

ELEKTRIČNI MOTOR SA BEZSENZORSKI KONTROLISANIM SINHRONIM MOTOROM SA PERMANENTNIM MAGNETIMA

Manfred Schroedl, Tino Colle
Institute of Electrical Machines and Drives
Viena University of Technology, Austria

REZIME – *Ovde je predstavljen moped sa novom pogonskom koncepcijom. Glavne komponente su 2kW sinhroni motor sa permanentnim magnetima (PSM) kao pogonska mašina sa disk rotorom konstrukcijom, MOSFET inverter sa 100 A/ 100V niskobudžetnim tranzistorima, olovnim baterijama (DC napon od 48 V, skladištena energija od oko 1kWh). Punjenje baterija je obezbeđeno pomoću punjača u mopedu koji se priključuje na 220V. PSM je kontrolisan bez ikakvih mehaničkih senzora koristeći INFORM i specijalni EMF algoritam za detekciju pozicije. Kontrolna jedinica je bazirana na digitalnom signalnom procesoru (TMS 32015). Upravljanje invertorskim okidanjem je obezbeđeno softverski, tako da nije skupo po hardverski deo. Visoka frekvencija okidanja obezbeđuje tihu operativnost pogona. Motor je vezan direktno za zadnji točak. Tako nije potreban prenosnik. U ovom tekstu je akcenat na bezsenzorskom upravljačkom sistemu.*

OPIS SISTEMA I KOMPONENTI

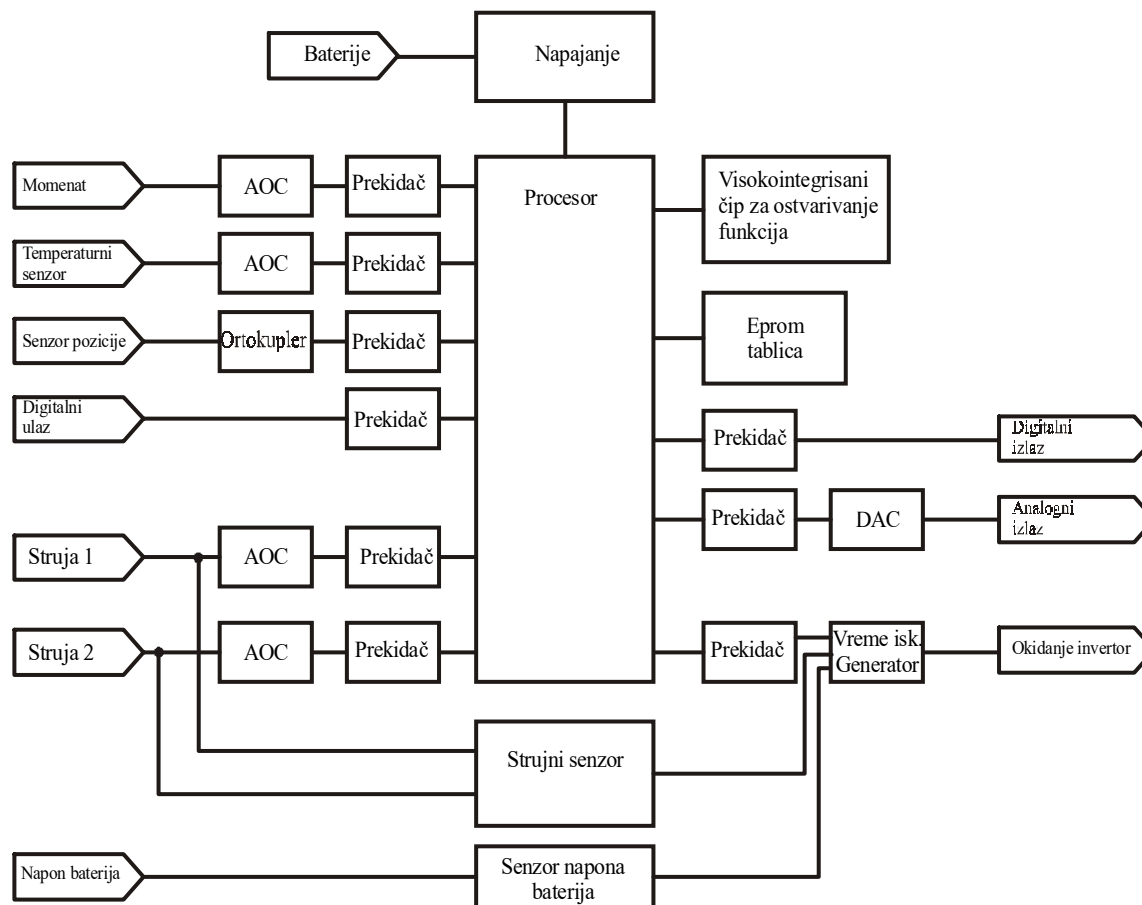
Pogonska jedinica

Predstavljeni moped se razlikuje od klasičnih rešenja u sledećem:

