

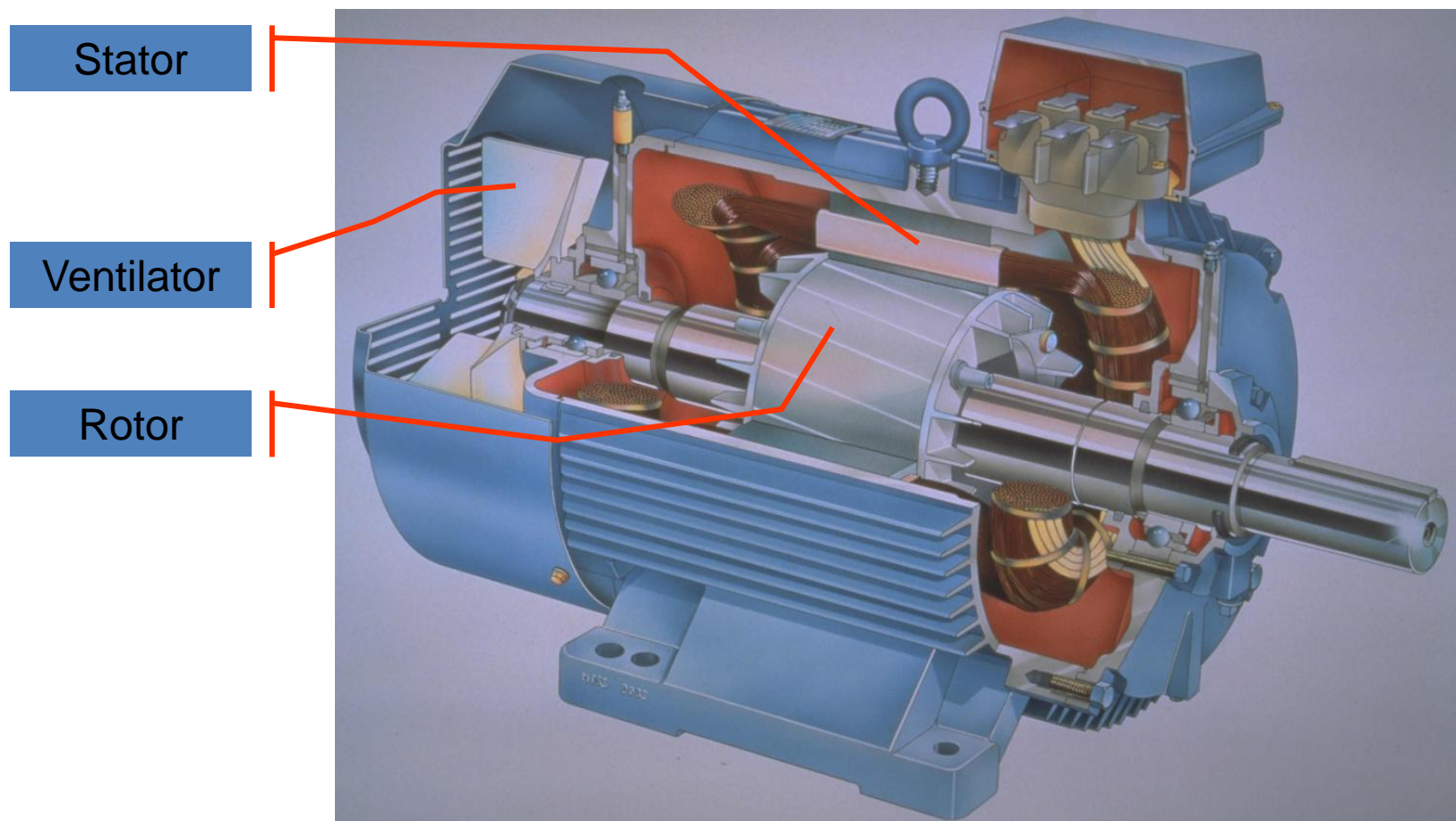
**ENERGETSKI OPTIMALNO
UPRAVLJANJE POGONIMA
SA ASINHRONIM
MOTOROM**

Organizacija predavanja

- I. Energetski optimalne strategije upravljanja – teorijski prikaz svake pojedinačne strategije, uporedna analiza i zaključna razmatranja.

- II. Mogućnosti za primenu neke od energetski optimalnih strategija u Laboratoriji korišćenjem frekventnih pretvarača renomiranih proizvođača u elektromotornom pogonu sa asinhronim motorom, ili nove laboratorijske postavke “LPUPE” – teorijska analiza, proračun i opis laboratorijskog mesta

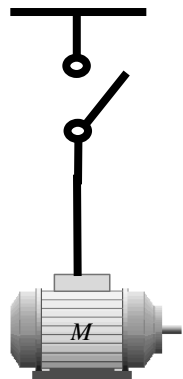
Asinhroni trofazni motori



U elektromotornim pogonima asinhroni motori su najčešći tip korišćenog motora i smatra se da oni troše oko 90% električne energije svih elektromotornih pogona u svetskim okvirima. Njihova masovna primena je posledica robusne konstrukcije, pouzdanog rada, niske cene u poređenju sa drugim vrstama motora, a njihova efikasnost je u području od 70% (kod manjih snaga) pa preko 95% (kod velikih snaga), u zavisnosti od klase EE, zavisno od konstrukcije i uslova primene.

Elektromotorni pogoni u industrijskom sektoru

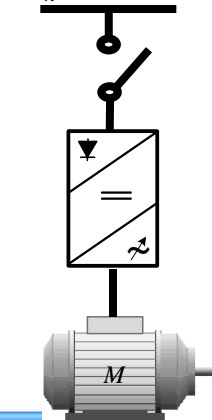
$U_n, 3 \sim, 50\text{Hz}$



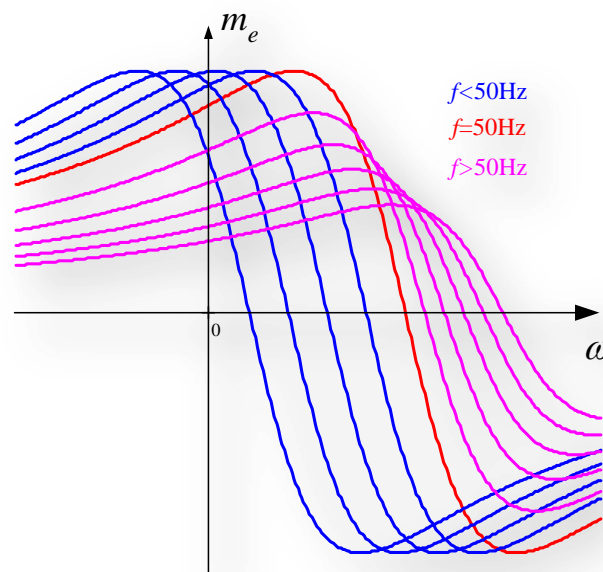
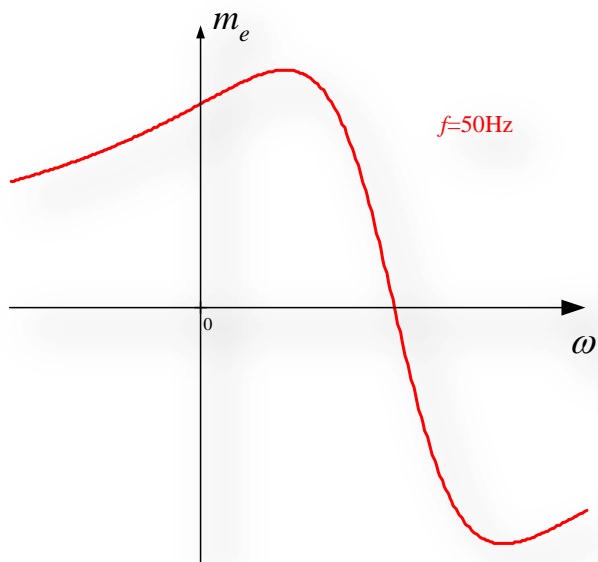
NEREGULISANI

Elektromotorni pogoni

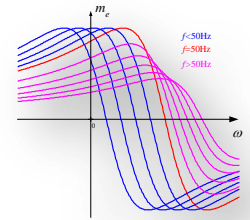
$U_n, 3 \sim, 50\text{Hz}$



REGULISANI



OSNOVNI DELOVI POGONA regulisani pogon

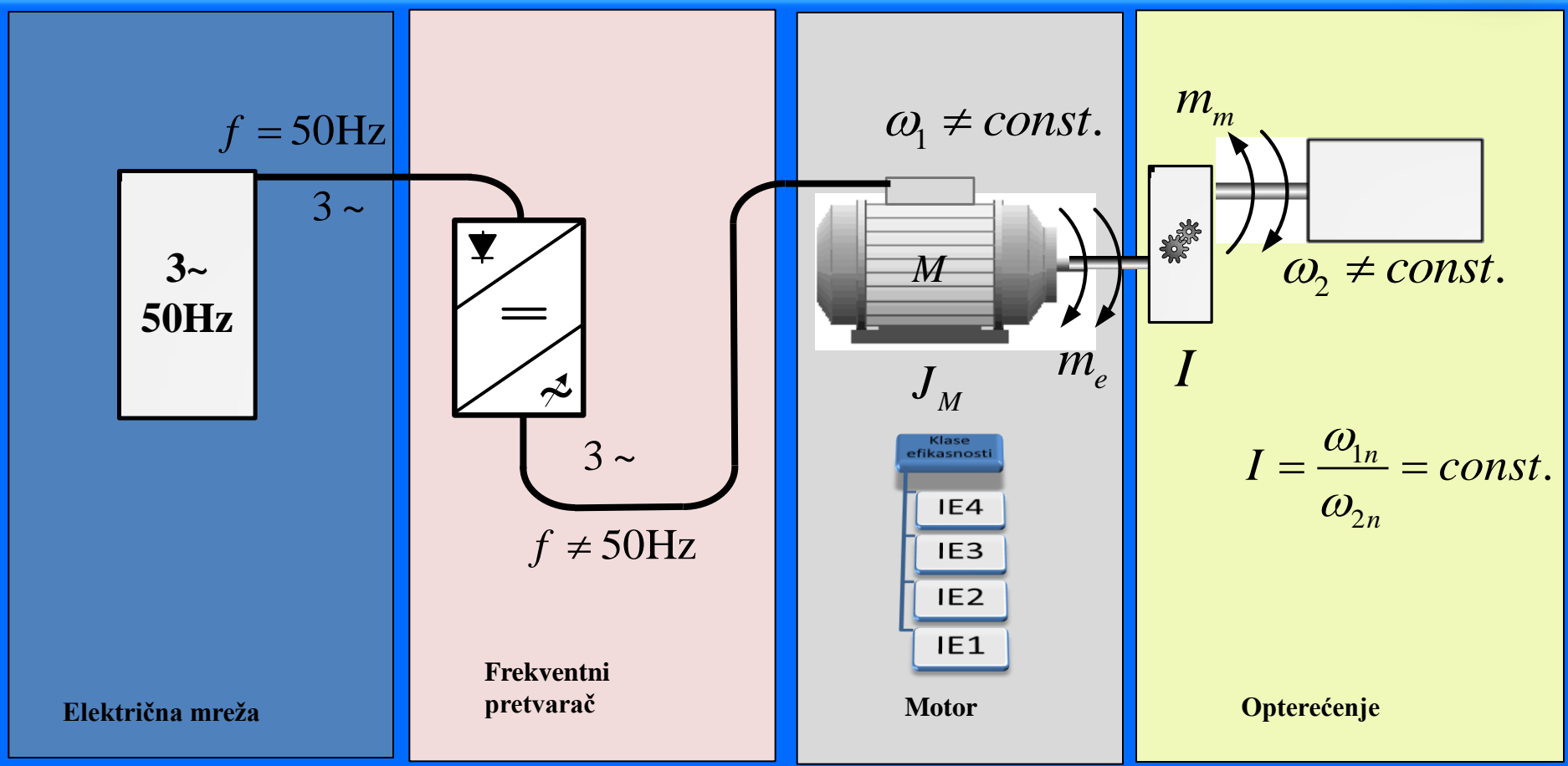


η_T

η_{FP}

η_{AM}

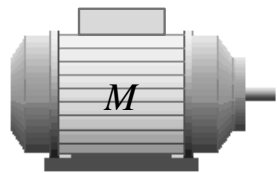
η_{MP}



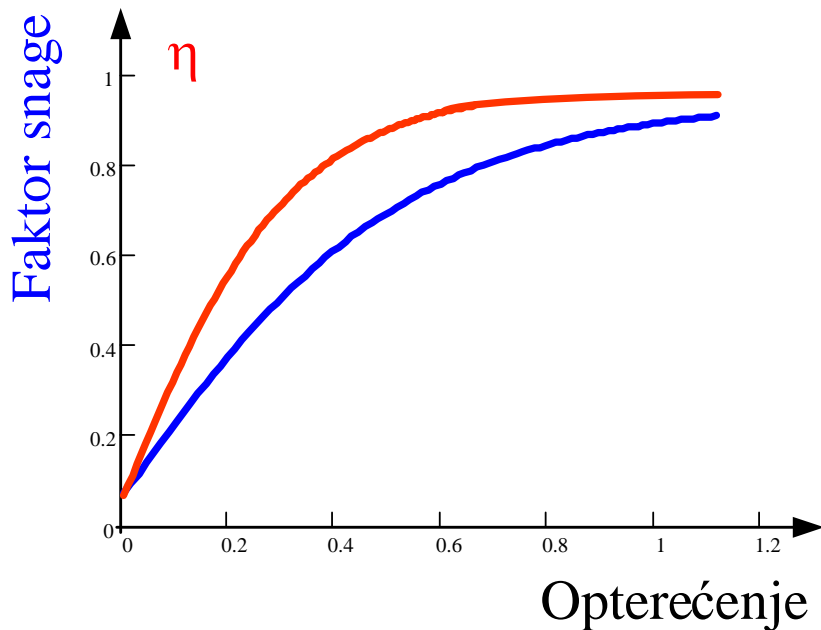
$$\eta_{ukupni} = \eta_T \times \eta_{FP} \times \eta_{AM} \times \eta_{MP} \quad \omega_1 = \omega_2 \cdot I \neq \text{const.}$$

IMA mogućnosti usklađivanja rada motora sa opterećenjem!

Efikasnost i faktor snage zavise od opterećenja

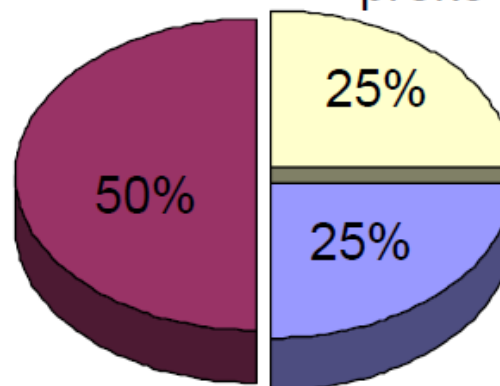


Ukupan broj motora u industriji



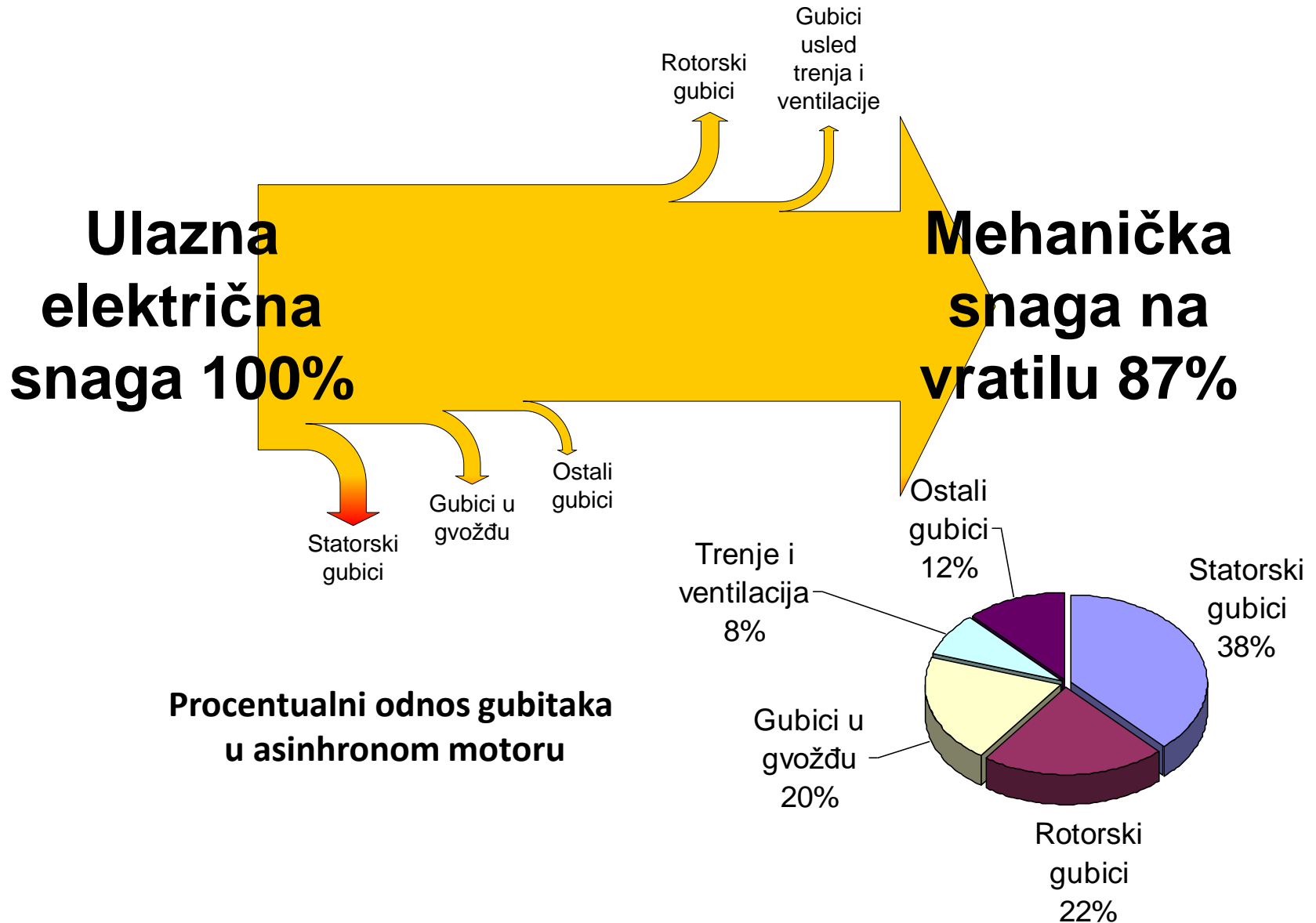
Srednje opterećenje od 30% do 60%

Odgovarajuće opterećenje preko 60%

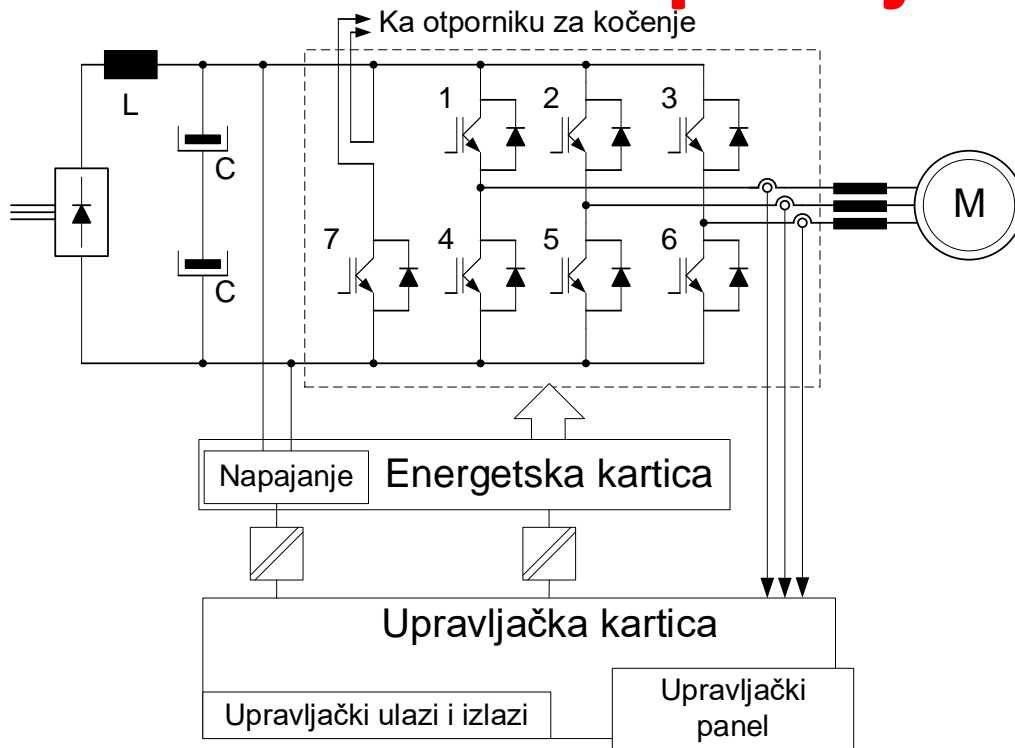


Veoma malo opterećenje manje od 30%

Raspodela gubitaka u asinhronom motoru



Energetski optimalne strategije upravljanja [1]

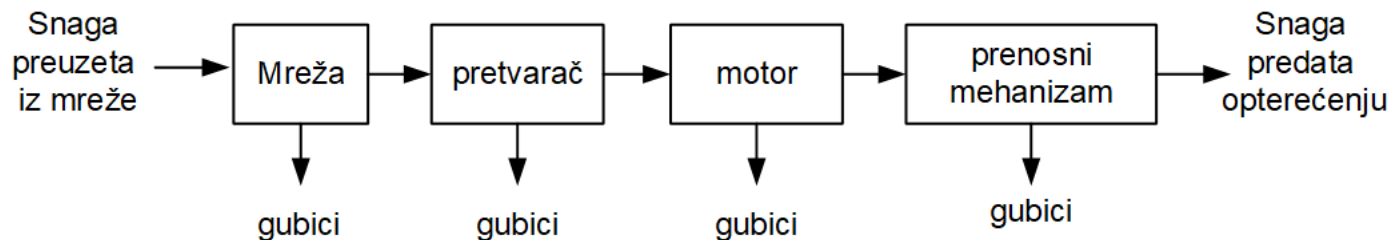


Definišu se 4 komponente gubitaka:

1. Gubici u mreži
2. Gubici u energetskom pretvaraču
3. Gubici u motoru
4. Gubici u mehaničkom prenosu energije

Konfiguracija elektromotornog pogona

Tok energije u elektromotornom pogonu



Gubici snage u procesu konverzije električne energije u mehaničku: od mreže, preko pogona do opterećenja

Gubici u mreži: Trofazni diodni ispravljač ima $\cos\phi$ koji je konstantno uvek blizu 1, ali ulazna struja ima značajan harmonijski sastav koji prouzrokuje dodatne gubitke u mreži. Ovi gubici praktično ne zavise od vrednosti fluksa u motoru, ali zavise od filtera u jednosmernom međukolu, kao i od uslova u mreži na koju je pogon priključen.

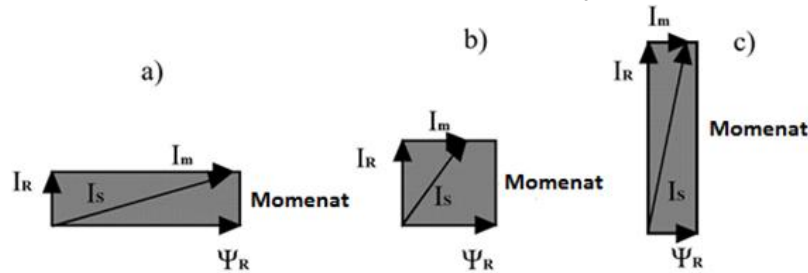
Gubici u pretvaraču: U ukupnim gubicima u pretvaraču, komponente gubitaka koje zavise od vrednosti fluksa su gubici usled prekidanja i provođenja prekidačkih komponenti u invertoru, kao i gubici u bakru u izlaznoj prigušnici i filteru u jednosmernom kolu. Na gubitke u invertoru dalje utiče izbor vrste (strategije) modulacije, ali to za ovu analizu nije od značaja. Dodatno postoje gubici koji ne zavise od načina upravljanja motorom, kao što su gubici u ispravljaču i gubici u napajanju kontrolne elektronike.

Gubici u motoru: Jedini gubici u motoru koji ne zavise od načina upravljanja su gubici usled trenja i ventilacije. Gubici u bakru i gubici u gvožđu zavise od vrednosti fluksa u motoru.

Gubici u mehaničkom prenosu: Ovi gubici ne zavise od načina upravljanja motorom, mada nisu zanemarljivi. Najbolji način da se smanje jeste direktna mehanička sprega, izbegavanje reduktora, zupčanika i kaišnika.

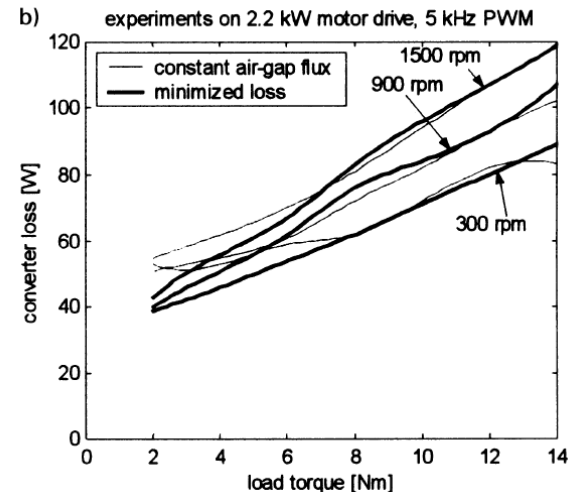
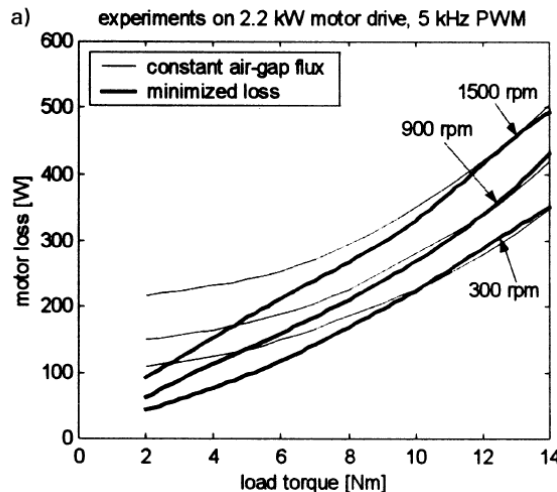
Minimizacija gubitaka prilagođavanjem vrednosti fluksa – Princip i rezultati [1]

- Ilustracija načina generisanja momenta pri malim opterećenjima, za različite vrednosti fluksa:
 a) nominalni fluks b) polovina nominalne vrednosti c) 20% nominalne vrednosti fluksa



Vektorski dijagram generisanja momenta pri malim opterećenjima za različite vrednosti fluksa

Gubici snage mereni na 4-polnom asinhronom motoru $P_n=2,2$ kW, $M_n=14$ Nm, učestanost prekidanja 5 kHz, koji radi ili sa konstantnim fluksom u zazoru, ili sa optimalnom vrednošću fluksa u zazoru pri kojoj se imaju minimalni gubici snage u pogonu: a) Gubici snage u motoru b) Gubici snage u pretvaraču.

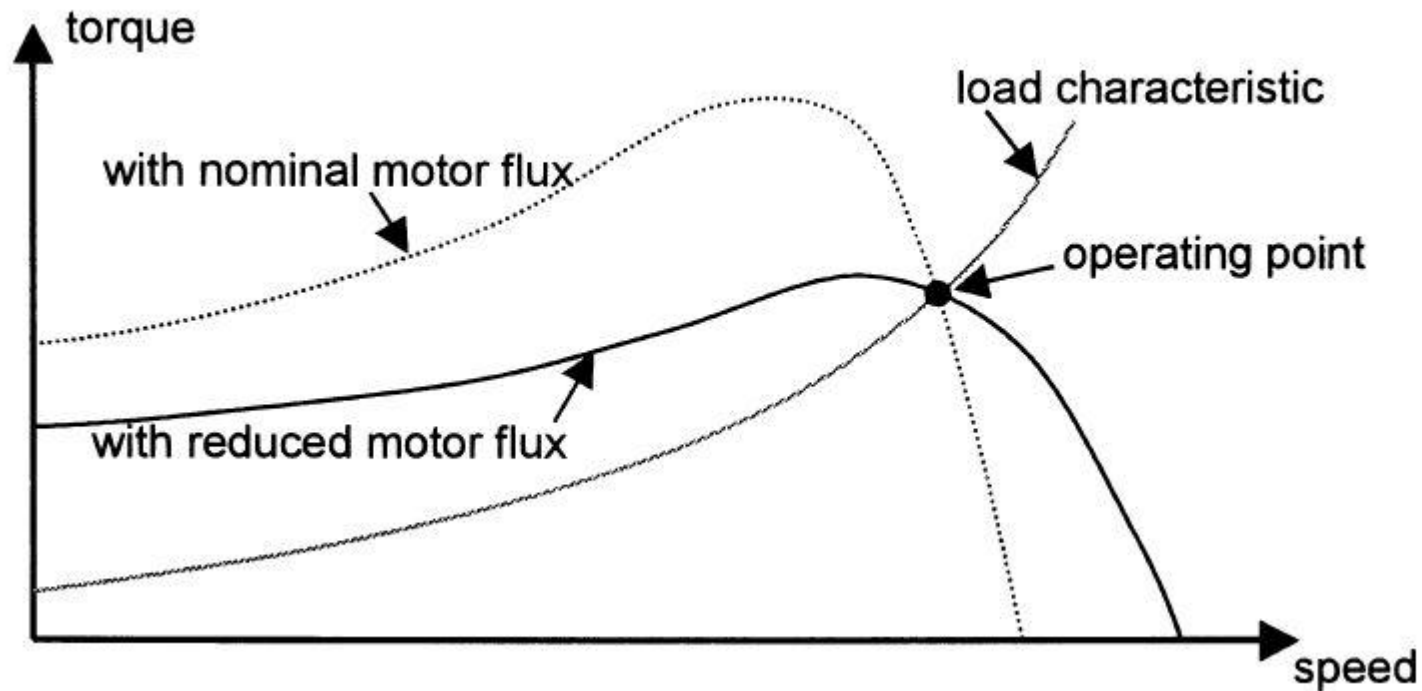


Minimizacija gubitaka prilagođavanjem vrednosti fluksa – Princip i rezultati [1]

- Optimalna vrednost fluksa pre svega zavisi od vrednosti momenta opterećenja. Ukoliko ne bi postojali gubici u gvožđu motora, optimalna vrednost fluksa ne bi zavisila od brzine obrtanja motora ali to nije slučaj, tako da optimalna vrednost fluksa zavisi od brzine.
- Gubici u pretvaraču u ovom slučaju nisu razmatrani. Oni prvenstveno zavise od amplitude struje statora i takođe su smanjeni u slučaju pod b), ali u izvesnoj meri oni zavise i od $\cos\varphi$ i indeksa modulacije.
- U prikazanom slučaju pogona male snage, minimizacija gubitaka snage varijacijom fluksa ima mnogo veći rezultat u slučaju motora, nego u slučaju pretvarača. Situacija se menja u slučaju pogona veće snage, kod kojih su gubici u motoru manji i poredivi sa gubicima u pretvaraču. Jasno je da do smanjenja gubitaka na ovaj način dolazi samo u slučaju malih opterećenja.
- **Glavni nedostatak ovog načina upravljanja je to što se sa smanjenjem fluksa u datoj radnoj tački (za zadatu brzinu i moment opterećenja), povećava učestanost napajanja statora, a prevalni moment motora se smanjuje, tako da motor postaje osetljiviji na iznenadne promene opterećenja. Šta će se desiti ukoliko se opterećenja iznenada promeni – zavisi od načina upravljanja motorom.**
- U slučaju vektorske kontrole sa povratnom spregom po brzini, brzina može značajno da opadne i može da se vrati na zadatu vrednost samo ako se fluks vrati na nominalnu vrednost.
- U slučaju upravljanja AM-om u otvorenoj sprezi, motor može i da prevali pri čemu motor ispada iz upravljanja i mora se zaustaviti. Važan zadatak pri projektovanju energetski optimalnog upravljanja je da se obezbedi da pogon može da podnese nagle promene opterećenja.

