

## Pobudni sistem sinhronog motora baziran na programabilnom logičkom kontroleru

Žarko Janda, Marko Janković, Sava Dobričić, Predrag Ninković

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8A,  
11000 Beograd, Srbija  
[janda@ieent.org](mailto:janda@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu je prikazana rekonstrukcija pobudnog sistema za sinhroni motor snage 3,5 MW, koji pokreće turbokompresor, vođen pomoću programabilnog logičkog kontrolera. Specifičnosti koje izdvajaju ovu realizaciju rekonstrukcije od sličnih rešenja su fleksibilnost sistema i primena standardnog hardvera i softvera. Upotreba programabilnog logičkog kontrolera (Programmable Logical Controller) odnosno PLC-a omogućava lako povezivanje sa procesnim upravljanjem fabričkog postrojenja i implementaciju različitih optimizacionih algoritama, a sve to uz nižu cenu. Ovakvo rešenje omogućava uređaju da postane aktivni učesnik u „smart grid“ sistemu i doprinese „pametnom“ korišćenju svih raspoloživih resursa za proizvodnju reaktivne energije. Prikazani su eksperimentalni snimci pobudne struje u toku starta sinhronog motora, kao i snimljene statičke karakteristike.

**Ključne reči:** statička pobuda, sinhroni motor, tehnoeкономski regulator, asinhroni režim rada.

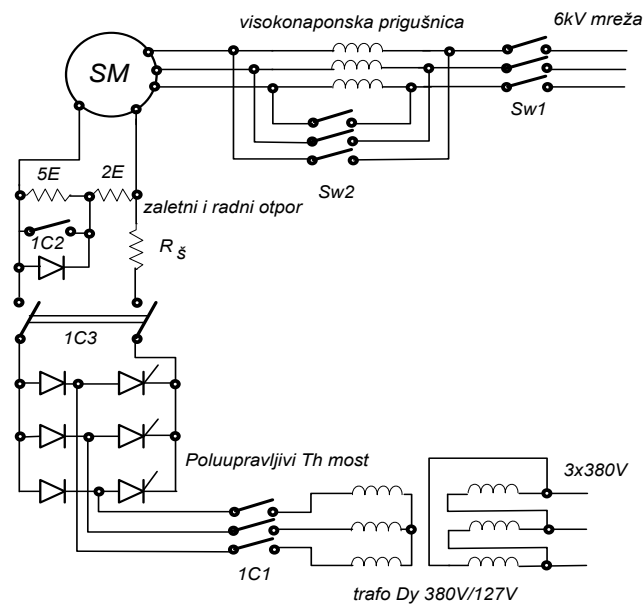
### 1. Uvod

Projektovanje savremenih uređaja energetske elektronike zahteva nov pristup razvoju i realizaciji istih, sa aspekta uključenja u tzv. „smart grid“ sistem. „Smart grid“ podrazumeva formiranje aktivnog distribucionog sistema koji se bazira na aktivnom distribuiranom upravljanju svim aspektima elektro energetskeg sistema od proizvodnje do potrošnje, uz maksimalno vođenje računa o sigurnosti. Na slici 1 je prikazana blok šema statičkog sistema pobude sinhronog motora [1] koji se koristi za pokretanje turbokompresora za likvifikaciju vazduha (rotor se pobuđuje poluupravljivim tiristorskim mostom) [2]. Imajući u vidu konkretnu aplikaciju i potrebu ostvarivanja relativno složene procedure starta i stopa motora (sekvencijalne funkcije) kao i zahteve koji se pojavljuju prilikom upravljanja, odlučeno je da se pobudni sistem bazira na

OMRON-ovom programabilnom logičkom kontroleru [3]. Takvo rešenje u konkretnim uslovima rada obezbeđuje nekoliko prednosti kao što su:

- Kratko vreme potrebno za realizaciju sistema
- Velika fleksibilnost rešenja koje ostavlja široke mogućnosti za izmenu načina upravljanja i povezivanja sa ostatkom sistema, a koji se mogu pojaviti u toku eksploatacije sistema (eventualni zahtev za optimizaciju sistema po određenim parametrima).

