

Uvajanje reguliranih pogonov v podzemnih premogovnikih *

Gregor EDELBAHER, Branko FOŠNER

Izvleček: Uporaba reguliranih pogonov je postala z razvojem sodobnih postopkov vodenja izmeničnih elektromotorjev, ki za svoje delovanje ne potrebujejo mehanskega senzorja hitrosti, širše zanimiva tudi na področju podzemnih premogovnikov. Zaradi delovanja v eksplozijsko ogroženem okolju uporaba komercialno dobavljivih pretvornikov ni možna. Prispevek podaja možna področja in konkreten primer uporabe reguliranega pogona, ki je plod lastnega znanja, v premogovniku Velenje.

Ključne besede: brezsenzorsko vodenje, eksplozijsko nevarno okolje, asinhronski motor,

Uvod

Na področju podzemne proizvodnje premoga se uporablja vrsta procesnih naprav (rudniški kombajni, transporterji, črpalke, ventilatorji itd.), ki lahko le s svojo robustnostjo ustrezajo zahtevam procesa. Večina naprav je gnanih z asinhronskimi elektromotorji s kratkostično kletko, ki so konstrukcijsko enostavni, imajo dober izkoristek in so hkrati dokaj ceneni glede na ostale vrste elektromotorjev. Običajno so priključeni neposredno na električno omrežje in tako delujejo z bolj ali manj konstantno hitrostjo, za kar mehanski senzor hitrosti, ki bi negativno vplival na

robustnost pogona, ni potreben. Slabosti asinhronskega motorja (ASM) pa sta potrebna jalova moč za magnetenje in velik zagonski tok. Zagonski tok ASM, ki se zaganja neposredno iz električnega omrežja, doseže 5- do 7-kratno vrednost nazivnega toka [1]. Ustrezno temu morajo biti dimenzionirani tako električni viri kakor tudi električni vodniki.

Osnovno izhodišče je bilo razviti za premogovniške razmere primerno pretvorniško napravo v eksplozijsko varni oz. 'Ex' izvedbi, primerno za pogon obstoječih elektromotornih pogonov, ki ne bi imela negativnih lastnosti pogonov s konstantno hitrostjo in bi hkrati omogočala regulirano delovanje. Seveda zmanjšanje robustnosti pogona ni dopustno, zato uporaba dodatnega mehanskega senzorja hitrosti, ki je običajno potreben v reguliranih pogonih, ne pride v poštev. Tako bi z minimalnim vlaganjem dosegli največji možen ekonomski kot tudi tehnični učinek.

Takšna pretvorniška naprava omogoča tudi večjo integracijo motornih pogonov v informacijsko zanko procesa [2]. Analiza možnosti uporabe reguliranih pogonov s spremenljivo hitrostjo v podzemnih premogovnikih je pokazala širok spekter upo-

ravnosti. Osnovna področja uporabe so vse vrste transporterjev; od verižnih do transporterjev s trakom, črpalke za pripravo hidravličnega medija, črpalke za vodo kakor tudi prezračevanje jame.

Teorija delovanja

Teorija delovanja asinhronskega motorja je kompleksnejša kot pri enosmernem motorju, zato bo na tem mestu opisana zelo poenostavljeno. Bistveno je razumevanje osnovnega principa delovanja, podrobnejše opise pa je mogoče najti v literaturi [3], ki se z asinhronskim motorjem veliko ukvarja. V poenostavljenem modelu predstavimo ASM kot transformator z vrtljivim sekundarjem (rotorjem). Primarno navitje (stator) je priključeno na vir napajanja, skozi kratko sklenjeno rotorsko navitje pa teče inducirani sekundarni tok. Vrtilni navor je rezultat delovanja sekundarnih (rotorskih) tokov in magnetnega sklepa v zračni reži motorja. Statorska navitja so porazdeljena po statorju s ciljem proizvodnje sinusno porazdeljenega vrtilnega polja. Ko nanje priključimo trifazno izmenično napetost, nastane vrtljivo izmenično statorsko magnetno polje, ki zaradi medsebojnega delovanja z rotorskim magnetnim

Dr. Gregor Edelbaher, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko; Branko Fošner, univ. dipl. inž., Premogovnik Velenje, d. d., Velenje

