Modernizacija sustava upravljanja istosmjernim električnim pogonom isplačne pumpe na EMSCO-605 bušaćoj garnituri

Retrofitting of mud pump DC electrical drive control system on EMSCO-605 LAND-BASED drilling rig

dr. sc. Sandra Stanković, mag. ing.
Asistentica na Akademiji tehničko-vaspitačkih strukovnih studija – Odsek Niš
dr. sc. Mihael Cipek, dipl. ing.
Izvanredni profesor na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
dr. sc. Danijel Pavković, dipl. ing.
Redoviti profesor na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu



Ključne riječi: duboko bušenje; balansiranje električnog opterećenja isplačne pumpe; regulacija uzbude istosmjernih motora; terenski testovi.

Keywords: deep drilling; mud pump electrical load balancing; direct current motor excitation control; field tests.

Sažetak

U starijim sustavima isplačnih pumpi koje koriste istosmjerne električne strojeve s nezavisnom uzbudom, poput onog koji je nedavno moderniziran na EMSCO 605 bušaćoj garnituri, jedan energetski pretvarač odgovoran je za napajanje armatura dvaju istosmjernih strojeva spojenih paralelno i korištenih za upravljanje brzinom vrtnje pogona isplačne pumpe. Zbog specifične topologije takvog elektromotornog pogona, nije moguće uravnotežiti potrošnju električne energije za svaki od motora isključivo putem regulacije napona armature. Stoga, ovaj rad predstavlja dizajn sustava regulacije (balansiranja) električnog opterećenja kroz adaptaciju struje uzbude jednog od motora. Učinkovitost predloženog dizajna regulacijskog sustava potvrđena je eksperimentalno na bušaćoj garnituri EMSCO 605 tijekom puštanja u rad i ispitivanja na terenu u sklopu izrade geotermalne bušotine.

Abstract

In mature mud pump systems using independent-excitation direct-current electrical machines, such as the one recently retrofitted on EMSCO-605 deep drilling rig, a single power converter is responsible for supplying the armatures of direct-current machines connected in parallel and used for mud pump speed control. Due to the specific topology of such electrical drive, it cannot independently balance the electrical power drawn for each of the motors via armature voltage control only. To this end, this paper presents the design of an electrical load balancing feedback control system through adaptation of the excitation current of one of the motors. The effectiveness of the proposed control system design is verified experimentally on the EMSCO 605 deep drilling rig during commissioning and field tests amidst the production of a borehole for a geothermal well.

1. Uvod

Električni pogoni velike snage klasificiraju se kao oni čija je nazivna snaga u rasponu od približno 1 MW do 10 MW i više (Kouro, Rodriguez i drugi, 2012). U primjenama koje zahtijevaju takve elektromotorne pogone, odluka o djelomičnoj ili potpunoj modernizaciji pogona umjesto kupnje potpuno novih rješenja po principu „ključ u ruke“ može rezultirati značajnim uštedama. Ovo je posebno važno ako se uzme u obzir da električni strojevi velike snage lako mogu imati životni ciklus od preko 30 godina, koji se može dodatno produljiti kroz modernizacijske programe (Verma, Dick i drugi, 2013). Pritom je jedan od glavnih problema u upravljanim elektromotornim pogonima da je tipični životni vijek pretvarača snage električnog pogona oko 10 godina kontinuiranog rada (Rodriguez i Amaratunga, 2008), dok je zajamčeni period opskrbe rezervnim dijelovima od strane proizvođača opreme nakon prestanka proizvodnje dane linije uređaja također ograničen (tipično oko 10 godina nakon „gašenja“ dane linije proizvoda) kako sugeriraju Verma, Dick i drugi (2013). Nadalje, troškovi održavanja mogu igrati ključnu ulogu u izboru između modernizacije i kompletne zamjene, kao što je slučaj s istosmjernim (DC) električnim pogonima (Silvestre, Nicoletti i drugi, 2014). U svim tim slučajevima na operateru je da procijeni koja je vrsta nadogradnje najpovoljnija u smislu cijene, usluge, pouzdanosti elektromotornog pogona i dostupnosti odgovarajućih rješenja (Verma, Dick i drugi, 2013).

Istosmjerni elektromotorni pogoni ranijih generacija, koji se još uvijek koriste na kopnenim garniturama za duboko bušenje predstavljaju značajne izazove koji utječu i na radnu učinkovitost i na ekonomsku održivost. Konkretno, istosmjerni motori tipično imaju veće gabarite, manju učinkovitost i veće zahtjeve na održavanje u usporedbi s modernim izmjeničnim motorima (Deur & Pavković, 2011), što posljedično rezultira povećanom potrošnjom energije i operativnim troškovima uz češće remonte, te većim ugljičnim otiskom bušaćih garnitura opremljenim istosmjernim pogonima ranijih generacija. Modernizacija u sektoru proizvodnje nafte i plina je neminovan proces kako bi sektor mogao i dalje biti konkurentan usprkos novim izazovima (Longwell 2002). U području pogonske tehnike ovo uključuje sve veći naglasak na suvremenim izmjeničnim pogonima opremljenim frekvencijskim pretvaračima koji nude značajne ekonomske i tehničke prednosti (Bertoldi i Kuehneund, 2000). Navedene prednosti primjene izmjeničnih elektromotornih pogona uključuju poboljšanu energetsku učinkovitost, smanjeno održavanje, znatno bolje upravljanje brzinom vrtnje i okretnim momentom pogonskih motora te manjim ugljičnim otiskom (Saidur, Mekhilef i drugi, 2012), što u konačnici dovodi do nižih troškova životnog ciklusa i veće produktivnosti takvih moderniziranih bušaćih garnitura. Konkretno, u takvim reguliranim elektromotornim pogonima potrošnja električne energije motora se može smanjiti za 30 – 60% u usporedbi sa neupravljivim elektromotornim pogonima, što rezultira ogromnim potencijalom za uštedu energije budući da se u industrijskim elektromotornim pogonima troši više od 60% trenutnih potreba za električnom energijom (Saidur, Mekhilef i drugi, 2012).