Takođe, u savremenim uslovima postojanja distribuiranih obnovljivih izvora energije u distributivnoj mreži postavlja se pitanje njihovog optimalnog učešća u regulaciji napona. Distribuirani izvori energije utiču na naponske prilike u elektro energetske mreži i stabilnost prvenstveno injeokovanjem reaktivne snage na srednjenaponskom naponskom nivou (6 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV). Međutim, značajan dinamički izvor reaktivne energije predstavljaju i sinhroni motori, koji se mogu naći u industrijskim pogonima u oblastima sa slabom distributivnom mrežom ili kao motori za pogon velikih pumpnih stanica.



Slika 1. Energetsko kolo pobude i napajanja sinhronog motora

U konceptu "smart grid" sistema sinhroni motori mogu biti iskorišćeni kao značajan element za regulaciju napona, bez obzira što troše aktivnu energiju [4], [5].

## 2. Princip rada

Obzirom da je postojala potreba prilagođenja širokog dela specificiranih zahteva realnim uslovima eksploatacije, kao deo upravljačkog sistema upotrebljen je industrijski PLC. Korišćenje "mass-production" PLC-a omogućilo je da se postigne:

- kratko vreme razvoja sistema pobude
- relativno laka i brza promena kako parametara tako i celokupnog algoritma upravljanja i kontrole sistema
- jednostavno dodavanje novih funkcija u skladu sa zahtevima naručioca
- pouzdanost i jednostavna zamena u slučaju otkaza
- mogućnost komunikacije između sistema pobude kao zaokružene celine i ostalih komponenti tehnološkog sistema
- mogućnost daljinskog upravljanja i nadzora.

PLC u konkretnoj primeni preuzima na sebe funkcije kako nadzora i zaštite, tako i upravljanja. Njegovim korišćenjem realizovane su vremenske sekvence starta i stopa. Na Slici 2 dat je kao primer ciklodijagram procedure starta. Sa slike se uočava da procedura starta počinje pojavom signala Start request koji od PLC-a zahteva da proveri da li je sistem spreman za start (što podrazumeva odsustvo signala koji izazivaju proradu zaštite, odnosno havarijskog stopa). Ukoliko je sistem spreman za start PLC uključuje kontakter 1C2 (vidi Sliku 1) koji preko svojih pomoćnih kontakata omogućava uključanje visokonaponskog prekidača SW1. Nakon izvesnog vremena, koje je definisano vremenskom konstantom zagrevanja visokonaponske prigušnice i postizanjem potrebne brzine obrtanja sinhronog motora u toku zaleta, generiše se signal SW2 koji krati viskonaponsku prigušnicu. Nakon par sekundi (ostavljenih za dodatno zaletanje motora) uključuje se napajanje tiristorskog mosta (1C1), i nakon 1s se priključuje izlaz tiristorskog mosta na pobudni namotaj rotora.

Kao deo sistema za zaštitu i monitoring, PLC obavlja sledeće funkcije:

