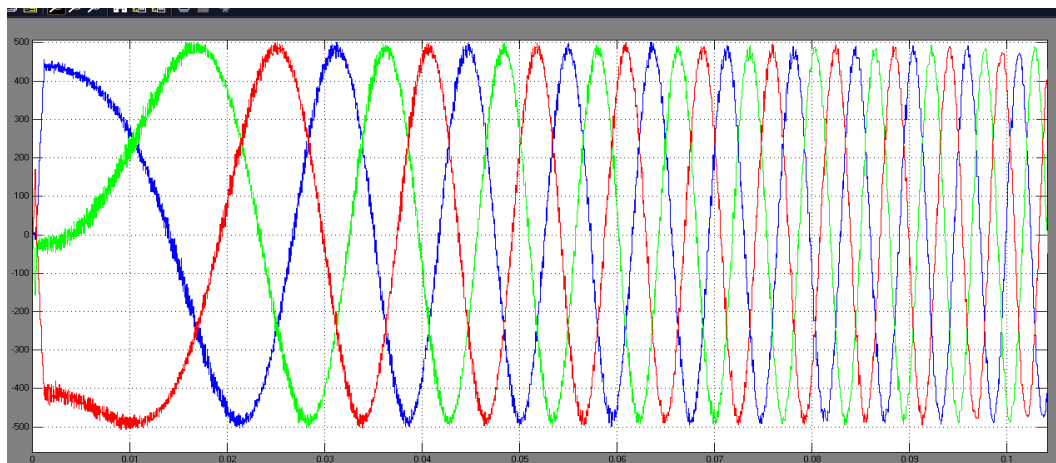
7. ábra. A nyomatékszabályozott üzem időfüggvény-ábrái: nyomaték, sebesség, leadott mechanikai teljesítmény a baloldalon. Jobbra a programban nagybetűvel jelölt I_d és I_q áramvektorok amplitúdó-értékei I eredőjükkel, és végül alatta az itt kisbetűvel jelölt u_d és u_q feszültségvektorok amplitúdó-értékei az u eredő vektorral

A feszültségösszetevő-görbék a névleges sebesség eléréséig sebesség-arányosan nőnek, ami a bemutatott ábrában a közel állandó gyorsulás miatt időben állandósult sebesség-növekedést jelent, s emiatt a feszültséggörbe változása a kezdeti 0-0,1 s közti tartományban egyenes vonallal rajzolódik.

A sebesség a 0,75 s –nál 10600/p értékű, azaz a névlegesnek több, mint háromszorosa, de a motorteljesítmény az alsó ábrán láthatóan gyakorlatilag változatlan, 100 kW körüli értékű, ami a nyomatéknak a sebesség növekedésével fordított arányú, hiperbolikus változásával jött létre, ami az időfüggvény-ábrában az exponenciálisan csökkenő gyorsulás miatt már nem lehetett hiperbolikus. A fordulatszám további növekedése után az eddigi tendencia nem tartható, tartós nyomatékcsökkenési folyamat kezdődik, amit a q irányú összetevő folyamatos csökkenése is jelez.

Az indítási folyamat első 0,1 s hosszúságú szakasza látható a 8. ábrán. A háromfázisú rendszer, melyet a motorhajtó inverter állít elő, gyakorlatilag szimmetrikusnak mondható, a három tekercs áramának algebrai összege zérus.

Az áramszabályozó láthatóan jól működik, mert a felgyorsulás során a fázisáramok értékei azonos amplitúdójúak, annak ellenére, hogy a növekvő sebességeken a tekercsekre adandó fázisfeszültségek rendre növekednek, és miközben az eredő áramvektor szöghelyzetét a számított nyomatékszögnek megfelelően előre tarja, mint a forgórész d tengelyének elfordulása az állórész függőleges szimmetriatengelyétől.