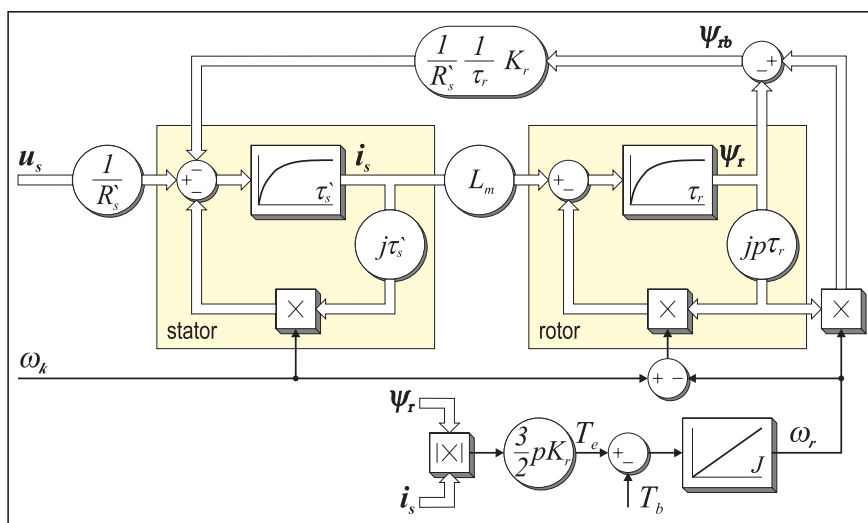
* Projekt je bil sofinanciran iz evropskega sklada za regionalni razvoj v okviru projektov z naslovom Avtomatizacija strojev in naprav, s podporo Ministrstva za razvoj Republike Slovenije in Premogovnika Velenje

poljem zavrti rotor. Vendar se rotor ne vrti natančno s frekvenco statorskega polja, temveč za njim zaostaja za t. i. slipno frekvenco.

Dinamični model asinhronskega motorja [3] v stacionarnih statorskih (a-b) koordinatah z izraženim statorskim tokom in rotorskim magnetnim sklepom prikazuje *slika 1*. Uporaba kompleksnih prostorskih kazalcev omogoča predstavitev ASM kot dinamičnega sistema samo tretjega reda

ter dopušča izčrpano ponazoritev motorja kakor tudi struktur vodenja s pomočjo signalnih grafov [4].

V prikazanem dinamičnem modelu je ω_r kotna hitrost rotorja, kompleksna prostorska kazalca $\psi_s = \psi_{sa} + j\psi_{sb}$ in $\psi_r = \psi_{ra} + j\psi_{rb}$ sta statorski in rotorski magnetni sklep, $u_s = u_{sa} + j u_{sb}$ in $i_s = i_{sa} + j i_{sb}$ sta statorska napetost in tok, T_e električni navor, T_b navor obremenjevanja, J vztrajnostni moment rotorja z bremenom, p pa je število polovih parov.