Minimizacija gubitaka prilagođavanjem vrednosti fluksa – Problemi [1]

1. Kako odabrati optimalnu vrednost fluksa?
2. Kako ostvariti željenu vrednost fluksa?



Mehaničke karakteristike motora koji radi u označenoj radnoj tački. Prevelni moment motora opada sa smanjenjem fluksa.

Model gubitaka snage u elektromotornom pogonu [1]

Da bi se energetske optimalno upravljalo pogonom sa asinhronim motorom, mora da se napravi kompromis između tačnosti i jednostavnosti!

1. Gubici snage u motoru pri osnovnoj učestanosti napajanja:

- Dovoljno tačno posmatrati ekvivalentnu šemu AM-a po fazi da bi se modelovali gubici snage u motoru pri osnovnoj učestanosti napajanja. Oni obuhvataju gubitke u bakru statora i rotora, gubitke u magnetnom kolu (gvožđu) statora i rotora i mehaničke gubitke. Dodatni gubici nisu posebno razmatrani, ali su obuhvaćeni gubicima u bakru statora.
- Statorskom otpornošću se obuhvata porast otpornosti usled porasta temperature namotaja, ali skin efekat nije obuhvaćen. Rotorskom otpornošću se takođe obuhvata porast otpornosti usled porasta temperature namotaja i moguće je izraziti u zavisnosti od učestanosti klizanja. Mehanički gubici se modeluju u zavisnosti od brzine.
- Gubici u gvožđu se modeluju klasičnom Steinmetz-ovom formulom, koja uključuje i zavisnost od učestanosti i od magnetizacije.

$$P_{Fe} = k_h \Psi_m^v f + k_e \Psi_m^v f^2$$

k_h – histerezisni koeficijent koji zavisi od vrste magnetnog materijala i konstrukcije motora,

k_e – koeficijent vihornih struja koji zavisi od vrste magnetnog materijala i konstrukcije motora

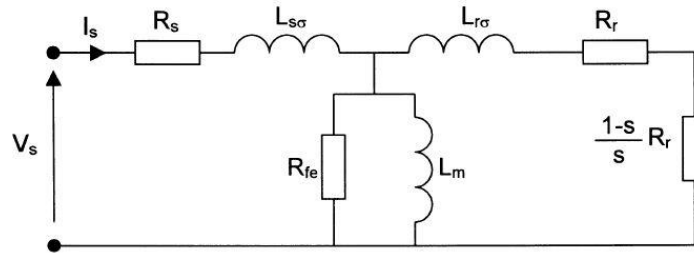
Ψ_m - zajednički (uzajamni) fluks u mašini

f – osnovna učestanost napajanja.

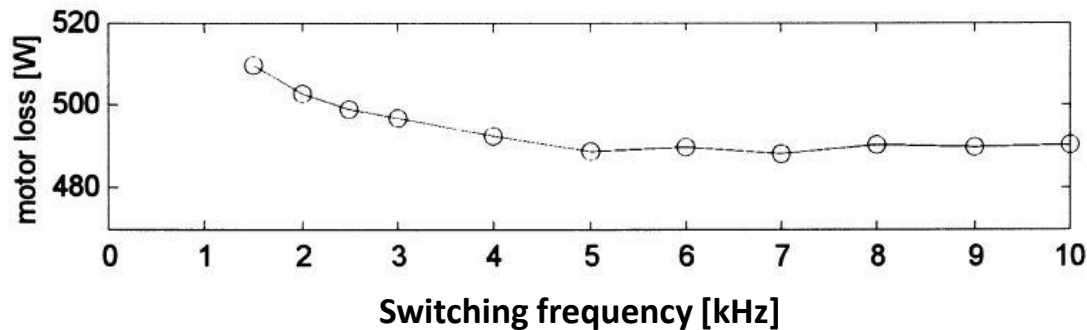
Modeli gubitaka snage u motoru testirani su na pogonima snage 2,2kW, 22kW i 90kW u opsegu brzine od 0,2 do 1r.j. i u opsegu momenta opterećenja od 0 do 1r.j.

Model gubitaka snage u motoru [1]

2. Gubici snage u motoru usled viših harmonika:



- PWM invertori izazivaju talasnost (ripple) u talasnom obliku struje, koja onda prouzrokuje gubitke snage u motoru usled viših harmonika. Ovakva struja, koja sadrži više harmonike, protiče kroz namotaje statora i rotora, utičući na porast gubitaka u bakru statora i rotora. Takođe, viši harmonici u talasnom obliku fluksa se koncentrišu uz površinu magnetnog materijala i stvaraju gubitke usled viših harmonika u statorskim i rotorskim zupcima. Teorijska analiza je uspeła samo da izrazi ove gubitke kvalitativno.



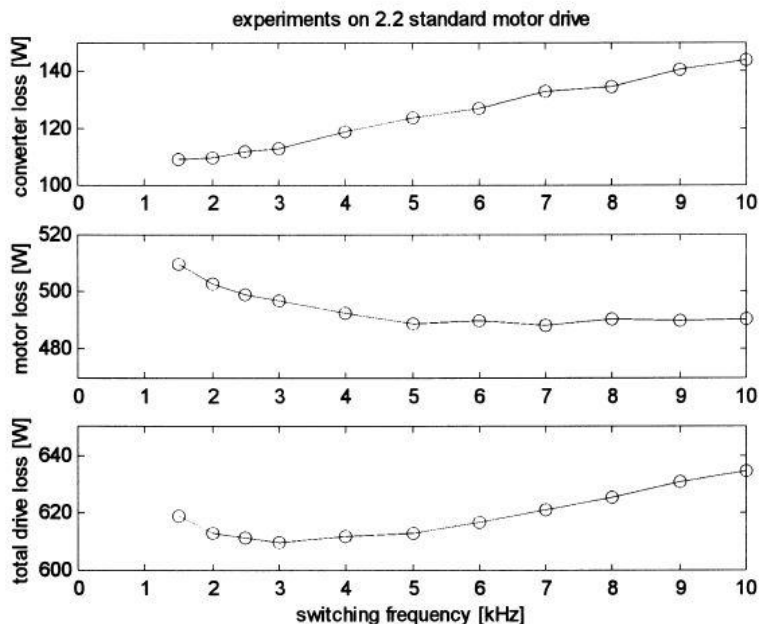
Mereni gubici snage u motoru usled viših harmonika u zavisnosti od prekidačke učestanosti za pogon sa AM-om snage 2,2kW

Model gubitaka snage u frekventnom pretvaraču [1]

3. Gubici snage u frekventnom pretvaraču:

1. Gubici snage u napajanju
2. Gubici snage u ispravljaču
3. Gubici snage u bakru prigušnice u jednosmernom međukolu
4. Gubici snage u invertoru usled provođenja i prekidanja
5. Gubici snage u izlaznoj prigušnici

- Poslednje dve vrste gubitaka prvenstveno zavise od izbora načina upravljanja, pa se one i analiziraju. Pokazalo se da je potpuno zadovoljavajuće modelovati gubitke u izlaznoj prigušnici sa idealnom otpornošću, dok su gubici u invertoru mnogo kompleksniji, mada se najčešće mogu pojednostaviti tako da se njihov proračun, zajedno sa ukupnim modelom gubitaka u motoru može vršiti u realnom vremenu.



- Gubici snage u invertoru usled provođenja:

- definišu se padovi napona na diodama i tranzistorima:

$$v_{con,T} = V_{0,T} + R_{0,T} \cdot i_T$$

$$v_{con,D} = V_{0,D} + R_{0,D} \cdot i_D$$

Model gubitaka snage u frekventnom pretvaraču [1]

1. Gubici snage u invertoru usled provođenja:

-Najčešće se računaju za slučaj space-vector modulacije prema sledećim izrazima:

$$P_{con,T} = \frac{V_{0,T} \cdot I_s \sqrt{2}}{\pi} + \frac{V_{0,T} \cdot I_s \cdot m_i \cdot \cos \varphi}{\sqrt{6}} + \frac{R_{0,T} \cdot I_s^2}{2} + \frac{R_{0,T} \cdot I_s^2 \cdot m_i}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot 6\pi} - \frac{4R_{0,T} \cdot I_s^2 \cdot m_i \cdot \cos 3\varphi}{45\pi\sqrt{3}}$$
$$P_{con,D} = \frac{V_{0,D} \cdot I_s \sqrt{2}}{\pi} + \frac{V_{0,D} \cdot I_s \cdot m_i \cdot \cos \varphi}{\sqrt{6}} + \frac{R_{0,D} \cdot I_s^2}{2} - \frac{R_{0,D} \cdot I_s^2 \cdot m_i}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot 6\pi} + \frac{4R_{0,D} \cdot I_s^2 \cdot m_i \cdot \cos 3\varphi}{45\pi\sqrt{3}}$$

I_s – efektivna vrednost struje statora

m_i – indeks modulacije (ima vrednost od 0 do 1)

φ – fazni pomeraj izmedju statorskog napona i struje

$V_{0,T}, V_{0,D}$ – konstantni padovi napona na tranzistorima i diodama

$R_{0,T}, R_{0,D}$ – dinamičke otpornosti tranzistora i dioda

$i_{0,T}, i_{0,D}$ – struje tranzistora i dioda

Model gubitaka snage u frekventnom pretvaraču [1]

- Gubici snage u invertoru usled prekidanja:

Ovi gubici se približno mogu posmatrati kao linearna funkcija struje statora i mogu se odrediti na osnovu sledećeg izraza:

$$P_{sw} = C_{sw} \cdot I_s \cdot f_{sw}$$

C_{sw} – empirijski određena konstanta

f_{sw} – učestanost prekidanja

- Ukupni gubici snage u invertoru:

$$P_{gub,inv} = 3 \left(P_{gub,T} + P_{gub,D} \right) + P_{sw}$$

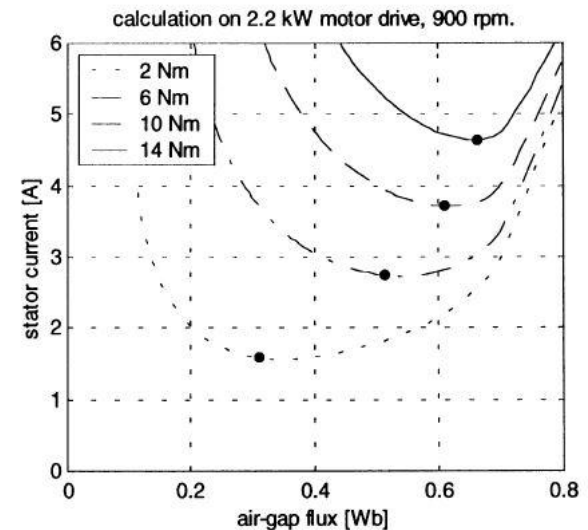
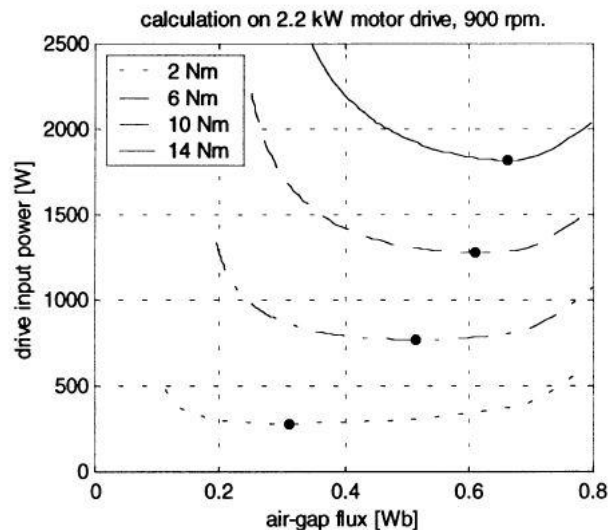
Gubici snage u invertoru su funkcija

- amplitude struje statora,
- faznog pomeraja,
- prekidačke učestanosti i
- indeksa modulacije.

Kriterijum optimizacije [1]

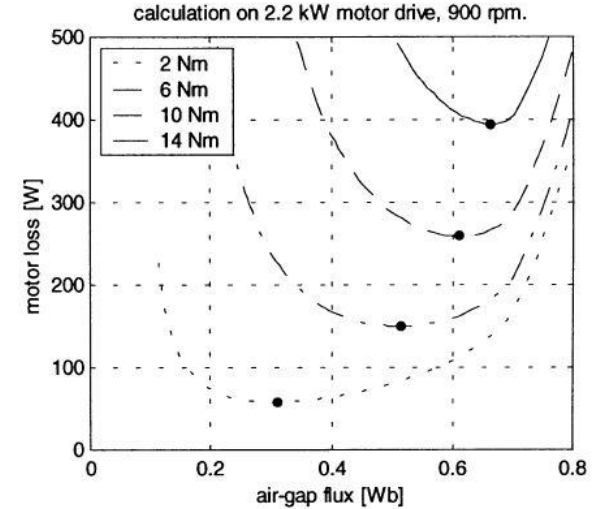
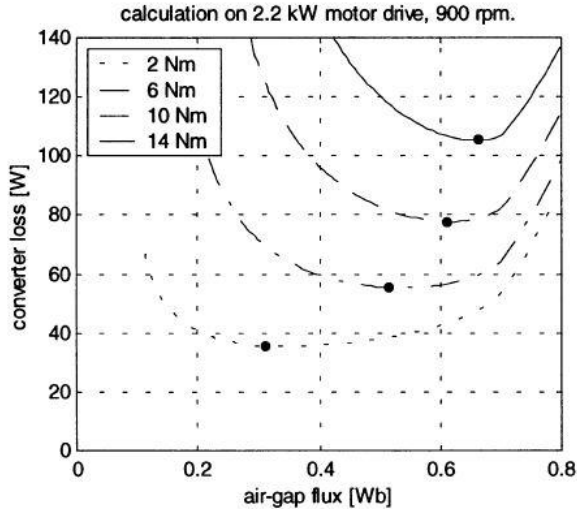
- Pre nego što se izabere energetski optimalan način upravljanja, neophodno je analizirati ponašanje pogona sa ciljem da se odluči kako da se realizuje rad sa minimalnim gubicima snage. Takva analiza je sprovedena ovde za standardni elektromotorni pogon sa asinhronim motorom snage 2,2kW.
- Moguće je da se izvedu zaključci na analitičkom nivou, na osnovu modela motora u stacionarnom stanju, ali problem predstavlja nelinearnost motora, kao i kompleksnost gubitaka u pretvaraču.
- Grafički prikaz rezultata proračuna u pomenutom slučaju pogona, dat je samo za brzinu od 900o/min (nominalna brzina je 1500 o/min). Svi grafici prikazuju proračune za 4 različita momenta opterećenja. U svakom posmatranom slučaju, varira se vrednost fluksa u zazoru mašine (nominalna vrednost iznosi 0.66Wb). Na svakom grafiku je tačkom označena vrednost fluksa pri kojoj se imaju minimalni gubici u pogonu.

Izračunata ulazna snaga pogona i struja stratora u slučaju elektromotornog pogona snage 2,2kW

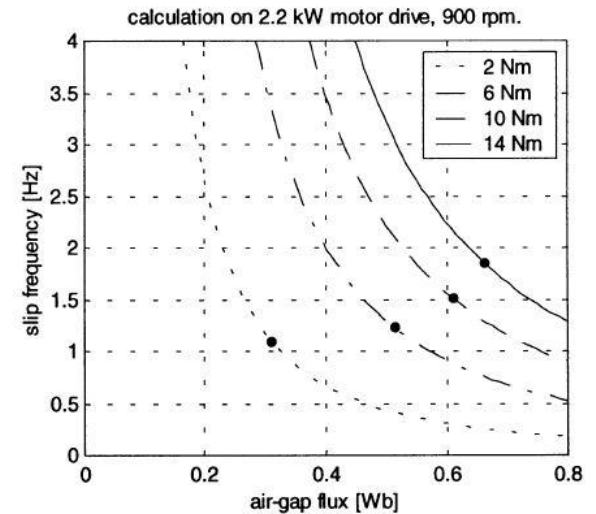
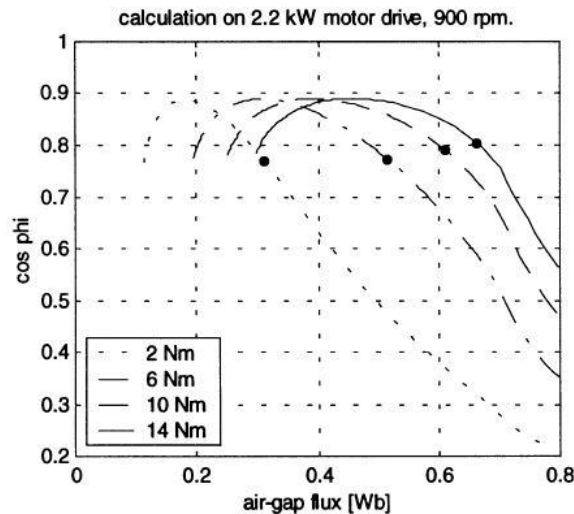


Kriterijum optimizacije [1]

Izračunati gubici snage u frekventnom pretvaraču i u motoru u slučaju elektromotornog pogona snage 2,2kW

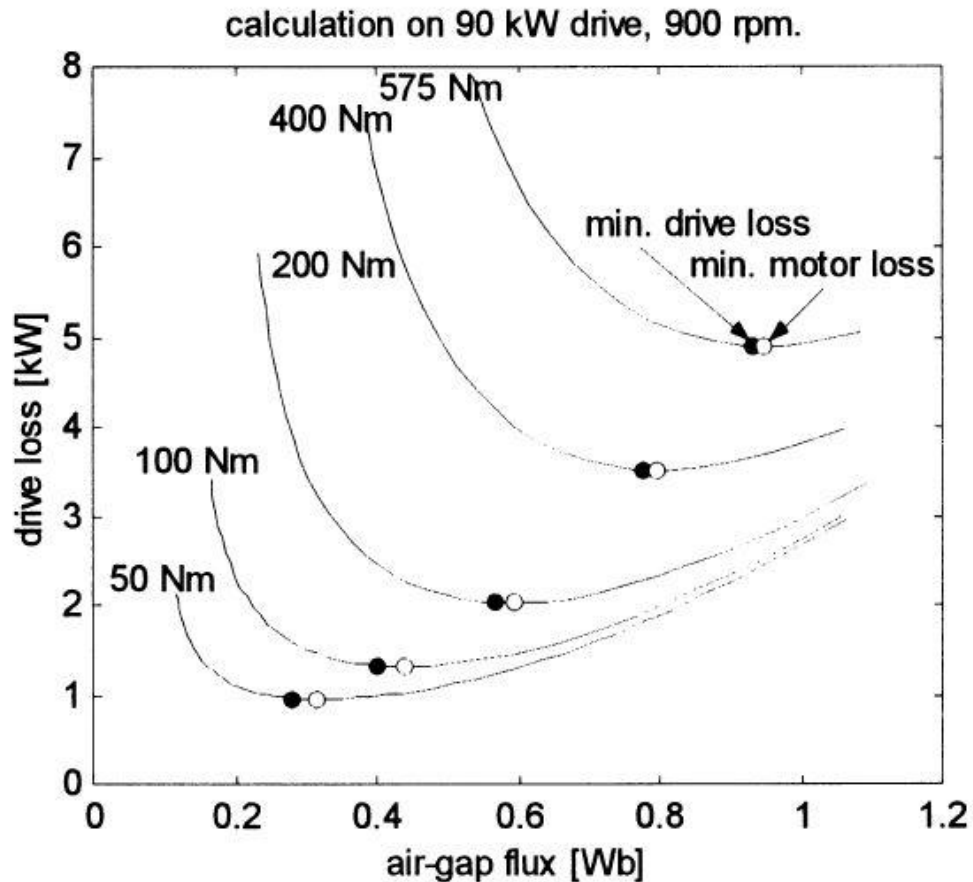


Izračunata vrednost za $\cos\phi$ i učestanost klizanja u slučaju elektromotornog pogona snage 2,2kW



Minimizacija gubitaka snage u pogonima srednje snage [1]

Izračunati gubici snage u elektromotornom pogonu srednje snage 90kW, 900o/min



Jedini razlog da se uključe gubici u pretvaraču pri formiranju modela gubitaka u pogonu je taj što oni podižu optimalnu vrednost fluksa, čime se dobija na robustnosti pogona.

- Tačkama su označeni minimumi gubitaka u pogonu, a kružićima u motoru.

Primena energetski optimalnih strategija upravljanja u praksi [1]

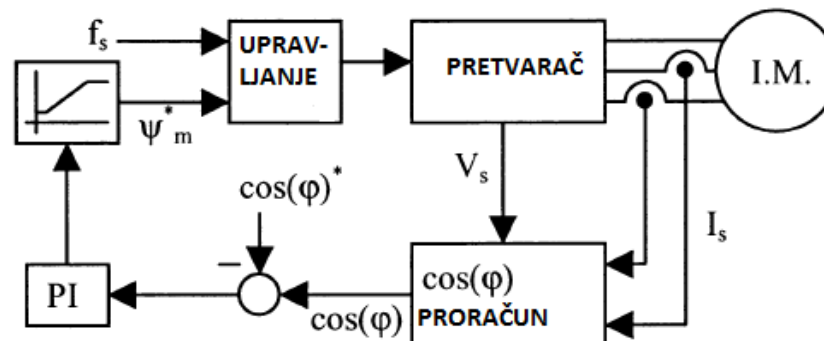
-Ovde će biti prikazane 3 osnovne energetski optimalne strategija upravljanja pogonom u cilju ostvarenja minimalnih gubitaka. Ovi načini se mogu kombinovati sa načinima upravljanja motorom kao što su:

- skalarno upravljanje,
- vektorsko upravljanje i
- direktna kontrola momenta.

- U ovom delu su prikazani eksperimentalni rezultati za skalarno upravljanje i vektorsko upravljanje sa orijentacijom referentnog sistema u skladu sa rotorskim fluksom.

I - Jednostavno upravljanje nekom od radnih veličina motora [1]

- Ovo praktično znači da se neka od veličina motora meri i reguliše na jednostavan način (npr. $\cos\varphi$).

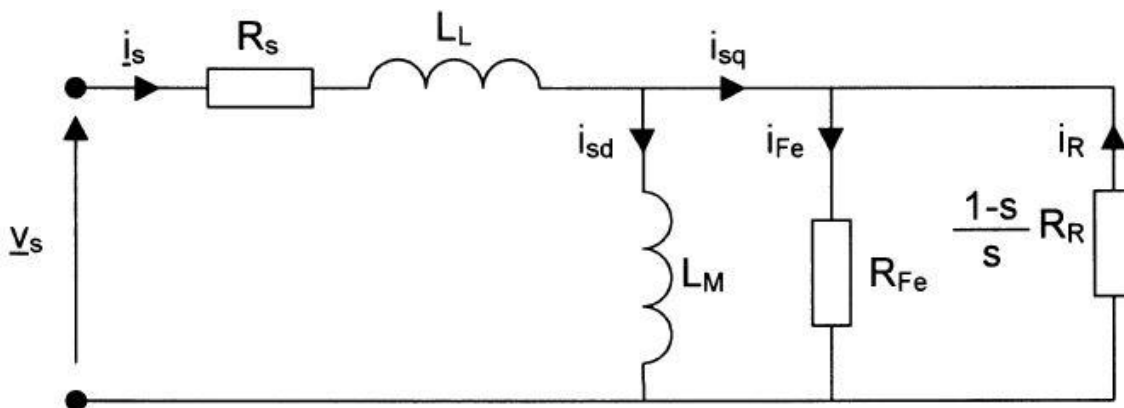


Blok dijagram regulacije $\cos\varphi$

II Upravljanje na osnovu modela gubitaka u motoru [1]

- Podešavanje optimalne vrednosti fluksa u motoru, tako da se imaju minimalni gubici snage, može se realizovati na različite načine. Koji će način biti izabran prvenstveno zavisi od toga kako je realizovano upravljanje motorom. Ovde su prikazana dva načina: analitički (minimum gubitaka u motoru) i numerički način postizanja minimuma gubitaka snage (kada su uključeni i gubici snage u frekventnom pretvaraču).

II.1 Analitičko rešenje za optimalnu vrednost fluksa kod upravljanja primenom modela gubitaka [1]



Ekvivalentna šema u stacionarnom stanju motora sa orijentacijom referentnog sistema u skladu sa vektorom rotorskog fluksa uključujući i gubitke u gvožđu

- Optimalna vrednost fluksa, tj. optimalna radna tačka se dobija rešavanjem jednačina koje važe za el. kolo prikazano na prethodnoj slici. Računaju se gubici snage u bakru statora, gubici snage u bakru rotora i gubici snage u gvožđu. Ukupni gubici su podeljeni na tri dela: na one koji zavise od struje u d osi, one koji zavise od struje u q osi i one koji zavise od obe struje i prikazani su izrazima:

$$P_{gub,d} = \left(\frac{(\omega_s L_M)^2}{R_{Fe}} + R_s + (\omega_s L_M)^2 \frac{R_s}{R_{Fe}^2} \right) \cdot i_{sd}^2$$

$$P_{gub,q} = (R_s + R_R) \cdot i_{sq}^2$$

$$P_{gub,dq} = -2\omega_s L_M \frac{R_s}{R_{Fe}} i_{sd} i_{sq}$$

ω_s – sinhrina brzina

L_M – induktivnost magnećenja rotora

R_{Fe} – otpornost kojom se modeluju gubici u gvožđu

R_s – otpornost statorskog namotaja

R_R – otpornost rotorskog namotaja

i_{sd} – komponenta struje statora srazmerna fluksu

i_{sq} – komponenta struje statora srazmerna momentu opterećenja

- Momenat koji razvija motor je

$$\tau_{em} = z_p L_M i_{sd} i_{sq}, \quad z_p - \text{broj pari polova}$$

- Ako definišemo A kao

$$A = \frac{i_{sq}}{i_{sd}},$$

- Onda važi:

$$i_{sq}^2 = A \frac{\tau_{em}}{z_p L_M}, \quad i_{sd}^2 = \frac{1}{A} \frac{\tau_{em}}{z_p L_M}, \quad i_{sd} i_{sq} = \frac{\tau_{em}}{z_p L_M}.$$

- Sada se ukupni gubici mogu izračunati na osnovu izraza:

$$P_{gub} = P_{gub,d} + P_{gub,q} + P_{gub,dq} = \frac{\tau_{em}}{z_p L_M} \left[\left(\frac{(\omega_s L_M)^2}{R_{Fe}} + R_s + (\omega_s L_M)^2 \frac{R_s}{R_{Fe}^2} \right) \cdot \frac{1}{A} + (R_s + R_R) A - 2\omega_s L_M \frac{R_s}{R_{Fe}} \right]$$

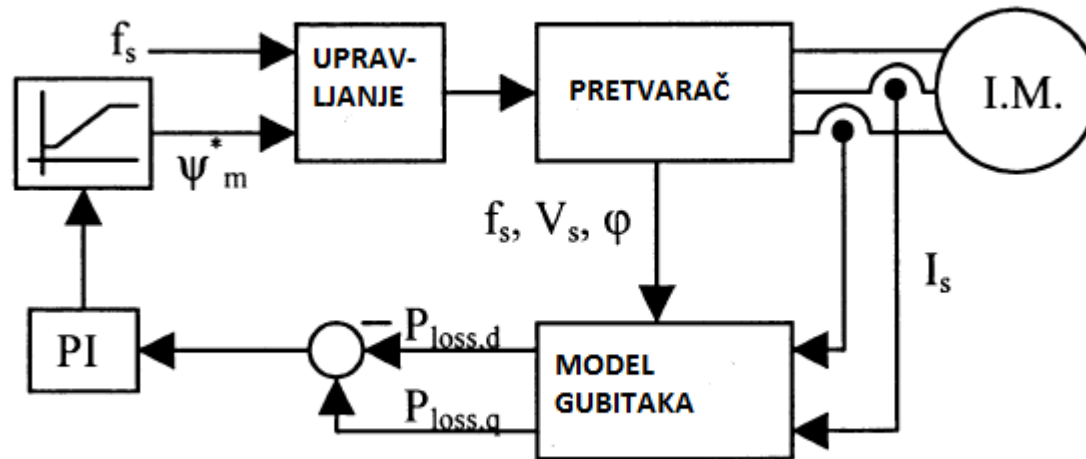
- Za konstantni moment opterećenja, minimum gubitaka se dobija diferenciranjem izraza za gubitke po A, smatrajući da parametri modela ne zavise od A. Ovo nije u potpunosti tačno, jer L_M i R_{Fe} zavise od vrednosti fluksa, što je sadržano u A, ali se ovakvo zanemarenje može prihvatiti.

$$\frac{\partial P_{gub}}{\partial A} = 0$$

$$-\left(\frac{(\omega_s L_M)^2}{R_{Fe}} + R_s + (\omega_s L_M)^2 \frac{R_s}{R_{Fe}^2} \right) \cdot \frac{1}{A^2} + (R_s + R_R) = 0 \Rightarrow P_{gub,d} = P_{gub,q}$$

ZAKLJUČAK: Gubici snage u motoru će biti minimalni kada se izjednače gubici snage koji zavise od direktne komponente struje statora sa gubicima snage koji zavise od poprečne komponente struje statora.

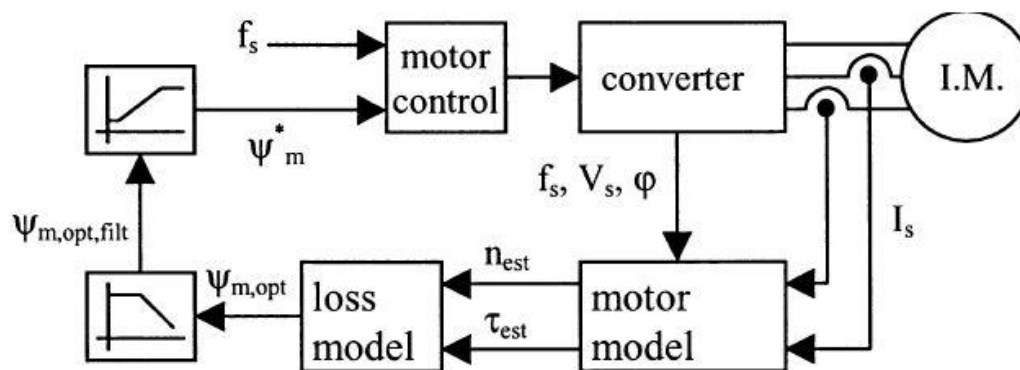
- Ova jednačina se može rešiti primenom PI regulatora, kao što je prikazano na slici:



- Nedostatak ove metode je to što njome nije obuhvaćeno zasićenje magnetnog materijala. Zbog ove pojave se pri velikim opterećenjima dobija velika vrednost referentnog fluksa. Problem se može prevazići ograničenjem fluksa na nominalnu vrednost.