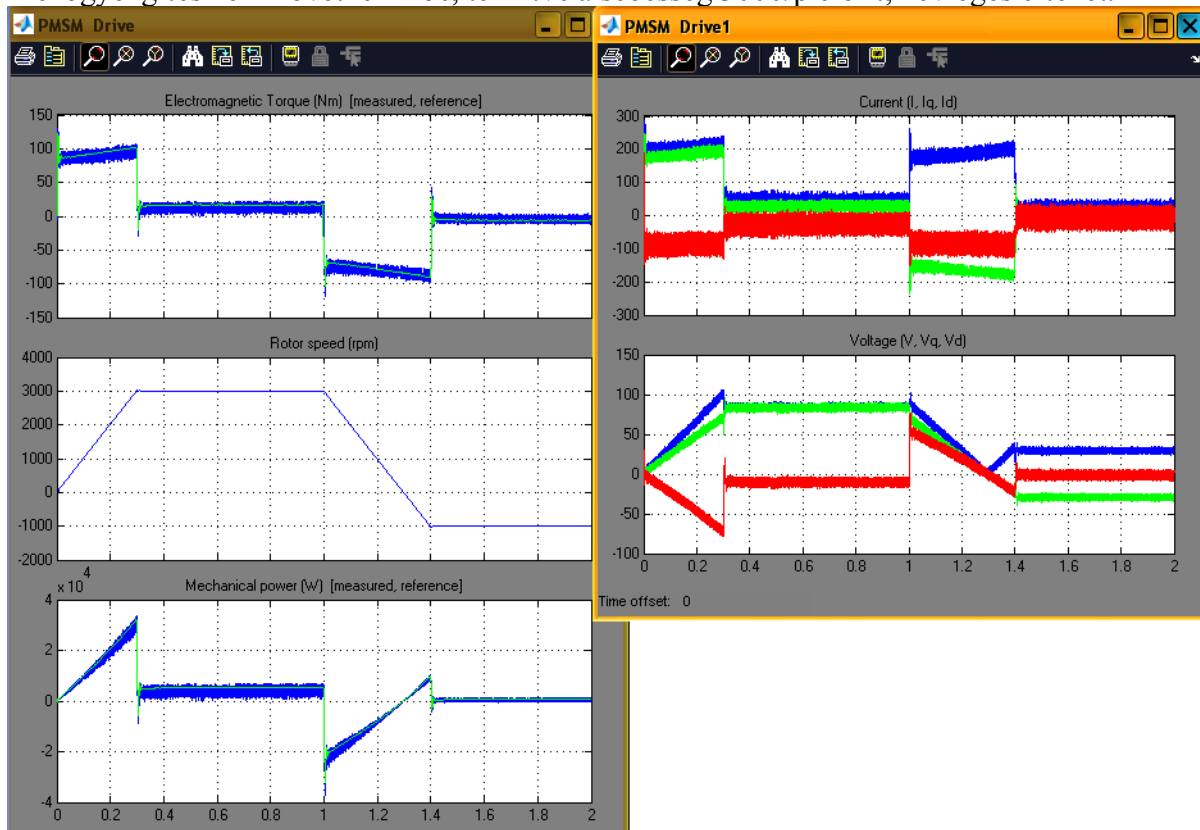


8. ábra. Az indítás alatti fázisáramok időfüggvényei az első 0,1 s alatt. Az ábra a 12. ábra részlete, amelyen az indítási áramok jelentősen nagyobbak, mint a 7. ábrához tartozó esetben. A két, eltérő nyomatékú állapot csak áramértékeiben különbözik.

A szabályozási feladat átírásával sebességszabályozás valósítható meg, a 6. ábra szerinti adatok beírásával. Ezek szerint a sebesség-alapjel kezdetben 3000/p, és az 1 s végétől - 1000/p, ami egy élénk gyorsítást, és a váltáskor kezdődő élénk lassító fékezést tartalmaz, amely utóbbi az ellenkező irányú felgyorsulással -1000/p elérését tűzi ki célul. A futtatási eredmények a 9. ábramezőben láthatóak. Baloldalt középen látható a modellben megvalósult sebesség-idő függvény, amelynek közel egyenes fel-lefutó szakaszai közel állandó gyorsító-fékező nyomatékkal teljesíthetők.