- (1) Sinhroni disk motor sa permanentnim magnetima: Izbor ovog motora (2kW, momenat 30 Nm, polazni motenat 80 Nm) je zarad velikih momenata i snage pri maloj zapremini motora, niske cene koštanja i proste geometrije magneta, korišćenje serijske proizvodnje statora i lako podešljivog zazora. Volumen kotora se takodje može menjati prema mestu motora na mopedu.
- (2) Inverter: Za napon od 48V koji se koristi najbolju iskoristljivost daju MOSFET-vi prema niskom otporu pri provođenju (oko deset mili oma po prekidaču). Kako prekidač može da ima prekide na par stotina nano sekundi, visoka učestanost prekidanja se može postići bez velikih gubitaka pri komutaciji. Ekonomična proizvodnja invertora se može postići pomoću niskobudžetnih MOSFET-ova 100V/100A u TO 247 pakovanju.

Kontrolna jedinica

- (1) Hardver: Glavni deo kontrole (slika 1) je 16-to bitni signal procesor TMS 32015. On je specijalno dizajniran da radi u ril tajmu i da se može implementirati sofisticirani upravljački algoritam kao što je INFORM model i statičke posmatrače. Procesorske jedinice su obkrbljene brzim A/D konvertorima (3 mikro sekunde). Matematički funkcijski modeli su smešteni u EPROM-tablice i do njih se lako može doći u nekoliko ciklusa. Većina hardvera je dizajnirana u CMOS tehnologiji, garantujući niske gubitke.
- (2) Softver: Vozilo je kontrolisano kontrolom momenta i ponaša se kao konvencionalni moped. Ekstra ,neke funkcije su implementirane pomoću softvera, podržavajući upravljanje vozilom i racionalnu potrošnju baterija. Kontrola je bazirana na orijentaciji polja. Generatorski režim se postiže promenom smera momenta i proizvodnjom struje.
- (3) Proračun struje baterije: Indirektan način detekcije struje baterije je postignut merenjem faznih struja, u trenutku uključenja polumosta za datu fazu.
- (4) Ograničavač snage baterija: Za pažljivo korišćenje baterija, uz garantovan dovoljan broj radnih krugova, potreban je ograničavač snage. Zbog izbora baterije (olovna, bez održavanja) limitator snage je potreban 1kW je instaliran. Tako je sa povećanom brzinom redukovano moment.
- (5) Rekuperacija baterija: Pri generatorskom režimu PSM ima struju suprotnog smera nego pri motornom radu. U zavisnosti od kapaciteta baterije, kada se napon "pojavi" na baterijama one će se puniti ali naravno u ograničenim količinama. Supervizija napona nije zgregega. Pri niskim brzinama punjenje nije preporučljivo pa se zaustavlja od strane softvera.
- (6) Informacijski displej: Na prvom prototipu konvencionalni tahometar nije menjan. Kako bilo elektronski merač brzine i predjenog puta zasnovan na proceni stanja će smanjiti troškove i biti korišćen u daljim razvojjima. Displej za struju baterija pokazuje stvarni trenutni konzum pogona.



Slika 1. Kontrolna jedinica

BEZSENSORSKA KONTROLA POGONA PSM-a

PSM ima nekoliko prednosti (visoko iskorišćenje jer nema gubitke u rotoru i jednostavnija struktura kontrole) u poredjenju sa indukcioni motorom. Problem je što se mašinom može upravljati samo ako je poznat položaj rotora ili magnetskog fluksa. Ovo je inače postignuto ugradnjom senzora čime uveliko smanjujemo robusnost mašine.

Ovde su INFORM metoda (skraćenica od “indirektna detekcija fluksa merenjem trenutne reaktanse”) i EMF bazirani algoritmi detekcije fluksa integrisani u celinu kojom se upravlja momentom PSM-a. Kako fluks-detekcioni algoritmi pokrivaju celokupno područje upravljanja mašine, uključujući mirovanje, pogonu nije potreban mehanički senzor.

Upravljanje mašinom sa permanentnim magnetom

U ovom poglavlju je data kratka prezentacija rotorski orijentisanog upravljanja. Osnovna ideja je da se koristi princip konvencionalnog upravljanja jednosmernim motorima uz izmenu funkcije statora i rotora. U oba slučaja, jednosmernog motora i PSM, potrebno je da se prostorni fazori armature struje i fluksa nalaze pod uglom od 90 stepeni da bi postigli maksimalni moment. Funkcija komutatora kod jednosmernog motora je kod PSM-a zamenjena takvim upravljanjem poluprovodnicima invertora da se postiže isti efekat.

