

# Optimizacija potrošnje električne energije u rudarskim pogonima

Snežana Aleksandrović, Vesna Damjanović  
Rudarsko-geološki fakultet  
Univerzitet u Beogradu,  
Beograd, Srbija  
[snezana.aleksandrovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:snezana.aleksandrovic@rgf.bg.ac.rs)  
[vesna.damjanovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:vesna.damjanovic@rgf.bg.ac.rs)

Ilija Jeftenić  
Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Beogradu,  
Beograd, Srbija  
[jeftenic.ilija@gmail.com](mailto:jeftenic.ilija@gmail.com)

**Sažetak**—U cilju postizanja optimizacije potrošnje električne energije na površinskim kopovima, neophodno je ne samo pratiti i analizirati njene tokove, već i obavljati stalnu proveru efikasnosti rada potrošača, jer najefikasnije snabdevanje za nepotrebnu inelativnu potrošnju predstavlja gubitak.

Jedan od najvažnijih faktora uštede energije je upotreba energetski efikasnih električnih motora. I pored specifičnosti svakog pogona, uporednim pregledom karakteristika standardnih energetski efikasnih motora različitih snaga i opterećenja, može se doći do nekih zajedničkih univerzalno primenljivih rezultata. Uradu je razmotrena nezavisnost efikasnosti celog pogona od faktora snage motora i diskutovana su načina kompenzacija reaktivne snage.

**Ključne riječi**—energetska efikasnost; reaktivna snaga; asinhroni motori, rudarski pogoni

## I. UVOD

U savremenoj industriji, naročito u rudarstvu, postoji stalno povećanje potrebe za električnom energijom, kao rezultat neprekidnog uvođenja nove mehanizacije. Neprekidno se analiziraju načini smanjenja energetskih gubitaka i postizanja što većih ušteda, odnosno ostvarenja željenih rezultata u pogonima uz najmanji utrošak energije. Ušteda električne energije koja je potrebna za pogon električnih motora može značiti uštedu i do pet puta većeg iznosa energije goriva u elektrani [1, 2]. Poboljšanje energetske efikasnosti elektromotornih pogona istovremeno štedi novčanastva i gorivo i samim tim omogućuje životnesredine.

Neki od načina optimalnog korišćenja električne energije odnose se na:

- upravljanje opterećenjem,
- racionalizaciju potrošnje elektromotornih pogona i kompenzaciju reaktivne snage.

Optimalan način upravljanja sistemom elektroenergetskog snabdevanja podrazumeva odgovarajuće prilagođavanje procesa proizvodnje, ali bez smanjenja kvaliteta njegovog odvijanja [3]. U tom smislu razvijeni su sistemi nadzora i upravljanja elektroenergetskim sistemima primenom odgovarajućih merno-akvizicionih i upravljačkih uređaja.

Postoji širok opseg uređaja za upravljanje elektroenergetskim sistemom, od najjednostavnijih uređaja za

uključivanje i isključivanje pojedinačnih potrošača, do programibilno upravljanih sistema kojima je omogućen totalni nadzor i optimizacija potrošnje električne energije pogona. Primenom upravljačke opreme sa odgovarajućim performansama i konfiguracijom, softverima i proračunima na osnovu podataka iz pogona, moguće je postići sinhronizovani nadzor celog energetskog sistema, kako poboljšanje efikasnosti dela energetskog sistema ne bi pogoršalo stanje u nekom drugom delu sistema. Izbor uređaja i njihov način rada određeni su specifičnostima određenog pogona i njegovog režima rad.

## II. PRIMENA ENERGETSKI EFIKASNIH ELEKTRIČNIH MOTORA

Skoro 70% ukupne električne energije u rudničkim pogonima troši se na motorne pogone, samim tim velike uštede energije mogu se postići primenom energetski efikasnih motora i kontrolom karakteristika njihovog napajanja. Efikasniji motori imaju poboljšane konstrukcijske karakteristike [4] i skuplji način proizvodnje, međutim, ulaganje se može višestruko isplatiti u toku eksploatacionog veka. Analize iz prakse pokazale su da se povraćaj troškova kod energetski efikasnog električnog motora može očekivati već nakon nekoliko stotina sati njegovog rada sa punim opterećenjem.

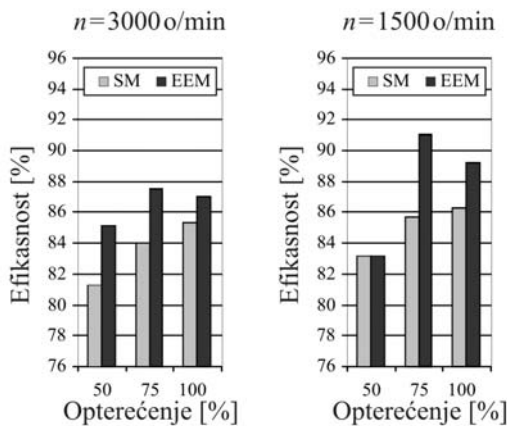
Najveći broj električnih motora primenjuje se u sledećim opsezima opterećenja [5]:

- 50-75% nominalnog opterećenja, za motore manje snage (3 – 22 kW) i
- 75-100% nominalnog opterećenja, za motore veće snage (30 – 90 kW).

Prema tome, neophodno je razmatrati efikasnost motora kako pri punom opterećenju, tako i pri manjem opterećenju od nazivnog. Predimenzionisanje motora vrši iz sigurnosnih razloga, ali za posledicu ima povećanje cene same mašine, instalacije, smanjenu efikasnost, manji faktor snage i povećanje troškova u toku rada.