Najjednostavnije i najfleksibilnije nadogradnje u sustavima elektromotornih pogona su one koje se odnose na servisni i upravljački softver te njegove specijalizirane funkcije (Verma, Dick i drugi, 2013). Ovo je posebno važno za pogone koji trebaju zadovoljiti preciznu regulaciju brzine vrtnje u prisutnosti naglašene elastičnosti i trenja u prijenosnom mehanizmu (Pavković, Šprljan i drugi, 2021), ali i za bilo koju drugu vrstu nelinearnosti unutar elektromotornog pogona koja degradira njegove upravljačke performanse. Jedan od najzahtjevnijih problema u sustavima dubokog bušenja je koordinirano upravljanje pumpama za cirkulaciju bušaće isplake (isplačne pumpe). U takvim primjenama elektromotorni pogoni trebaju biti regulirani po brzini vrtnje kako bi se održala potrebna brzina strujanja (volumni protok) isplake u prisustvu značajnih pulzacija tlaka zbog primjene klipnih pumpi koje se koriste u takvim teškim uvjetima rada. Ublažavanje navedenih pulzacija tlaka može se postići sinkronizacijom kuta zakreta vratila motora pojedinih pumpi (Cipek, Pavković i drugi, 2023) pa su takva komercijalna rješenja već dostupna za suvremene upravljane elektromotorne pogone klipnih pumpi (Bentec GmbH, 2016).

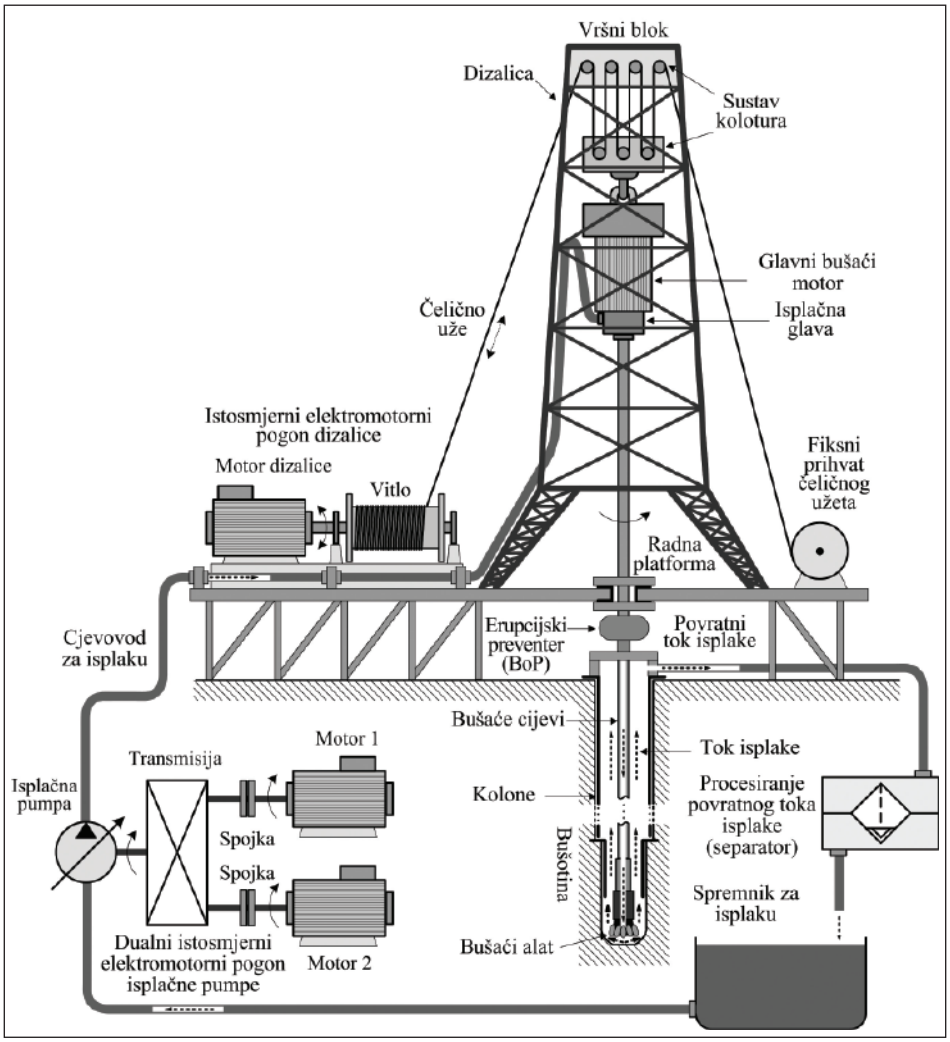
Međutim, neki elektromotorni pogoni sustava pumpi ranije generacije nisu opremljeni sustavima upravljanja koji se temelje na mjerenju brzine i položaja vratila motora, već se umjesto toga oslanjaju na tzv. upravljanje brzinom vrtnje motora pumpi u otvorenom krugu kroz upravljanje naponom armature pogonskih istosmjernih elektromotora. Takvi elektromotorni pogoni zasnovani na istosmjernim elektromotorima velike snage, mogu se još uvijek naći u primjeni upravo u pogonima pumpi, kao na primjer na kopnenim garniturama za duboko bušenje (CROSCO 2023). Konkretna bušaća garnitura EMSCO-605 koja se raz-