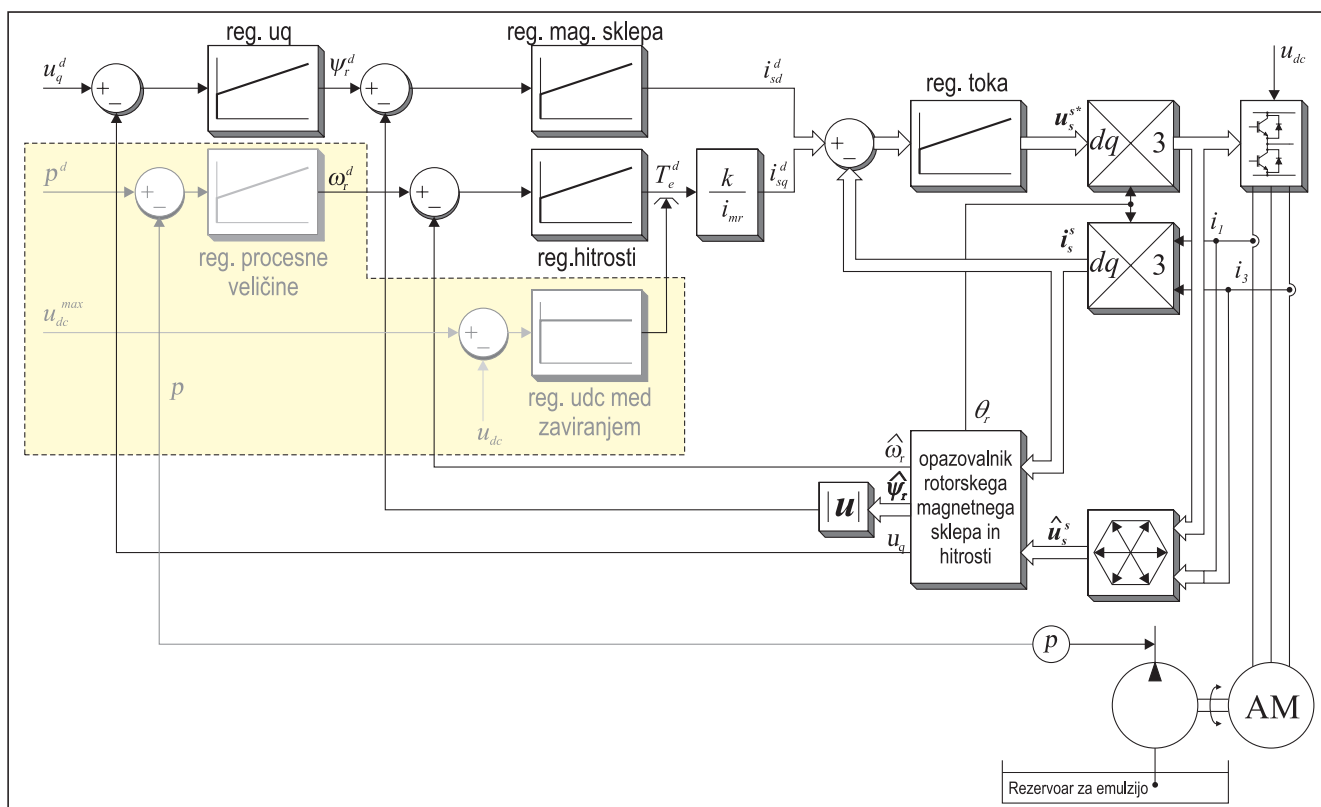
Slika 1. Kompleksni signalni diagram asinhronskega motorja

Vodenje brez senzorja hitrosti

Slika 2 predstavlja vektorsko regulacijo ASM z opazovalnikom rotorskega magnetnega sklepa, ki omogoča vodenje ASM brez senzorja hitrosti. Klasična vektorska regulacija je danes še vedno prva izbira v visoko zmogljivih pogonih, kjer so zahtevane dobre dinamične lastnosti ob visokem nivoju zanesljivosti delovanja, kar je še zlasti pomembno v industrijskih obratih.

Princip vektorske regulacije [5] temelji na tem, da so komponente toka, ki napajajo ASM, orientirane tako, da je mogoče medsebojno ločiti magnetilno komponento toka od komponente, ki skrbi za proizvodnjo navora. S tem je mogoče ločeno nadzirati navor in magnetni sklep, podobno kot pri tuje vzbujanem enosmernem motorju. Seveda je potrebno poznati orientacijo rotorskega magnetnega sklepa.

Vendar rotorskega magnetnega sklepa brez posega v konstrukcijo motorja ne moremo neposredno meriti. Zato ga določimo z uporabo matematičnega modela rotorja. Kot



Slika 2. Signalni diagram vektorskega vodenja asinhronskega motorja brez senzorja hitrosti

je razvidno s slike 1, je za njegovo določitev potrebno poznati statorski tok in rotorsko hitrost. Statorski tok je možno neposredni meriti, meritev hitrosti motorja pa je zaradi negativnih lastnosti, ki jih vnašata senzor hitrosti in dodatni signalni kabel, v premogovniških aplikacijah še posebej nezaželena.