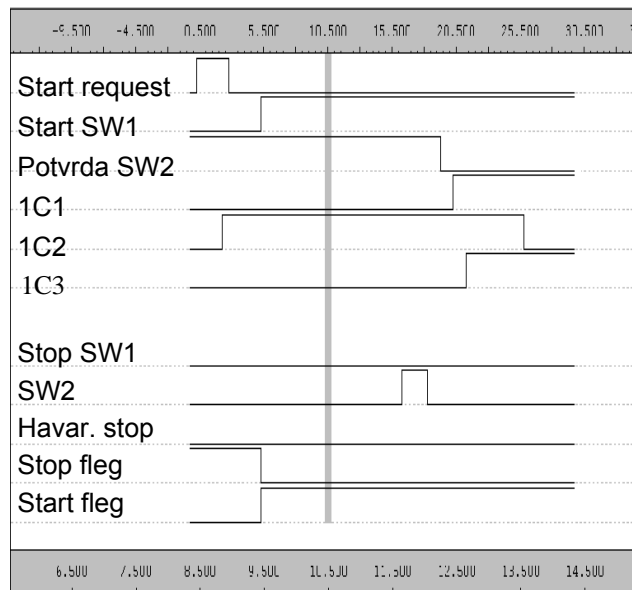
- detekcija predugog zaleta mašine,
- detekcija kvara poluprovodničkog mosta pobude,
- monitoring frekvence mreže i mašine uz merenje klizanja i to on-line,
- detekcija asinhronog rada putem merenja valovitosti struje pobude, takođe on-line,
- nadzor stanja energetskog dela.

Komunikaciju sa ostalim celinama sistema obavlja se preko RS485/422 veze, po protokolu koji se može proizvoljno prilagoditi. Na taj način je omogućena je jednostavna integracija sistema pobude u nadređeni sistem za upravljanje ili SCADA sistem.

U sistemu regulacije, PLC služi kao PID regulator struje pobude uz mogućnost regulacije i faktora snage  $\cos\phi$ , što je prikazano na Slici 3. Takođe, omogućuje režim forsaza, nadpobuđivanjem motora u slučaju pada

napona mreže ispod definisane granice radi zadržavanja sinhronog motora u sinhronizmu sa mrežnim naponom.

S obzirom da PLC poseduje realizovane matematičke funkcije višeg nivoa, otvaraju se vrata i naprednijim metodama regulacije kao što su on-line estimacija parametara mašine, odnosno merenjima u kratkom spoju i praznom hodu, snimanje Mordejeve krive blagim nad i pod-pobuđivanjem mašine u željenoj radnoj tački, kao i projektovanje optimalnih i prediktivnih regulatora pobude sinhronih motora.



Slika 2. Ciklodijagram procedure starta

### 3. Zaštita od asinhronog rada

Zaštita od asinhronog rada sinhronog motora je realizovana na dva načina kako bi se mogućnost oštećenja mašine svela na najmanju moguću meru. Jedan način je softverski, pomoću detektovanja karakterističnih varijacija pobudne struje. Drugi način je hardverski, pomoću posebno realizovanog elektronskog kola za tu namenu.

Softverska zaštita se zasniva na merenju valovitosti pobudne struje. Apsolutna vrednost razlike zadate i ostvarene struje pobude se integriše (sumira) u odgovarajućem vremenskom intervalu (prozoru) i ako ta vrednost pređe unapred zadatu vrednost Ref\_asy daje se nalog za isključenje mašine.