Za PSM dizajn, linearnost magnetnog kola i simetrična konstrukcija (konstantna vrednost statorske reaktanse u rel. jedinicama) se podrazumevaju.

Tako je magnetni fluks statora u vezi sa

$$\Psi_s = x_s \cdot I_s + \Psi_m \quad (1)$$

kako je moment t :

$$t_i = -I_m (i_s \cdot \Psi_s) = \Psi_m \cdot i_{sq} , \quad (2)$$

fazorom armaturne struje i fazorom fluksa stalih magneta koji su generalno pod uglom od 90 stepeni.

Izvesno slabljenje polja moguće je postignuti negativnom d-komponentom struje (u fazi sa Ψ_m) u cilju povećanja brzine do maksimuma. Kakogod, u skladu sa malom statorskom induktansom motora sa površinski ugrađenim magnetima (struja će smanjiti fluks na 80% maksimalno) nema slabljenja polja u datom pogonu. U ovoj aplikaciji pogona moment $t_{i,ref}$ je taj koji je referentna veličina, kao i q komponenta struje i_{sq} su one koje kontrolišu pogon. Moment je ograničen veličinom brzine da bi se postigla ograničenost snage baterije .D-komponenta je podešena da bude nula. Od zadate d i q komponente, redom su sračunate vrednosti fazne struje koristeći odgovarajuću transformaciju. Petlje kontrole struje su realizovane histerezisnim kontrolerima opsega ili invertorskom kontrolom u diskretnom vremenu. Kako je iskorišten brzi digitalni mikroprocesor zarad pogona, tako je napisan i softver za njega.

Detektovanje ugla rotora pri malim brzinama (“INFORM” metod)

U ovom poglavlju glavna ideja je detaljno objašnjena. Više o tome u (1).

U PSM-u su ugrađeni jaki permanentni magneti kao što su SaCo ili NdFeB, gvozdeni delovi statora su manje ili više zasićeni, kao naprimer zupčanici. Ovaj efekat se može opisati malo različitim induktivnim parametrima u q i d komponenti ($x_{d,diff} < x_{q,diff}$). U daljem, sistem se smatra linearizovanim u magnetnom pogledu što je definisano od strane pobude stalnih magneta.

Napon statora je:

$$u_s = x_c \cdot di_s / d\tau \quad (3)$$

sa kompleksnom diferencijalnom induktivnošću

$$x_c = x_{re} \cdot j x_{im} \quad (4)$$

pa tako sledi

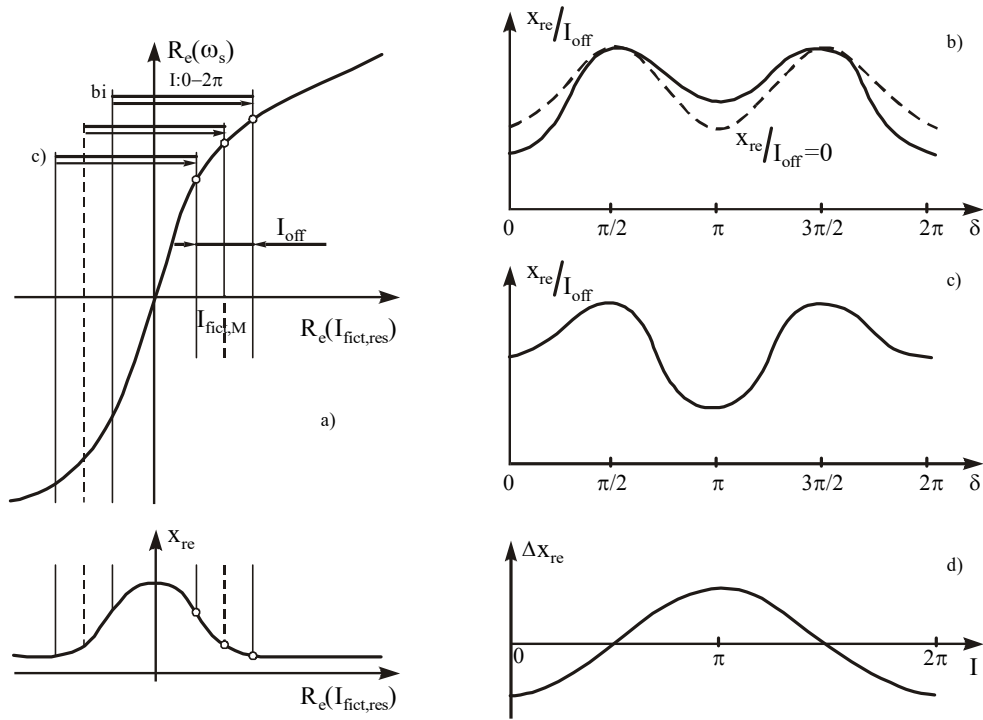
$$x_{re} = x_m - \Delta x \cdot \cos(2\alpha_i) \quad (5)$$

$$x_{im} = \Delta x \cdot \sin(2\alpha_i) \quad (6)$$

gde je

$$x_m = (x_{d1diff} + x_{q1diff})/2 , \quad \Delta x = (x_{q1diff} - x_{d1diff})/2 \quad (7)$$