II.2 Numeričko rešenje za optimalnu vrednost fluksa kod upravljanja primenom modela gubitaka [1]

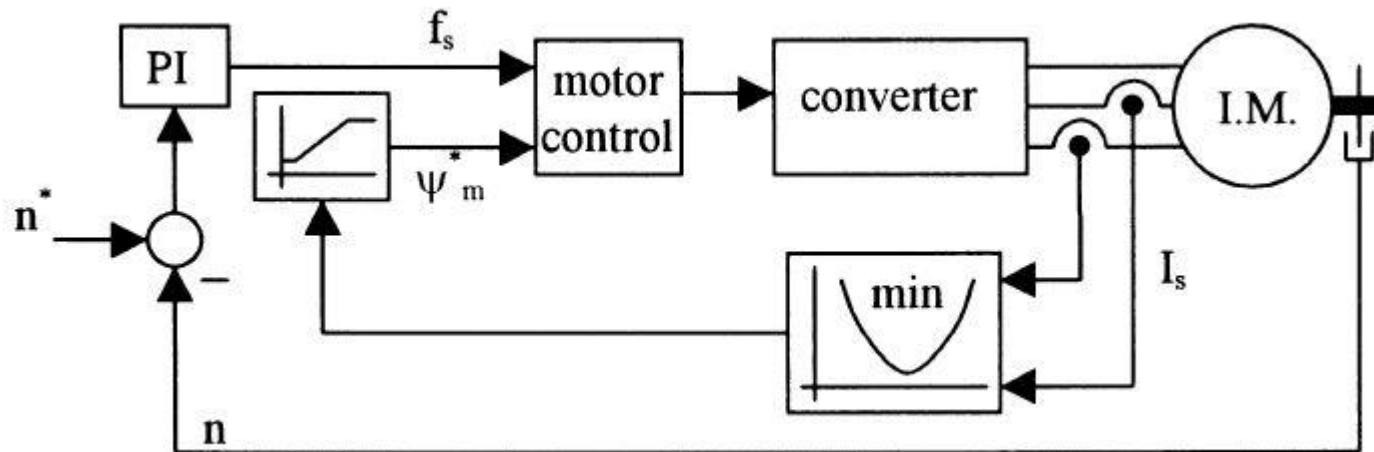
- Prednost numeričkog rešenja modela gubitaka je to što se na ovaj način mogu uvažiti nelinearnosti modela motora, kao i gubici u frekventnom pretvaraču.
- Potrebno je raspolagati preciznim modelom gubitaka snage u pogonu. U primeru prikazanom na slici, model motora je upotrebljen za estimaciju brzine i momenta opterećenja, odakle se može izračunati optimalna vrednost za fluks.
- Numeričko rešavanje zahteva više procesorskog vremena, ali se ovaj problem može prevazići na različite načine



- Izlaz iz ovog modela gubitaka ne mora uvek da bude vrednost optimalnog fluksa, već može da bude optimalna vrednost struje statora ili napona statora.

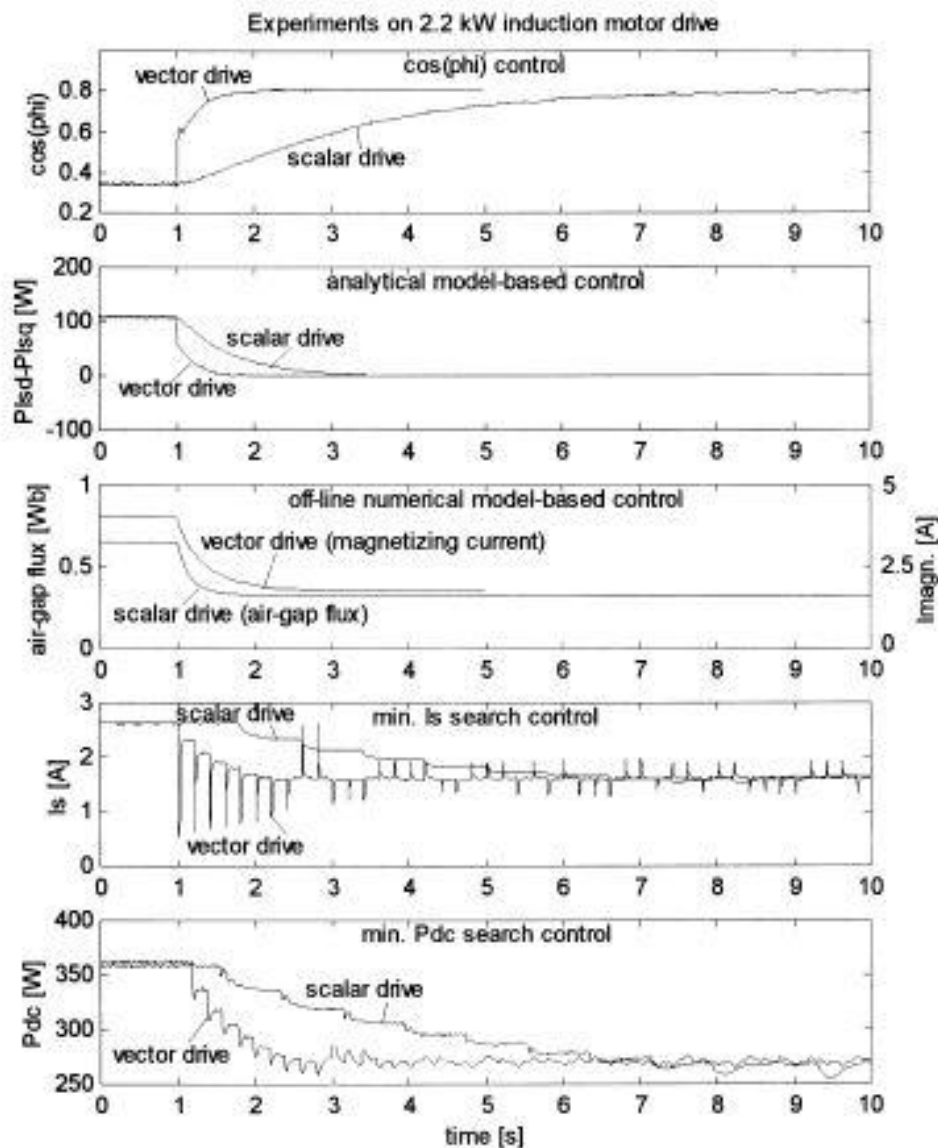
III Pretraživački algoritmi [1]

- Ovaj način jedini zahteva vrlo preciznu informaciju o brzini, tj. postojanje senzora za brzinu. Jedna od mogućnosti primene ovog načina energetski optimalnog upravljanja je data na slici.



- Prednost ove metode je to što nije neophodno poznavati gubitke snage u motoru.
- Nedostatak ove metode je to što pretraživački algoritam sporo konvergira ka optimalnoj vrednosti fluksa.

Uporedni prikaz energetski optimalnih strategija upravljanja [1]



- Pet energetski optimalnih načina upravljanja je analizirano na elektromotornom pogonu sa asinhronim motorom snage 2,2kW, u režimu rada sa malim opterećenjem (τ_m) u cilju njihovog poređenja prema brzini dostizanja optimalne radne tačke, tj. vremena potrebnog da se vrednost fluksa smanji sa nominalne vrednosti na optimalnu vrednost pri kojoj se imaju minimalni gubici snage u pogonu.

- Eksperimenti su vršeni na pogonima kod kojih su primenjena dva načina upravljanja:
- skalarno upravljanje u otvorenoj sprezi, osim u slučaju primene pretraživačkog algoritma koji zahteva regulaciju brzine
 - vektorsko upravljanje sa orijentacijom referentnog sistema u skladu sa vektorom rotorskog fluksa sa zatvorenim spregom po brzini.

Zaključci iz prikazanih rezultata [1]

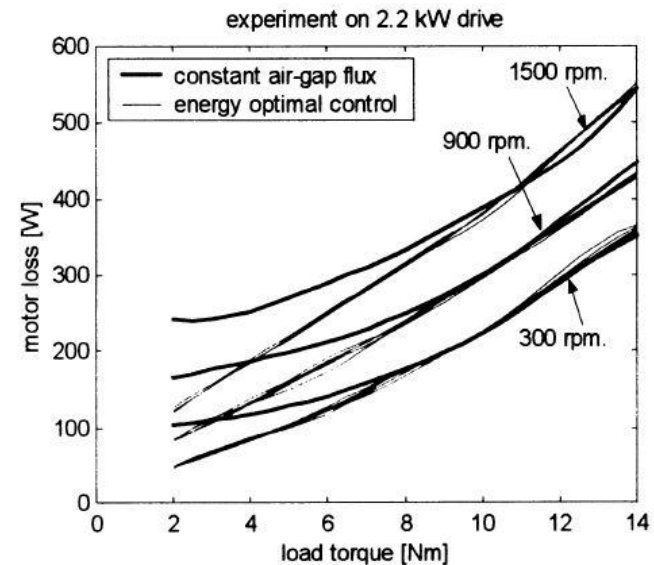
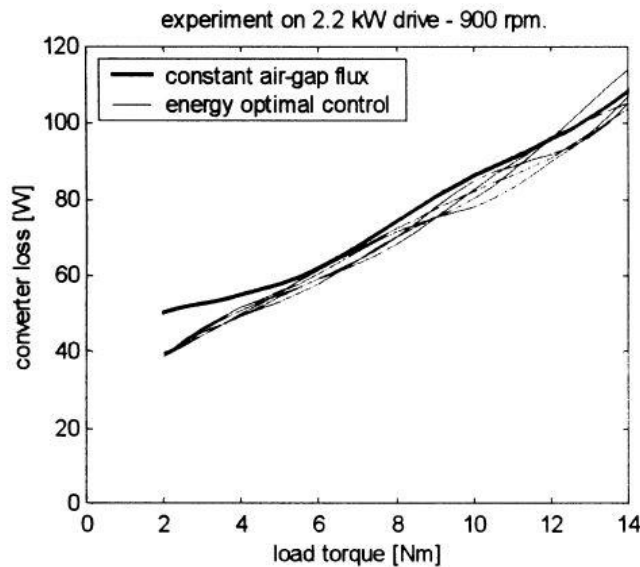
- Zaključci iz prikazanih rezultata dati su sumarno u tabeli :

Vrsta primenjene energetske optimalne strategije	Prednosti	Nedostaci
Upravljanje pri konstantnoj vrednosti $\cos\varphi$	Jednostavno, zahteva vrlo malo podataka o pogonu	Sporo konvergira ka optimumu
Analitičko rešenje za optimalnu vrednost fluksa primenom modela gubitaka	Relativno jednostavno	Nedovoljno tačno – ne uključuje se uticaj zasićenja magnetnog kola
Numeričko rešenje za optimalnu vrednost fluksa primenom modela gubitaka	Visoka tačnost, brz odziv, jednostavno za implementaciju	Neophodno je poznavati model motora i gubitke u pogonu
Pretraživački algoritam (minimizacija P_{in} , minimizacija I_s)	Nije neophodno poznavati model gubitaka	Sporo konvergira ka optimumu i varira oko optimalne vrednosti, zahteva senzor za merenje brzine i eventualno dodatni senzor za merenje snage, vremenski zahtevno za podešavanje

- Kako se vreme konvergencije fluksa ka optimalnoj vrednosti meri u sekundama, jasno je da se može primeniti samo u aplikacijama koje nisu dinamički zahtevne, kao što su HVAC (grejanje, ventilacija i klimatizacija). U ovim pogonima se mogu ostvariti najveće uštede energije, zato što oni u opštem slučaju rade sa malim opterećenjem veći deo radnog ciklusa, a imaju mnogo radnih sati godišnje. Primenjuje se najčešće tzv. kvadratnom V/Hz karakteristika, sa kojom se postiže redukcija fluksa pri niskim brzinama.

Zaključci iz prikazanih rezultata [1]

Gubici snage u elektromotornom pogonu sa četvoropolnim AM-om, snage 2,2,kW mereni pri konstantnom fluksu i primenom prikazanih 5 energetski optimalnih strategija. Nominalni moment je 14Nm, a prekidačka učestanost 5kHz.



- ✓ Redukcijom fluksa pri malim opterećenjima se pored uštede energije postiže i redukcija buke koju stvaraju i motor i pretvarač.
- ✓ Nedostatak strategije je to što se redukcijom fluksa povećava struja rotora pa se on više zagreva, a teže ga je hladiti nego stator.
- ✓ Drugi nedostatak je veća osetljivost pogona na poremećaje. Ovo se može prevazići praćenjem opterećenja i naglim povećavanjem fluksa pri povećanju opterećenja, ali će i dalje ostati povećana osetljivost u odnosu na pogon sa nominalnim fluksom. Mora se u svakom posebnom slučaju ispitati da li će ovo predstavljati ili ne problem.

Frekventni pretvarač – Danfoss [2]

- Skalarno upravljanje



Whitepaper

Automatic Energy Optimization

Introduction

Energy savings and precision system control are the main reasons to use adjustable frequency drives in heating, ventilating and air conditioning (HVAC) systems. Energy savings are significant because a slight reduction in the speed of a fan or centrifugal pump has a very large impact on its energy consumption. The efficiency of fans or pumps, along with the drive, remains high at reduced speeds. Motor efficiency, however, drops off as the motor becomes unloaded.

Drive manufacturers have attempted to improve the low speed efficiency of motors with a number of designs. Unfortunately, most of these products require tedious manual adjustment and still cannot optimize motor efficiency under all conditions.

The VLT HVAC Drive has a unique control feature called Automatic Energy Optimization (AEO). With this function, the drive automatically maximizes motor efficiency under any operating condition.

The following examines the reason for reduced motor efficiency at light loads and the way that AEO counteracts this natural tendency. The application and limitations of this function are also examined.

Frekventni pretvarač – Siemens [3]

- Vektorsko upravljanje

Vector control
4.13 Efficiency optimization

4.13 Efficiency optimization

Description

The following can be achieved when optimizing the efficiency using p1580:

- Lower motor losses in the partial load range
- Noise in the motor is minimized

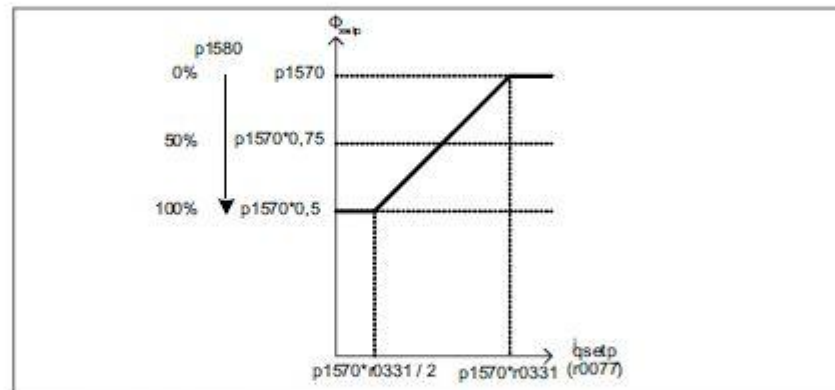


Figure 4-21 Efficiency optimization

It only makes sense to activate this function if the dynamic response requirements of the speed controller are low (e.g., pump and fan applications).

For $p1580 = 100\%$, the flux in the motor under no-load operating conditions is reduced to half of the setpoint (reference flux) ($p1570/2$). As soon as load is connected to the drive, the setpoint (reference) flux linearly increases with the load and at approx. $r0077 = r0331 \cdot p1570$ reaches the setpoint set in $p1570$.

In the field-weakening range, the final value is reduced by the actual degree of field weakening. The smoothing time ($p1582$) should be set to approx. 100 to 200 ms. Flux differentiation (see also $p1401.1$) is automatically deactivated internally following magnetization.

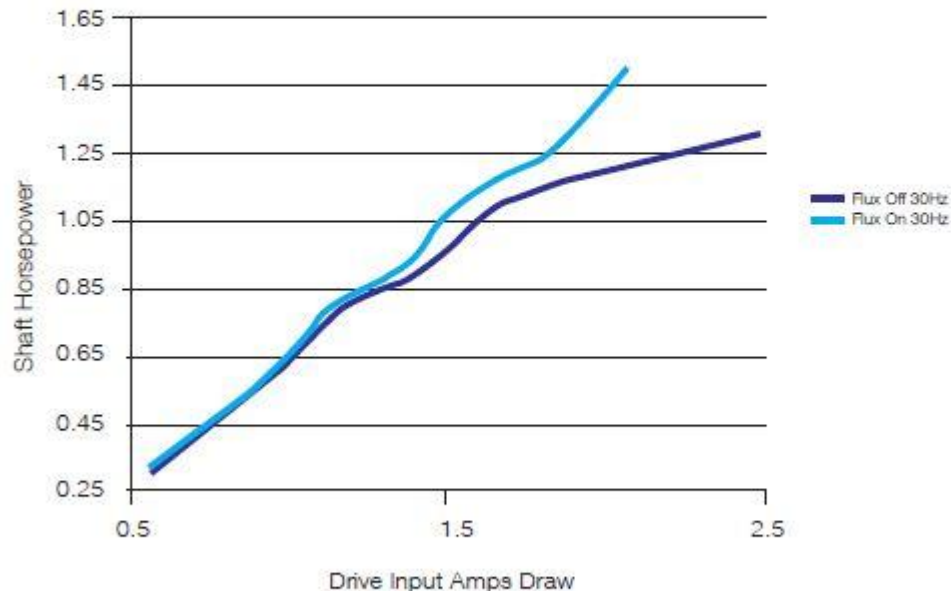
Frekventni pretvarač ABB [4]

- DTC - direktna kontrola momenta

Flux Optimization

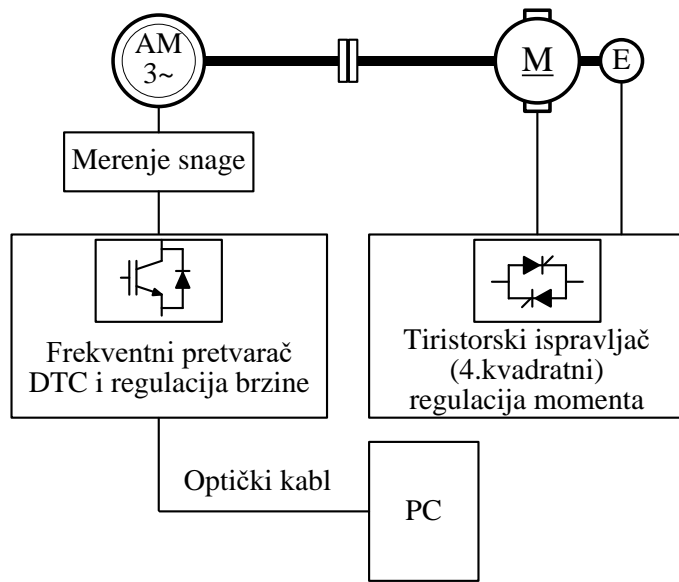
Benefit 1

The first benefit of flux optimization is the reduction of the flux-producing current. This increases the overall efficiency of the VFD / motor package, by reducing the motor's current. ABB conducted several tests of a 3HP 1755RPM motor operated via an ACH550 VFD. The motor was run at three (3) set speeds, while the shaft load was varied from 20 – 100% of full load. The VFD input power consumption was measured approximately 100 times at each. The average of the power draw of the drive for each speed and load was graphed. Below is a chart representing the motor operating at 30 Hz from 0.3 to 1.5 HP. As shown, there is an increase in the amp draw at a given HP at the lighter loads of the VFD operating in Flux Optimization. At 1/3 HP, the flux optimization provided a 2.3% increase; and, at 1 HP, a 4.2% increase was measured.

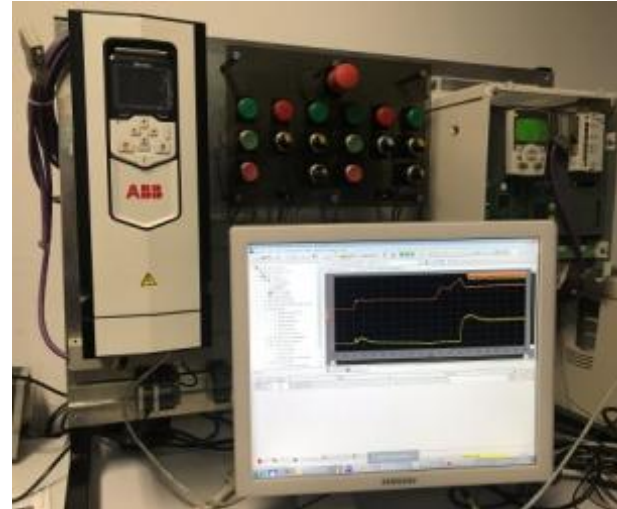


As the load was increased, the motor began to operate near the constant-torque mode. This created a large increase in efficiency, when using flux optimization. This was because the V/Hz ratio was set to the squared ratio, and the drive required additional flux to generate more torque. Flux Optimization has the ability to increase or decrease the magnetic flux in the motor to match the demand of the load.

Mogućnosti za primenu neke od energetski optimalnih strategija u Laboratoriji (Primena modela gubitaka u DTC pogonu sa AM)



Principijelni blok dijagram četvorokvadrantnog pogona



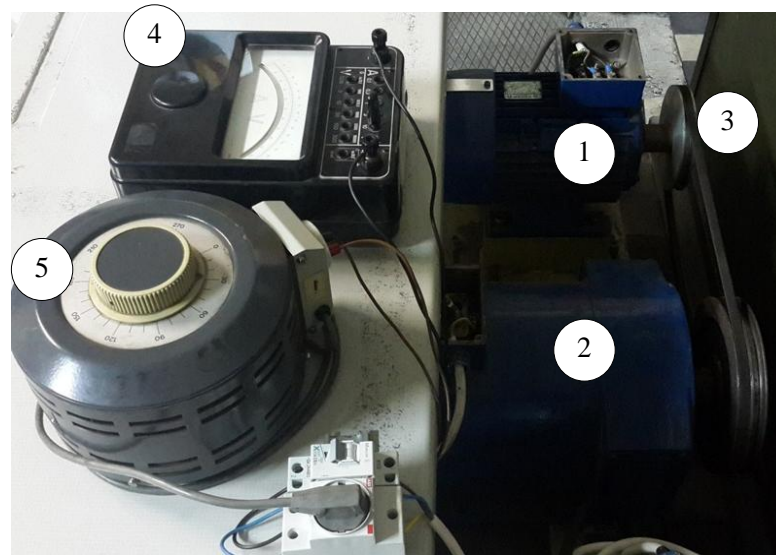
- 1 - frekventni pretvarač (DTC, ABB ACS 880)
- 2 – tiristorski ispravljač (ABB DCS 800)
- 3 - PC sa aplikativnim softverom
- 4 – komandni pult

- 5 – jednosmerni motor
- 6 – asinhroni motor:
 $P_n = 3 \text{ kW}$, $n_n = 1435 \text{ o/min}$,
 $\cos \phi_n = 0.8$
 $M_n = 19.97 \text{ Nm}$, $I_n = 6.5 \text{ A}$,
 $U_n = 380 \text{ V}$, veza statorskog namotaja u zvezdu



**Laboratorijska postavka:
DTC u pogonu sa AM-om**

Mogućnosti za primenu neke od energetski optimalnih strategija u Laboratoriji (Primena modela gubitaka u pogonu sa vektorski upravljanim AM)



Laboratorijska postavka: Vektorsko upravljanje pogonom sa AM-om

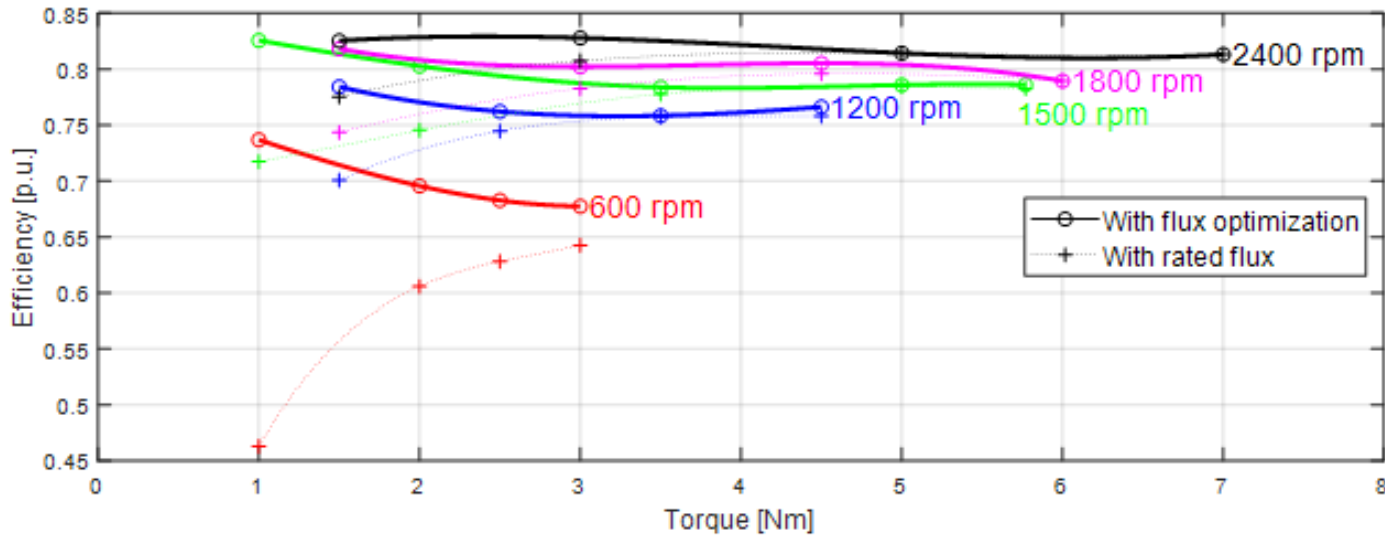
Levo: Frekventni pretvarač (Vektorsko upravljanje, Siemens Sinamics S120 levo)

Desno: 1- asinhroni motor,

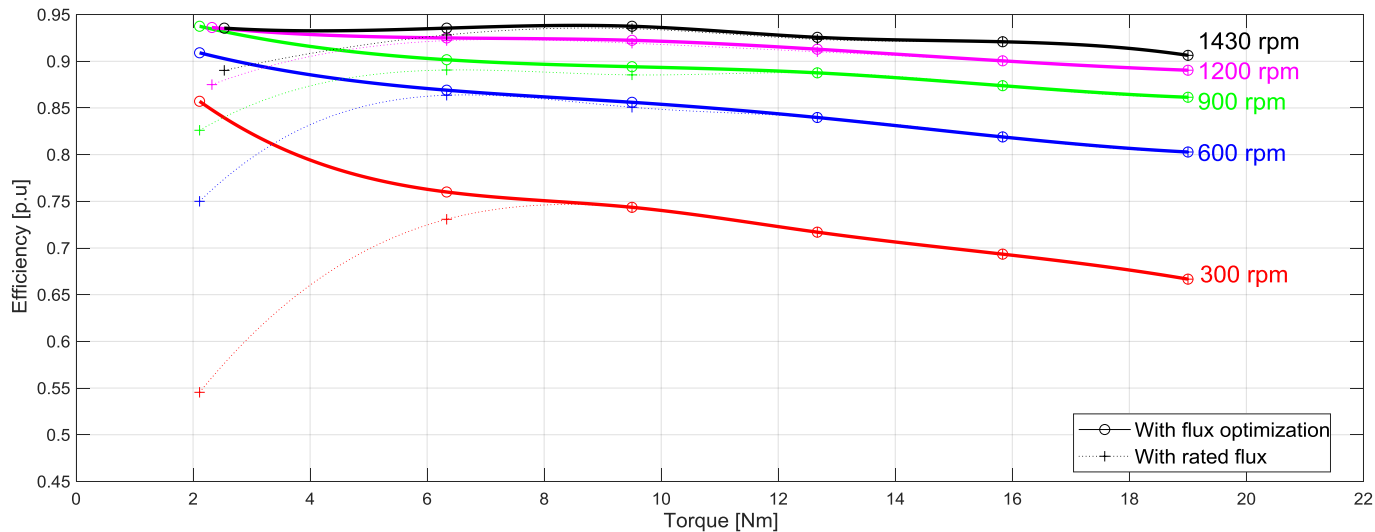
2 – Jednosmerni motor, 3 – Kaiš, 4 - Ampermetar,
5 – Autotransformator

Podaci o AM-u: $P_n = 3 \text{ kW}$, $n_n = 2820 \text{ o/min}$, $\cos \phi_n = 0.83$
 $M_n = 10.16 \text{ Nm}$, $I_n = 7 \text{ A}$, $U_n = 380 \text{ V}$, veza statorskog namotaja u trougao

Uporedni prikaz rezultata merenja [5]



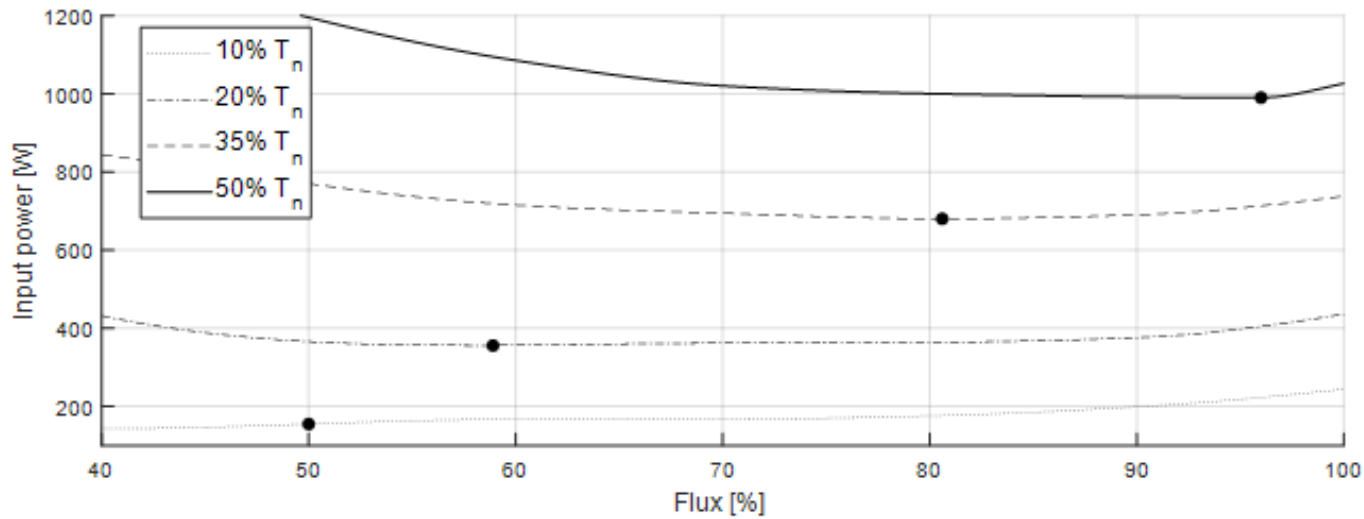
Pogon sa vektorski upravljanim AM



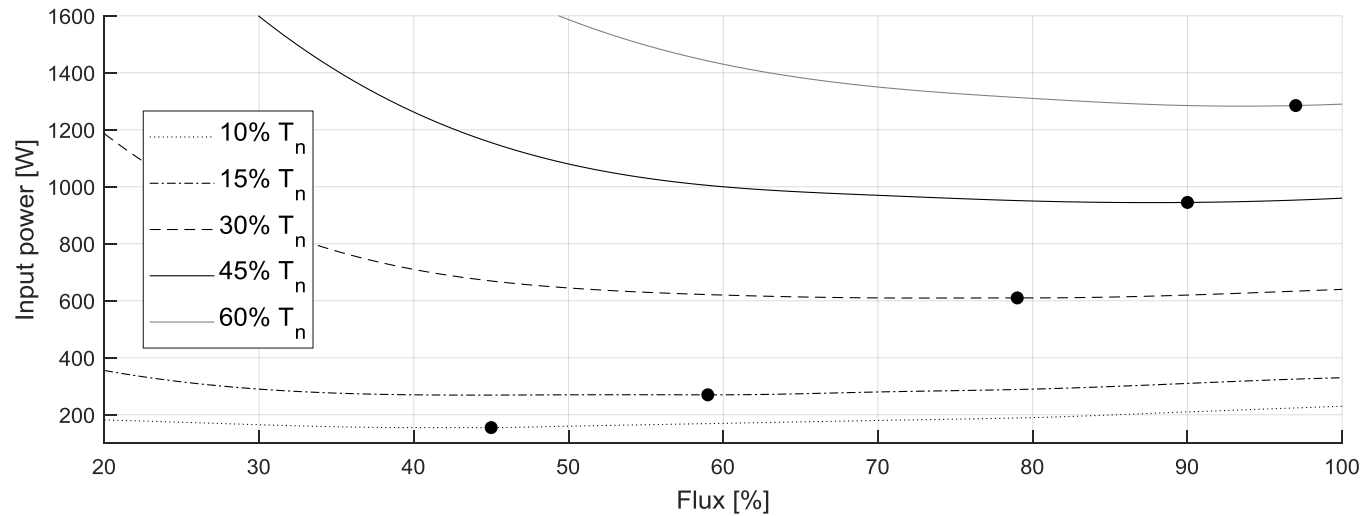
Pogon sa AM-om sa DTC-om

a) Efikasnost motora u zavisnosti od momenta opterećenjaza konstantnu brzinu obrtanja motora

Uporedni prikaz rezultata merenja [5]