matra u ovom radu nedavno je prošla ciklus modernizacije sustava isplačnih pumpi. Pritom je provedena zamjena dotrajalih energetskih pretvarača istosmjernih elektromotornih pogona suvremenijim kompatibilnih rješenjem (Siemens AG, 2023). U danom rješenju, energetski pretvarač je konfiguriran za upravljanje brzinom vrtnje pogona pumpe u otvorenom krugu kroz upravljanje naponom armature uz istodobnu fiksnu regulaciju struja uzbuda obaju motora. U navedenoj primjeni koja je topološki identična izvornom rješenju, armature dvaju nezavisno uzbuđenih istosmjernih strojeva spojene su paralelno i napajaju se iz jednog tiristorskog energetskog pretvarača velike snage. To čini uravnoteženje opterećenja između pojedinačnih istosmjernih motora vrlo zahtjevnim zadatkom, osobito ako takvo rješenje ne nudi proizvođač energetskog pretvarača unutar svog dijapazona softverskih nadogradnji. Potonji slučaj je predmet ovog rada.

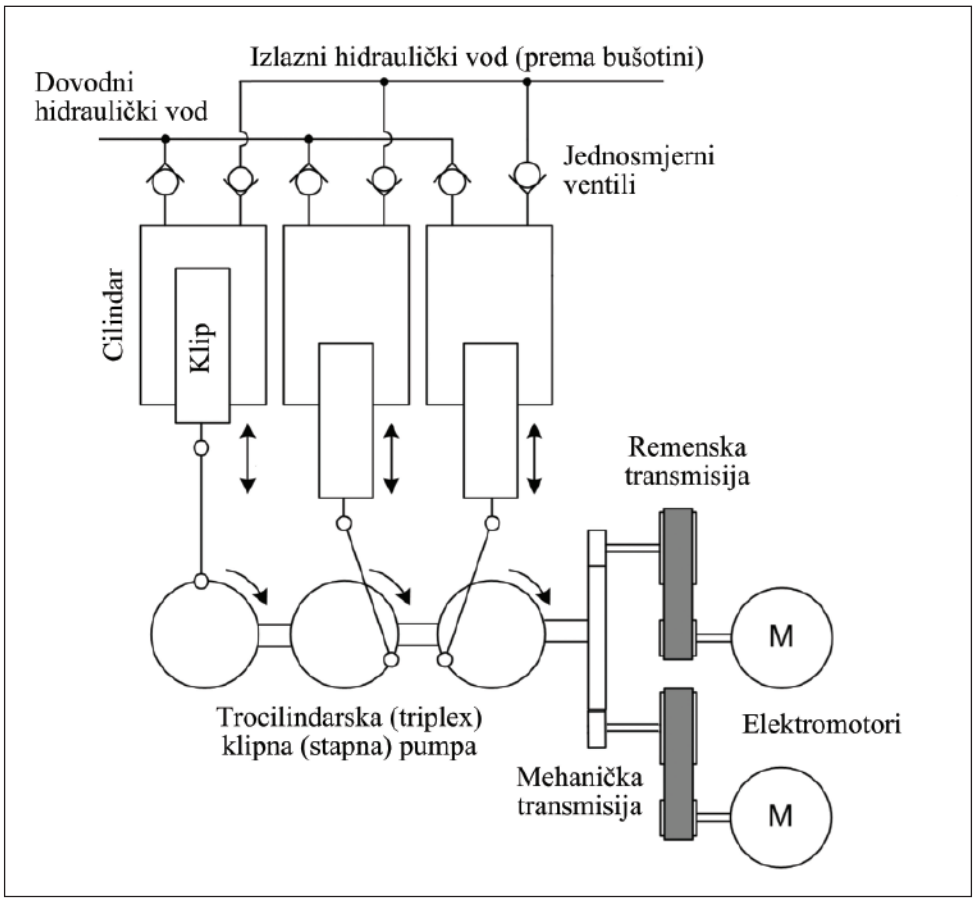
Konkretno, u radu se prikazuje razvoj i implementacija rješenja za balansiranje struja armatura u dvomotornom pogonu s istosmjernim električnim strojevima za pogon isplačne pumpe primjenom dodatne regulacijske petlje s proporcionalno-integralnim (PI) regulatorom. Regulator prilagođava struju uzbude jednog istosmjernog stroja, čime se modificira njegova statička karakteristika (ovisnost brzine vrtnje o struji armature) te se posljedično prilagođava struja armature danog motora kako bi se postigla jednaka raspodjela strujnog opterećenja između dvaju istosmjernih električnih strojeva koji se simultano koriste za pogon pumpe.