Vidi se da je jednostavna zavisnost izmedju kompleksne vrednosti x_c i ugla α_i (slika 2)



Slika 3. Promena veličine X_{re} u toku pune el. periode rotora pri ofset struji

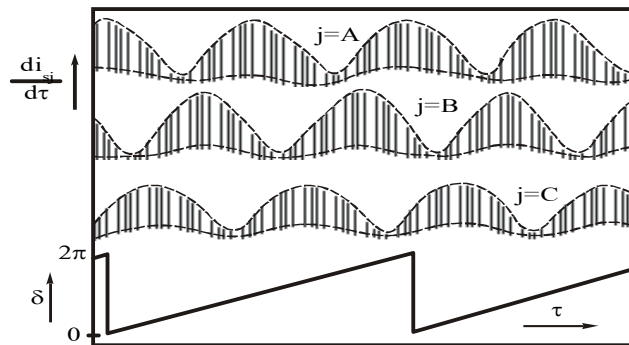
U drugom koraku merenje je modifikovano dodavanjem konstantne ofset struje i_{off+} na A osu. i_{off+} izaziva modifikaciju $x_{re}(\gamma)$ što se vidi na slici 3b. Ponavljajući merenje sa negativnom ofset strujom i_{off-} doprinosi prosledjivanju krive, slika 3c. Oduzimajući date, dobijamo bezofsetnu γ periodičnu f-ju, slika 3d:

$$\Delta x_{re} = x_{re} \big|_{i_{off+}} - x_{re} \big|_{i_{off-}} \quad (8)$$

Za praktičnu realizaciju, jednostavnija procedura je korišćenje direktne $di_{sj}/d\tau$ modulacije (promena struje u fazi j kada se daje fazor napona na fazu j i pozitivna ili negativna ofset struja u faze j , $j=a,b,c$) bez posebne kalkulacije Δx_{re} , pa je tako

$$\Delta C_{real,j}(\gamma) = di_{sj}/d\tau \big|_{i_{off+}} - di_{sj}/d\tau \big|_{i_{off-}} = -|\text{const}| \cdot \Delta x_{re}(\gamma) \quad (9)$$

Ovaj efekat je potvrđen eksperimentalno (Slika 4): Naknadno su izvedena merenja sa pozitivnim i negativnim ofset strujama prosledjujući očekivane $di_{sj}/d\tau$ - modulisane ($j=a,b,c$). Merenja su uradjena u svim smerovima A,B,C sa određenim fazorima napona.



Slika 4. Merni uticaj i_{off+} i i_{off-} na $di_{sj}/d\tau$; isprekidana linija je i_{off+}

Osobine imaginarnog dela x

Procenjujući imaginarni deo x_{im} isto kao i realni deo prosledjuje još jedan oportunizam računanju pozicije rotora, o čemu ovde nećemo govoriti. Više detalja u izdanju (1).

Detekcija rotorske ugaone pozicije γ od strane INFORM merenja

Izvedeći tri (modifikovana) INFORM merenja u sve tri faze prosledjuju se tri f-je $\Delta C_{real,j}$ ($j=a,b,c$) koje su opisane sledećim jednačinama:

$$\Delta C_{real,A} = \Delta C_{real} \cdot \cos(\gamma) \quad (10)$$

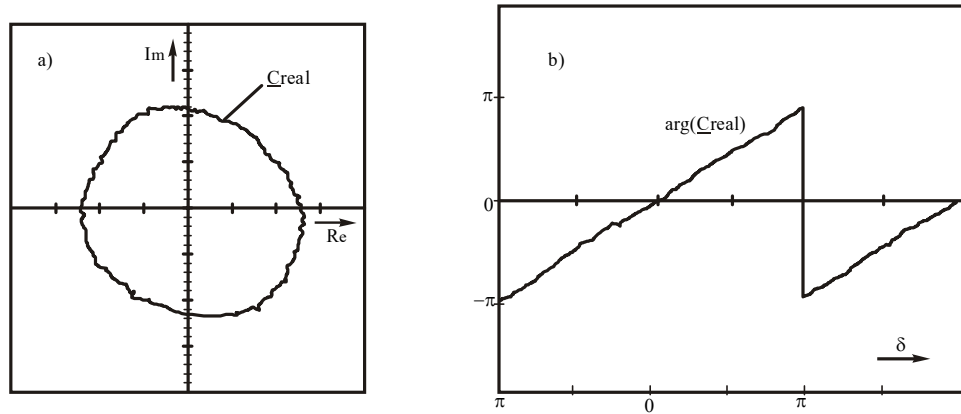
$$\Delta C_{real,B} = \Delta C_{real} \cdot \cos(\gamma - 2\pi/3) \quad (11)$$