V strokovni literaturi je poznanih več metod, ki omogočajo določitev rotorskega magnetnega sklepa brez senzora hitrosti [6]. V grobem jih delimo na modelne metode, ki temeljijo na inducirani napetosti, in na metode, ki izkoriščajo izražene lastnosti motorja. Pregled in primerjavo posameznih metod je moč najti v literaturi [7]. Modelnim metodam je skupno, da imajo težave pri nizkih hitrostih, kjer je inducirana napetost zelo majhna in se s tem izgubi povratna povezava med rotorjem in statorjem [8]. Problem je strukturni in se mu ni mogoče ogniti pri statorski frekvenci nič. Metode, ki izkoriščajo izraženosti oz. nepravilnosti rotorja motorja, teh težav nimajo, vendar morajo biti merljive, zato je njihova uporaba dokaj omejena.

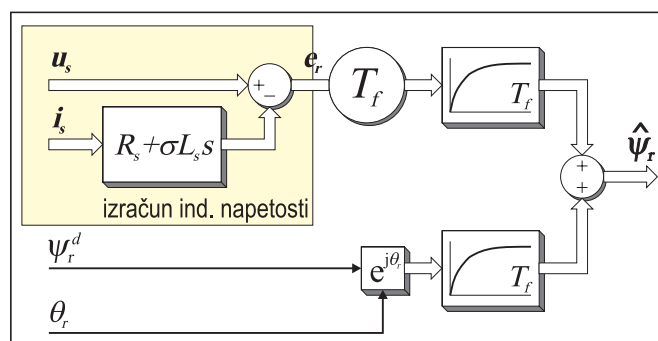
Pri uporabljenem vodenju je statorsko navitje napajano s tokom (napetostni pretvornik z digitalno regulacijo toka). Referenčna toka za vektorsko vodenje izračunata kaskadna regulatorja magnetnega sklepa in hitrosti. Odvisno od aplikacije se lahko osnovno vodenje razširi z dodatnim regulatorjem procesne veličine (npr. tlaka) in regulatorjem napetosti enosmerne zbiralke, kadar vračanje energije v električno omrežje ni možno.

Ocenjevanje rotorskega magnetnega sklepa

Uporabljeni ocenjevalnik rotorskega magnetnega sklepa, kot ga je predlagal Ohtani [9], zmanjšuje vpliv statorske upornosti pri nizki obratovalni hitrosti. Ocenjevalnik je zgrajen na osnovi vezja dveh členov prvega reda, ki iz inducirane napetosti in referenčnega rotorskega magnetnega sklepa izračuna ocenjen rotorski magnetni sklep in hitrost, tudi pri zelo nizkih hitrostih. Ocenjevalnik rotorskega magnetnega sklepa upo-

rablja parameter T_r , ki določa časovno konstanto obeh členov prvega reda. S postavitvijo parametra ocenjevalnika rotorskega magnetnega sklepa enako rotorski časovni konstanti se vpliv statorske upornosti na ocenjevanje rotorskega magnetnega sklepa zmanjša.

Struktura opazovalnika z obema členoma prvega reda je predstavljena na *sliki 3*. Inducirana napetost rotorja e_r je vhod v člen $T_r/(1 + T_r s)$, medtem ko je referenčni rotorski magnetni sklep ψ_{rd} vhod v drugi člen $1/(1 + T_r s)$. Vsota obeh členov predstavlja ocenjeno vrednost rotorskega magnetnega sklepa.



Slika 3. Ocenjevalnik rotorskega magnetnega sklepa

Kot izračunanega kompleksnega prostorskega kazalca rotorskega magnetnega sklepa predstavlja transformacijski kot θ_r med sinhronskimi d-q in stacionarnimi a-b koordinatami.

Ocenjeno mehansko hitrost rotorja izračunamo iz ocenjene električne kotne hitrosti (1) in ocenjene slipne frekvence (2) z uporabo izraza (3).

$$\hat{\omega}_e = \frac{\hat{\psi}_{ra} e_{rb} - \hat{\psi}_{rb} e_{ra}}{\hat{\psi}_{ra}^2 + \hat{\psi}_{rb}^2} \quad (1)$$

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{R_r}{L_r} L_m \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} \quad (2)$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{\hat{\omega}_e - \hat{\omega}_{sl}}{p} \quad (3)$$