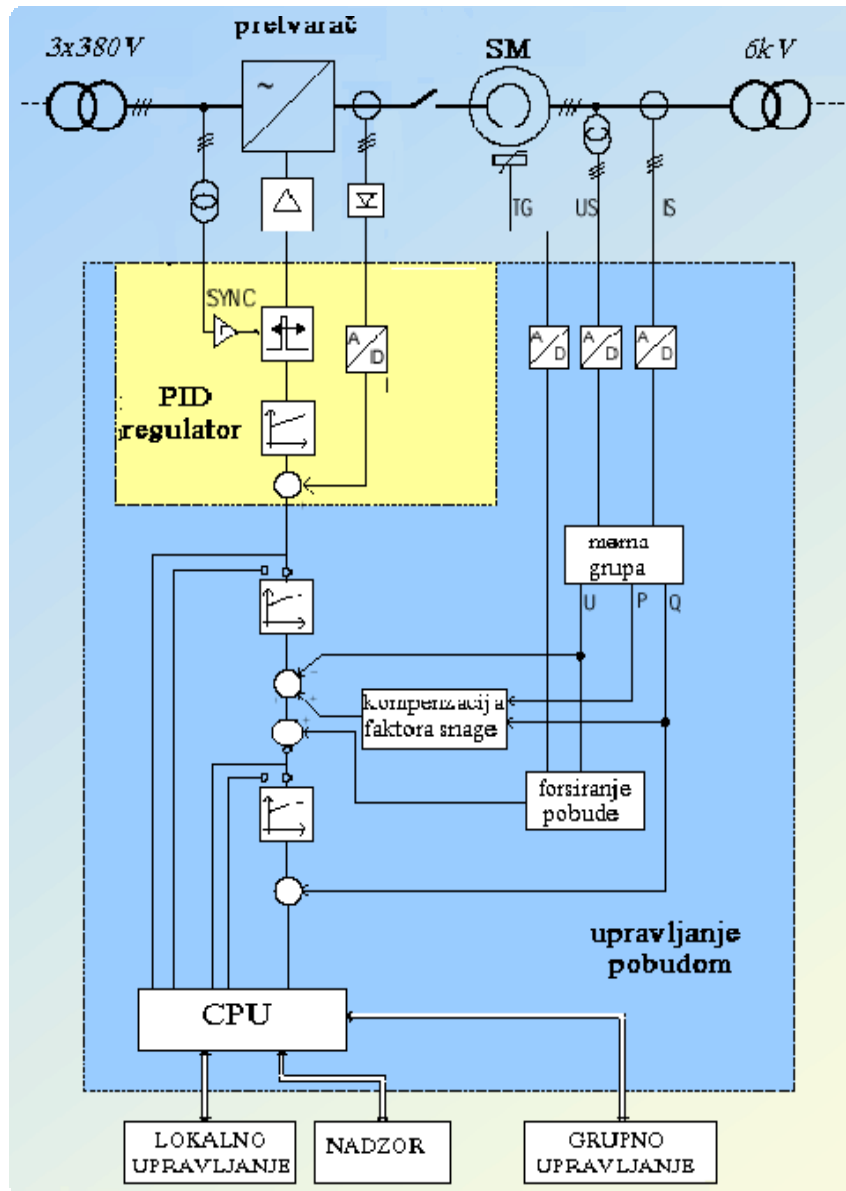
Promenljiva Ref\_asy je proporcionalna referentnoj pobudnoj struji. Na taj način se jednostavno rešava problem eventualnog nepotrebnog delovanja zaštite u toku starta ili forsiranja, kao i automatsko prepodešenje praga delovanja u slučaju izmene zadate vrednosti struje pobude.

Hardverski sklop za zaštitu od asinhronog rada se zasniva na detekciji radnog stanja u kojem q-osa kasni za električnom osom više od maksimalno dozvoljenog ugla snage. Blok dijagram elektronskog kola za detekciju ispada motora iz sinhronog rada je prikazan na slici 4.

Ulaz u ovaj sistem čine impuls sa induktivnog davača (marker) i sinhronizacioni signali generisani od sistema mrežnih napona. Marker je postavljen na vratilu motora tako da se poklapa sa q-osom. Sinhronizacioni signali se generišu od mrežnog napona tako da se dobiju impulsi male širine koji se poklapaju sa početkom nove periode odgovarajućih faznih napona R, S i T. Frekvencija sinhronizacionih impulsa je tri puta veća od osnovne, tj. 150Hz. Korišćenjem sva tri napona za generisanje sinhro-signala se postiže da sistem nije osetljiv na izbor referentne električne ose, tj na izbor faze a prema kojoj se meri kašnjenje električne q-ose.

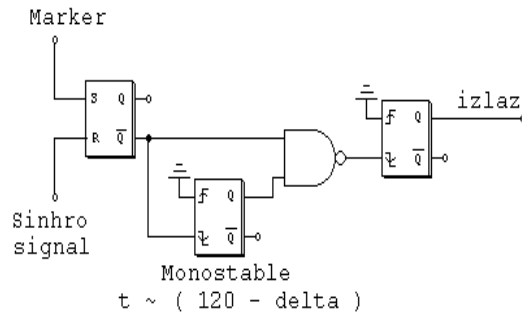
Vremenski dijagrami karakterističnih signala u normalnom radnom režimu je prikazan na slici 5.