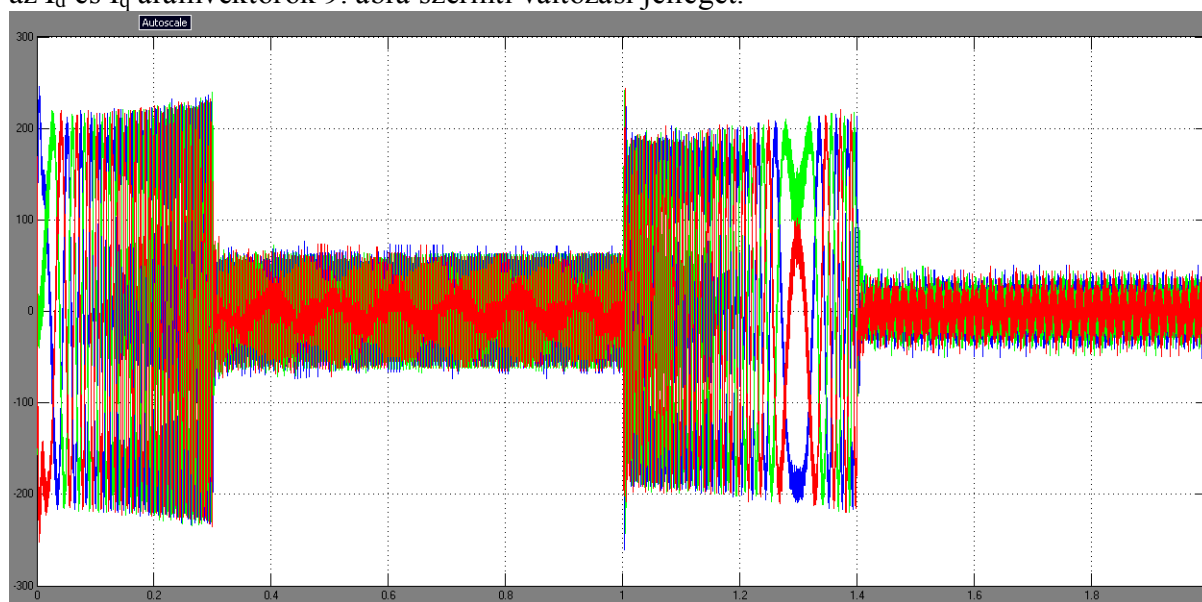
A mechanikai teljesítmény görbájén megfigyelhető, hogy a zérus sebességen irányváltással áthaladó görbe teljesítménye is zérus.

Mezőgyengítés nem következik be, tekintve a sebesség 3000/p előírt, névleges értékét.