Tabela 1. Osnovni podatki pretvornika

Nazivna moč	164 kW
Napajalna napetost	3 x 500 V AC
Nazivni tok	190 A rms
Največja dopustna napetost enosmerne zbiralke	800 V DC
Napajalna napetost	500 V AC
Stikalna frekvenca	5 kHz

Pretvorniška naprava

Frekvenčno spremenljivi izmenični pogoni so danes na voljo od par sto vatov pa do zelo velikih moči (okrog 15 MW). Za tako velike moči se pogosto uporabljajo naravno komutirani pretvorniki, ponavadi za pogon sinhronskih strojev. V pogonih do približno 750 kW pa se v glavnem uporabljajo tranzistorsko bazirani, pulznoširinsko modulirani pretvorniki z napetostnim izhodom, ki služijo za pogon asinhronskih motorjev. Osnovna topologija pulznoširinsko moduliranega pretvornika z napetostnim izhodom je prikazana na *sliki 4*.

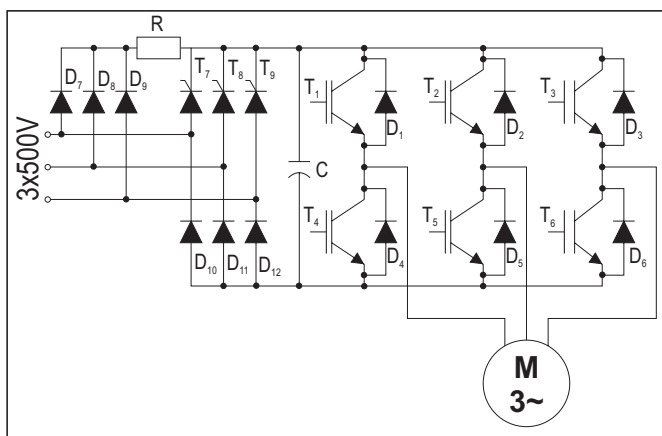
Naloga pretvorniškega mostiča je, da realizira želeno napetost na statorskem navitju motorja (oz. tok skozi navitje) s preklapljanjem stikalnih elementov T1–T6. Omrežna napetost se s pomočjo diod D7–D12

usmeri in zgledi s filtrsko stopnjo, ki povezuje omrežno in motorsko stran pretvornika.

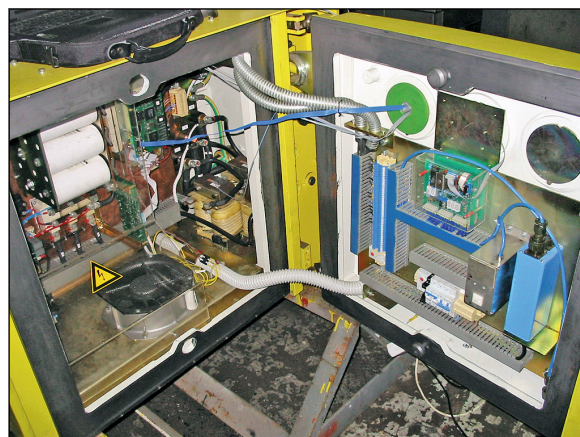
Slika 5 prikazuje izvedbo vodno hlajenega močnostnega pretvornika, primerne za uporabo v eksplozijsko nevarnem okolju. Ta je zasnovan na osnovi DSP-2 motornega regulatorja [10]. Nekaj najbolj osnovnih podatkov pretvornika podaja *tabela 1*.

Delovanje

Izmed različnih možnih aplikacij je bila izbrana oprema visokotlačne črpalke (*slika 6*) za proizvodnjo hidravličnega medija za vodenje odkopnega podporja. Procesna shema sistema je podana na *sliki 7*. Nadzor



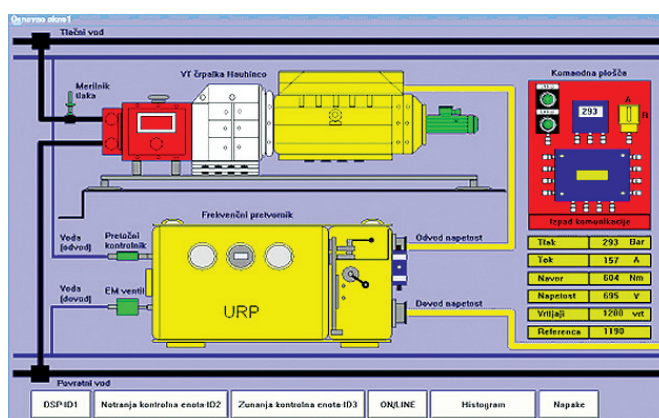
Slika 4. Osnovna topologija pulznoširinsko moduliranega pretvornika