2. Sustav cirkulacije isplake na garnituri EMSCO-605

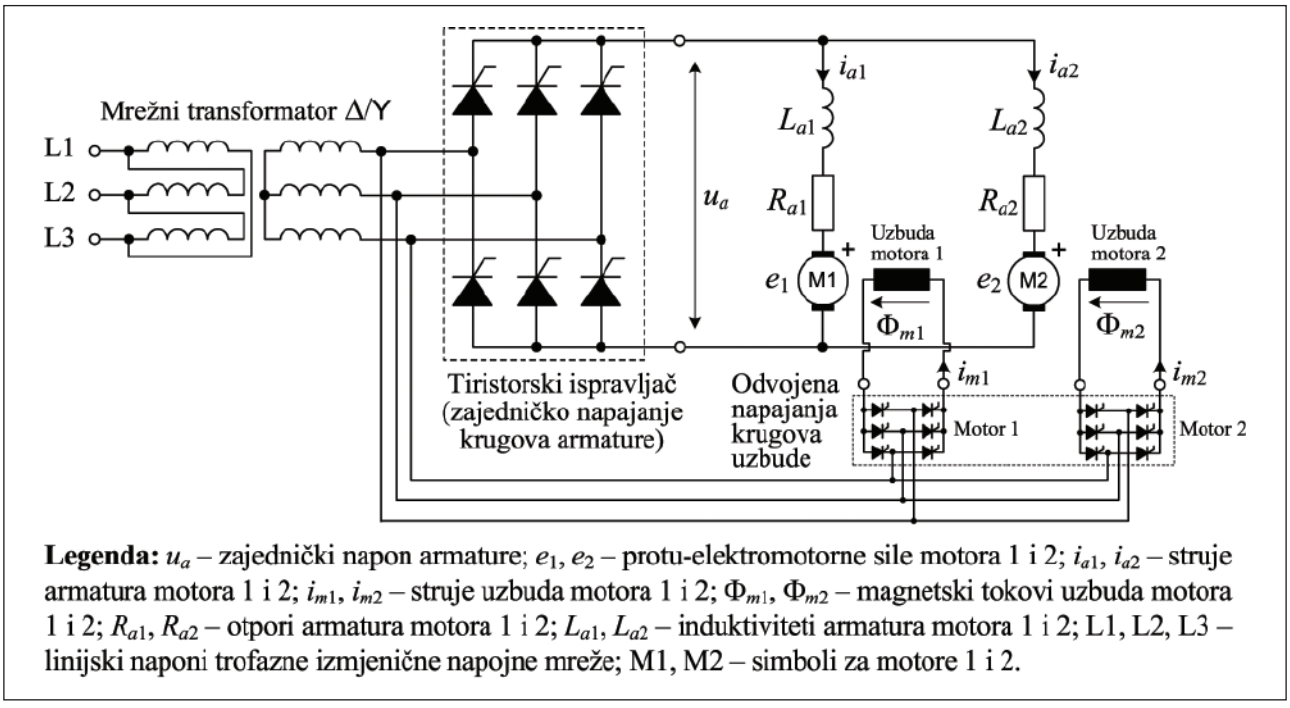
Na slici 1 shematski je prikazana kopnena bušaća garnitura koja sadrži glavni elektromotorni ili hidraulički pogon velike snage (preko 600 kW) kojim se upravlja brzinom vrtnje sustava bušaćih cijevi i alata na dnu bušotine (Jansen i van den Steen, 1995). Kombinirano



Slika 1. Shematski prikaz kopnene bušaće garniture opremljene sustavom cirkulacije isplake temeljenom na dualnom elektromotornom pogonu.



Slika 2. Shematski prikaz pogonskog sustava isplačne pumpe pogonjene s dva elektromotora.



Legenda: u_a – zajednički napon armature; e_1, e_2 – protu-elektromotorne sile motora 1 i 2; i_{a1}, i_{a2} – struje armatura motora 1 i 2; i_{m1}, i_{m2} – struje uzbuda motora 1 i 2; Φ_{m1}, Φ_{m2} – magnetski tokovi uzbuda motora 1 i 2; R_{a1}, R_{a2} – otpori armatura motora 1 i 2; L_{a1}, L_{a2} – induktiviteti armatura motora 1 i 2; L1, L2, L3 – linijski naponi trofazne izmjenične napojne mreže; M1, M2 – simboli za motore 1 i 2.

Slika 3. Topologija tiristorskog pretvarača snage za dvojni istosmjerni elektromotorni pogon sa zajedničkim napajanjem armatura i odvojenim napajanjima uzbudnih krugova.

Tablica 1. Nominalni iznosi parametara GE752 nezavisno uzbuđenog DC motora.

Nazivni napon armature	Nazivna struja armature	Nazivna snaga	Nazivna brzina vrtnje	Nazivna struja uzbude	Moment inercije motora
750 V	1050 A	800 kW	965 okr./min.	60 A	25 kgm^2

djelovanje bušaćeg pogona i električnog pogona dizalice (engl. „draw-works“) rezultira kontinuiranim prodiranjem alata pri čemu se torzijski moment bušaćih cijevi, brzina prodiranja bušaćeg alata i sila nasjeda alata moraju kontinuirano pratiti i regulirati u realnom vremenu (Pavković, Šprljan i drugi, 2021).