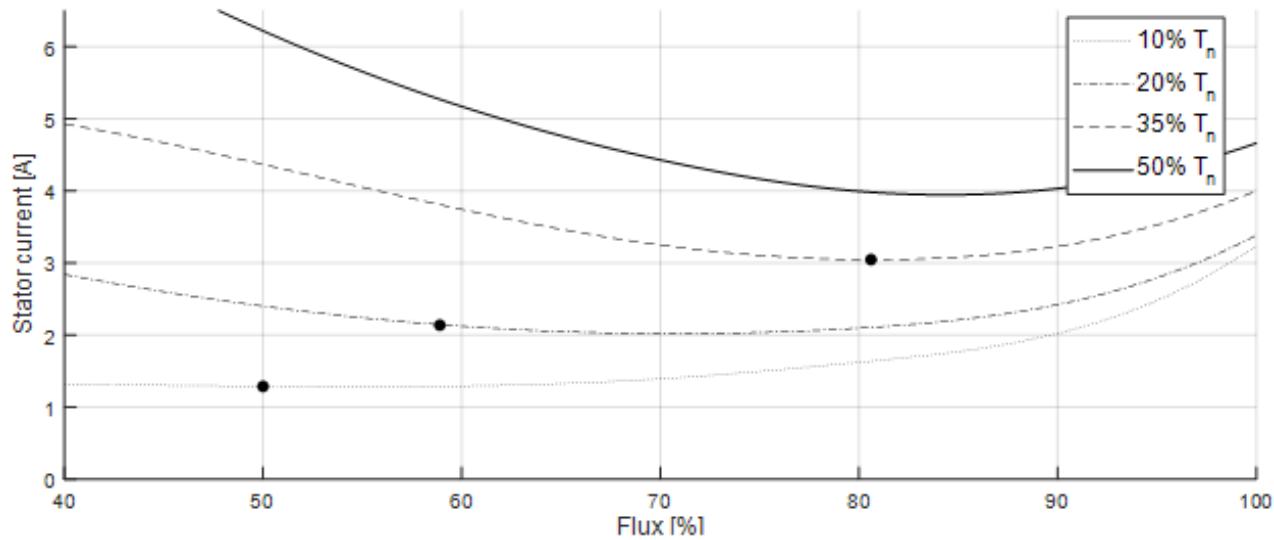
Pogon sa vektorski upravljanim AM (1500o/min)



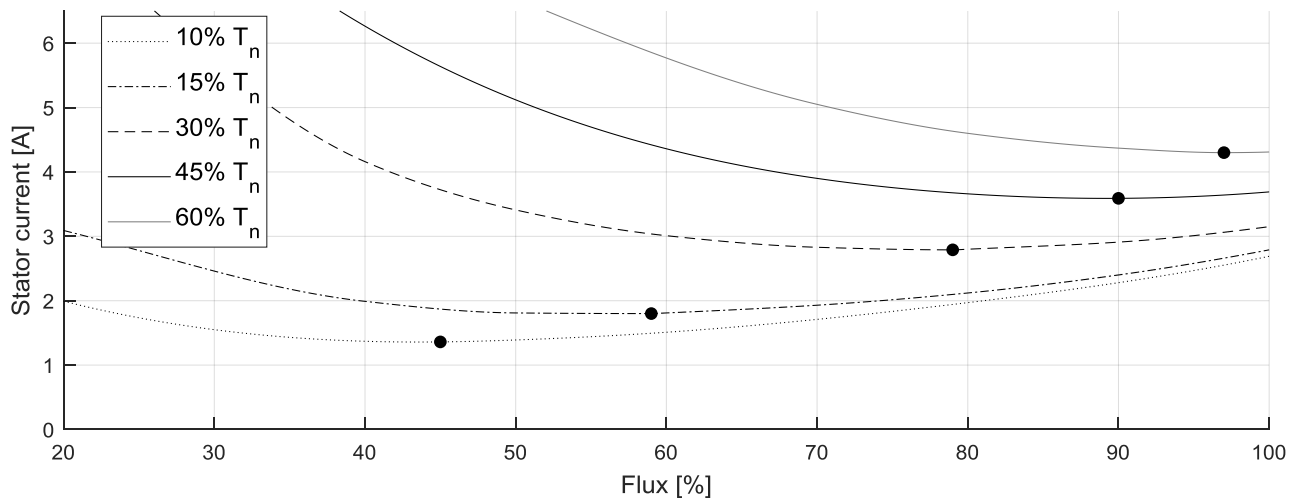
Pogon sa AM-om sa DTC-om (900o/min)

b) Zavisnost ulazne snage od fluksa za konstantnu brzinu obrtanja motora

Uporedni prikaz rezultata merenja [5]



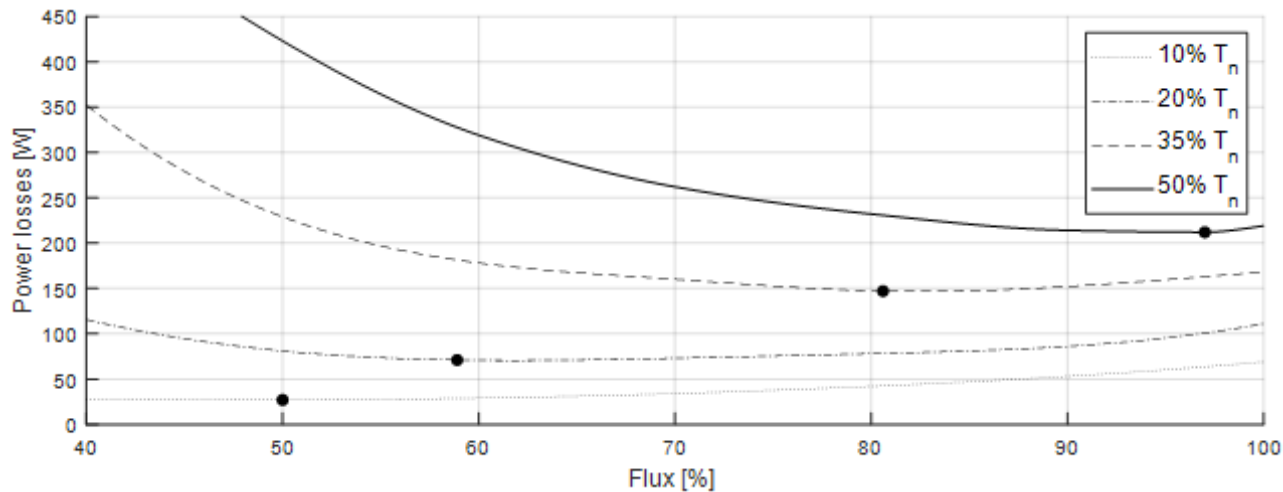
Pogon sa vektorski upravljanim AM (1500o/min)



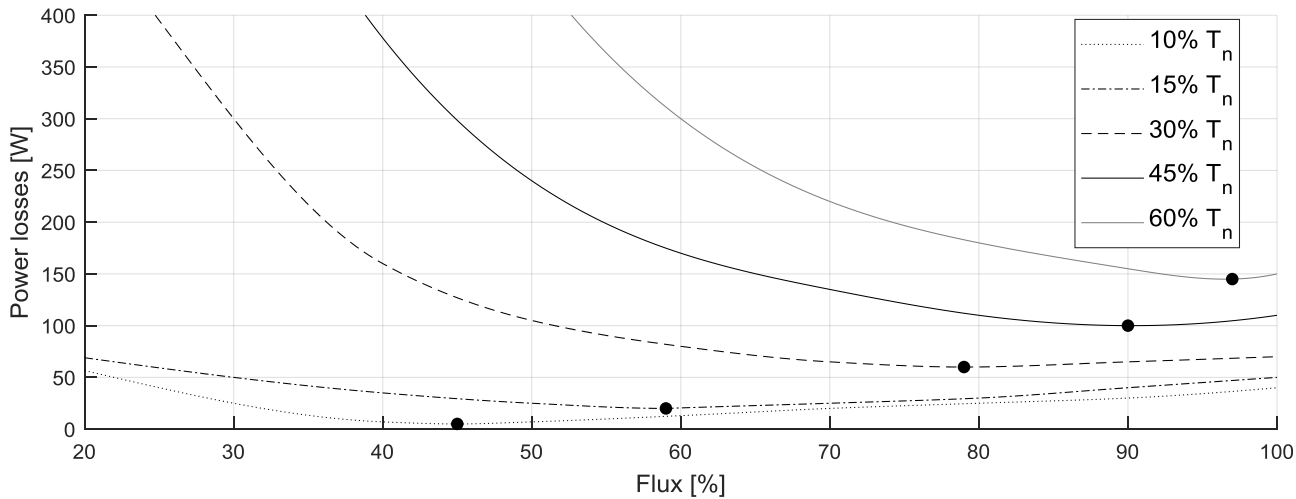
Pogon sa AM-om sa DTC-om (900o/min)

c) Zavisnost struje statora motora od fluksa za konstantnu brzinu obrtanja motora

Uporedni prikaz rezultata merenja [5]



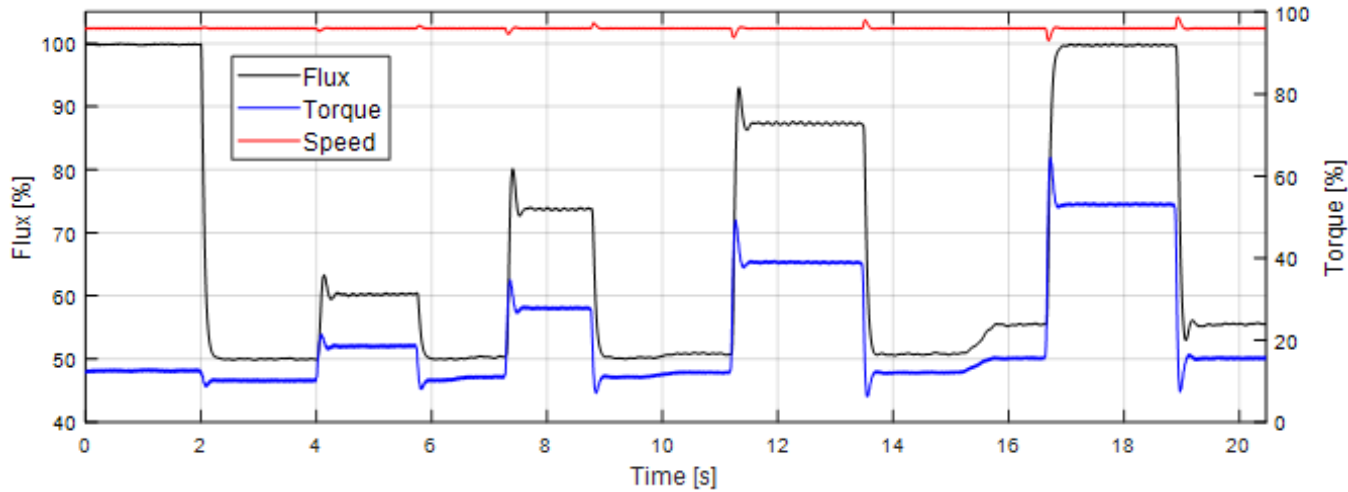
Pogon sa vektorski upravljanim AM (1500o/min)



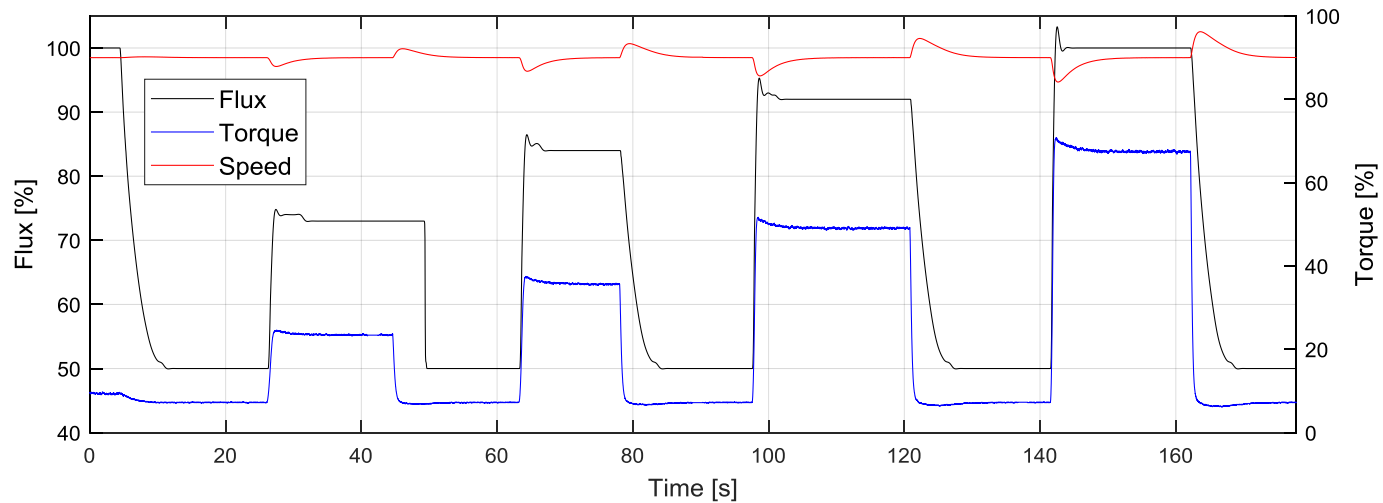
Pogon sa AM-om sa DTC-om (900o/min)

d) Zavisnost gubitaka snage u motoru od fluksa za konstantnu brzinu obrtanja motora

Uporedni prikaz rezultata merenja [5]



Pogon sa vektorski upravljanim AM (1500o/min)



Pogon sa AM-om sa DTC-om (900o/min)

e) Opterećenje i rasterećenje pogona pri konstantnoj brzini i energetski optimalnom radu motora

Ispitivanje novih algoritama optimizacije i mogućnost za njihovu realizaciju u laboratoriji

- ✓ Energetsku efikasnost pogona sa asinhronim motorom je moguće dodatno povećati poboljšanjima u razvoju digitalnih upravljačkih algoritama.
- ✓ Algoritam roja čestica (engl. Particle Swarm Optimization – PSO) su razvili Kenedy i Eberhart 1995. godine prilikom pokušaja simulacije ponašanja i kretanja jata ptica. Zbog svoje jednostavnosti u konceptu našao je primenu u raznim praktičnim problemima. Algoritam je pogodan i za određivanje optimalnog vektora struje statora koji će rezultovati minimalnim kontrolabilnim gubicima u asinhronom motoru. Ovim algoritmom moguće je uključiti promenu parametara od interesa i uvažiti uticaj strujnih i naponskih ograničenja invertora prilikom proračuna optimalnog vektora struje statora. Implementacija – *look up tabela*.
- ✓ Drugi način: traži se minimum nelinearne funkcije više promenljivih sa uvažavanjem definisanih ograničenja. Može se koristiti funkcija *fmincon* iz MATLAB Optimization Toolbox-a. Implementacija – *look up tabela*.
- ✓ U opštem slučaju funkcija *fmincon* se koristi za nalaženje minimuma neke nelinearne funkcije više promenljivih, pod važećim ograničenjima, tj.

$\min_x f(x)$ tako da

x

$c(x) \leq 0$, $ceq(x) = 0$, *nelinearna ograničenja*

$A \cdot x \leq b$, $Aeq \cdot x = beq$, *linearna ograničenja*

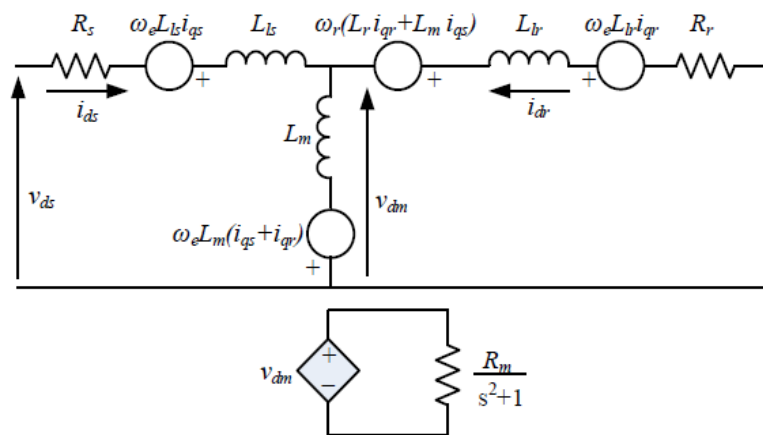
$LB \leq x \leq UB$, LB – donja granica ulazne promenljive

UB – gornja granica ulazne promenljive

Energetski optimalno upravljanje pogonom sa AM-om zasnovano na primeni PSO algoritma - simulacija [6, 7]

- Predstavlja jedno od rešenja da se poveća energetska efikasnost regulisanog elektromotornog pogona sa asinhronim motorom primenom odgovarajućeg algoritma, koji u određenim uslovima obezbeđuje minimum gubitaka snage u motoru.
- Primena algoritma predstavlja softversko rešenje koje ne zahteva nikakve dodatne modifikacije na postojećoj hardverskoj konfiguraciji pogona.
- Eksperimentalna postavka pogona na kojoj su rađena ispitivanja sastoji se od: industrijskog frekventnog pretvarača renomiranog proizvođača opreme i PLC-a (programabilni logički kontroler) sa PROFINET komunikacionim protokolom za prenos podataka.
- Algoritam roja čestica (PSO) je korišćen za minimizaciju gubitaka u bakru i gvožđu motora. Zasniva se na poznavanju parametara zamenske šeme asinhronog motora.
- Ovaj način za energetski optimalno upravljanje je prvo primenjen i analiziran na dinamičkom modelu razvijenom u MATLAB/Simulink-u, a zatim su izvršeni eksperimenti na laboratorijskom modelu pogona.
- Eksperimentalni rezultati su analizirani u poređenju sa rezultatima dobijenim simulacijama na modelu.
- Na osnovu sprovedene analize izvedeni su zaključci u pogledu sprovedenog energetski optimalnog načina upravljanja, a takođe su razmatrani potencijali za njenu primenu na industrijske pogone.

Energetski optimalno upravljanje pogonom sa AM-om zasnovano na primeni PSO algoritma - simulacija [6, 7]

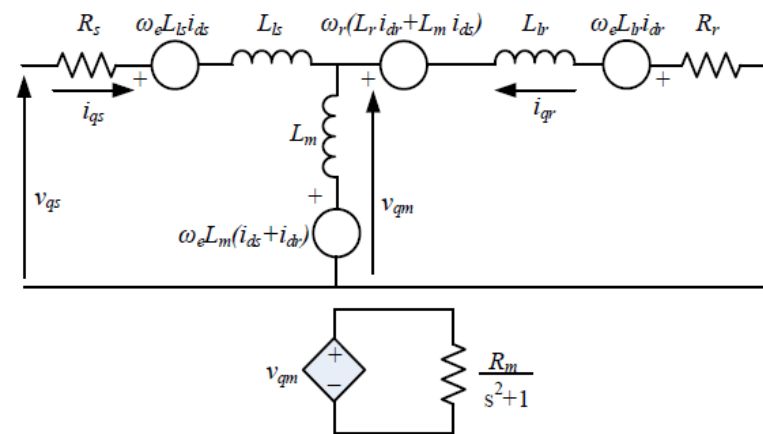


-Pri normalnom radu asinhronog motora, relativno klizanje ima malu vrednost, $s \ll 1$, $p \cdot \omega \approx \omega_e$, pa gubici u gvožđu rotora mogu da se predstavljaju kao:

$$P_\gamma = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + \frac{v_{dm}^2 + v_{qm}^2}{R_m} \quad (1)$$

U elektromotornom pogonu sa promenljivom brzinom (VSD) i sa realizovanim vektorskim upravljanjem, radna tačka je definisana brzinom ($\omega \approx \omega_e/p$) i momentom (M_e), dok je vrednost fluksa određena veličinom struje i_{ds} . Može se zaključiti na osnovu izraza (1), da su gubici snage u motoru funkcija sledeće tri promenljive:

$$P_\gamma = f(\omega_e, M_e, i_{ds}) \quad (2)$$



Energetski optimalno upravljanje pogonom sa AM-om zasnovano na primeni PSO algoritma - simulacija [6, 7]

Optimizaciona metoda:

- ✓ PSO je relativno jednostavna za primenu.
- ✓ Traženje mogućeg rešenja se zasniva na slučajnosti, ali vrednosti promenljivih u jednom koraku utiču na odabir narednog koraka u iterativnom procesu.
- ✓ Osnovna ideja je da se formira funkcija gubitaka snage i da se za različite radne tačke (ω, M_e) , izračuna optimalna vrednost struje i_{ds} .
- ✓ Rezultati PSO algoritma će biti upisani u dvodimenzionalnu tabelu, čiji će izlaz biti optimalna vrednost fluksa izračunata kao proizvod magnetizacione induktivnosti L_m i optimalne vrednosti struje i_{ds} .
- ✓ Nedostaci modela:
 - Zavisnost L_m od fluksa: u praksi je potrebno proveriti da li se vrednost induktivnosti magnećenja menja u zavisnosti od vrednosti fluksa.
 - Model koristi konstantnu vrednost otpornosti rotora R_r .
 - Model koristi konstantnu vrednost otpornosti magnetnog kola R_m .

Energetski optimalno upravljanje pogonom sa AM-om zasnovano na primeni PSO algoritma - simulacija [6, 7]

-Pogon sa vektorski upravljanim motorom.

- Algoritam se zasniva na nalaženju optimalne vrednosti fluksa (tj. d komponente struje statora) pri kojoj se imaju minimalnu gubici snage u motoru, za definisana ograničenja u pogonu $P_L = f(\omega_e, M_e, i_{ds})$

-Tehnička ograničenja:

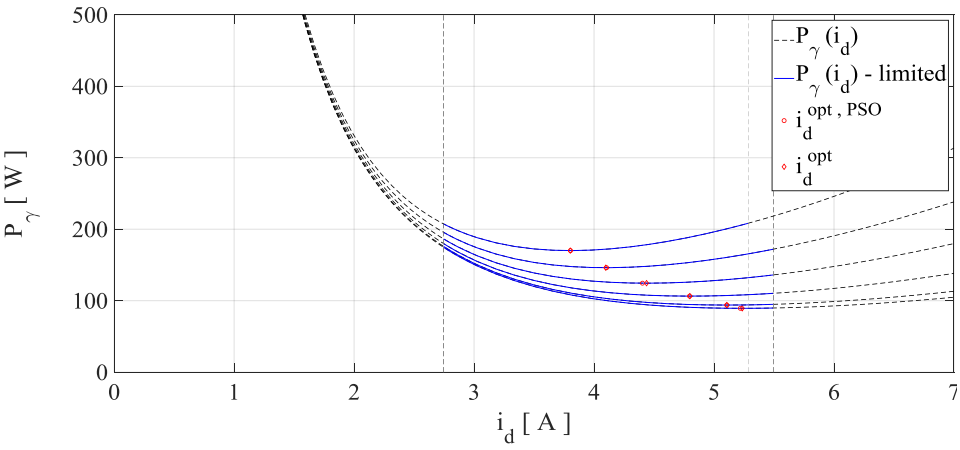
✓**Maksimalna vrednost struje** – kako se rezultati primenjuju u ustaljenim stanjima, maksimalna vrednost statorske struje mora biti manja ili jednaka vršnoj vrednosti nominalne struje motora, odnosno $\sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \leq \sqrt{2}I_n$.

✓**Maksimalni dozvoljeni napon** – može se izraziti kao $\sqrt{v_{ds}^2 + v_{qs}^2} \leq U_{maxf}$, gde je kod sinusne impulsno-širinske modulacije maksimalni raspoloživi fazni napon $U_{maxf} = \frac{U_{DC}}{2}$ a U_{DC} je napon jednosmernog međukola invertora.

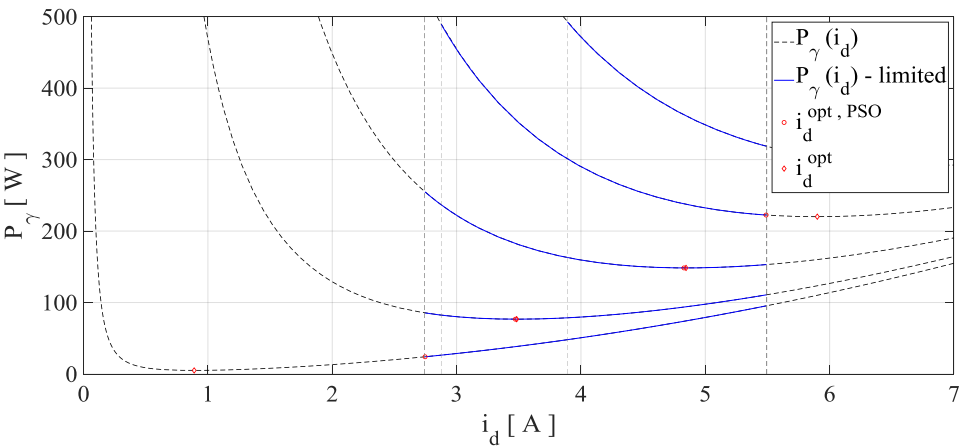
✓**Maksimalna vrednost fluksa** – fluks u mašini ne bi trebalo da prelazi nominalnu vrednost, $\Psi_{dr} \leq 0.5 \Psi_{drn}$.

✓**Minimalna vrednost fluksa** – kako mašina treba da ima dovoljno pobude tokom rada, minimalna vrednost fluksa je najčešće podešena na 50% vrednosti nominalnog fluksa, $\Psi_{dr} \geq 0.5 \Psi_{drn}$

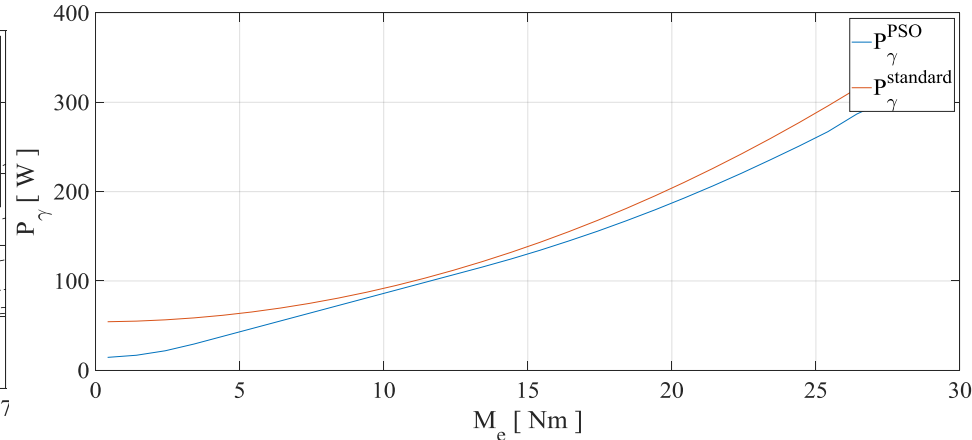
Rezultati PSO algoritma [6, 7]



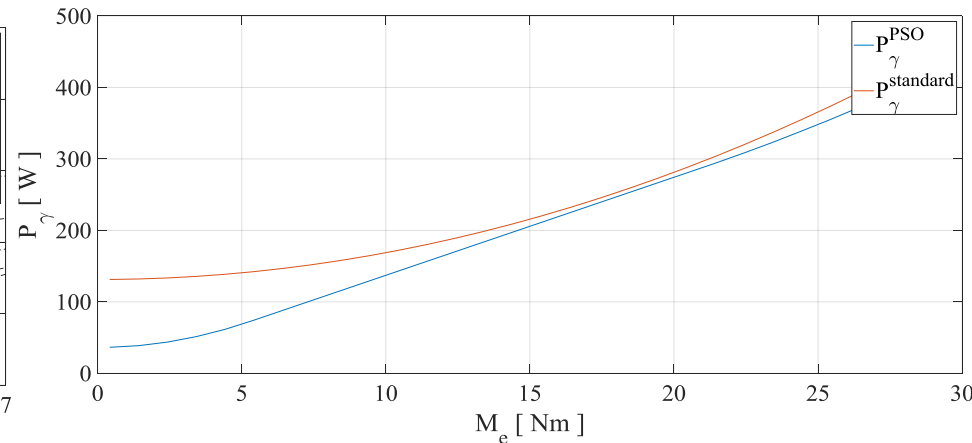
Zavisnost ukupnih gubitaka od d komponente struje statora za konstantnu vrednost momenta $0.3M_n$ i različite brzine motora



Zavisnost ukupnih gubitaka od d komponente struje statora za konstantnu brzinu od $n=900\text{o/min}$ i različita opterećenja



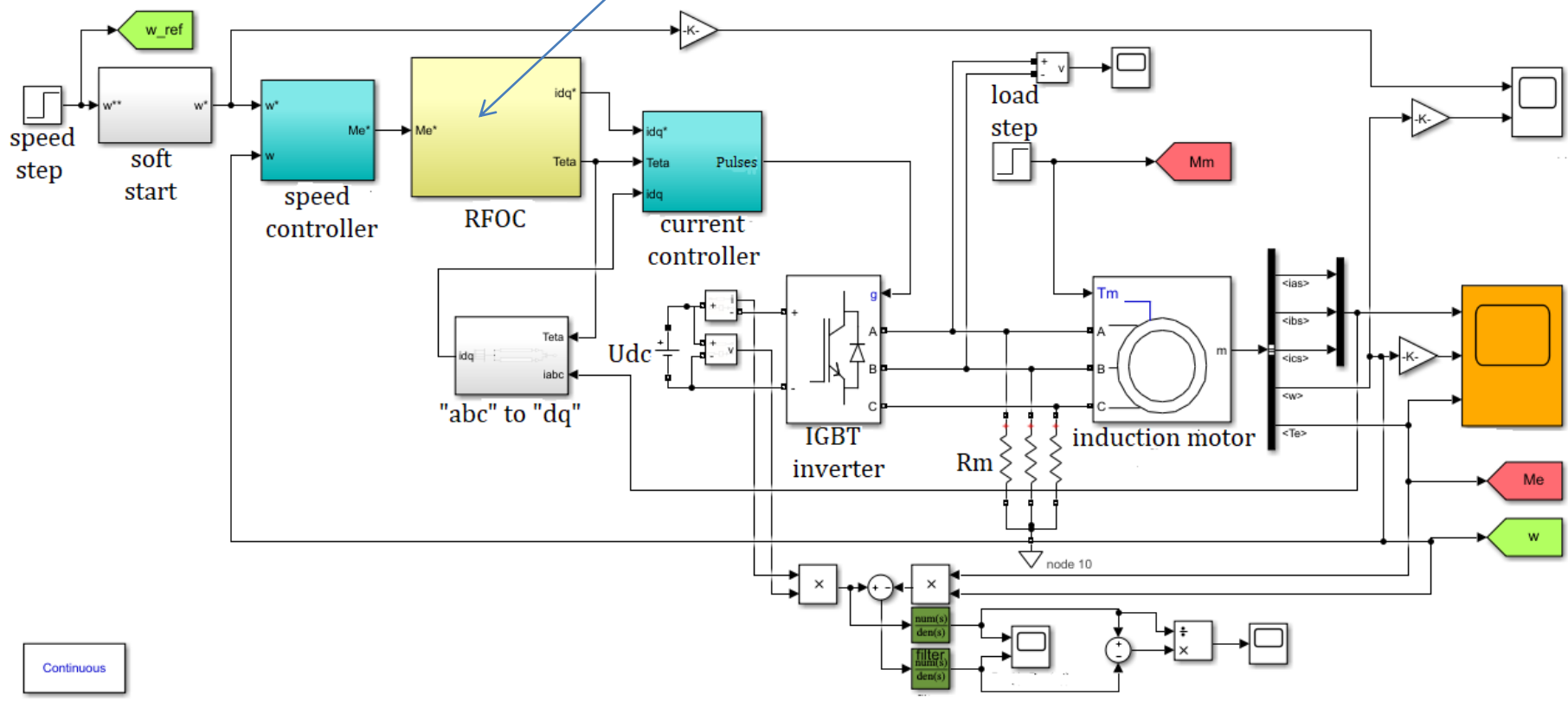
Zavisnost ukupnih gubitaka od opterećenja, pri energetski efikasnom i standardnom načinu upravljanja pogonom sa AM za konstantnu brzinu motora $n=300\text{o/min}$



Zavisnost ukupnih gubitaka od opterećenja, pri energetski efikasnom i standardnom načinu upravljanja pogonom sa AM za konstantnu brzinu motora $n=1200\text{o/min}$

Energetski optimalno upravljanje pogonom sa AM-om zasnovano na primeni PSO algoritma - simulacija [6, 7]

Optimalne vrednosti za i_d^* se dobijaju pomoću PSO optimizacionog algoritma, a implementirane su kao 2-D lookup tabela u Simulink model



Energetski optimalno upravljanje pogonom sa AM-om zasnovano na primeni PSO algoritma - simulacija (primenjeno upravljanje) [6, 7]

Primenjen je sledeći ogled:

- U toku prelaznih perioda, pogonom se upravlja na standardni način;
- Kada apsolutna vrednost razlike između referentne i ostvarene brzine postanje manja od 10% referentne vrednosti, smatra se da je ostvareno stacionarno stanje i fluksu se dodeljuje optimalna vrednost za tu radnu tačku;
- U toku uspostavljanja referentne vrednosti fluksa, njegova vrednost se smanjuje po rampi definisanoj u funkciji soft-starta za fluks;
- Soft-start za fluks je podešen na sledeći način: kada se vrednost fluksa povećava, rampa je vrlo strma, a kada se vrednost fluksa smanjuje, ovo smanjenje se ostvaruje sa blagom rampom.
- Dinamički model elektromotornog pogona sa promenljivom brzinom i sa vektorskim upravljanjem, realizovan je u MATLAB/Simulink-u sa parametrima koji odgovaraju eksperimentalnoj postavci u laboratoriji.