$$\Delta C_{real,C} = \Delta C_{real} \cdot \cos(\gamma + 2\pi/3) \quad (12)$$

Kombinujući ove vrednosti sa definicijom prostornog fazora, imamo

$$C_{real} = \Delta C_{real,A} + \Delta C_{real,B} \cdot \exp(j2\pi/3) + \Delta C_{real,C} \cdot \exp(j4\pi/3) = 3/2 \Delta C_{real,B} \cdot \exp(j\gamma).$$

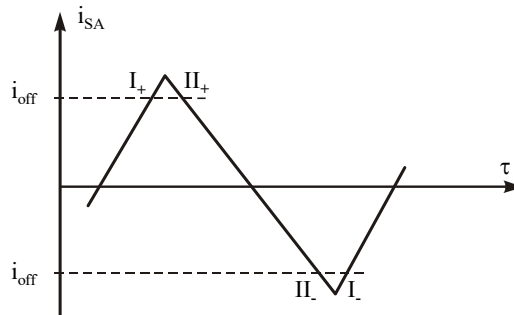
Argument kompleksne vrednosti C_{real} je željena rotorska pozicija γ . Kompleksna kriva C_{real} je na slici 5a.



Slika 5. Merena kompleksna vrednost $C_{real}(\gamma)$ a) hodograf u kompleksnoj ravni b) argument

Eliminacija uticaja EMF i opterećenja na INFORM merenju

Uticaj EMF na merenje može se eliminisati smenom merenja i_+ (sa ofset strujom i_{off+}) i i_- (ofset strujom i_{off-}) sa diferencijalnim izrazom $(I_+ - II_+)$ i $(I_- - II_-)$. Ovo vodi do mernog načina kao na slici 6.



Slika 6. Modifikovano INFORM merenje u fazi A sa eliminisanim EMF

Ako je motor upravlján pod određenim opterećenjem, uticaj q-komponente struje indukta je nezanemarljiv. Koristeći prost i_{sq} -zavisni korekcioní funkciju ($\Delta\gamma$) koja prosledjuje zadovoljavajuću pozicijonu detekciju od zadatog momenta.

Procena stanja PSM-a pri višim ubrzanjima (EMF metod)

Mana INFORM merenja na višim ubrzanjima (diztorzija struje) se može izbeći menjanjem pozicijonog detekcionog algoritma. Očigledno je iskoristiti EMF koje je vezano za rotorski položaj. Normalno da kada se odrđuje magnetni fluks prema naponski modelovanom kolu mašine, napon indukta treba da se meri. Ovo merenje može da bude sačuvano pri proračunu veze fluksa kod kratko spojenih namotaja. Ovo je slučaj kada sve invertorske veze imaju ili pozitivan ili negativan jednosmerni napon. Tako je očigledno da je fazor napona indukta u_s nula. Predpostavljajući $x_d=x_q$ i zanemarujući statorsku el. otpornost, stičemo kratak spoj u statorski orjentisanom (α, β) referentnom sistemu:

$$(u_s =) 0 = d/d\tau(\Psi_s) = d/d\tau(\Psi_m) + x_s \cdot d/d\tau(i_s) \quad (14)$$

$$\Psi_m = |\Psi_m| \cdot \exp(j\gamma) \quad (15)$$

$$d/d\tau(i_s) |_{\alpha, \beta} = -j \omega / x_s \cdot |\Psi_m| \cdot \exp(j\gamma) . \quad (16)$$

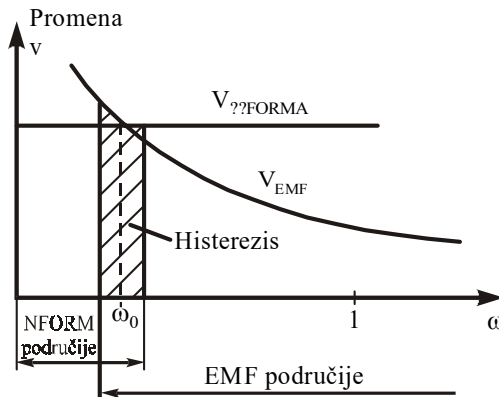
Tako, ugaono položaj rotora je jednostavno dobijen merenjem promene fazora struje u toku kratkog spoja za dati znak rotorskog ugaonog ubrzanja (inverteru je zadan “+++” ili “---“ znak za EMF period $d\tau$):

$$\gamma = \arg |d/d\tau(i_s) |_{\alpha, \beta}| + \arg(j\omega\gamma) \quad (17)$$