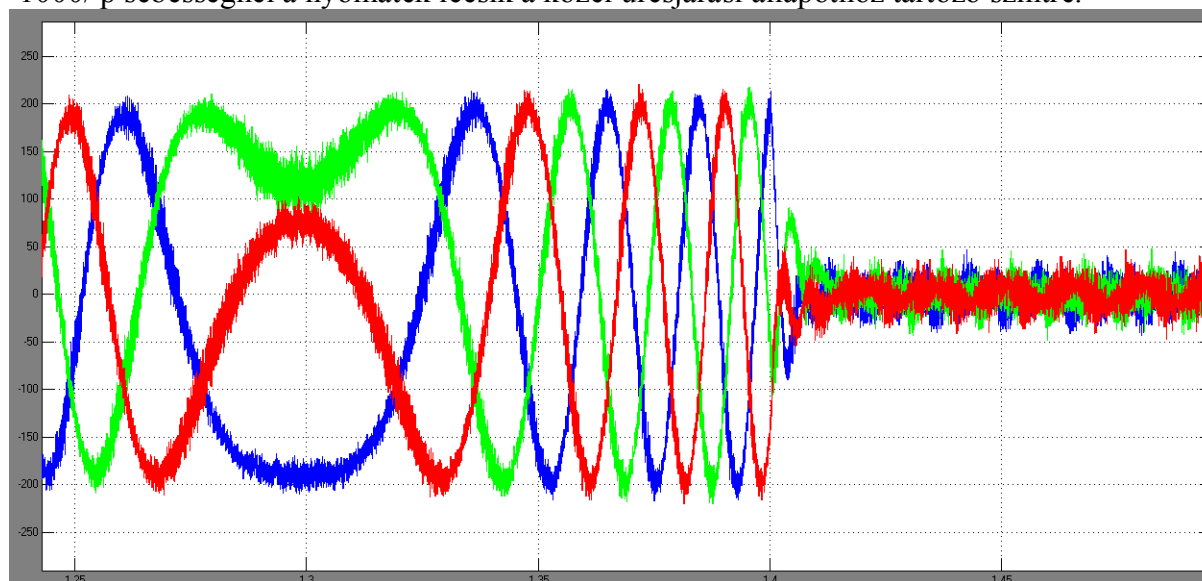
9. ábra. Sebességszabályozott üzem, mezőgyengítés nélküli áramvektor-szabályozással

A 10. ábrán az állórész-tekercekbe vezetett fázisáramok időfüggvényei láthatóak, jól követve az I_d és I_q áramvektorok 9. ábra szerinti változási jellegét.



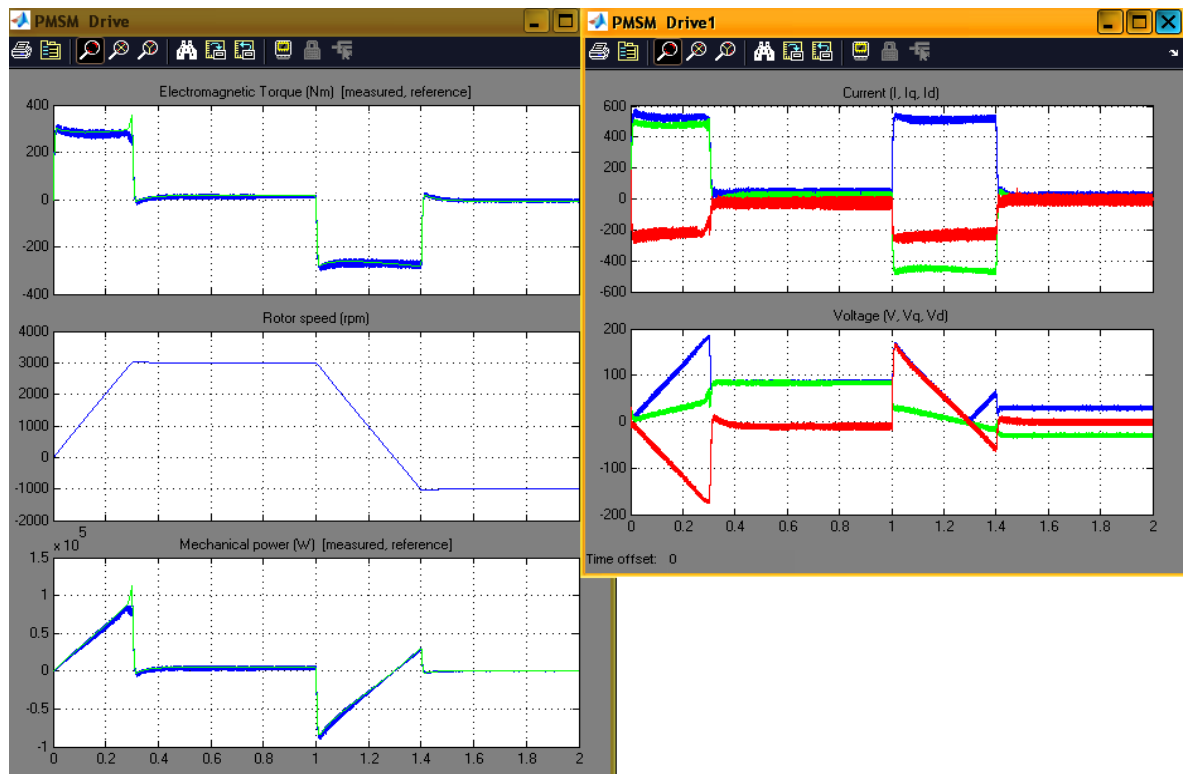
10. ábra. Az állórész-tekercekbe vezetett fázisáramok időfüggvényei