Rezultati simulacija [6, 7] – Opis izvođenih testova

Parametri korišćenog motora

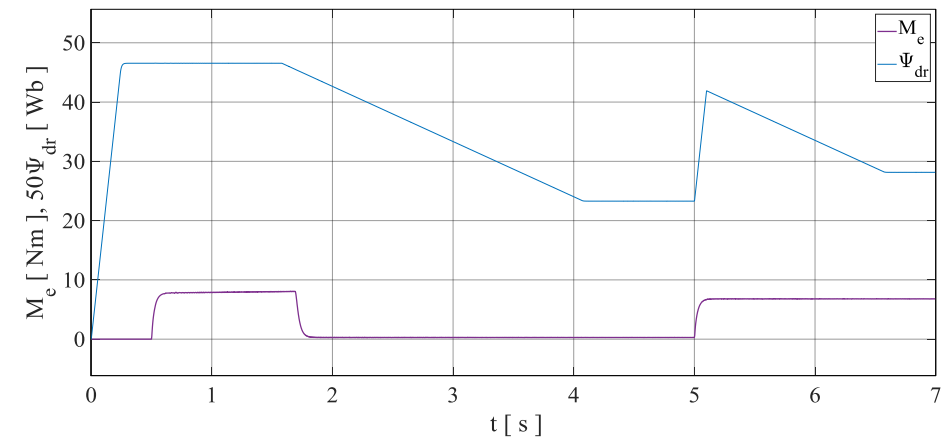
P_n [kW]	U_n [V]	f_s [Hz]	L_{lr} [mH]	L_{ls} [mH]	L_m [mH]	R_r [Ω]
4	400	50	8.99	8.55	169.5	0.74
R_s [Ω]	R_m [k Ω]	P	J [kgm ²]	F [Nms]	n_n [rpm]	
1.08	1	2	0.09	0.003	1460	

- Frekventni pretvarač je modelovan kao trofazni mosni invertor sa IGBT tranzistorima, $U_{DC}=600V$, prekidačka učestanost 4kHz i mrtvo vreme $3\mu s$.

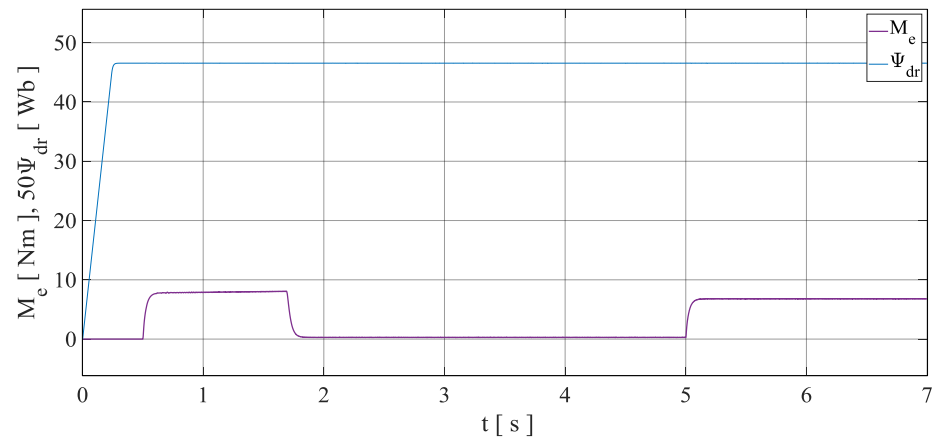
Test 1 – Pogon se zaleće i po postizanju zadate brzine opterećuje se malim momentom opterećenja ($n^*=900rpm$, $M_m=0.2M_n$).

Test 2 - Pogon se zaleće i po postizanju zadate brzine opterećuje se nominalnim momentom opterećenja ($n^*=900rpm$, $M_m=M_n$).

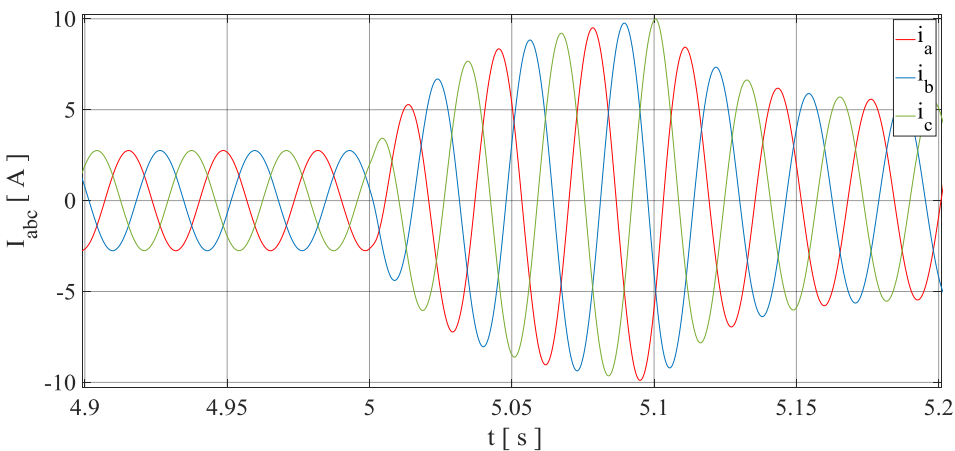
Rezultati simulacija [6, 7]



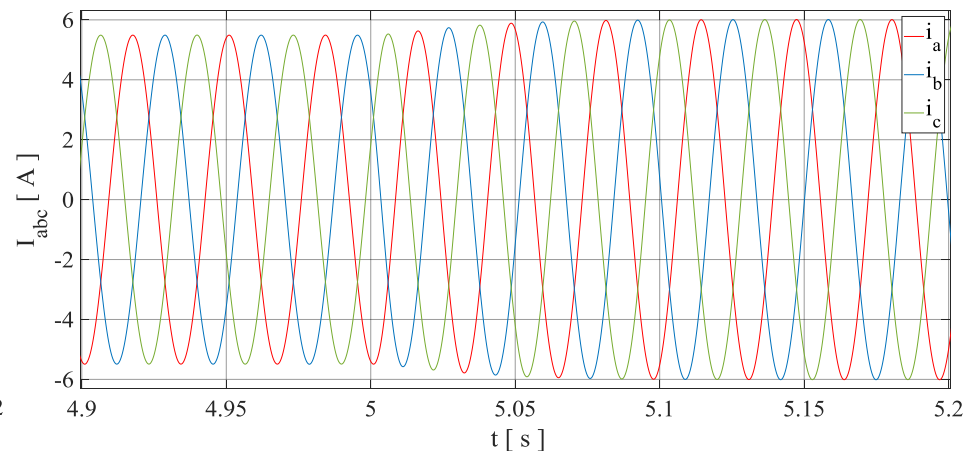
Test 1: moment i fluks motora – optimalno upravljanje.



Test 1: moment i fluks motora – standardno upravljanje.

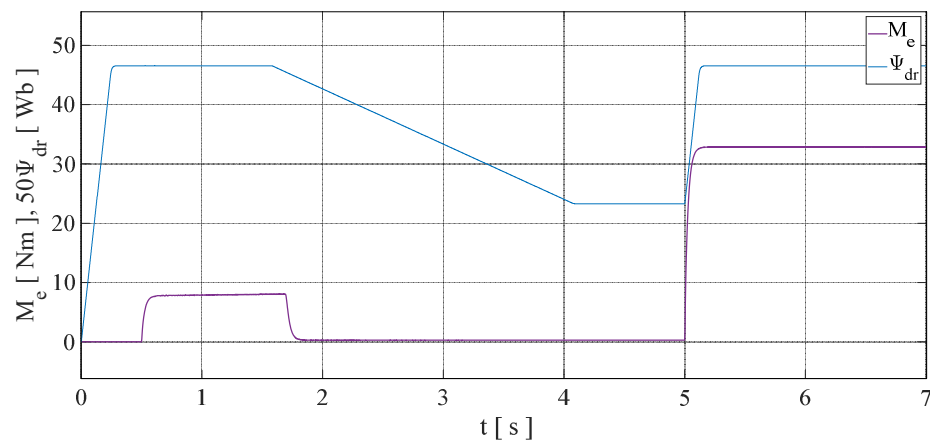


Test 1: struja statora (uvećan deo) – optimalno upravljanje.

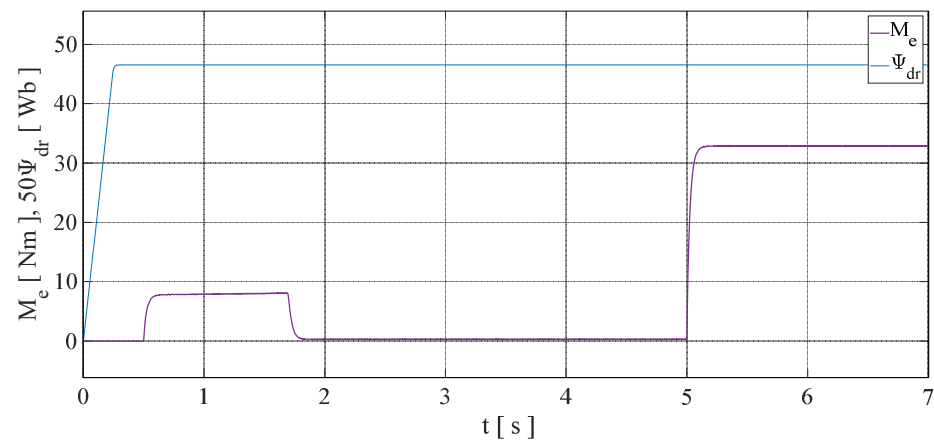


Test 1: moment i fluks motora – standardno upravljanje.

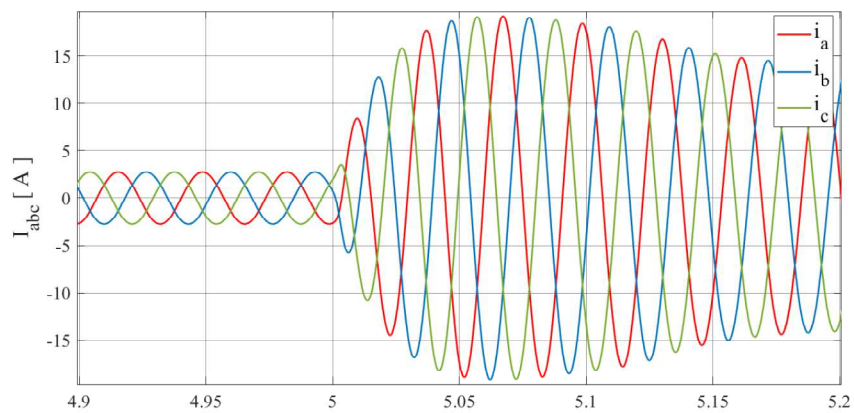
Rezultati simulacija [6, 7]



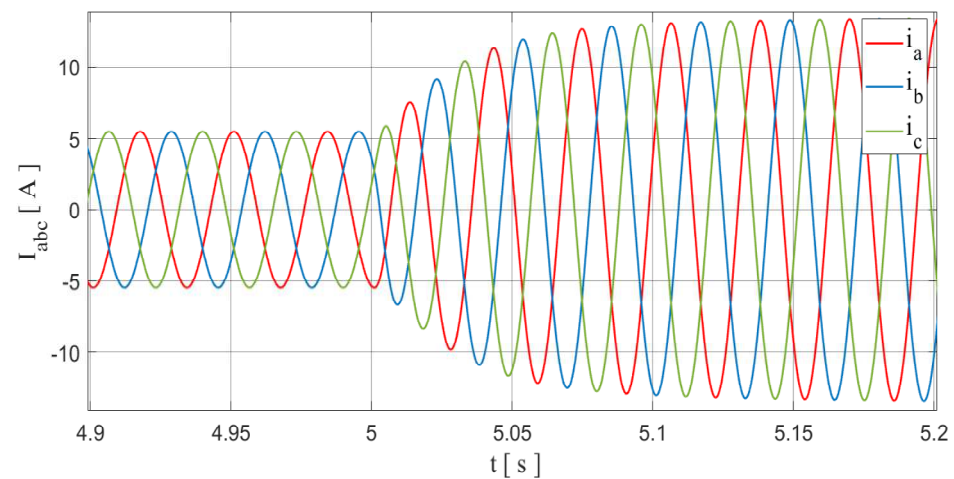
Test 2: moment i fluks motora - optimalno upravljanje.



Test 2: moment i fluks motora – standardno upravljanje.



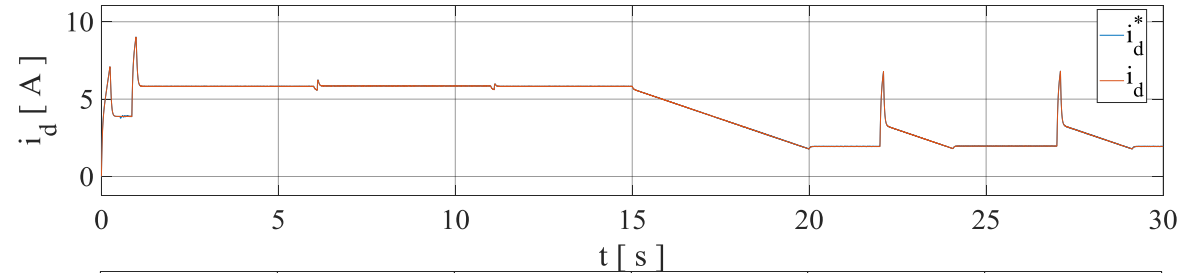
Test 2: struja statora (uvećani deo) – optimalno upravljanje.



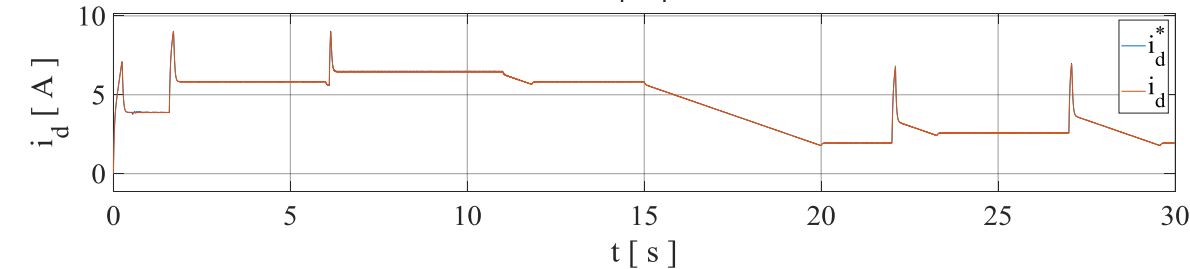
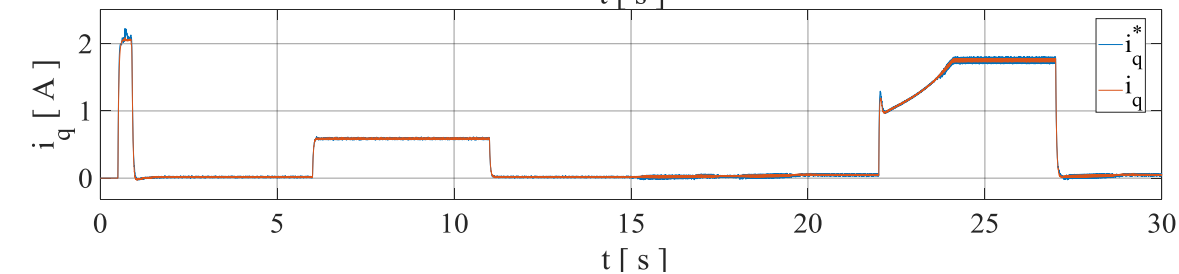
Test 2: struja statora (uvećani deo) – standardno upravljanje.

Rezultati simulacija [6, 7]

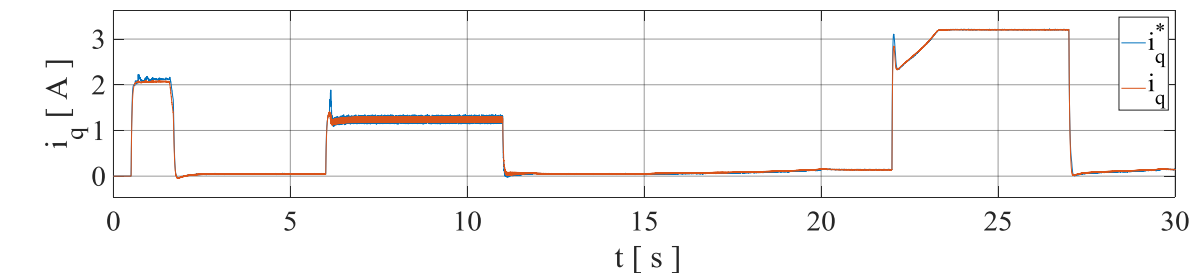
- Sledeći test odgovara eksperimentu koji je rađen u laboratoriji na eksperimentalnoj postavci, a rađen je zbog testiranja tačnosti modela.
- Sastoji se od opterećivanja i rasterećivanja pogona sa standardnim i optimalnim načinom upravljanja, pri brzinama od 300o/min i 900o/min.



d i q komponenta struje statora pri brzini od 300o/min



d i q komponenta struje statora pri brzini od 900o/min

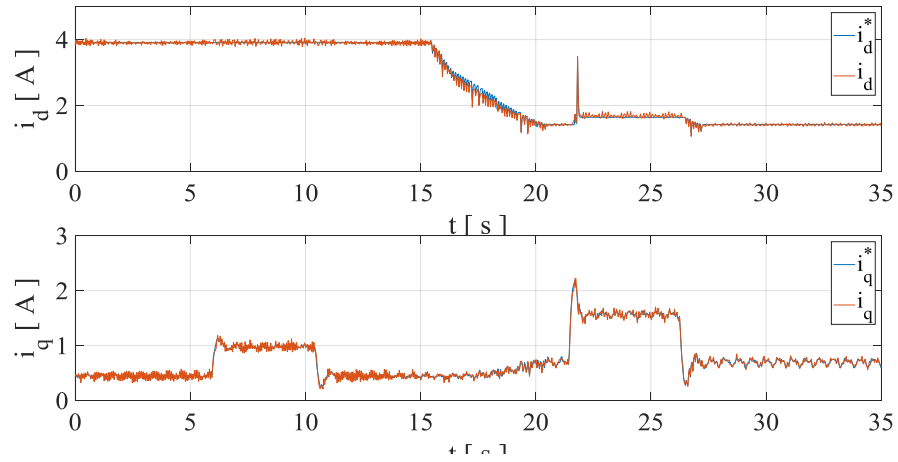


Eksperimentalna postavka u laboratoriji [6, 7]

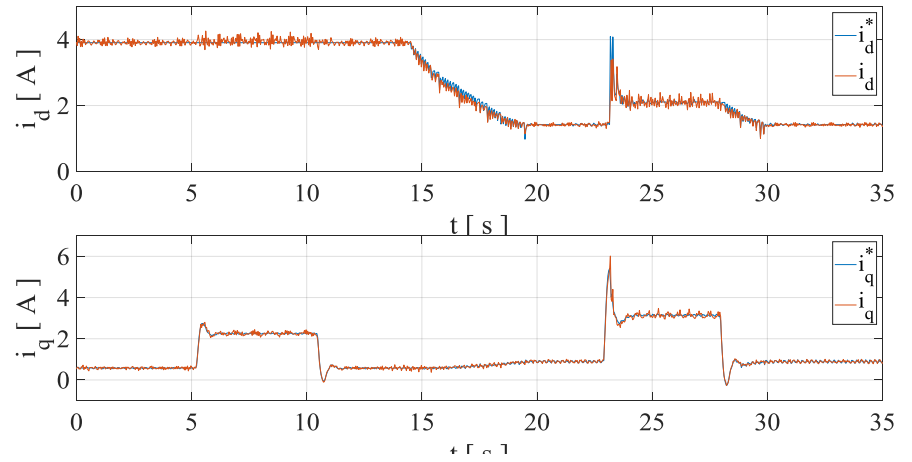


Eksperimentalna postavka: 1 – asinhroni motor (pogonska mašina), 2 – DC motor (za opterećivanje pri testiranju dinamike motora), 3 – asinhroni motor (za opterećivanje za merenja u stacionarnim stanjima), 4 – SINAMICS S120, 5 – SINAMICS G120, 6 – SIMATIC S7 1500, 7 – PROFINET (Ethernet), 8 – PC

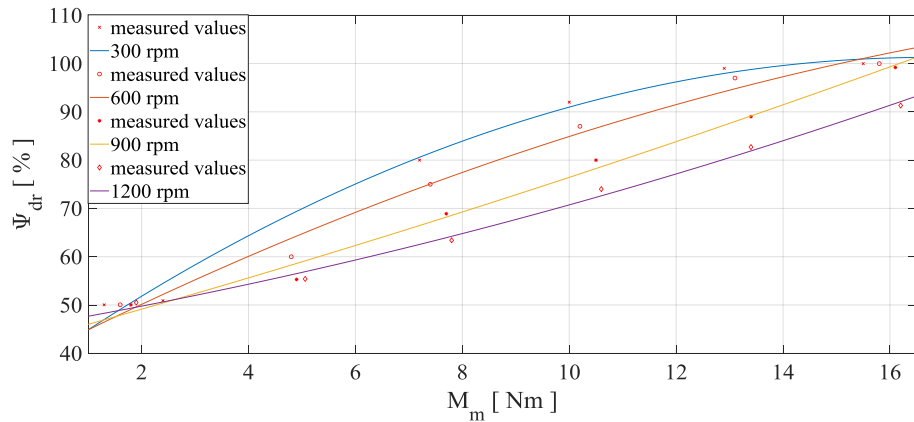
Rezultati eksperimenta [6, 7]



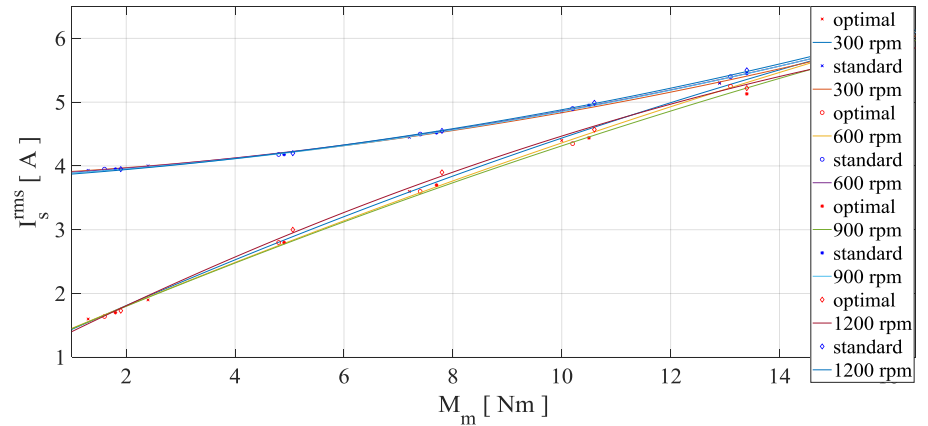
d i q komponenta struje statora pri brzini od 300o/min



d i q komponenta struje statora pri brzini od 900o/min



Zavisnost fluksa od momenta opterećenja – optimalno upravljanje



Zavisnost struje statora od momenta opterećenja – optimalno i standardno upravljanje

Zaključak [6, 7]

- Predstavljani upravljački algoritam je relativno jednostavan za primenu i primenljiv je u praksi na pogone sa digitalnim upravljenjem iz nadređenog sistema upravljanja.
- Nedostatak metode je neophodnost poznavanja parametara motora, jer su njihove vrednosti neophodne u procesu optimizacije.
- Prednost primene look-up tabele se ogleda u vrlo jednostavnom upravljanju u realnom vremenu.
- Dva značajna poboljšanja se mogu ostvariti:
 - 1) Smanjenje ukupnih gubitaka u motoru pri radu sa malim opterećenjima i različitim brzinama;
 - 2) Kada je pogon slabo opterećen, talasnost momenta je značajno smanjena.

Energetski optimalno upravljanje pogonom sa AM-om zasnovano na primeni numeričke metode za optimizaciju *fmincon* iz *MATLAB Optimization Toolbox-a* [8]

Određuje se minimum kriterijumske funkcije

$$P_{gub} = \left(\frac{(w_s \cdot L_m)^2}{R_{fe}} + R_s + (w_s \cdot L_m)^2 \cdot \frac{R_s}{R_{fe}^2} \right) \cdot I_d^2 + (R_s + R_r) \cdot I_q^2 - 2 \cdot w_s \cdot L_m \cdot \frac{R_s}{R_{fe}} \cdot I_d \cdot I_q$$

- U posmatranoj analizi uvedena su sledeća ograničenja:

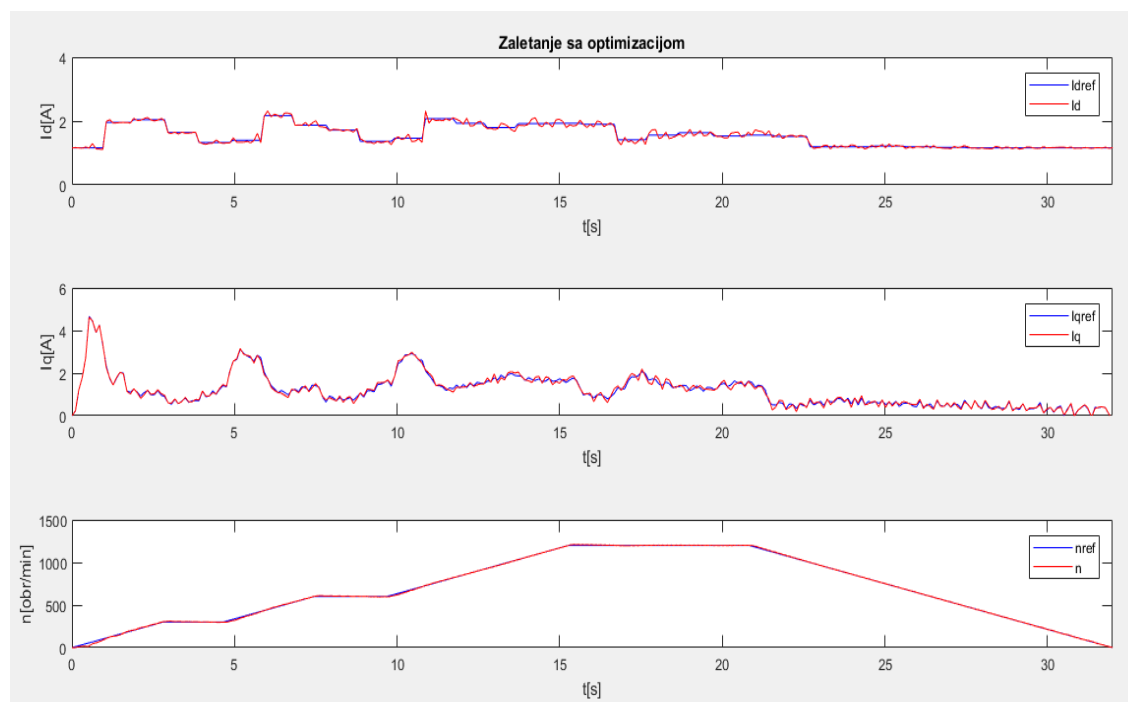
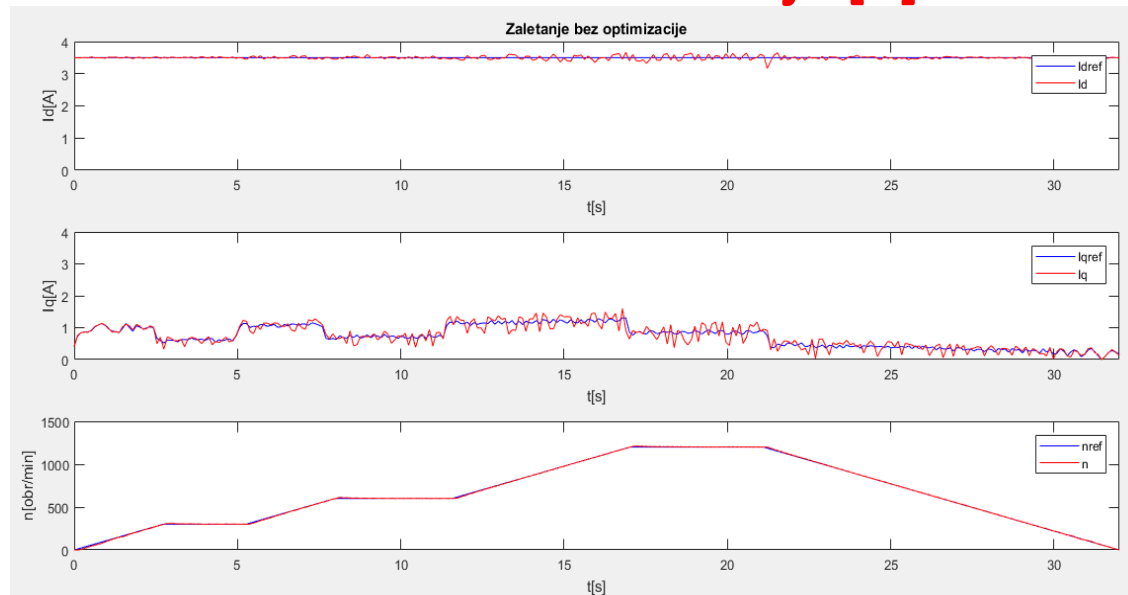
- $0,25 \cdot I_{dnom} \leq I_d \leq I_{dnom}$ ili $1,16A \leq I_d \leq 4,64A$ – po d komponenti struje statora,
- $-M_{emax} \leq M_e \leq M_{emax}$ ili $-16,33Nm \leq M_e \leq 16,33Nm$ – po elektromagnetskom momentu,
- $-w_{snom} \leq w_s \leq w_{snom}$ ili $-314 \frac{rad}{s} \leq w_s \leq 314 \frac{rad}{s}$ – po brzini motora,
- $-U_{max} \leq U_d \leq U_{max}$ ili $-310,27V \leq U_d \leq 310,27V$ – po d osi napona motora,

-Izlazna, tražena veličina ove optimizacione metode jeste struja statora po d osi (fluks). U MATLAB-u se formira look-up tabela, koja se po kolonama menja sa momentom, a po vrstama sa brzinom i popunjava sa dobijenim vrednostima struje statora po d osi.

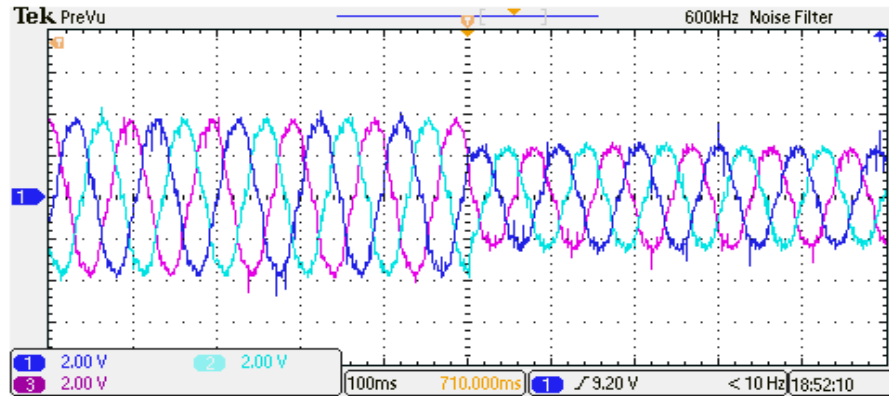
- Optimizacija se izvršava off-line, jer se na taj način prevazilazi problem numeričkog rešavanja i procesorskog vremena.