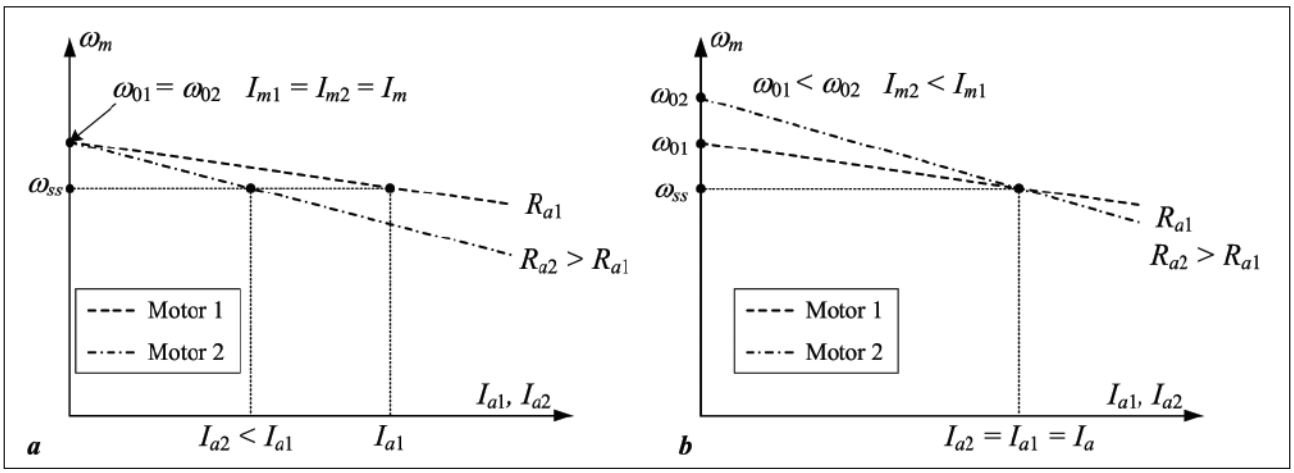
Tijekom procesa izrade bušotine, istosmjerni elektromotori velike snage pokreću klipne isplačne pumpe koje cirkuliraju bušaću isplaku kroz bušotinu (slika 2) čime se kontrolira tlak u bušotini i osigurava podmazivanje i hlađenje bušaćeg alata te uklanjanje otpada (čestica) na mjestu kontakta bušaćeg alata s dnom bušotine (Cipek, Pavković i drugi, 2023). Takvi istosmjerni pogoni velike snage još uvijek koriste tiristorske energetske pretvarače (Stemmler, 1994) pa se i razmatrano rješenje dvostrukog istosmjernog elektromotornog pogona isplačne pumpe također temelji na zajedničkom trofaznom tiristorskom ispravljaču velike snage (slika 3). Zajednički tiristorski pretvarač snage 1.6 MVA (Siemens AG, 2023) pritom napaja paralelno spojene armature dvaju nezavisno uzbuđenih istosmjernih strojeva koji pokreću klipnu isplačnu pumpu (National Oilwell Varco 2006), dok se uzbudni krugovi pojedinih elektromotora napajaju odvojeno, kao što je prikazano na slici 3. Elektromotori koji su nadograđeni novim sustavima energetskih pretvarača su „zreli“ General Electric GE752 nezavisno uzbuđeni istosmjerni strojevi (General Electric Co., 2005) čije su nominalne vrijednosti parametara navedene u tablici 1. Ovi istosmjerni strojevi se još uvijek koriste na terenu zbog svoje izdržljivosti i povoljnih radnih karakteristika.

3. Projektiranje upravljačkog sustava

U dvomotornom pogonu s paralelno spojenim armaturama koje se napajaju iz jednog izvora napajanja (napona armature u_a, slika 3) nije moguće balansirati struje armatura pojedinačnih motora koje nastaju zbog neusklađenosti njihovih otpora armature isključivo promjenom napona armature. Na slici 4a prikazane su statičke karakteristike pojedinih motora unutar dvomotornog pogona s paralelno spojenim armaturama kada otpori armatura motora 1 i 2 (R_{a1} i R_{a2}) nisu istih iznosa, odnosno kada je $R_{a2} > R_{a1}$, uz jednake stacionarne iznose struja uzbuda pojedinih motora ($I_{m1} = I_{m2} = I_m$). Budući da su vratila motora 1 i 2 spojena zajedno preko simetričnog prijenosnog mehanizma (slika 2), brzina vrtnje motora 1 jednaka je brzini vrtnje motora 2, odnosno njihove stacionarne brzine vrtnje su identične ($w_m = w_{ss}$) pri danom mehaničkom opterećenju. Međutim, za zadano mehaničko opterećenje postižu se različite vrijednosti stacionarnih struja armatura pojedinih motora ($I_{a1} > I_{a2}$ na slici 4a), odnosno istosmjerni motor s većim iznosom otpora armature vuče manju struju iz izvora napajanja kruga armature (napona u_a) i obratno. Uslijed toga, jedan od motora može imati značajno veću potrošnju, čime se posljedično povećavaju mehaničko opterećenje (okretni moment) motora i toplinski gubitci namota armature. Ovo bi pak dovelo do povećanja radne temperature te povezanih problema sa održavanjem zbog ubrzanog starenja izolacije namota zbog dodatnog zagrijavanja namota armature (Stone, 2013) te potencijalnih kvarova zbog preopterećenja u ležajevima (Brithinee, 1998).