A 11. ábrán a $t=1,3$ s-nál lejátszódó áramirány-változás követhető, amely lehetővé teszi az ellenkező forgásértelmű felgyorsulást. A generátoros féküzem a zérus sebességig tartott, attól kezdve pedig ellenkező értelmű nyomaték kifejtésére képes motoros üzem kezdődik. Az elért $-1000/p$ sebességnél a nyomaték leesik a közel üresjárási állapothoz tartozó szintre.



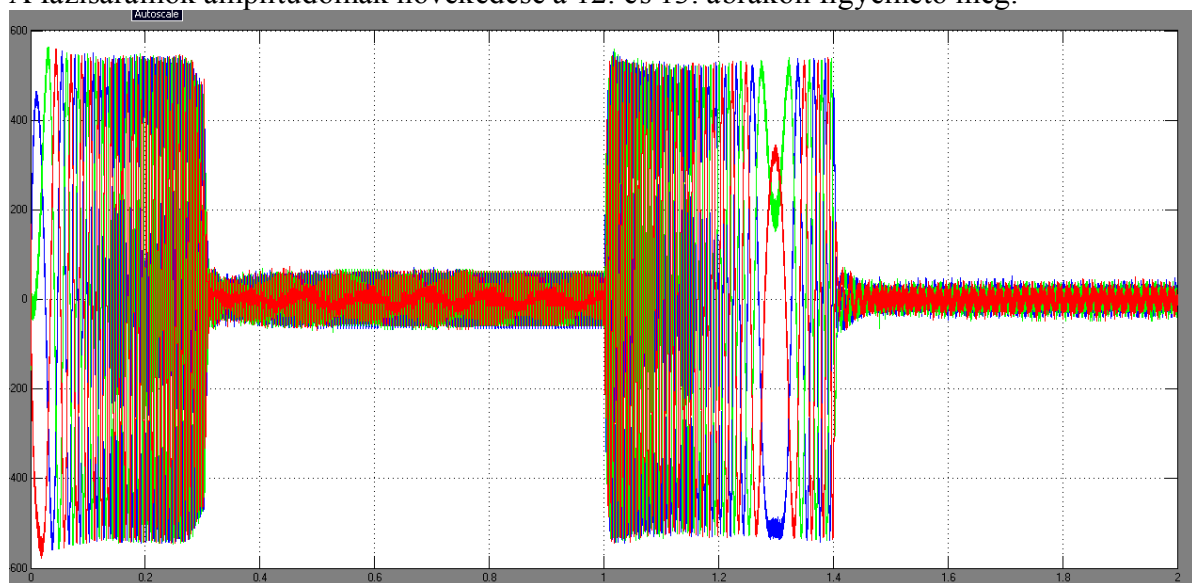
11. ábra. Az áramirány-fordítás a generátoros fékezésről ellenkező előjelű motoros üzemre váltáskor.

Ha a tengelyre kapcsolt mechanikai rendszer időállandóját, ami a tehetetlenségi nyomatékával arányos, 2 s-ról 6,5 s-ra növeljük, a sebességszabályozó a felgyorsulási idő növekedésének megakadályozására az állórész-áram értékét, vele a nyomatékot közel arányosan növeli. Ennek részletei láthatóak a 12. ábrán.