- Popunjena look-up tabela se učitava u softverskom programu Labview i zatim se na odgovarajućoj laboratorijskoj postavci vrše merenja u realnom pogonu.

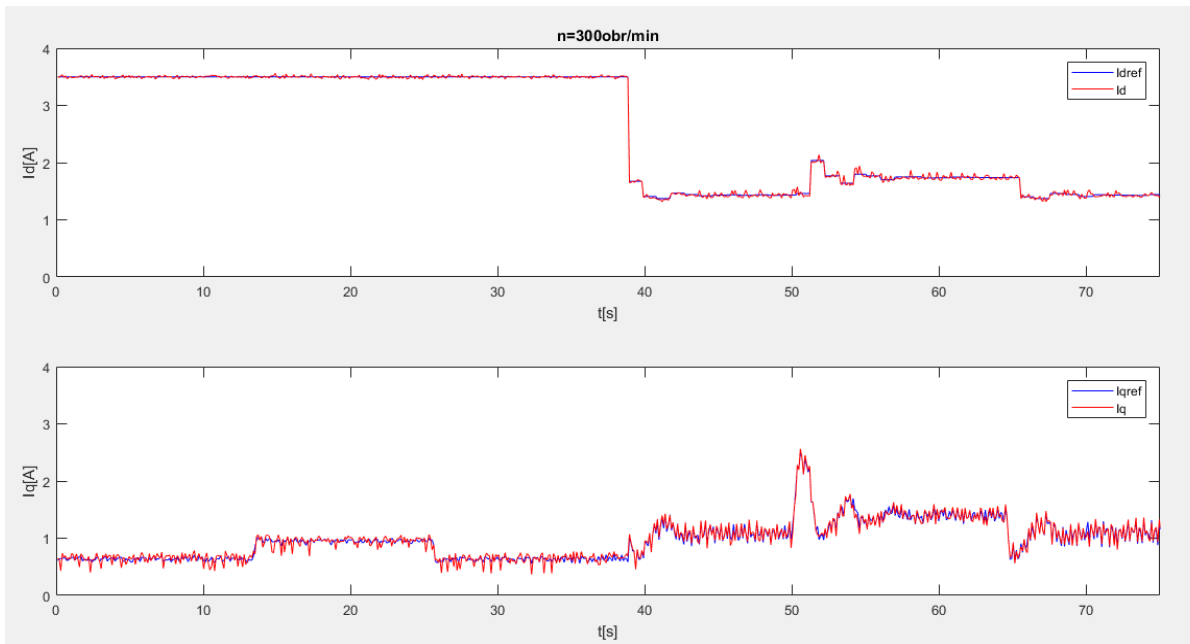
Rezultati merenja [8]



Rezultati merenja [8]

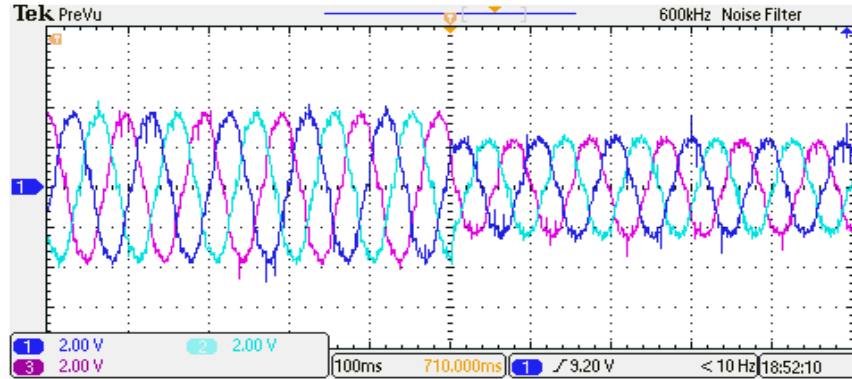


Tri fazne struje prilikom aktiviranja optimizacije

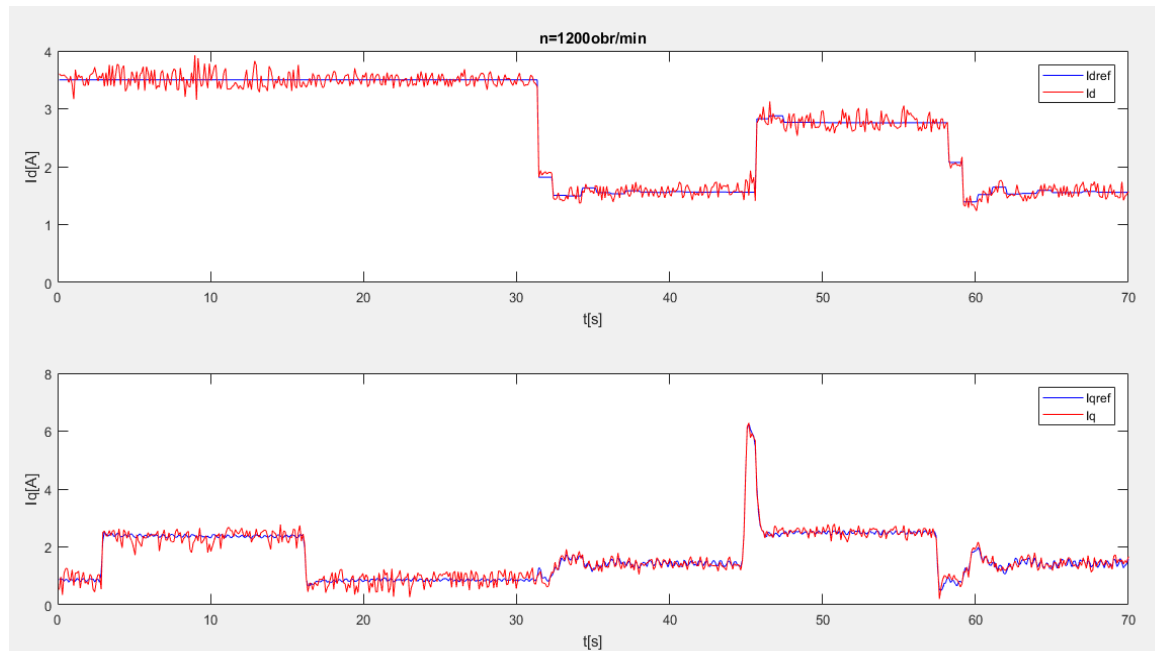


Promena struja prilikom opterećivanje i rasterećivanje asinhronog motora

Rezultati merenja [8]

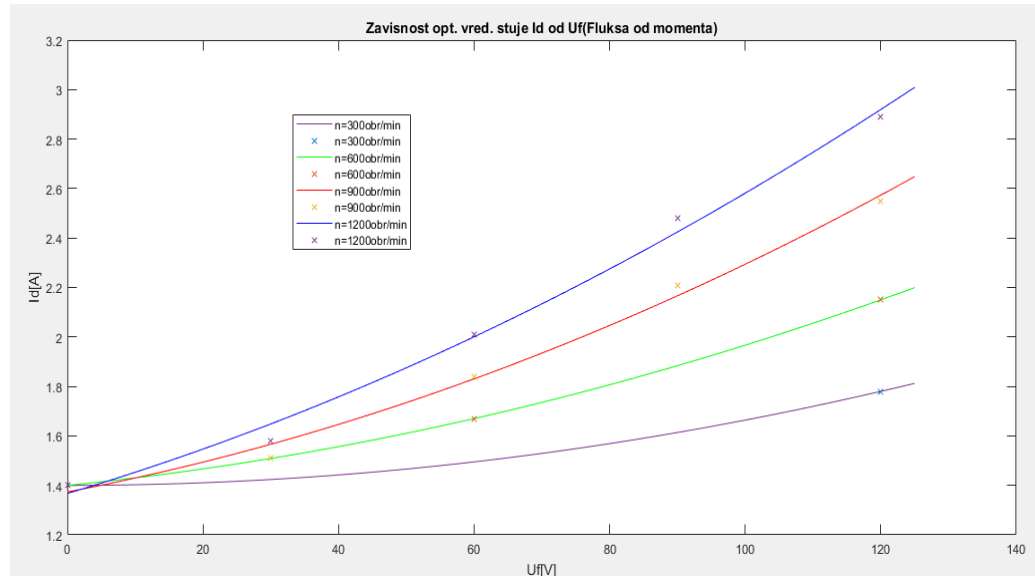


Tri fazne struje prilikom aktiviranja optimizacije

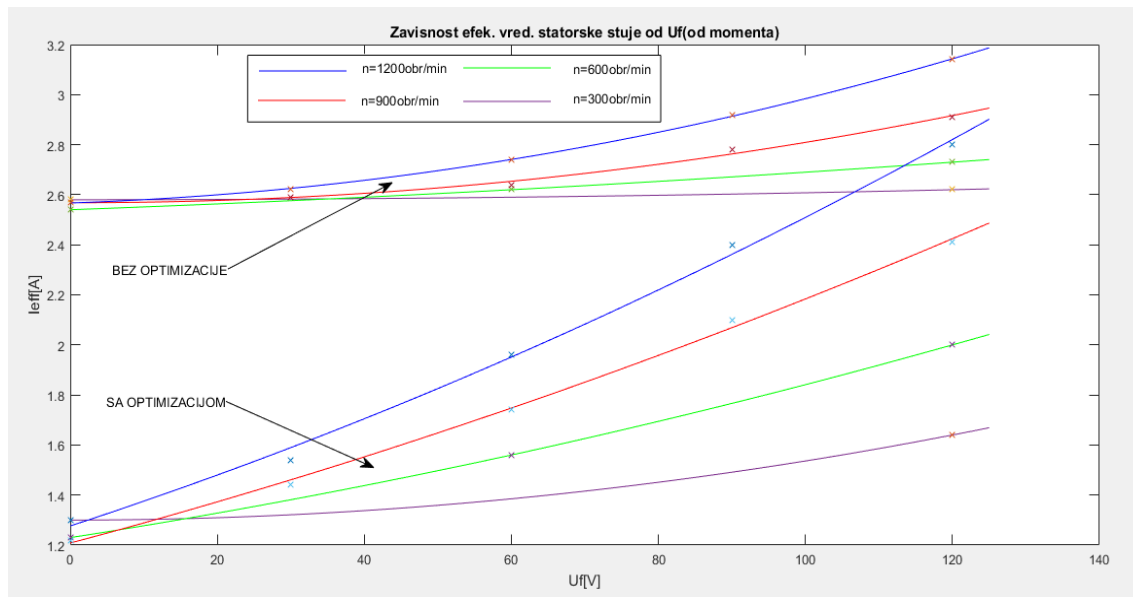


Promena struja prilikom opterećivanje i rasterećivanje asinhronog motora

Rezultati merenja – ustaljeno stanje [8]

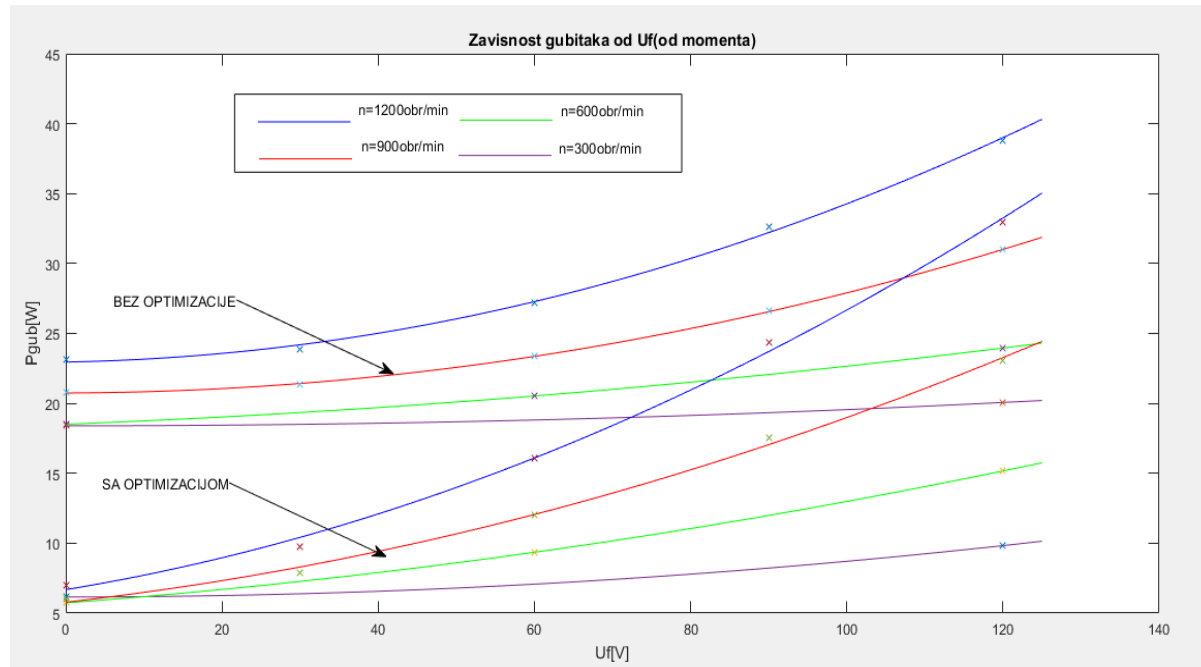


Zavisnost optimalne vrednosti stuje od opterećenja, predstavljenog preko napona pobude (U_f)

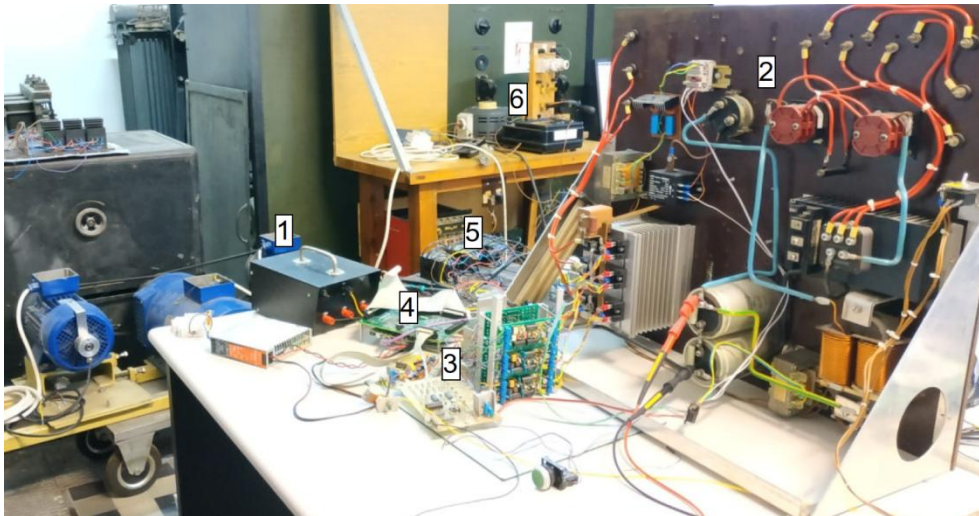


Zavisnost efektivne vrednosti statorske struje od opterećenja

Rezultati merenja – ustaljeno stanje [8]

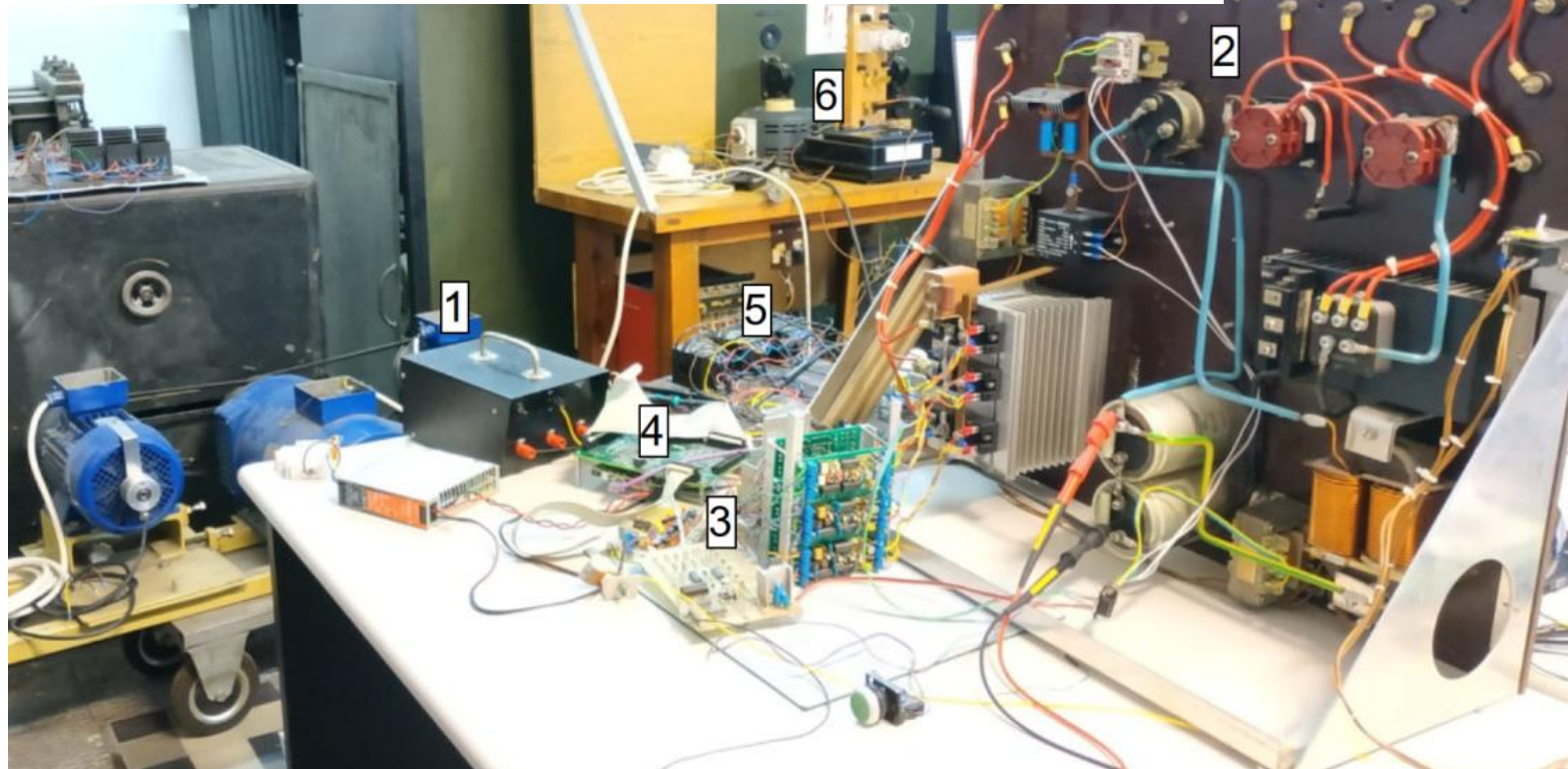
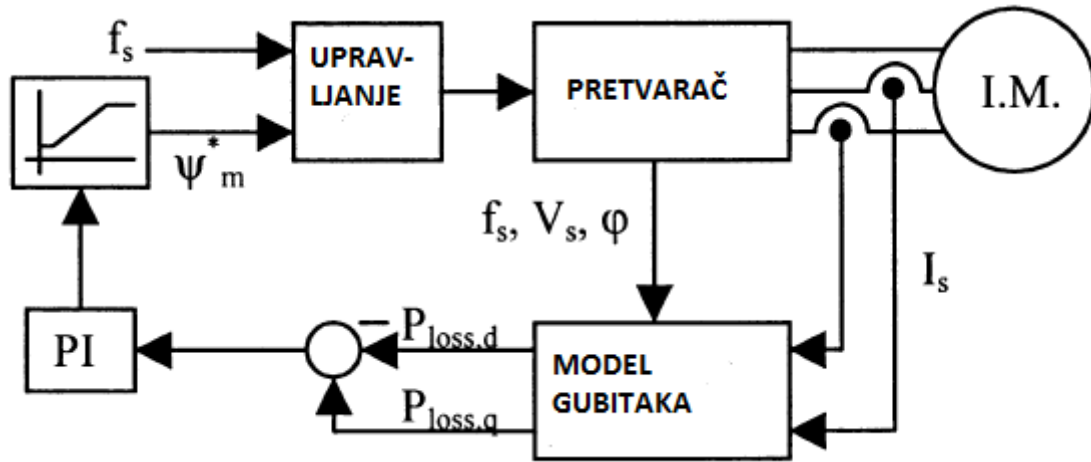


Zavisnost gubitaka u asinhronom motoru od opterećenja

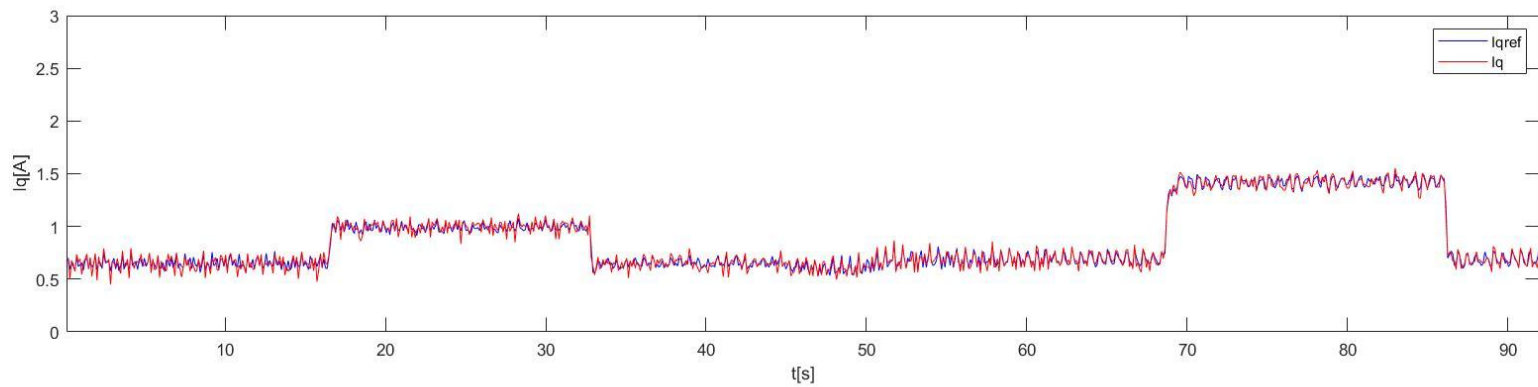
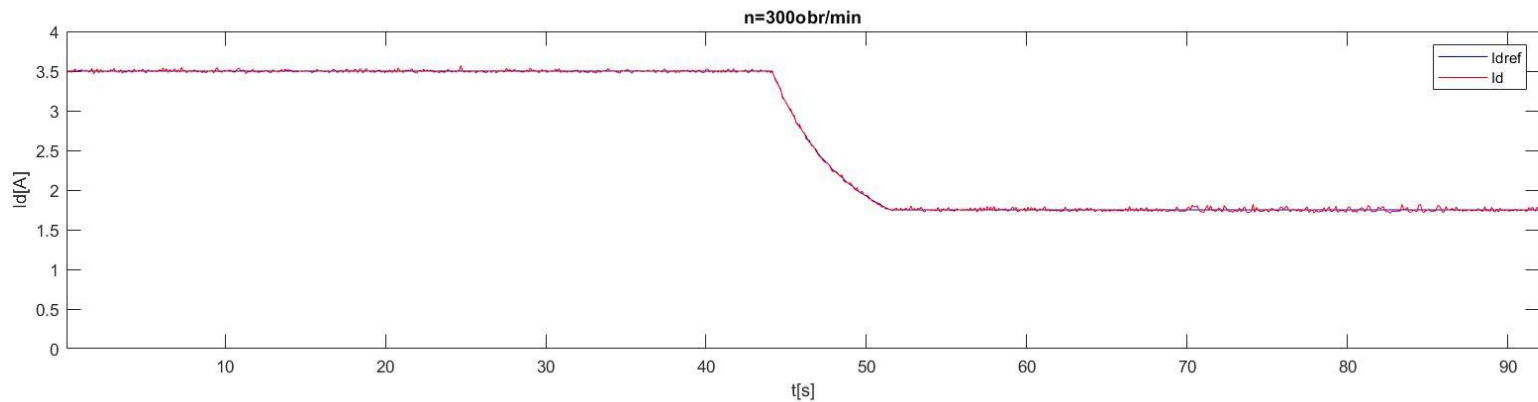


Laboratorijski pogon na kome je vršeno ispitivanje:
1-asinhroni motor sa enkoderom,
2-energetski deo invertora, 3-upravljački deo invertora (elektronika),
4-kartica sbRio NI9683, 5-LEM senzori, 6-oprema za dinamičko kočenje motora za jednosmernu struju

Energetski optimalan rad elektromotornog pogona primenom modela gubitaka u motoru[9]

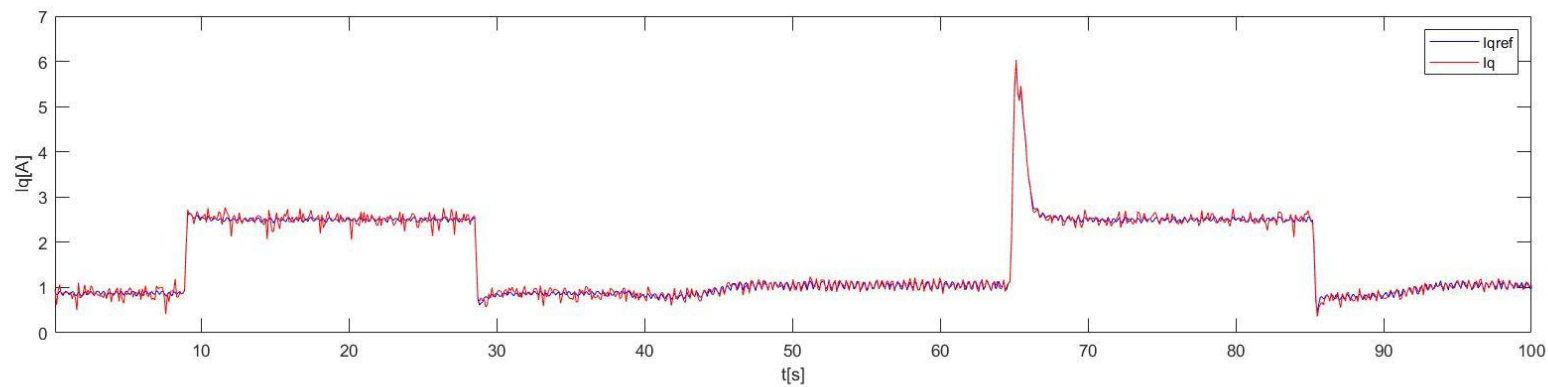
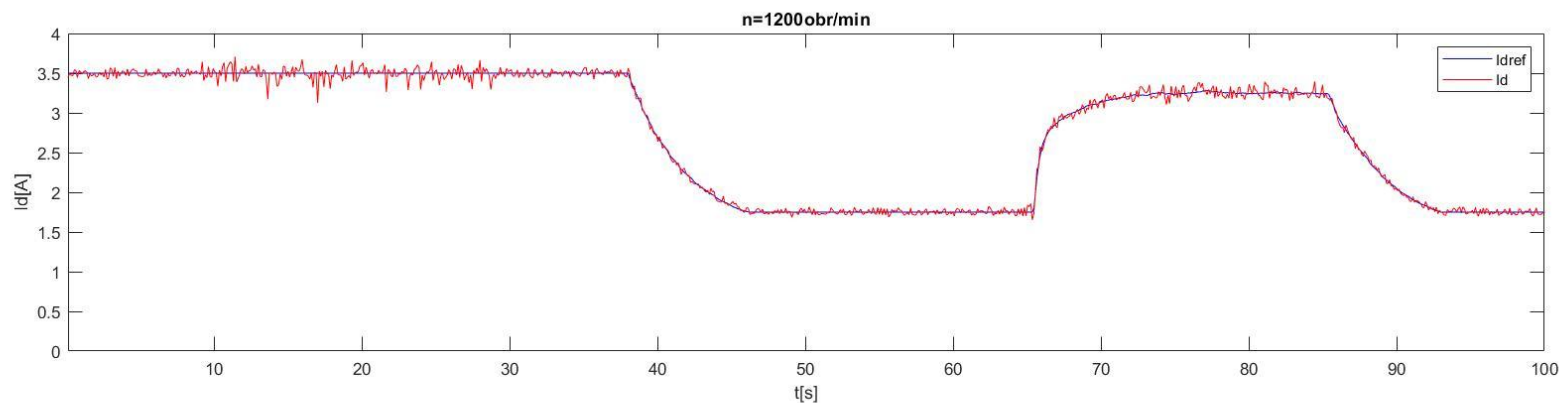


Energetski optimalan rad elektromotornog pogona primenom modela gubitaka u motoru [9]



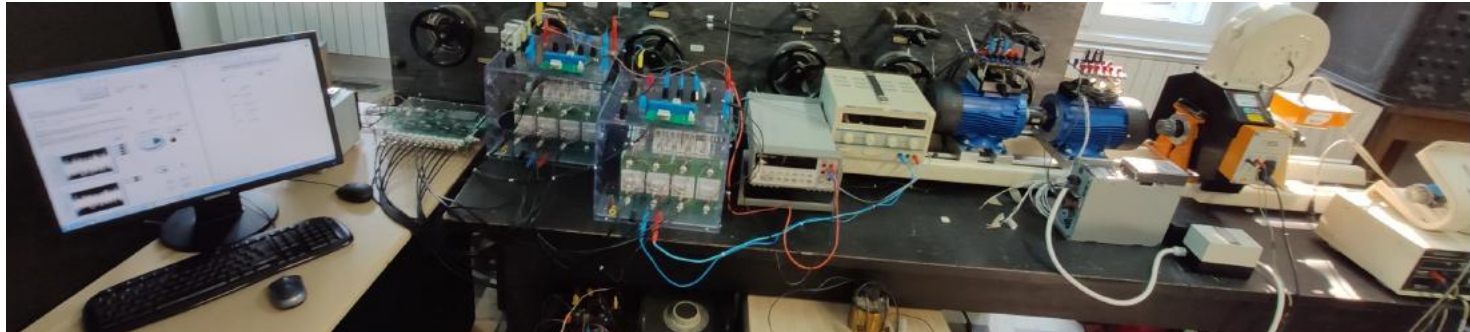
Promena struja I_d i I_q pri opterećivanju motora (300ob/min)

Energetski optimalan rad elektromotornog pogona primenom modela gubitaka u motoru [9]

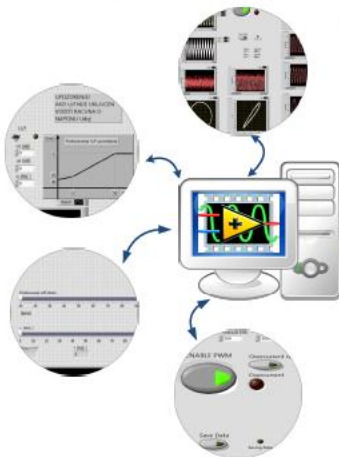


Promena struja I_d i I_q pri opterećivanju motora (1200ob/min)

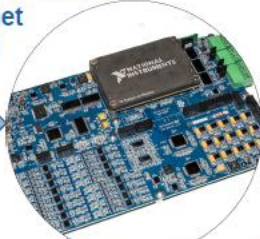
Novo laboratorijsko mesto [10]



Supervisory-Control-And-Data-Acquisition



- FPGA
- 30 PWM channels
- 24 analog inputs
- 4 analog outputs
- 36 digital inputs/ outputs
- Resolver interface
- Ethernet
- RS486



- 20 kW
- 50 kHz switching frequency
- 500 Hz max output frequency

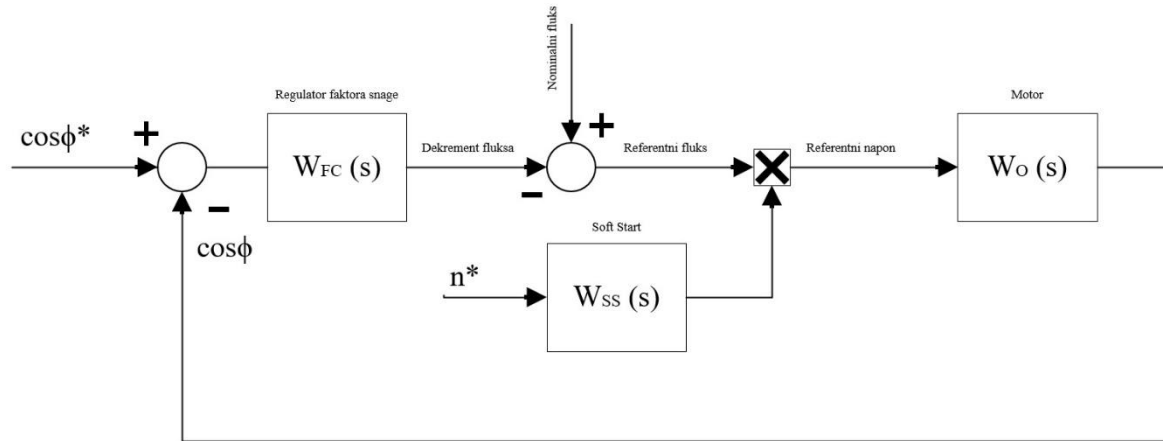


Six or three-phase induction motor



- +/-110A measuring range
- 1:2000 Conversion ratio
- DC...200 kHz bandwidth
- +/- 1kV measuring range
- DC...60 kHz bandwidth
- Encoder/Resolver possibility

Energetski optimalno upravljanje pogonom sa asinhronim motorom u aplikacijama sa pumpom [11]



Blok dijagram sistema u s-domenu vrednost fluksa:

- Prenosna funkcija Soft Start-a

$$W_{SS}(s) = \frac{K_{SS}}{1 + sT_{SS}}$$

- Prenosna funkcija pogona je $W_O(s)$:

$$T_O = T_S = \frac{L_S}{R_S} = \frac{L_{\gamma S} + L_m}{R_S}$$

$$W_O(s) = \frac{K_O}{1 + sT_O}$$

$$W_{FC}(s) = K_p \cdot \frac{1 + sT_i}{sT_i} \quad T_i = \frac{K_p}{K_i}$$

- Za podešavanje parametara regulatora može da se koristi metod kompenzacije. S obzirom da je dominantna vremenska konstanta ona koja potiče od Soft Starta, zgodno je kompenzovati manju vremensku konstantu, tj. onu koja potiče od dinamike samog motora.