Iz gornjeg primjera je vidljivo da je potrebno modificirati statičku karakteristiku (ovisnost brzine vrtnje o struji armature) jednog od motora kako bi se izjednačile struje armatura obaju motora ($I_{a1} = I_{a2} = I_a$). Slika 4b ilustrira slučaj kada se struja uzbude jednog od motora smanjuje ispod iznosa struje uzbude drugog motora ($I_{m2} < I_{m1}$). Vidljivo je da je u tom slučaju moguće korigirati karakteristiku motora 2 tako da struje krugova armatura obaju motora budu identične (slika 4b). Međutim, takvo balansiranje struja armatura motora kroz „ručnu“ korekciju struje uzbude jednog od motora nije praktično za primjenu na terenu.

Stoga je u radu dizajniran regulacijski sustav (sustav upravljanja u zatvorenoj regulacijskoj petlji) koji upravlja strujom armature motora 2 do postizanja „ciljanog“ iznosa struje armature koja odgovara iznosu struje armature motora 1. Ovo se provodi putem dodatne komande za slabljenje ili jačanje struje uzbude motora 2, a koju osigurava proporcionalno-integralni (PI) regulator (slika 5). Predloženi koncept, nazvan „strujno zrcalo“, podešava struju uzbude motora 2 na temelju mjernih signala struja armature i_{a1f} i i_{a2f}



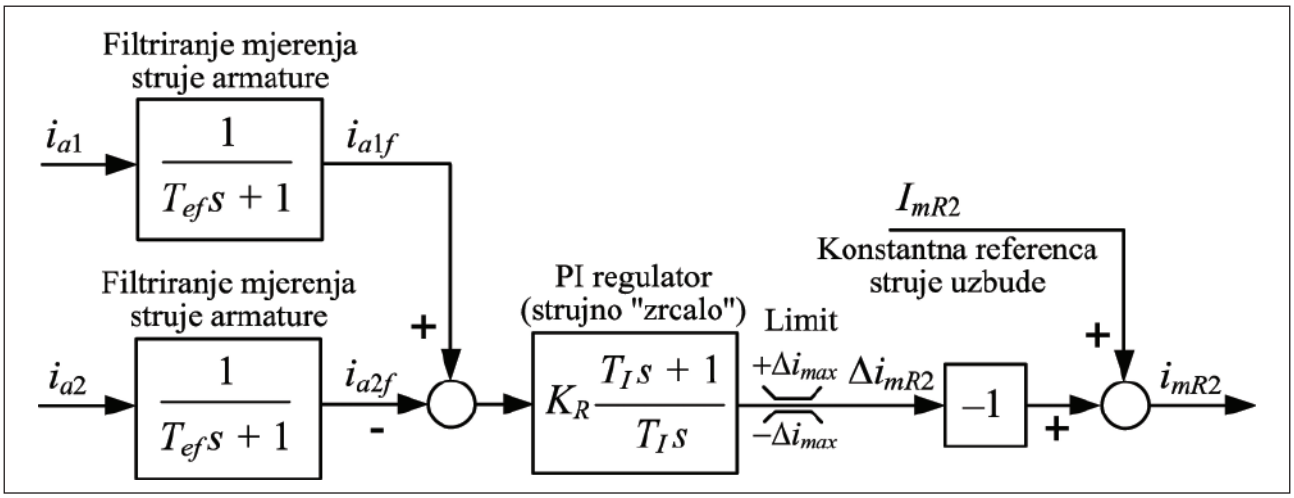
Slika 4. Statičke karakteristike dvomotornog pogona s paralelno spojenim armaturama i vratilima priključenim na zajedničku mehaničku transmisiju uz nejednake iznose otpora armature: slučaj jednakih struja uzbude (a) i slučaj nejednakih struja uzbude (b).

motora 1 i 2. U ovom regulacijskom krugu struja armature motora 1 (i_{a1}) može se smatrati ciljnom (referentnom) vrijednošću koju treba postići struja armature motora 2 (i_{a2}), a koja tvori petlju negativne povratne sprege u ovom regulacijskom sustavu. Upravljačka varijabla Di_{mR2} iz PI regulatora dodaje se zadanoj (fiksnoj) referentnoj vrijednosti struje uzbude I_{mR2} s negativnom predznakom te se ukupna referenca struje uzbude i_{mR2} zatim prosljeđuje regulacijskom sustavu struje uzbude motora 2. Prethodno spomenuta promjena predznaka upravljačke varijable Di_{mR2} PI regulatora povezana je s učinkom toka polja uzbude $F_{m2}(I_{m2})$ na namot armature, gdje smanjenje struje uzbude općenito rezultira povećanjem struje armature uz konstantne iznose brzine vrtnje i mehaničkog opterećenja (vidi sliku 4b). Podešenje PI regulatora koji realizira funkciju „strujnog zrcala“ temelji se na tzv. simetričnom optimumu (Schröder, 2007).

4. Rezultati ispitivanja na kopnenoj bušaćoj garnituri EMSCO-605

Predloženi sustav balansiranja struja armatura („strujnog zrcala“) testiran je na kopnenoj bušaćoj garnituri EMSCO-605 (CROSCO 2023) koja je korištena za proizvodnju geotermalne bušotine u blizini Legrada, Republika Hrvatska (slika 6a). Predmetna bušaća garnitura opremljena je dualnim istosmjernim elektromotornim pogonom isplačne pumpe (slika 6b) koji je nedavno moderniziran kroz zamjenu tiristorskih energetskih pretvarača ranije generacije suvremenim kompatibilnim rješenjem s digitalnim sustavom upravljanja.