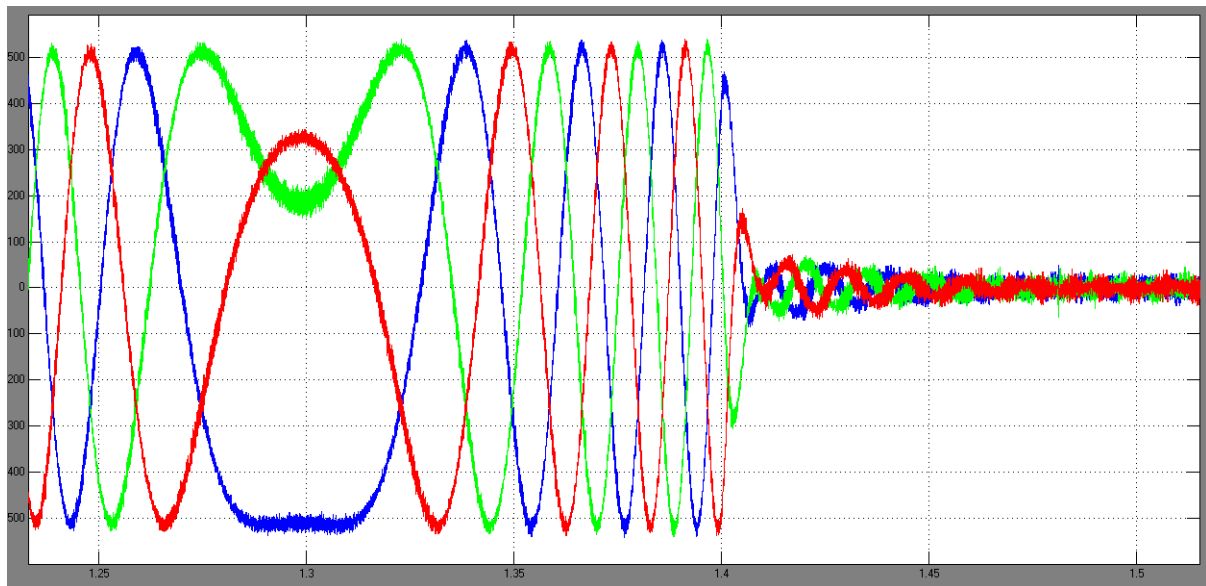
12. ábra. A mechanikai időállandó növelése a nyomaték-, áram- és feszültségértékek növekedését eredményezi, hogy a felfutási és fékezési idők ne növekedjenek

A fázisáramok amplitúdóinak növekedése a 12. és 13. ábrákon figyelhető meg.



12. ábra. A mechanikai időállandó növelése, emiatt a hajtónyomaték növelése azonos idejű felgyorsulási folyamatban az egyes fázisáramok növelése árán lehetséges.

Az indítás fázisáram-görbéit a 8. ábra mutatja. A $t = 1,3$ s időpontban lezajló sebességelőjel-váltás részletei kinagyításra kerültek