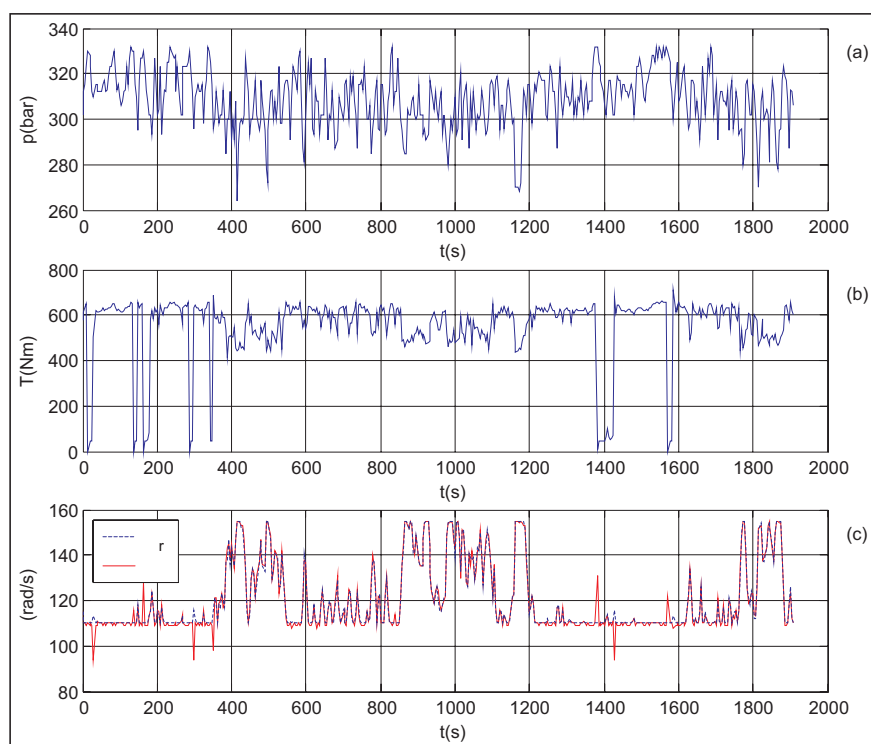
Slika 5. Izvedba možnostnega pretvornika v eksplozijsko varnem Ex-ohišju



Slika 6. Hidravlična črpalka Hauhinco 3K125-50



Slika 7. Daljinski nadzor sistema



Slika 8. Grafični prikaz delovanja

sistema z vsemi pomembnimi parametri je bil možen iz nadzornega centra. Naloga vodenja sistema je bila vzdrževanje konstantnega tlaka (310 bar) hidravličnega medija (slika 8a). Zaradi visokih dinamičnih zahtev hidravličnega omrežja je bilo potrebno zagotoviti dovolj visoko dinamiko tlačnega regulatorja. Izhod iz tlačnega regulatorja je uporabljen za regulacijo mehanske hitrosti (slika 8c) in navora (slika 8b) motorja. Dopustno področje delovanja je, zaradi izvedbe mazanja črpalke, omejeno med 1000 in 1500 1/min.

Odzivnost regulatorja je bila primerna spremembi tlaka emulzije v omrežju (slika 8). V primeru zadostne količine medija, ki je bil proizveden z eno črpalko (210L/min), je regulacija tlaka obvladovala razmere (desni del diagrama). Ko je bila poraba večja, je tlak padal, četudi so bili obrati EM maksimalni. V takšnem primeru je bilo potrebno vključiti dodatno črpalko, s čimer se je potreba regu-

lirane črpalke zmanjšala in je obratovala z minimalnimi vrtljaji.