- Ako se vrednost vremenske konstante regulatora T_i postavi na vrednost vremenske konstante motora, izvršiće se kompenzacija te vremenske konstante, čime ostaje jedan stepen slobode za podešavanje pojačanja regulatora K_p .

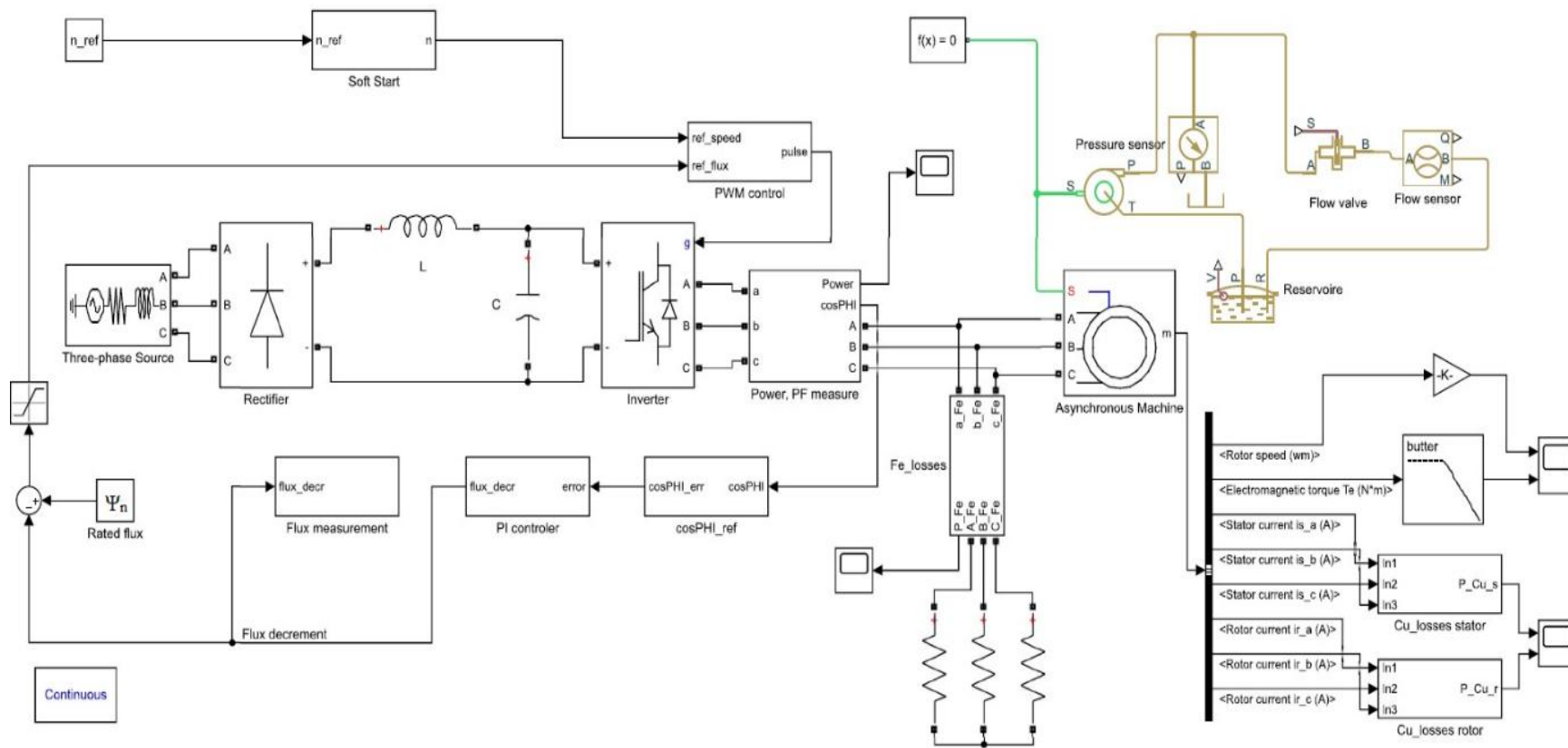
- Funkcija prenosa celog sistema u s-domenu, u tom slučaju postaje

$$W_s(s) = \frac{K_p n^* K_{SS} K_O}{sT_i (1 + sT_{SS})} \quad K_i = \frac{K_p}{T_S}$$

- Funkcija spregnutog prenosa u zatvorenoj povratnoj vezi je

$$W_{ss}(s) = \frac{W_s(s)}{1 + W_s(s)} = \frac{K_p n^* K_{SS} K_O}{s^2 T_{SS} T_i + sT_i + K_p n^* K_{SS} K_O}$$

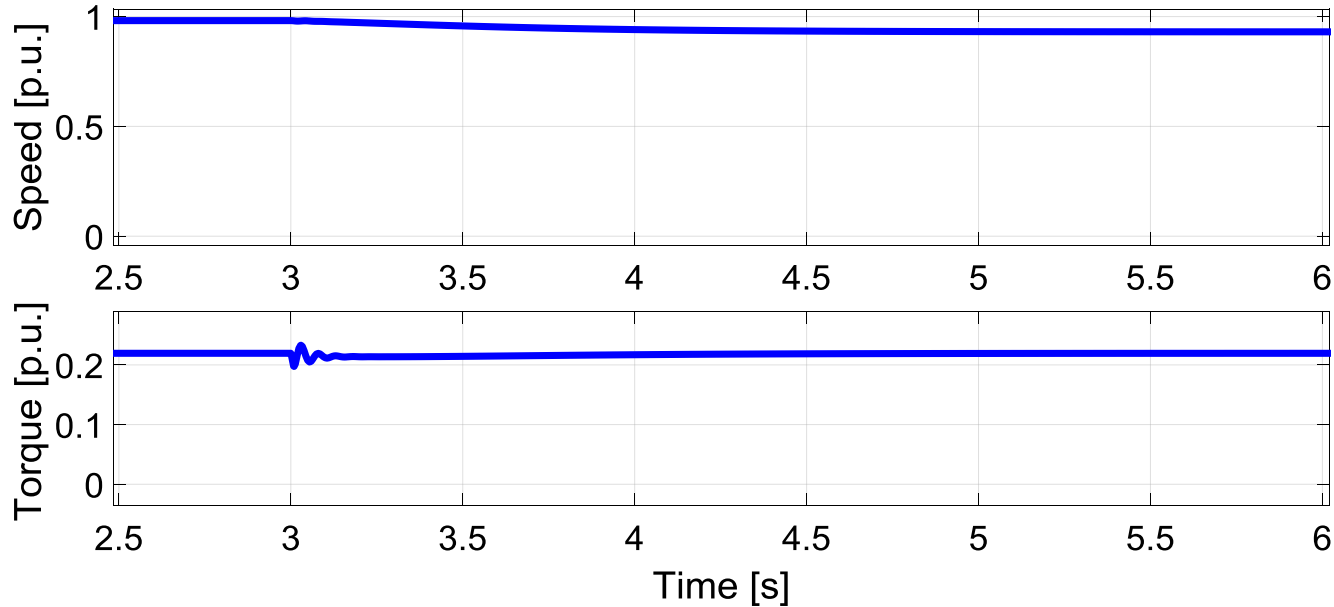
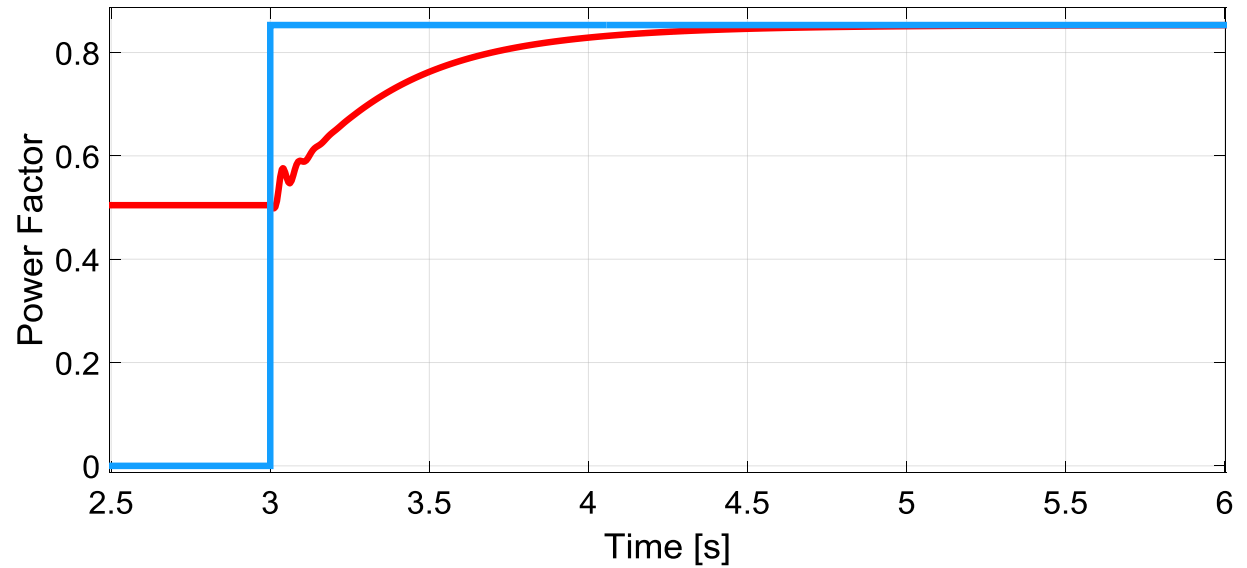
Energetski optimalno upravljanje pogonom sa asinhronim motorom u aplikacijama sa pumpom – simulacioni model [11]



Simulacioni blok dijagram

Rezultati simulacija pri uključenju regulatora faktora snage [11]

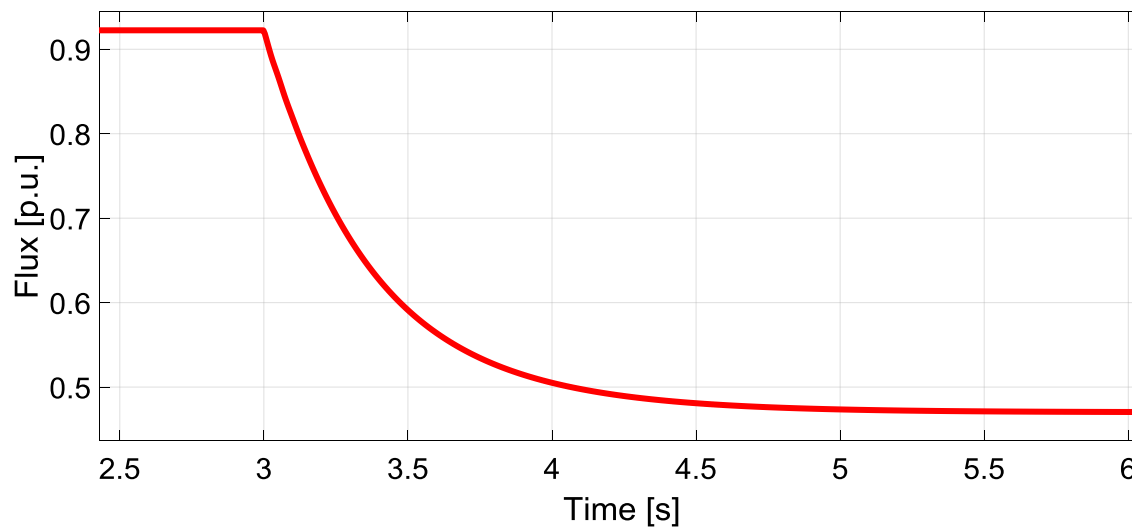
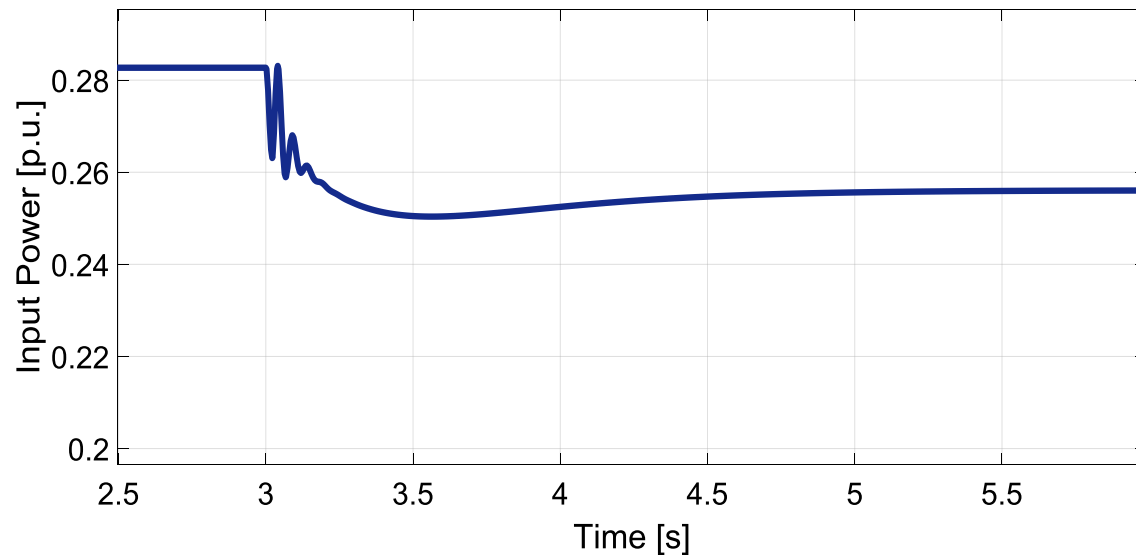
Odziv faktora snage



Pad brzine zbog promene klizanja

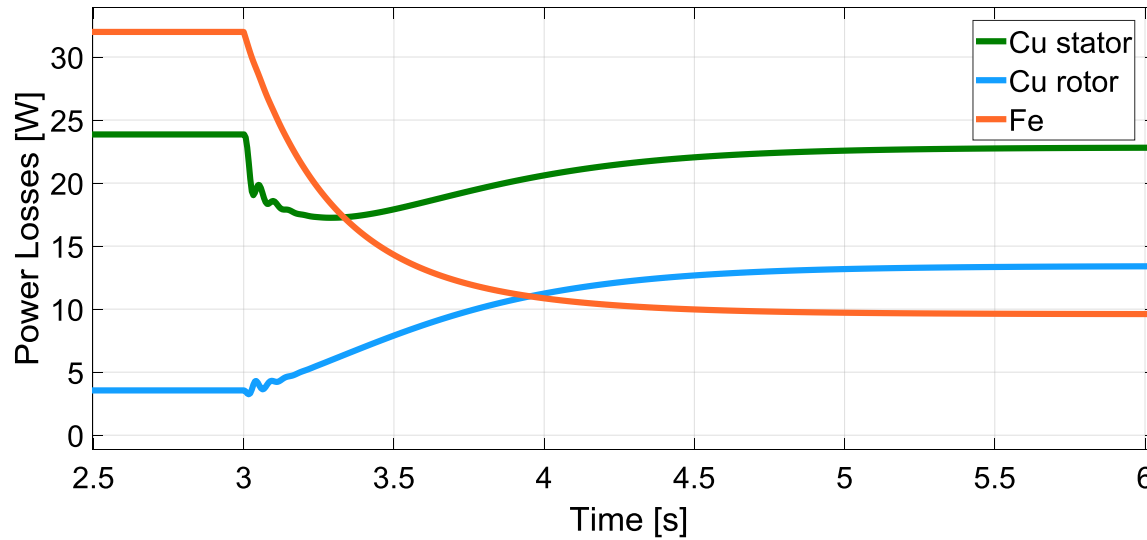
Rezultati simulacija pri uključenju regulatora faktora snage [11]

Ulazna snaga opada



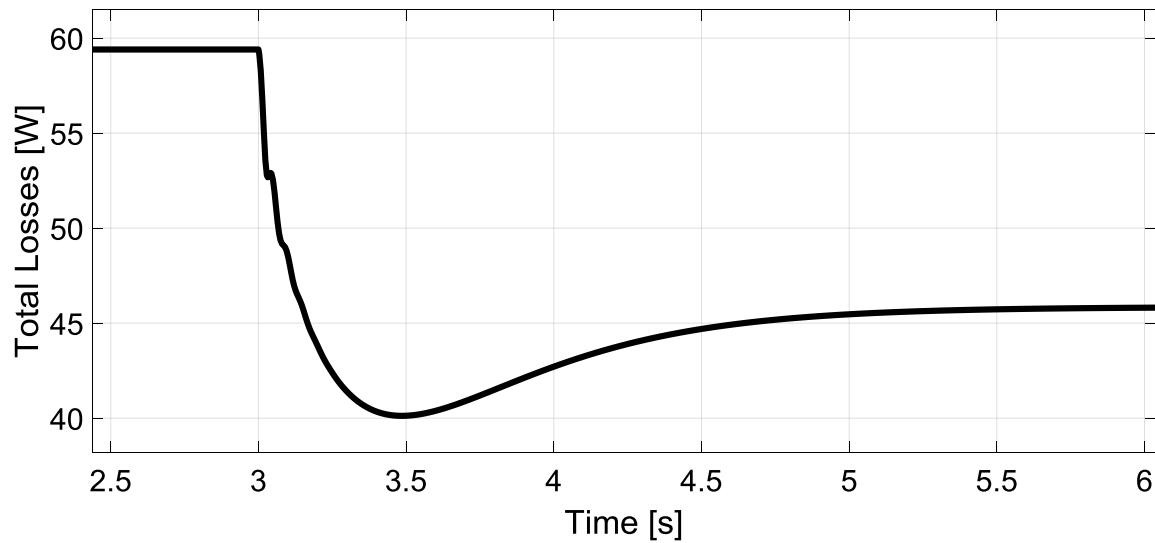
Fluks opada

Rezultati simulacija pri uključenju regulatora faktora snage [11]

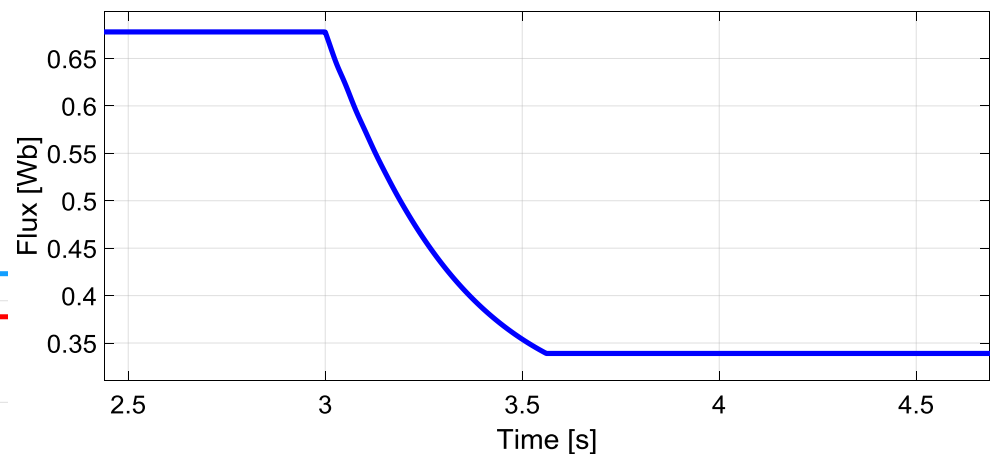
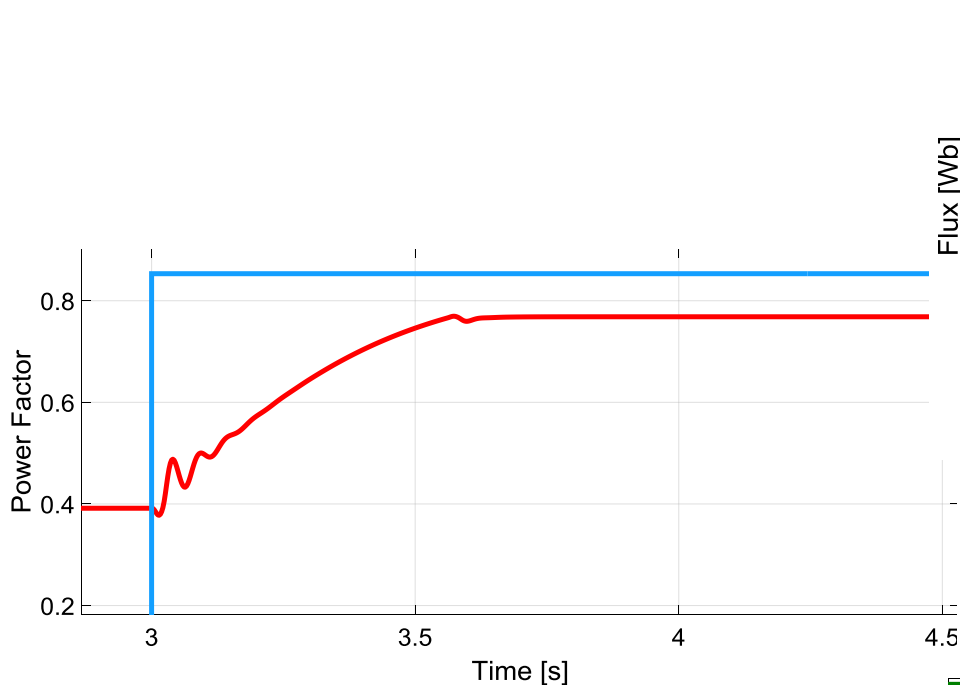


Raspodela gubitaka pri uključenju regulatora faktora snage

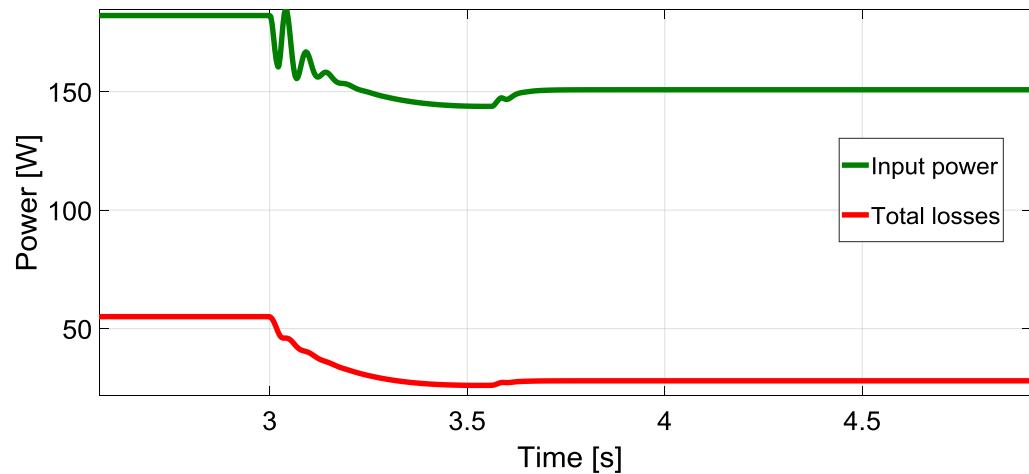
Odziv ukupnih gubitaka



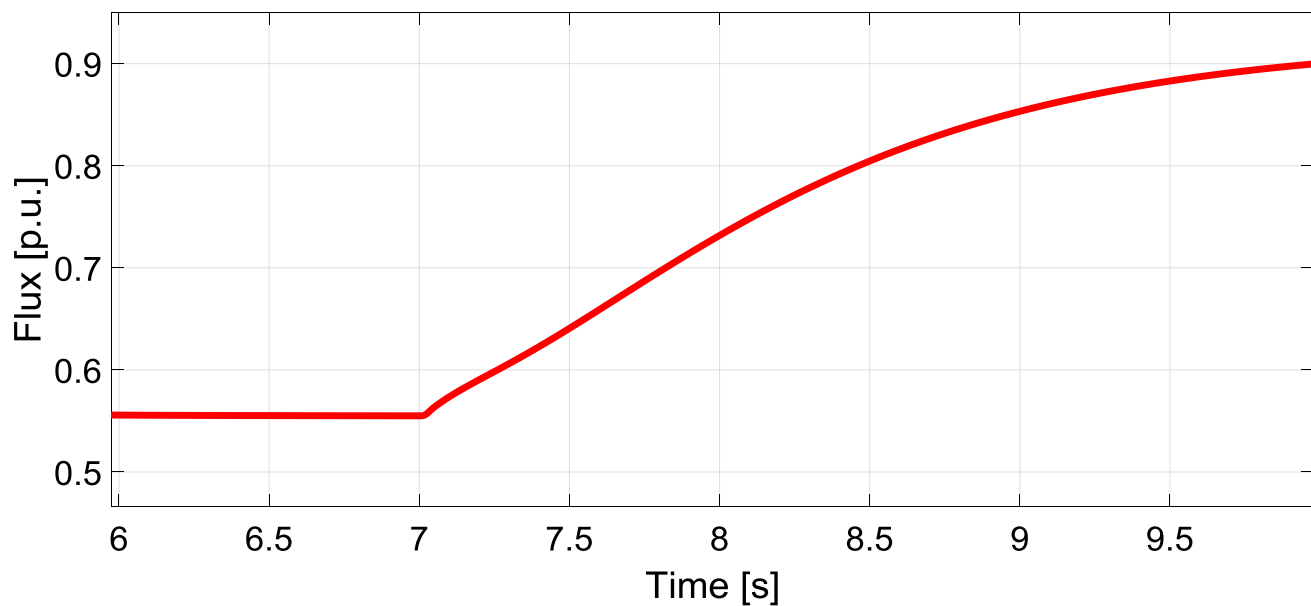
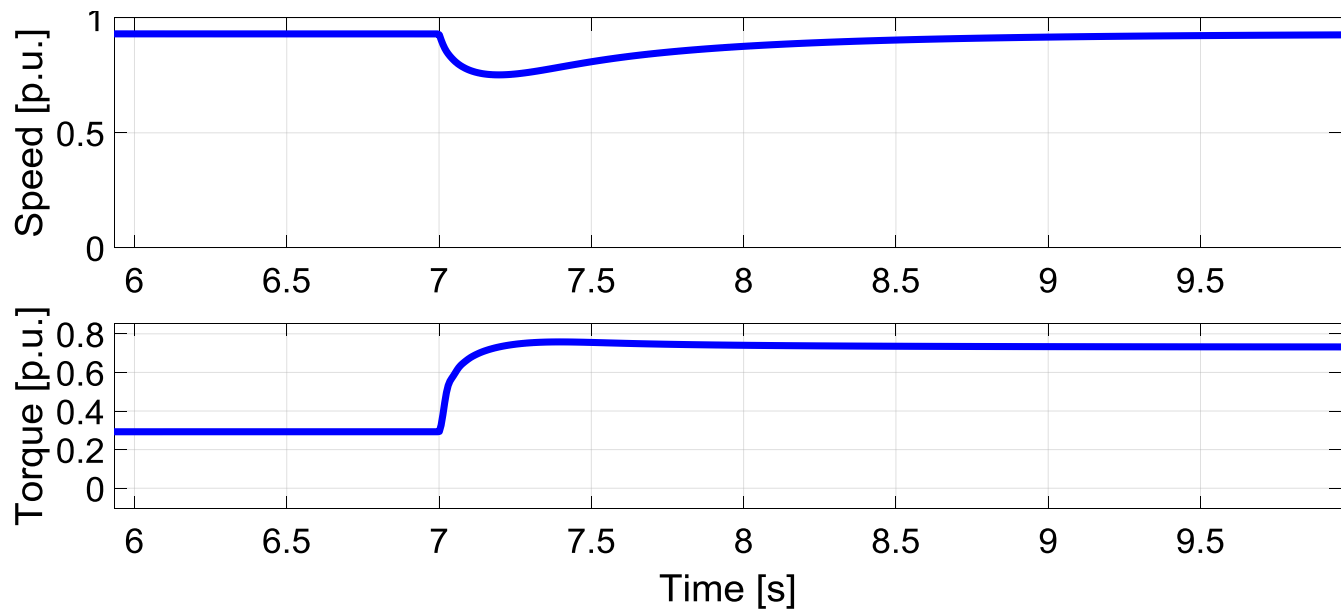
Rezultati simulacija pri uključenju regulatora faktora snage [11]



Uticaj limita fluksa na ponašanje pogona

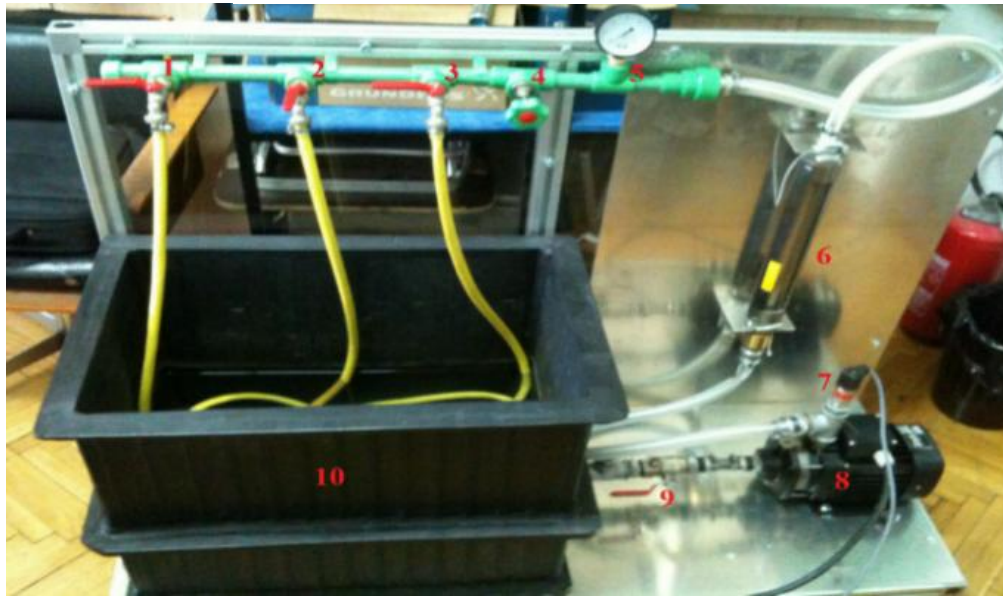


Rezultati simulacija pri uključenju regulatora faktora snage [11]