Usvajamo konstantno vreme merenja $d\tau$ zarad određivanja vrednosti strujnog fazora,

$$d/d\tau(i_s) = (i_s(\gamma + \Delta\gamma) - i_s(\gamma)) / \Delta\gamma, \quad (18)$$

šum v u proračunskoj poziciji rotora (jed. 17) je u zavisnosti od ugaonog ubrzanja. Ova činjenica je ukorist porasta EMF-a koji prouzrokuje veći porast merenog signala. Poredeći varijante greške merenja V INFORM metode i EMF baziranog metoda očigledno je koji tip merenja koristiti pri kojoj ugaonoj brzini (slika 7).



Slika 7. Promene INFORM metoda i EMF metoda u zavisnosti od ugaonog ubrzanja

U cilju izbegavanja problema promene metoda (očigledno pri ω_0) određeni histerezis bi mogao biti umetnut. Bitna činjenica za praktičnu realizaciju je da oba metoda prosledjuju istu vrednost $y = \tau$. Ovo znači da se isti model mašine može koristiti za rešavanje pitanja položaja.

Procena ugaonog ubrzanja i položaja PSM-a

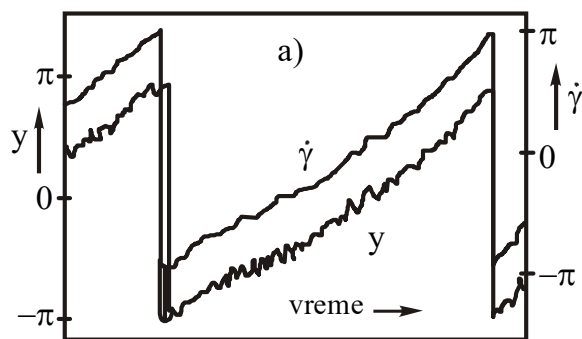
Baziran na INFORM metodi i EMF algoritmu detektovana rotorska pozicija nam daje manje ili više tačnu sliku o stanju mašine. U ev-lu nije samo potrebno znati položaj rotora već i ugaono ubrzanje. Korisna tehnika je da se PSM opiše u trenutnom stanju i ugradi Kalmanov filter. Kako INFORM i EMF metodi prosledjuju procenjenju veličinu (y) rotorskog položaja (γ) direktno i mašina je u stanju da bude pokretana brzim kontrolerima gde je jednostavna predstava mašine dovoljna za upravljanje. Ugaoni položaj (γ) i ugaono ubrzanje (ω) su definisane kao promenljive stanja. Komponenta struje koja proizvodi momenat je distorzirana ulazna veličina, procenjen položaj rotora je distorzirana merena veličina koja je poredjena sa očekivanom (procenjenom) promenljivom stanja $\gamma(k/k-1)$. Razlika ($y(k)-\gamma(k/k-1)$) je poslata preko Kalmanove matrice vrednosti K u model stanja tako da je greška stanja minimalna. Kalmanova matrica vrednosti K je nezavisna od stanja sistema i ulaza i može biti izračunata sa strane. Kako je matrica za stanje mirovanja K_c na dohvat za par stotina milisekunda, dozvoljeno je računanje statorskih veličina k_{ic} i korišćenje njih za filter.

Dalja uprošćenja su da bi se održali konstantni koef. davanja Kalmana u EMF području. (Greška merenja bi dovele do promenljivog davanja Kalmana u zavisnosti od ugaonog ubrzanja). Ovo pojednostavljuje račun ali prosledjuje podoptimalno (ali dobro) ponašanje procenjivača stanja (Slika 9).

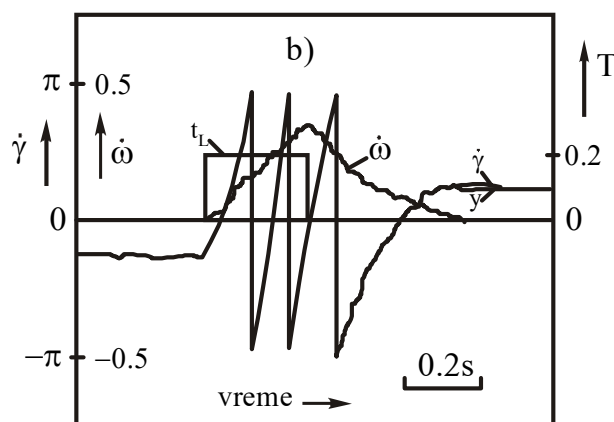
Eksperimentalni rezultati

PSM pogon sa procenom stanja je realizovan sa digitalnim procesorom TMS 32015. PSM je opremljen MOS-FET invertorom i kontrolisan sa softverom za kontrolu struje.