Kada naiđe marker-impuls (trag 2), Set-Reset Flip-Flop (SRFF) menja stanje tako da je na njegovom izlazu logička nula (trag 3). Takođe, aktivira se monostabilno kolo koje generiše na svom izlazu impuls zadate širine (trag 4). Kada naiđe sledeći sinhronizacioni impuls (trag 1), SRFF menja stanje u logičko 1. Ako je do tog trenutka trag 4 pao na logičku nulu (kašnjenje markera nije veće od kritičnog), onda se na izlazu iz kola NI kola (trag 5) ima visok logički nivo, odnosno na izlazu (trag 6) se zadržava logička nula, kao pokazatelj ispravnog rada mašine.

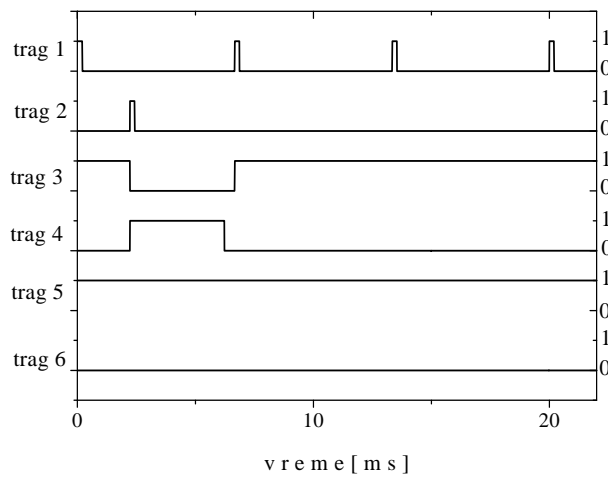


Slika 3. Dijagram regulacije struje pobude

Ukoliko bi marker kasnio više nego što je dozvoljeno, u trenutku promene stanja SRFF-a trag 4 bi bio i dalje jednak logičkoj jedinici. Tada dolazi do preklapanja logičkih jedinica traga 3 i traga 4, što dovodi do pojave logičke nule na izlazu iz NI kola, a to opet postavlja izlaz u logičko stanje 1, što je dojava neregularnog rada sinhronog motora.



Slika 4: Blok dijagram kola za detekciju ispada motora iz sinhronizma



Slika 5: Vremenski dijagrami karakterističnih signala u normalnom radu sinhronog motora

Kao što se iz opisa principa funkcionisanja kola može zaključiti, monostabilno kolo na slici se podešava tako da vreme trajanja impulsa koje generiše odgovara vrednosti  $(120^\circ - \delta_{\max})$ .

#### 4. Funkcija forsiranja pobude

Veoma važna funkcija pobudnog sistema sinhronog motora je forsiranje pobude. Svrha forsiranja pobude je da sinhroni motor ostane u sinhronizmu u toku kratkotrajnih (ili čak i dugotrajnih) smanjenja mrežnog napojnog napona. Pri tome je potrebno pravilno proceniti kada treba da stupi forsiranje pobude u rad. U principu, forsiranje se izvodi sa strujom pobude koja iznosi oko 1,5 nominalne struje i traje oko 30 sekundi (ograničeno toplotnim kapacitetom rotora i dozvoljenom temperaturom izolacije na rotoru). U slučaju motora koji je opisan u ovom radu forsiranje pobude se vrši sa 450A i to trajno, dokle god postoji zahtev za forsiranjem pobude. Ta vrednost je odabrana pošto sinhroni motor trajno radi sa pobudnom strujom od 300A, a nominalna pobudna struja iznosi 426A.