Uticaj iznenadnog porasta opterećenja na ponašanje pogona

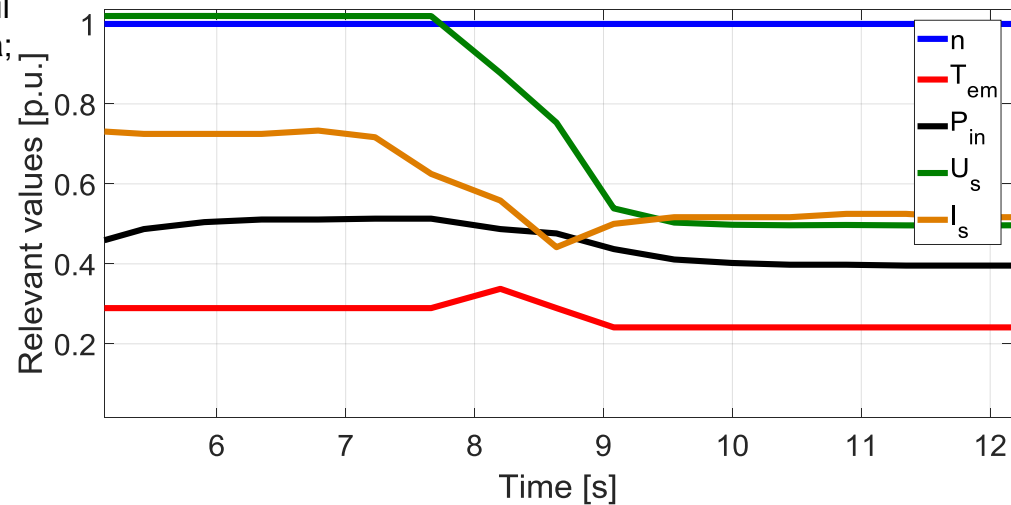
Rezultati merenja u laboratoriji [11]



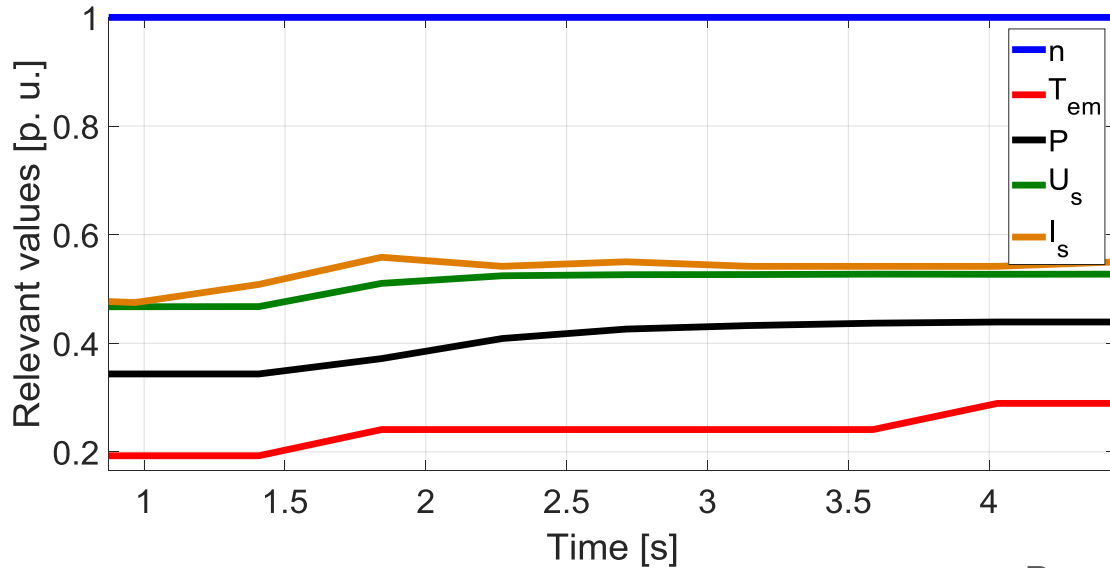
- Promena karakterističnih veličina pri uključenju AEO funkcije: minimalno opterećenje (minimalni protok), nominalna brzina, nominalni faktor snage

Laboratorijska postavka: 1,2,3 – slavine; 4 – nepovratni ventil
5 – pokazivač pritiska; 6 – merač protoka; 7 – senzor pritiska;
8 – motor i pumpa; 9 – dovodni ventil; 10 – rezervoar

- Danfoss, MCT 10
- AQUA Drive parametri
- Motor CosPhi



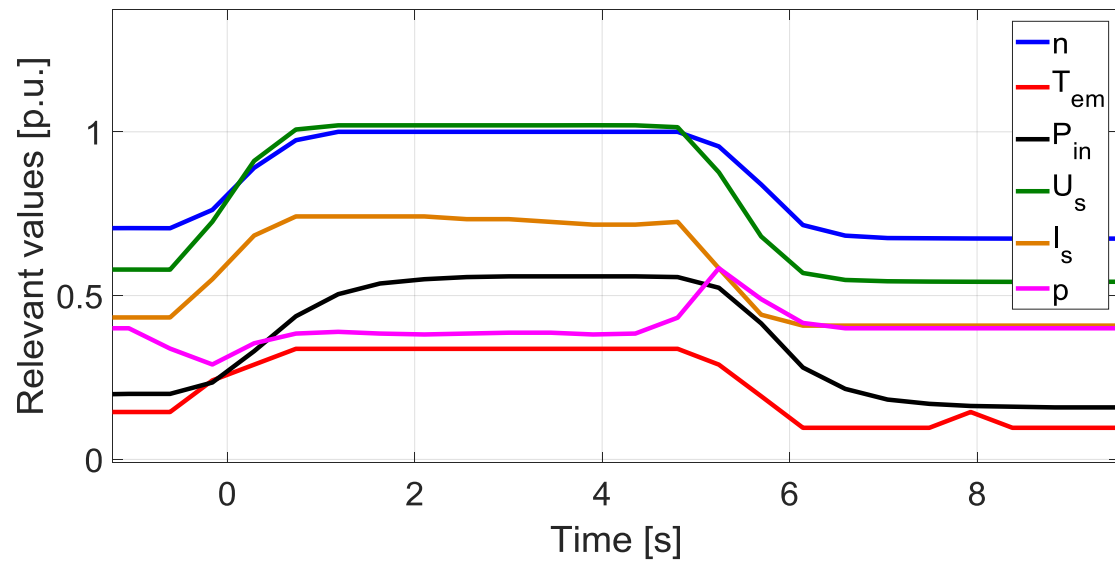
Rezultati merenja u laboratoriji [11]



Iznenadni porast opterećenja:

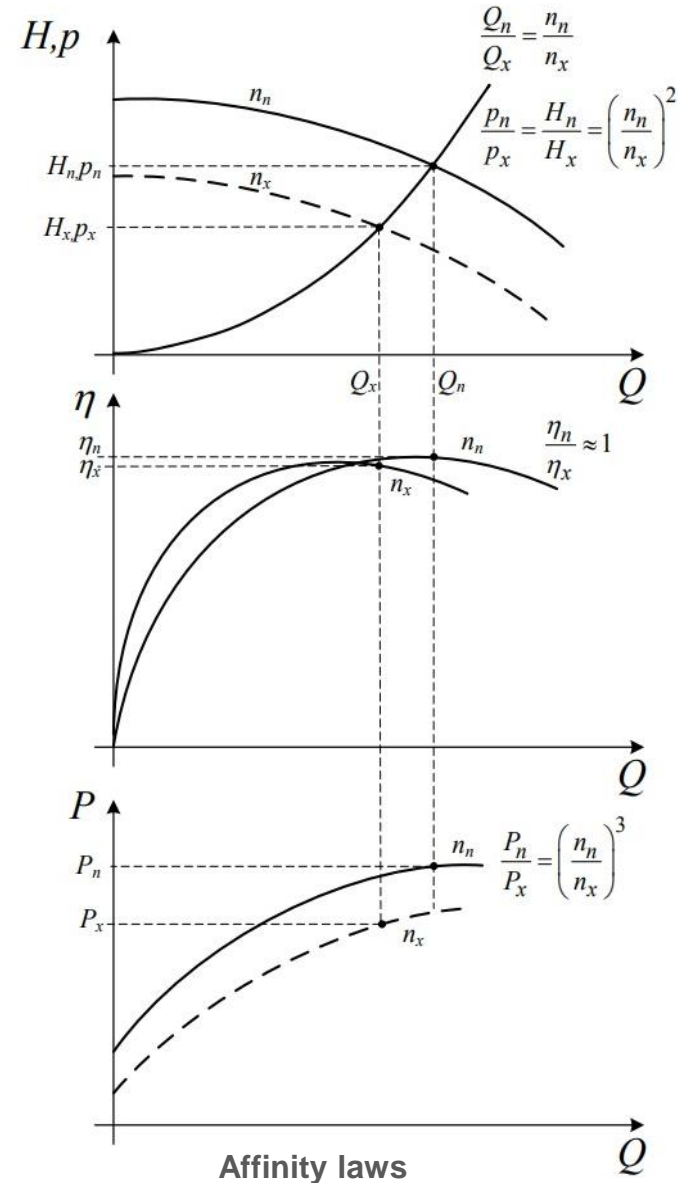
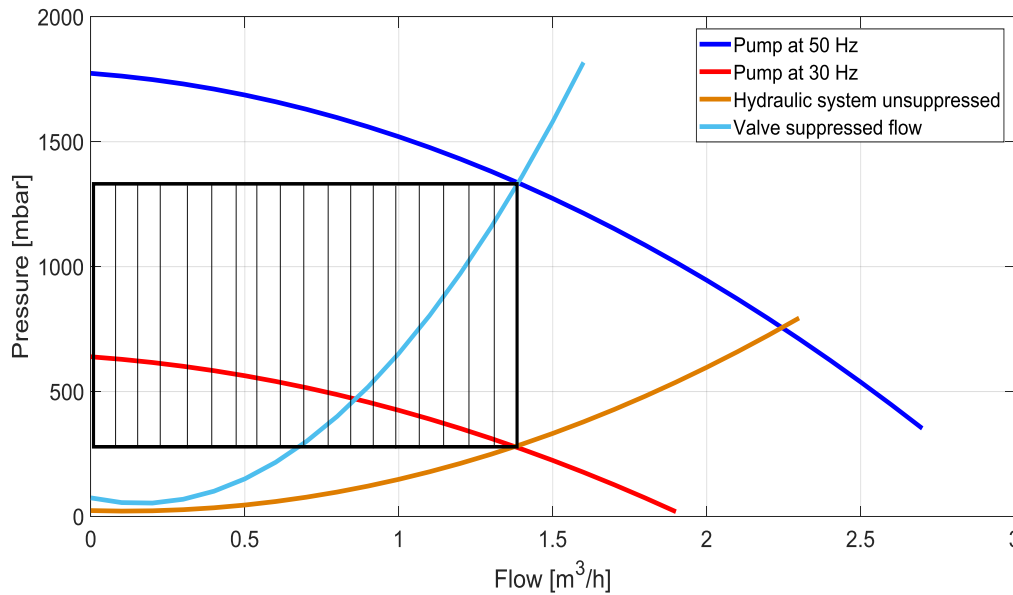
- Sa postojećom laboratorijskom postavkom samo mala opterećenja mogu da se ostvare
- Opterećenje se menja od minimalne do maksimalne vrednosti koja može da se ostvari pri upravljanju u otvorenoj sprezi (skalarno upravljanje)

Ponašanje pogona pumpe pri upravljanju u zatvorenoj sprezi sa aktiviranom AEO funkcijom



Rezultati merenja u laboratoriji [11]

Rad motora pumpe u energetski efikasnoj radnoj tački je dodatna mogućnost za smanjenje utrošene električne energije, tek pošto je već ostvaren energetski efikasan rad pumpe u hidrauličkom sistemu (promenom brzine radnog kola pumpe korišćenjem frekventnih pretvarača, a ne korišćenjem prigušnih ventila)



Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama[12]

- Pretraživački algoritam se u ovom primeru bazira na primeni fazi logike.
- Fazi skupovi se opisuju funkcijama pripadanja. Fazi logika je produžetak Bulove logike koja se bazira na matematičkoj teoriji o fazi skupovima. Uvođenjem funkcija pripadnosti, informacije kojima baratamo dobijaju nove dimenzije. Više nisu uređene samo sa jedinicom/tačno i nulom/netačno, a to nam omogućava veći spektar operacija. Fazi logika se predstavlja skupom pravila koja mogu da predstavljaju ljudsko rezonovanje u zaključivanju. Ovo omogućava dobijanje zaključka iz nedovoljno određenih informacija što omogućava veliku upotrebu u automatskom upravljanju [11].
- Fazi logika se zasniva na:
 - Funkcijama pripadnosti
 - Operacijama fazi logike
 - Fazi pravilima odlučivanja

Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama[12]

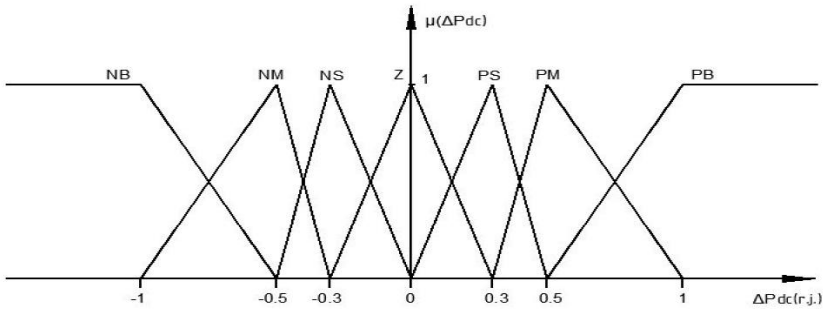
- Primena fazi regulatora sa dva ulaza i jednim izlazom za određivanje energetski optimalne radne tačke, tj. minimuma gubitaka snage u regulisanom pogonu sa asinhronim motorom:

✓ Uzima se odbirak snage u jednosmernom međukolu $Pd(n)$ koji se poredi sa prethodnim odbirkom snage $Pd(n-1)$ u cilju određivanja koraka promene snage u jednosmernom međukolu.

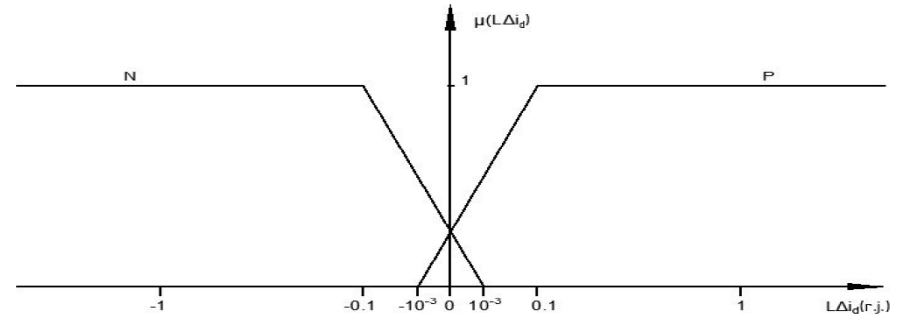
✓ Na isti način se određuje i promena struje $id(n)$ u odnosu na prethodnu vrednost, a u razmatranje se uzima prethodni korak promene struje id , $L\Delta id$.

✓ Na osnovu razlike $\Delta Pd(n)$ i $L\Delta id(n)$ primenom fazifikacije, fazi pravila i na kraju defazifikacije, određuje se novi korak promene struje $\Delta id(n)^*$.

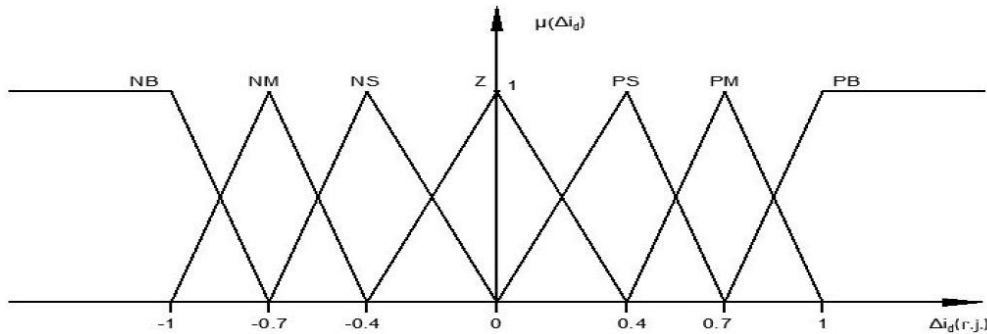
Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama[12]



Funkcija pripadnosti prvog ulaza (promena gubitaka)



Funkcija pripadnosti drugog ulaza (prethodna promena struje)



Funkcija pripadnosti izlaza (promene struje)

$\begin{matrix} \Delta i_d \\ \Delta P_{dc} \end{matrix}$	N	P
PB	PM	NM
PM	PS	NS
PS	PS	NS
Z	Z	Z
NS	NS	PS
NM	NM	PM
NB	NB	PB

Pravila fazi logike

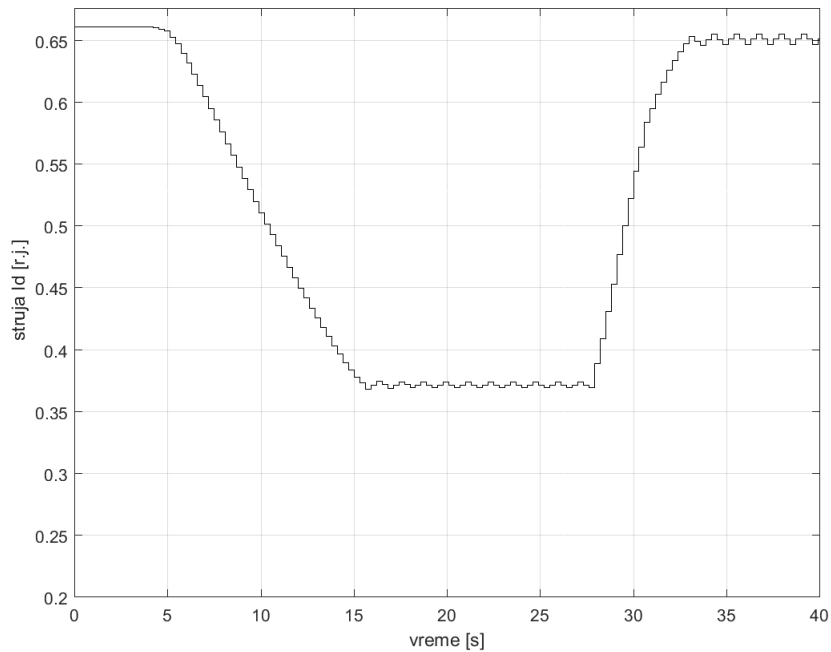
Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama[12]

- Analizom prikazanog optimizacionog fazi regulatora, došlo se na ideju da se proba sinteza nešto jednostavnijeg fazi regulatora. Uprošćenje se svodi da se izbací drugi ulaz u fazi regulator, odnosno smer prethodnog koraka promene struje I_d , $L\Delta I_d$.

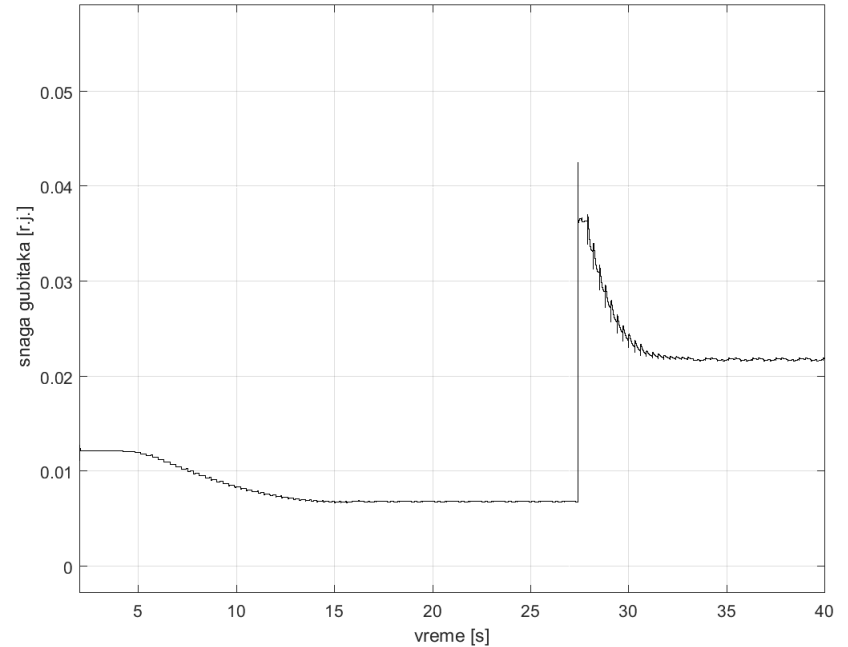
-Zadatak optimizacionog algoritma je da generiše odgovarajuću vrednost koraka promene struje I_d u smeru koji izaziva opadanje gubitaka, tj. smer promene struje ostaje isti ako se gubici smanjuju, kada se gubici povećaju smer promene struje se menja.

-Na sledećim slikama pokazani su referentna vrednost struje I_d , snaga gubitaka, odziv struje I_q i odziv momenta u motoru kome su od početnog trenutka zadati nominalna brzina i moment u vrednosti 15% nominalnog momenta. U trenutku 4 s uključuje se fazi regulator. Po dostizanju ustaljenog stanja neko vreme će raditi u ustaljenom stanju, a onda u trenutku 28 s zadaje mu se opterećenje od 47 % nominalnog opterećenja (pri tom opterećenju struja I_d je na granici svoje nominalne vrednosti) i posle nekoliko sekundi doći će do ustaljenog stanja u kom će raditi neko vreme. Sve vrednosti su izražene u relativnim jedinicama.

Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama – rezultati simulacija [12]

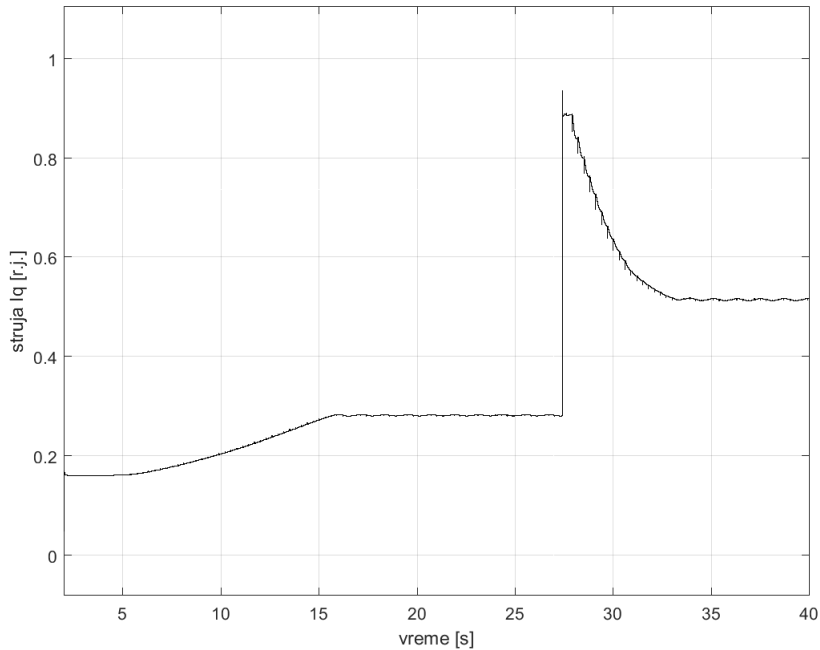


Referentna vrednost struje I_d

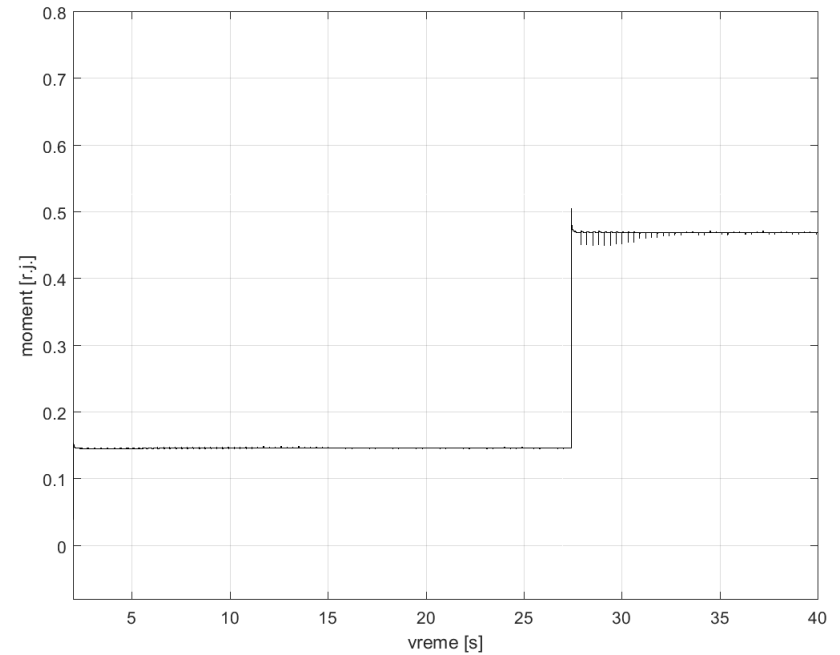


Prikaz snage gubitaka

Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama – rezultati simulacija [12]

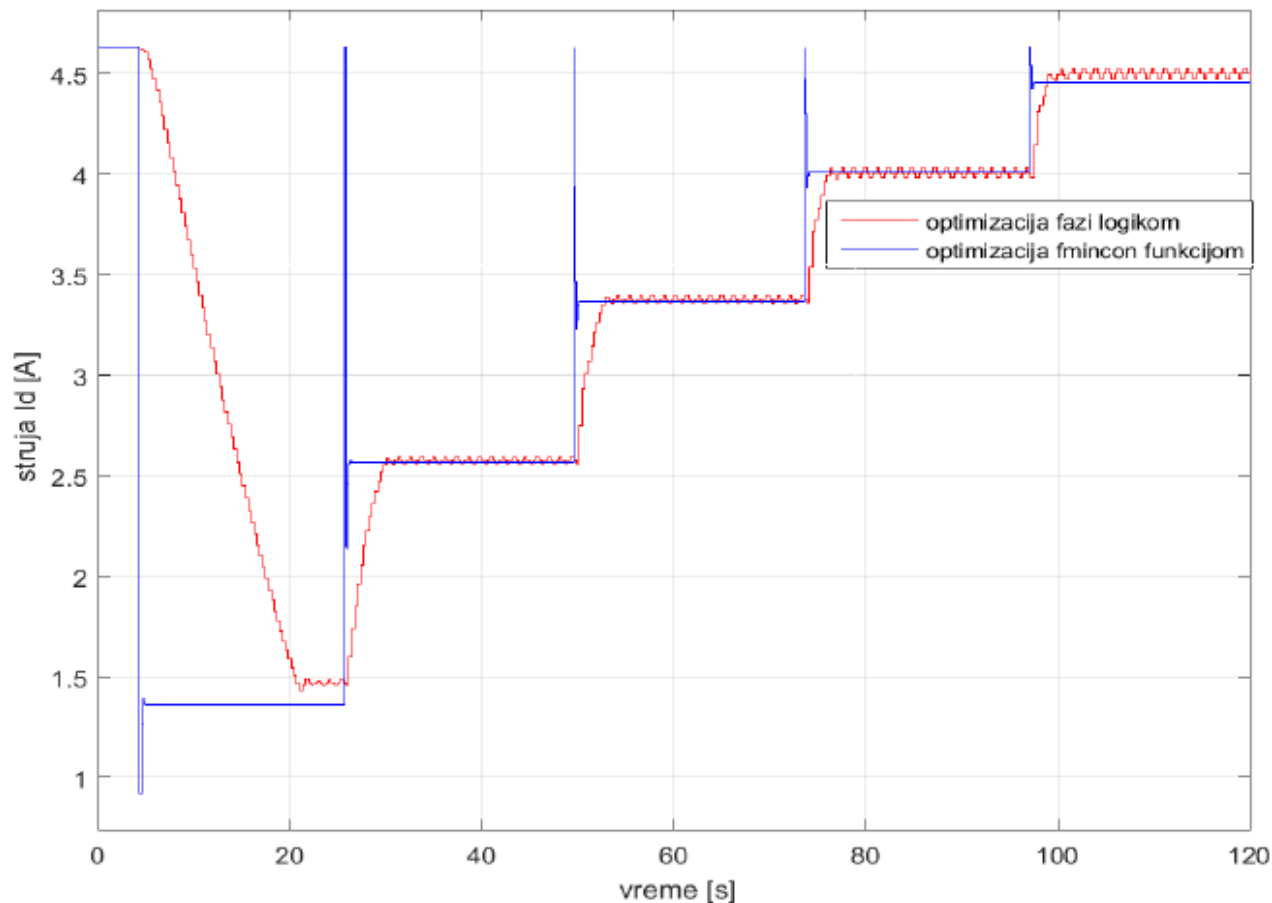


Odziv struje Iq



Moment motora

Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama – rezultati simulacija [12]



Referentna vrednost struje I_d

Korišćena literatura

- [1] Marian. Kazmierkowski, Frede Blaabjerg, Ramu Krishnan, „Control in Power electronics – selected problems”, Academic Press Elsevier Science 2002.
- [2] <http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/6CF3D800-0BA0-491B-AC82-7ACF7BB02AC7/0/AutomaticEnergyOptimization.pdf>
- [3] https://cache.industry.siemens.com/dl/files/625/59737625/att_59993/v1/FH1_012012_eng_en-US.pdf
- [4] [http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/209e22c299f6254285257823004902fc/\\$file/Flux+Optimization+White+Paper+--+LVD-PHWP13U-EN_REVB.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/209e22c299f6254285257823004902fc/$file/Flux+Optimization+White+Paper+--+LVD-PHWP13U-EN_REVB.pdf)
- [5] Luka STANIĆ, Žarko KOPRIVICA, Nikola VOJVODIĆ, Lepasava RISTIĆ, Milan BEBIĆ „ENERGY OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE - STUDY OF TWO CASES”, VII Regional Conference INDUSTRIAL ENERGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION IN SOUTH EASTERN EUROPEAN COUNTRIES, June 19-22, 2019, Zlatibor, Serbia, pp.365-374
- [6] Aleksa SEIZOVIĆ, Lepasava RISTIĆ, Milan BEBIĆ „ENERGY OPTIMAL CONTROL OF AN INDUCTION MOTOR DRIVE BASED ON PSO ALGORITHM”, VII Regional Conference INDUSTRIAL ENERGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION IN SOUTH EASTERN EUROPEAN COUNTRIES, June 19-22, 2019, Zlatibor, Serbia, pp.374-385
- [7] Aleksa SEIZOVIĆ, Lepasava RISTIĆ, Milan BEBIĆ, Nikola VOJVODIĆ „Energy efficient control of variable-speed induction motor drives based on Particle Swarm Optimization”, International Symposium on Industrial Electronics and Applications - INDEL 2020, November 4-6, 2020, Banja Luka, Bosna i Hercegovina
- [8] Đurđica Mutavdžić „Energetski oprimalan rad pogona sa asinhronim motorom”, Master rad, septembar 2019.
- [9] Dušan Pejić „Energetski oprimalan rad elektromotornog pogona primenom modela gubitaka u motoru”, Master rad, septembar 2020.
- [10] Strahinja Aškračić „LabView based platform for control and monitoring of a six-phase electrical drive”, Seminar on measurement and data acquisition, University of Belgrade, School of Electrical Engineering and Center of the promotion of science, Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union, 25th -27th of October 2019, Belgrade, Serbia
- [11] Mateja NIKOLIĆ, Lepasava RISTIĆ, Milan BEBIĆ „ENERGY OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE IN PUMP APPLICATIONS”, VII Regional Conference INDUSTRIAL ENERGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION IN SOUTH EASTERN EUROPEAN COUNTRIES, June 19-22, 2019, Zlatibor, Serbia, pp.355-365
- [12] Miroslav Biočanin „ Minimizacija gubitaka snage u elektromotornom pogonu sa AM primenom pretraživačkih algoritama”, Master rad, septembar 2020.