Na slici 8a poredi se mereni položaj y sa filtriranom vrednošću γ . Slika 8b pokazuje filtrirane vrednosti ω i γ kada injektiramo struju koja proizvodi momenat ($i_{sq=}$).

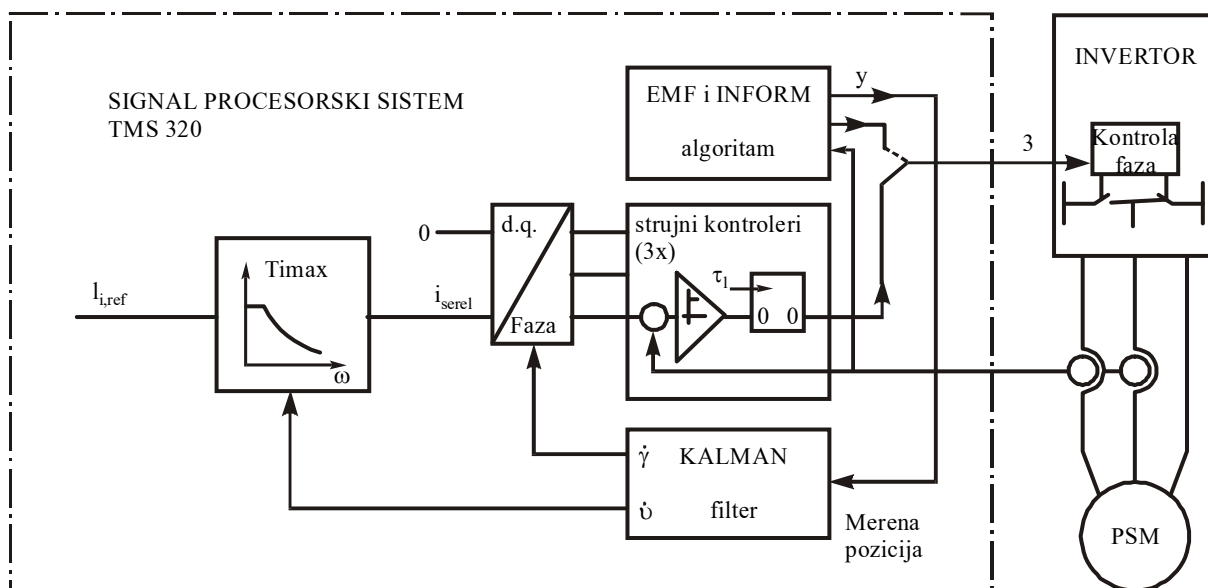
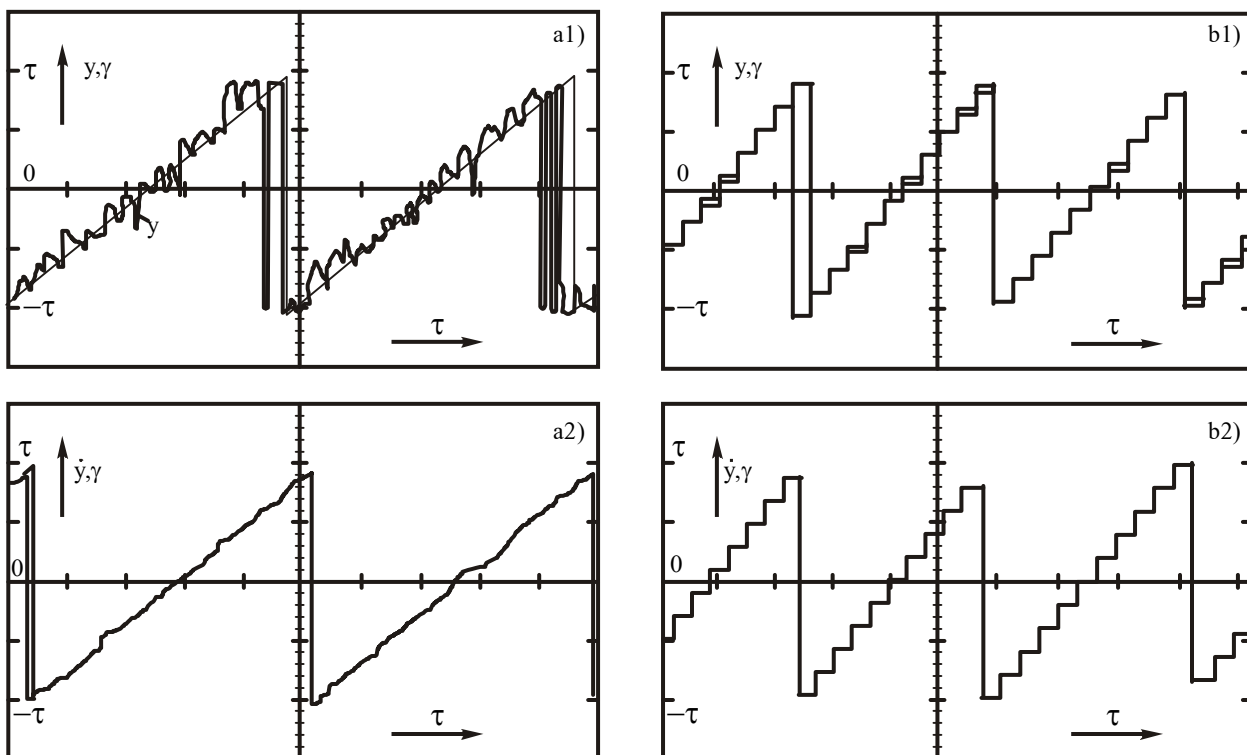