Rezultati 30-minutnog testa puštanja u rad s uključenim sustavom za balansiranje struja armatura motora temeljenim na konceptu „strujnog zrcala“ pri-

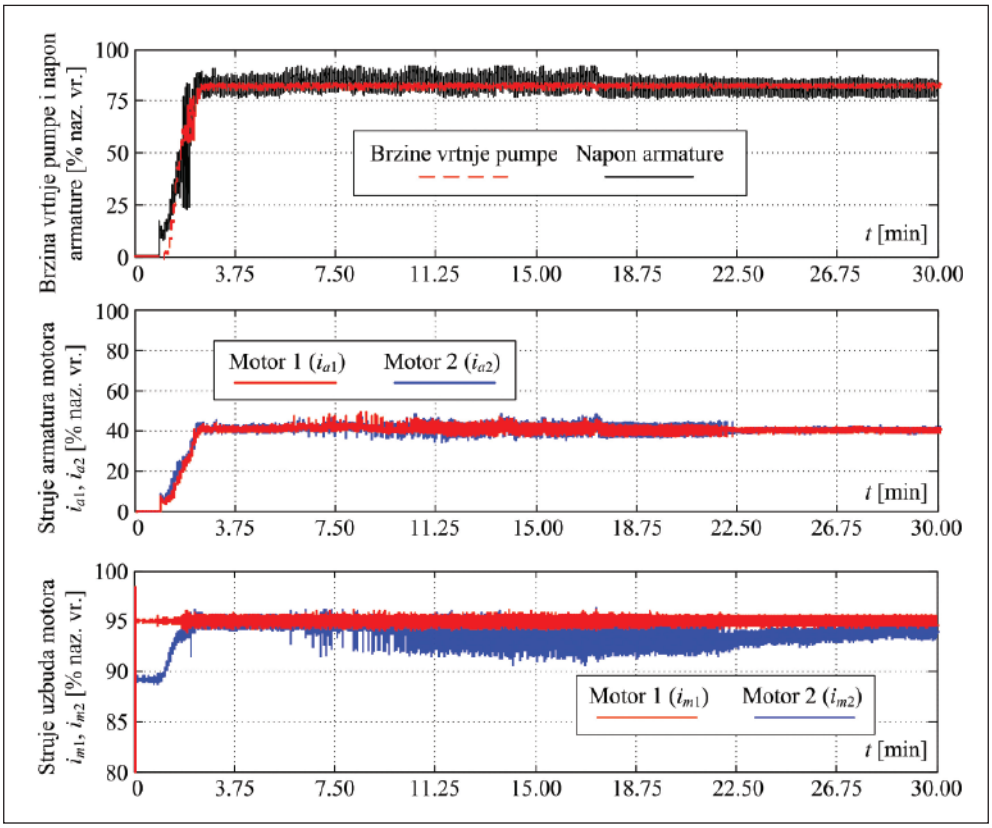


Slika 5. Blokovski dijagram regulacijskog sustava armaturnog „strujnog zrcala“ s PI regulatorom koji upravlja strujom uzbude jednog od motora (motora 2).



Slika 6. Fotografije bušaće garniture EMSCO-605 (a) i pogona isplačne pumpe (b).

kazani su na slici 7. Rezultati su dobiveni za postupno pokretanje pogona pumpe iz mirovanja s oba stroja spojena na zajednički napon armature (gornji graf na slici 7), što rezultira postupnim povećanjem struja armature motora i brzine vrtnje pogona (središnji i donji graf na slici 7). Struje armatura oba istosmjerna motora održavaju se na gotovo identičnim iznosima kroz djelovanje pomoćnog PI regulatora, odnosno sustava „strujnog zrcala", a koji djeluje na struju uzbude motora 2 te ju kontinuirano prilagođava tijekom rada elektromotornog pogona isplačne pumpe. Na ovaj način se kompenziraju neizbježne spore varijacije (povećanja) otpora armatura oba stroja zbog njihovog zagrijavanja nakon pokretanja iz „hladnog" stanja (vidi središnji i donji graf na slici 7). Test puštanja u rad potvrđuje da predloženi sustav „strujnog zrcala" radi stabilno i održava struje armatura pojedinih motora na identičnim iznosima.



Slika 7. Eksperimentalni rezultati dobiveni tijekom terenskih ispitivanja na bušaćoj garnituri EMSCO-605 u okolici Legrada, Republika Hrvatska.

5. Zaključak

U radu je predstavljen dizajn sustava za izjednačavanje (balansiranje) struja armatura elektromotora u sklopu moderniziranog dualnog istosmjernog pogona isplačne pumpe na bušaćoj garnituri EMSCO-605. U ovoj realizaciji pogona za cirkulaciju isplake ranije generacije, armature istosmjernih strojeva su spojene paralelno i napajaju se iz zajedničkog energetskog pretvarača, dok se njihovi krugovi uzbude napajaju odvojeno. Predloženi koncept „strujnog zrcala“ zasniva se na upravljanju strujom uzbude jednog od elektromotora čime se modificira njegova statička karakteristika i posljedično adaptira pripadna struja armature danog motora na iznos struje armature motora koji ima konstantnu struju uzbude.