Zaključek

Obstaja več razlogov, ki narekujejo uporabo reguliranih motornih pogonov v rudniških aplikacijah. V težkih rudniških razmerah so še posebej uporabni regulirani pogoni brez mehanskega senzorja hitrosti. Eden izmed glavnih razlogov je znižanje porabe električne energije in povečanje zanesljivosti delovanja glede na izvedbe z mehanskim senzorjem hitrosti.

Iz navedenega je razvidno, da je bil pričakovani cilj z izdelanim in preskušenim pretvorniškim sistemom na izbranem objektu kljub nekaterim omejitvam dosežen. To se kaže predvsem v zmanjšanju zagonskega toka EM črpalke, zmanjšanju porabe električne energije, povečanju življenjske dobe črpalke ter zmanjšanju kvarnih tlačnih konic v omrežju, ki nastajajo pri vključevanju obtočnega načina delovanja črpalke pri doseganju zelenega tlaka v klasičnem načinu obratovanja.

Viri

- [1] I. Zagradišnik, B. Slemnik. Električni rotacijski stroji. Maribor: FER, 2001. ISBN 86-435-0382-7.
- [2] Field oriented control in digital implementation, a stable platform for drives in future mechatronics applications. Schumacher, W. Virginia, USA: s. n., november 2003. IECON 2003. Str. 1003–1007.
- [3] D. Dolinar, P. Jereb. Splošna teorija električnih strojev: izbrana poglavja iz dinamičnega modeliranja. Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 1995.
- [4] The representation of ac machine dynamics by complex signal flow graphs. Holtz, J. Junij 1995, IEEE Transactions on Industrial Electronics, zv. 42(3), str. 263–271.
- [5] Leonhard, W. Control of Electric Drives. 3. izdaja. Berlin: Springer Verlag, 2001. ISBN 3-540-41820-2.
- [6] Vas, P. Sensorless vector and direct torque control. S. l.: Oxford University Press, 1998.
- [7] Holtz, J. Methods for Speed Sensorless Control of AC Drives. [Ured.] A. Kawamura, K. Matsuse, K. Rajashekera. Sensorless Control of AC Motor Drives. S. l.: IEEE Press, 1996, str. 21–29. ISBN 0-7803-1046-2.
- [8] Brezsenzorska regulacija asinhronskega motorja za nizke hitrosti. G. Edelbacher, K. Jezernik. 2003, Elektrotehniški vestnik, zv. 70 (5), str. 261–266.
- [9] Ohtani, T. Vector control of induction motor without shaft encoder. [red.] A. Kawamura, K. Matsuse, K. Rajashakera. Sensorless control of AC motor drives. 1996, str. 105–112.
- [10] Programming of the DSP2 board with the Matlab/Simulink. D. Hercog, M. Ćurkovič, G. Edelbacher, E. Urlep. Maribor, Slovenija: IEEE, 2003. IEEE ICIT 2003, str. 709–713.

Control of Induction Machines in Mining Applications

Abstract: A power inverter applying a speed-sensorless induction-motor control is presented in the paper. It was designed with the aim to use it in applications positioned in the ex-environment of underground mines. The applied hardware and the control technique are presented. Direct field-oriented control, using the rotor flux and a speed observer is used. The operation is described with experimental results, which were obtained from actual operation in the Velenje coal mine.

Keywords: sensorless control, Ex-environment, induction machine,

nadaljevanje s strani 88

■ SENSOR + TEST Messtechnik – Messe (Sejem merilne tehnike)

22.–24. 05. 2007
Nürnberg, BRD

Informacije:

- AMA Service GmbH, Von-Münchhausen – Str. 49,
31515 Wunstorf, BRD
- tel.: + 05033-2639-0
- faks: + 05033-1056
- e-pošta: info@sensorfairs.de
- internet: www.sensorfairs.de

■ 51st National Conference on Fluid Power (during IFPE 2008) (Ameriška nacionalna konferenca o fluidni tehniki 2008)

Organizator:
National Fluid Power Association – NFPA

Predvidena tematika:

- Hidravlični in pnevmatični prenos moči (sistemi/
simulacije/analize)
- Hidravlični fluidi
- Fluidnotehni ni pogoni in krmilja (sestavine/vezja)
- Električni in mehanski pogoni (elektromotorji/
sklopke/zavore/pomožna oprema)

nadaljevanje na strani 128