Slika 8a. Merena pozicija y i filtrirana vrednost γ



Slika 8b. ω i γ pri promeni momenta

Slika 9 prikazuje praktične rezultate EMF baziranog modela sa Kalmanovim filterom (koeficijenti filtera su optimizovani na $\omega_1=0,2$ i držani konstantni) pri dva različita ubrzanja. Referencna veličina γ je pozicija koju daje enkoder.



- nema mehaničkih senzora

Jedini senzori su strujni senzori. Nema tako generatora, enkodera i potrebno je merenje napona zarad kontrole.

-niska cena hardverskih komponenti

Algoritmi (INFORM, EMF, procenjivač stanja, diskretni vremenski kontroler) su realizovani na DSP sistemu (slika 10). Softver je pisan u jeziku HANSL.

Zaključci

Novi disk motorom pogonjeni moped je prezentovan. Visoka iskoristljivost je postignuta sa MOSFET invertorski injektiranim motorom sa permanentnim magnetima sa sofisticiranom DSP pogonskom kontrolom i uredjenjem baterija. Eksperimenti su istakli da je moguće realizovati visoko dinamičan pogon bez mehaničkih senzora kombinujući nove detektore pozicije i tehnike procene stanja. Praktični testovi su pokazali da je moguće postići optimalan momenat preko statorske struje.

Dalji razvoj uključujući iskustvo koje je dao prvi prototip će ubrojati hardversku i softversku optimizaciju, povećanje robusnosti i usavršavanje ekonomskog i optičkog aspekta.

Reference

- [1] Schrod M.: "Sensorless Control of A.C. machines", *Thesis submitted for the certificate of habitation. To appear in VDI Fortschrittberichte 21, VDI – Verlag Dusseldorf (Germany)*
- [2] Grotstollen H., Pfaff G. : "Burstenloser Drehstrom Servoantrieb mit Erregung durch Dauermagnete" *ETZ (Germany), Vol. 100, 1979. pp 1382-1386.*
- [3] Grotstollen H.: "Die polarorientierte Regelung eines Drehstrom Servoantriebes mit duarmagnetisch erregtem Synchronmotor" , *ETZ – Archiv (Germany), Vol. 5 1983. pp 339-346.*
- [4] Borhinger A., Brugger F.: "Transformatorlose Transistor-Pulsumrichter mit Ausgangsleistungen bis 50 kVA" , *E&A 12 (Austria), 1979. pp 538-545.*
- [5] Ensbacher R.: "Untersuchung zur Polradlageerfassung an permanent-erregten Synchronmaschinen", *Diploma tesis, TU Wien (Austria) , 1991.*
- [6] Schrod M.: "Detection of the Rotor Position of a Permanent Magnet Synchronous Machine at standstill" , *Proc. ICEM 1988., Pisa (Italy), pp. 195-197.*
- [7] Schrod M.: "Operation of Permanent Magnet Synchronous Machine without a Mechanical Sensor", *Proc. IEE Conf. On Power Electronics and Variable Speed Drivers, London, 1990. pp. 51-56.*
- [8] Lechner A., Schrod M.: "Ein Signalprozessorsystem mit Hochsprachen-unterstutzung" (A Signal Processing System Supported by a High-Level Language), *Proc. MIKROELEKTRONIK, Wiena, 1989., pp 75-81.*