Predloženi sustav balansiranja struja armature temeljen na konceptu „strujnog zrcala“ provjeren je eksperimentalno tijekom terenskih ispitivanja provedenih na komercijalnoj kopnenoj bušaćoj garnituri EMSCO-605 korištenu u izradi geotermalne bušotine u okolici Legrada, R. Hrvatska. Terenski rezultati su potvrdili da predloženi sustav balansiranja struja armature temeljen na „strujom zrcalu“ rezultira dosljednom i kontinuiranom prilagodbom uzbudne struje jednog od motora, čime se uravnotežuju struje armatura istosmjernih motora unutar dualnog elektromotornog pogona isplačne pumpe, čime se uravnotežuju mehanička opterećenja i zagrijavanje obaju motora u dvomotornim pogonu isplačne pumpe. Na ovaj način se povećava energetska učinkovitost pogona i balansira toplinsko naprezanje izolacije namota u pojedinim motorima, te se posljedično smanjuju zahtjevi na periodično održavanje i remont elektromotora.

Zahvala

Ovom prilikom ističemo da je istraživanje u radu podupro Europski fond za regionalni razvoj u okviru projekta KK.01.1.1.01.0009 (DATACROSS). Posebno se zahvaljujemo CROSCO – naftnim servisima d.o.o. na pruženoj logističkoj podršci tijekom ispitivanja razvijenog sustava „strujnog zrcala“ te Zdravku Kučanu, ing. i Josipu Miškoviću, dipl. ing. za njihovu tehničku i organizacijsku podršku tijekom rada na terenu.

Literatura

1. BENTEC GmbH Drilling & Oilfield Systems: Soft Pump System. Technical Data Sheet, 2016. https://www.bentec.com/pdf_files/flyer-soft-pump-system-en_323_1.pdf [pristupljeno 20. 12. 2024.]
2. BERTOLDI, P. & KUEHNEUND, G.: The European negotiated agreement to improve motor efficiency," in Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000.
3. BRITHINEE, W. P.: Electric Motor Maintenance & Repair for Long Term Efficiency. Energy Engineering, 1998, 95, 1, 22–30.
4. CIPEK, M., PAVKOVIĆ, D., BENIĆ, J. & ŠITUM, Ž.: Mud pump pressure pulsation control systems. In Proc. of International Conference on Fluid Power 2023, 14 p., Maribor, Slovenia, September 20–21, 2023.
5. CROSCO Integrated Drilling & Well Services: CROSCO EMSCO 605 2000 HP Drilling Rig. https://crosco.com/wp-content/uploads/2018/01/emsco605.pdf [pristupljeno 20. 12. 2024.]
6. DEUR, J. & PAVKOVIĆ, D.: Fundamentals of Electrical Drive Controls. – In UNESCO-EOLSS Joint Committee (Ed.): UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems, Ch. 6.39.21, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2011, 59 p.
7. GENERAL ELECTRIC CO.: Vertical Drilling Motor Type GE752. Maintenance Manual No. GEK–91584D, 2005.
8. KOURO, S., RODRIGUEZ, J., WU, B., BERNET, S. & PEREZ, M.: Powering the Future of Industry: High-Power Adjustable Speed Drive Topologies. IEEE Industry Applications Magazine, 2012. 18, 4, 26–39.
9. LONGWELL, H. J.: The Future of the Oil and Gas Industry: Past Approaches, Future Challenges. World Energy, 2002, 5, 3, 100–104.
10. NATIONAL OILWELL VARCO: F and FD Series Triplex Mud Pumps, Technical Brochure No. D391000237-MKT-001, 2006.
11. PAVKOVIĆ, D., ŠPRLJAN, P., CIPEK, M. & KRZNAR, M.: Cross-Axis Control System Design for Borehole Drilling based on Damping Optimum Criterion and utilization of Proportional-Integral Controllers. Optimization and Engineering, 2021, 22, 1, 51–81
12. RODRIGUEZ, C. & AMARATUNGA, G. A. J.: Long-Lifetime Power Inverter for Photovoltaic AC Modules. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55, 7, 2593–2601.
13. SAIDUR, R., MEKHILEF, S., ALI, M. B., SAFARI, A. & MOHAMMED, H. A.: Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16, 1, 543–550.
14. SCHRÖDER, D.: Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen. 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2007.
15. SIEMENS AG: SINAMICS DCM Base Drive panel instructions V-1.0, Extended Range: 1500A – 2800A DC 575V, 690V, 830V & 950V, 3-phase AC Rated Armature Supply. https://www.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/dc-converters.html [pristupljeno 20. 12. 2024.]
16. SILVESTRE, C. A., NICOLETTI, P. H. & MARCELINO, M. A.: Retrofitting industrial in electrical motor type: A matter of energy efficiency and reduction of maintenance. Scientific Research and Essays, 2014, 21, 906 – 923.
17. STONE, G. C.: Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings – A review. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20, 6, 2073–2080.
18. VERMA, M., DICK, B., PHARES, D. & BONDY, S.: Bringing New Life to High-Capacity Systems: Modernization of Legacy Adjustable-Speed Drives. IEEE Industry Applications Magazine, 2013, 19, 6, 66–74.