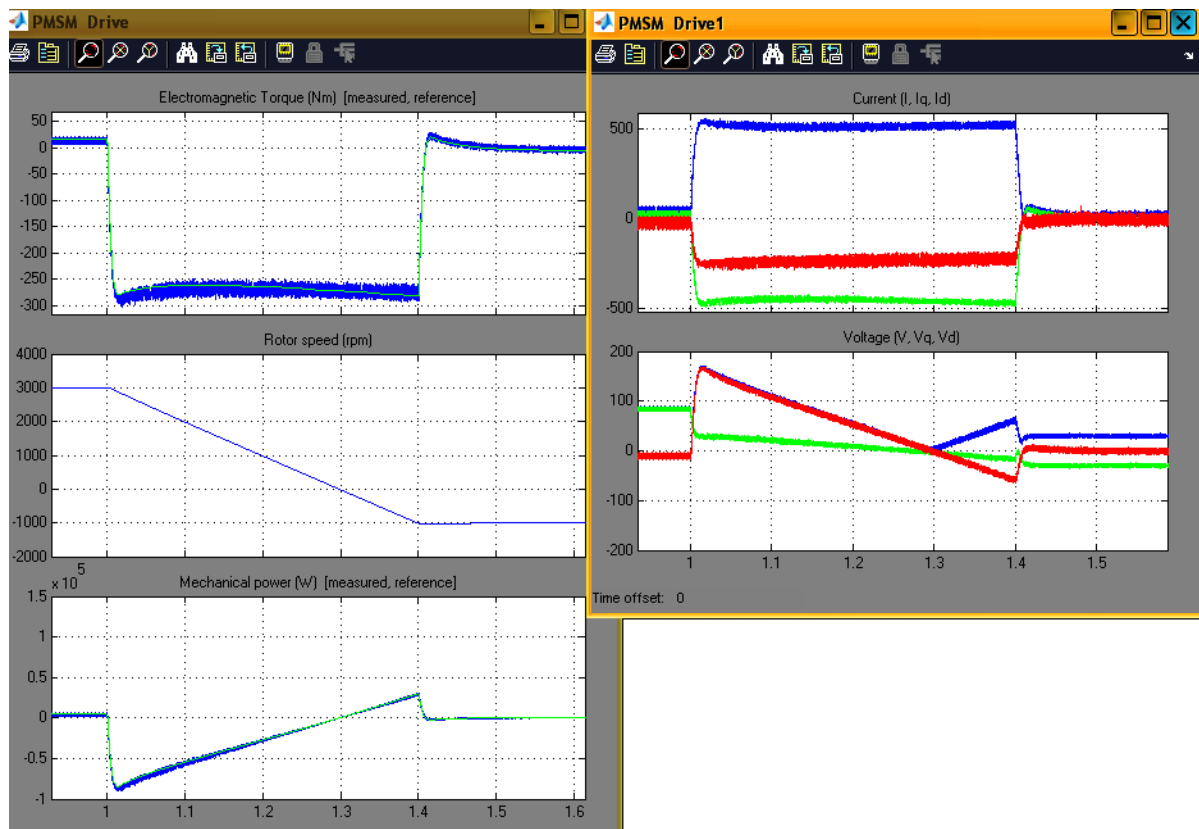
13. ábra. A mechanikai időállandó növelésének hatásai. A $t = 1,3$ s időpontban bekövetkező áramirány-fordítás a generátoros fékezésről ellenkező sebesség-előjelű motoros üzemre váltáskor az előző esetével hasonló módon történik, de az áramértékek magasabbak.

A 14. ábrán a lassító fékezés és az azt követő irányváltás részletei láthatók. A fékezés előtt közel üresjárási állapot van, az I_d értéke közel zérus, a I áramvektor értékét gyakorlatilag az I_q összetevő adja.

Fékezés alatt, a generátoros üzemben a nagy értékű negatív előjelű nyomatékot az I_q összetevő adja, negatív előjellel. Az I_d összetevő értéke a motoros üzemben látottéval közel azonos, a 12. ábra szerint.

A feszültségeket tekintve a programban nagybetűs jelölésű V jelű kapocsfeszültség értéke a zérus sebességen közel zérus, majd az ellenkező előjelű sebesség növekedésével arányosan nő. A keresztirányú áram biztosításához szükséges feszültség-összetevő tendenciája nem változik, mert a forgásirány a $t=1,3$ s időpontban megváltozott, s emiatt a vektorok előjele megváltozik.

Az $1000/p$ sebesség elérésétől a közel üresjárás alatt a fordított forgásértelmezésre tekintettel mind az áram-, mind a feszültség-összetevők, vektorok előjelei megváltoztak az előző forgásértelmű, $3000/p$ sebességű üresjárási állapotban láthatókéhoz viszonyítva.



14. ábra. A 12. ábra részletesebb bemutatása az irányváltás környezetében