Nominalna radna struja ovog sinhronog motora iznosi 413A pri napojnom naponu 6kV. Nominalna pobuda je 426A pri 54 VJSS. Odnos struja statora i rotora u ogledu kratkog spoja iznosi 413A/257A. Nominalni napon statora u praznom hodu se postiže pri struji pobude od 177,2A.

Pri ispitivanju zavisnosti struje statora od struje pobude (snimanje Mordejevih krivih) sinhrona mašina je radila sa faktorom snage 1 pri struji statora od 324A, naponu 5910V i pobudnoj struji od 300A. Takođe, pri podpobuđivanju opterećenog sinhronog motora (radi provere rada zaštite od asinhronog rada) do ispada iz sinhronizma, konstatovano je da je zadnja stabilna radna tačka podignuta pri pobudnoj struji od 200A, struji statora 378A i naponu od 5700V.

Analizirajući ovaj sinhroni motor na veoma uprošćeni način, uz zanemarenje isturenosti polova, može se odrediti zasićena sinhrona reaktansa (1)

$$X_s = \frac{U_{n,f}}{I_s} = \frac{6000V / \sqrt{3}}{\frac{413A}{257A} \cdot 177.2A} = 12,15\Omega \quad (1)$$

Snaga koju sinhroni motor uzima iz mreže u toku oglada pod opterećenjem se može proceniti iz tačke na dnu Mordejeve krive (2)

$$P = \sqrt{3} \cdot 5910V \cdot 324A = 3,317MW \quad (2)$$

Ugao snage sinhronog motora, neposredno pred ispadanje iz sinhronizma se može odrediti iz (3)

$$\sin(\delta) = \frac{P \cdot X_s}{3E_{f1} \cdot U_{s,f}} \quad (3)$$



gde je elektromotorna sila određena linearnom aproksimacijom krive magnećenja (4)

$$E_{f1} = \frac{6000\text{V}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_{f1}}{177,2\text{A}} = 3910\text{V} . \quad (4)$$

Izračunati granični ugao snage iznosi  $\delta = 90^\circ$ , što je u skladu sa teorijom rada sinhronne mašine, što znači da će ovaj uprošćeni način analize dati dobre rezultate. Dalje se postavlja pitanje pri kom napojnom naponu dolazi do ispada iz sinhronizma ove sinhronne mašine, kada radi pod datim teretom, i pre poremećaja napojnog napona se nalazi u radnoj tački na dnu Mordejeve krive. Minimalna vrednost napojnog napona se može odrediti iz izraza (5)

$$U_{s,f \min} = \frac{P \cdot X_s}{3E_{f2}} , \quad (5)$$

gde je elektromotorna sila određena sa (6)

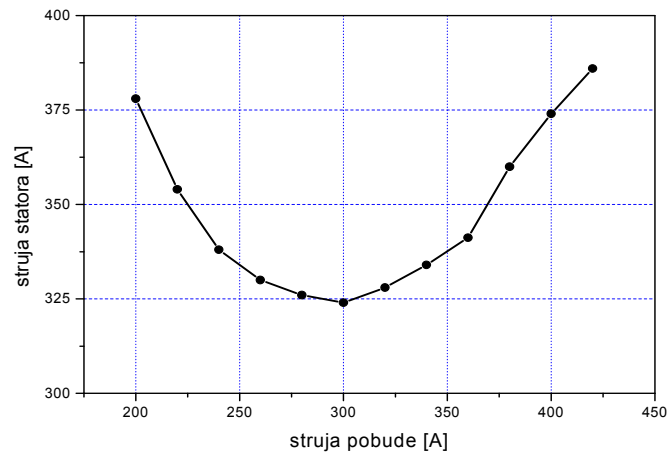
$$E_{f2} = \frac{6000\text{V}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_{f2}}{177,2\text{A}} = 5865\text{V} . \quad (6)$$

Pri tome se smatra da je postignut granični ugao snage od  $90^\circ$ . Odgovarajuća izračunata vrednost minimalnog faznog napojnog napona iznosi  $U_{s,f \min} = 2290\text{V}$ , odnosno 63% nominalnog faznog napona. Budući da kontakterija napajana naizmeničnim naponom ne radi pouzdano ispod 80% nominalnog napojnog napona, podnaponska zaštita (ABB-ovo rele za motornu zaštitu) je podešena na 80%  $U_n$  a granica pri kojoj forsiranje počinje da deluje na 85%  $U_n$ . Forsiranje pobude svojim delovanjem diže pobudnu struju na 450A, i time dalje diže (s obzirom na reaktansu kratkog spoja lokalne distributivne mreže u tački priključenja) napon mreže za 4,5%. Gornja granica merenog napona statora, pri kojoj funkcija forsiranja pobudne struje prestaje da bude aktivna, je podešena na 95%.

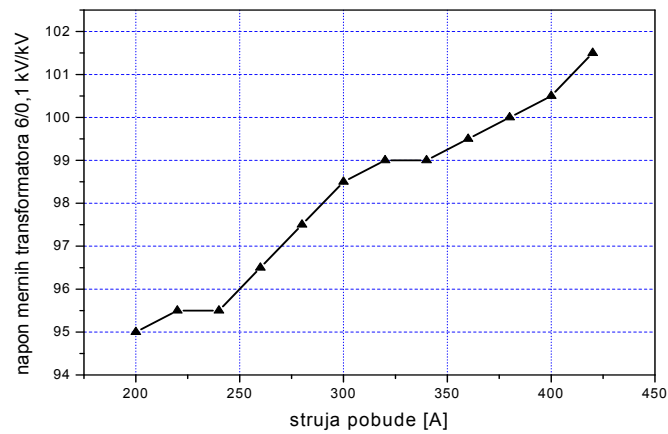
## 5. Eksperimentalni rezultati

Opisani i realizovani sistem pobude je primenjen na sinhronom motoru (SM) nazivne snage 3,5 MW u pogonu Tehnogasa u Merošini. Pri ispitivanju rada pobudnog sistema je snimljen Mordejev dijagram za nazivnu snagu motora, prikazan na slici 6. Pri tome je napojni napon varirao oko nominalne vrednosti, zavisno od toga da li je iz napojne mreže 6 kV uzimana reaktivna snaga ili je ista generisana od strane mašine. Odgovarajuća zavisnost napona lokalne mreže od veličine pobudne struje motora je prikazana na slici 7. Slike

6 i 7 jasno prikazuju mogućnost upotrebe ovog sinhronog motora za regulaciju lokalnog napona mreže 35 kV. Na slici 8 je dalje prikazan deo vremenskog toka struje pobudnog namota u toku zaleta. Jasno se vidi trenutak postizanja sinhronizma (bez uključene pobude, znači zbog reluktantnog momenta) posle 15 sekundi, kao i trenutak uključenja ispravljača i pojava jednosmerne pobudne struje.

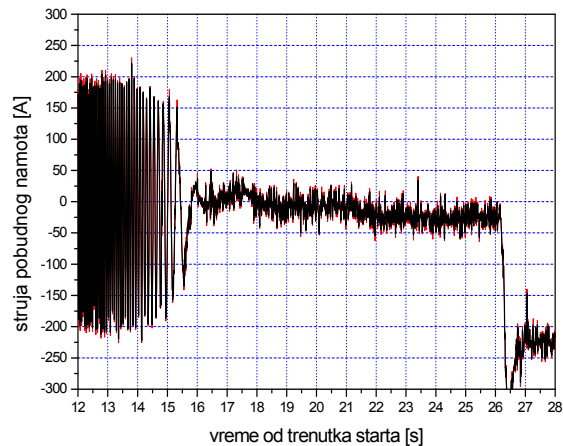


Slika 6. Zavisnost struje statora od struje pobude SM, pri nazivnoj snazi



Slika 7. Zavisnost lokalnog napona od struje pobude. Vidi se uticaj na napon 35 kV mreže

Sa slike 7 se vidi da se može ovaj sinhroni motor upotrebiti za popravljjanje naponskih prilika u lokalnoj distributivnoj mreži.



Slika 8. Vremenski dijagram pobudne struje u toku starta. Struja pobude je negativnog predznaka na ovom snimku

## 6. Zaključak

U radu je prikazan realizovani pobudni sistem sinhronog motora snage 3,5MW baziran na PLC uređaju. Osnovna regulaciona petlja (upravljanje strujom pobude) je zatvorena preko PLC-a. Pomoćne funkcije, kao što je niz sekvenci pri startu i stopu motora, funkcija forsiranja pobudne struje, kontrola uspešnosti zaletanja, zaštita od asinhronog rada i zaštita od prevelike pobudne struje su takođe implementirane na PLC-u. Prednosti korišćenja PLC-a se ogledaju u brzini izrade specifičnog rešenja, fleksibilnosti podešavanja zaštitnih i kontrolnih funkcija, pogodnoj ceni, većoj pouzdanosti, mogućnosti komunikacije sa nadređenim (eventualnim) grupnim regulatorom pobude, kao i lako integrisanje u sistem nadzora i upravljanja fabričkim postrojenjem. Predmetni sinhroni motor bi mogao biti uključen u lokalni "smart grid" sistem, mada je trenutna situacija takva da lokalna elektrodistribucija od vlasnika postrojenja sa sinhronim motorom očekuje samo da preuzima aktivnu energiju pri jediničnom faktoru snage. Uostalom, tako je trenutno naš tarifni sistem i koncipiran, u pogledu preuzimanja reaktivne snage. Usluga injektovanja reaktivne snage, radi popravke ili podržavanja naponskih prilika još nije prepoznata, ali to vreme neminovno dolazi, jer "smart grid" koncept predstavlja budućnost. Opisana pobuda je brzo i uspešno puštena u pogon u objektu Tehnogasa u Merošini, umesto starog sistema za upravljanje pobudom istočnonemačke proizvodnje VEB.

## Literatura

- [1] Bedienanweisung für statische Erregereinrichtung Typ EHLB/ENLB, 1975, VEB Elektro-maschinenbau Sachsenwerk, Drezden.
- [2] A-C MACHINES, M. Liwshitz-Garik, C.C. Whipple, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1961.
- [3] A. Hedes, N. Muntean, I. Boldea, C. Tudoran, O. Muntean, R. Babau, S. Scridon, "Automatic Control System Of A Synchronous Motor Excitation", Electronics, VOL. 11, No. 1-2, December 2007. pp 66 – 70
- [4] H. Romanowitz, E. Muljadi, C.P. Butterfield, R. Yinger, "VAR Support from Distributed Wind Energy Resources", World Renewable Energy Congress VIII, Denver, Colorado, August 29–September 3, 2004
- [5] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, M. Suter, "Network integration of distributed power generation", Journal of Power Sources, No 106 ,2002, pp 1–9

**Abstract:** This paper presents a 3.5 MW synchronous motor excitation system reconstruction. In the proposed solution programmable logic controller is used to control motor, which drives the turbo compressor. Comparing to some other solutions that are used in similar situations, the proposed solution is superior due to its flexibility and usage of mass-production hardware. Moreover, the implementation of PLC enables easy integration of the excitation system with the other technological processes in the plant as well as in the voltage regulation of "smart grid" system. Also, implementation of various optimization algorithms can be done comfortably and it does not require additional investment in hardware. Some experimental results that depict excitation current during motor start-up, as well as, measured static characteristics of the motor, were presented.

**Keywords:** static excitation system, synchronous motor, techno-economic regulator, asynchronous working mode.

## Programmable Logic Controller Based Synchronous Motor Excitation System

Rad primljen u uredništvo 14.09.2011. godine  
Rad prihvaćen 14.11.2011. godine