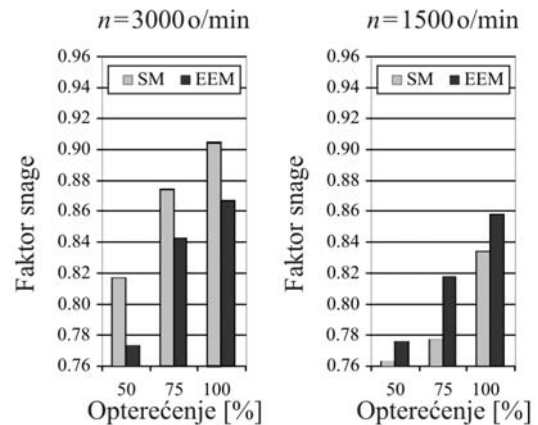
Na sl. 1, 2, 3 i 4 predstavljeni su: stepen efikasnosti i faktor snage standardnih (SM) i energetski efikasnih asinhronih motora (EEM), snage u opsegu 3 – 22 kW i 30 – 90 kW, za tri različite procentualne vrednosti opterećenja i za dve brzine obrtanja (3000 o/min i 1500 o/min).

Primenom konstrukcijski savršenijih motora i njihovim pravilnim izborom postiže se veća efikasnost za oko 3–4% u odnosu na standardne motore.

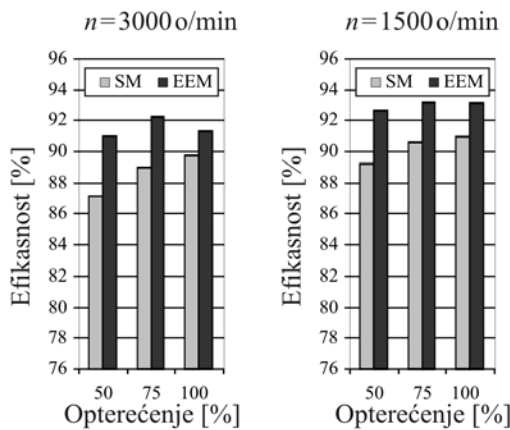


Slika 1. Efikasnost standardnih (SM) i energetski efikasnih motora (EEM) snage do 22 kW, za različita opterećenja i brzine obrtanja

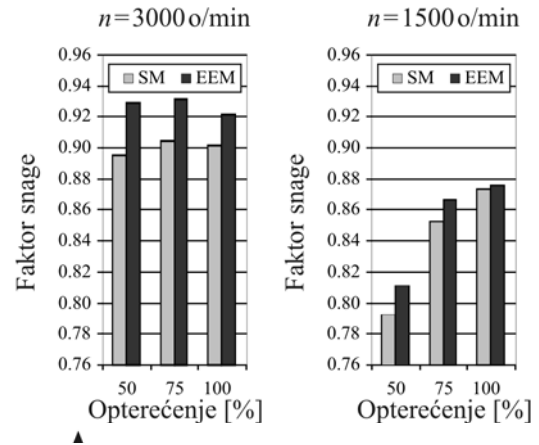
dobijeni za motore manje i veće snage, poređenjem grafika zaključuje se da su i efikasnost i faktor snage povoljniji u slučaju motora većih snaga.



Slika 3. Faktor snage standardnih (SM) i energetski efikasnih motora (EEM), snage do 22 kW, za različita opterećenja i brzine obrtanja



Slika 2. Efikasnost standardnih (SM) i energetski efikasnih motora (EEM) snage 30–90 kW, za različita opterećenja i brzine obrtanja



Slika 4. Faktor snage standardnih (SM) i energetski efikasnih motora (EEM), snage 30–90 kW, za različita opterećenja i brzine obrtanja

Na osnovu uporednog pregleda grafika dolazi se do zaključka da se efikasnost ne povećava ukoliko motori rade sa manjim opterećenjem od nominalnog, odnosno primenom motora veće nazivne snage od potrebne ne ostvaruje se veća efikasnost.

Pri projektovanju motornog pogona treba voditi računa da je kupovina skupljeg motora sa poboljšanim karakteristikama ekonomski mnogo više opravdana od zamene već postojećih, osim u slučaju kada se zamenjuju dotrajali i neefikasni motori. Razlika troškova ulaganja i dobijene efikasnosti zavisi i od opterećenja motora i sati rada u u konkretnom pogonu.

U zavisnosti od snage i broja obrtaja, faktor snage za neke energetski efikasnije motore manji je u odnosu na odgovarajuće standardne motore iste snage. Međutim, faktor snage moguće je popraviti lakše i uz manje troškove u odnosu na efikasnost motora. Kako su na sl.1 – 4 predstavljeni rezultati

Prazan hod motora predstavlja režim rada potrošnje velike snage. Sa druge strane, izbegavanje praznog hoda njegovim isklapanjem iz pogona vremenskim intervalima ovog režima rada nije povoljna opcija, s obzirom na ograničen broj dozvoljenih startovanja i zaustavljanja motora.

Regulacija brzine električnih motora često je preduslov povećanja stepena korisnosti pogona i sprečavanja nepotrebnog utroška energije. Na primer, kod pogona pumpi utrošena energija srazmerna je kvadratu brzine i pri radu motora sa polovinom brzine snaga se smanjuje na 12,5% nominalne vrednosti [6]. Regulacijom brzine smanjuju se i troškovi održavanja, utrošak materijala i habanje.

U svim automatizovanim regulisanim pogonima, za punu kontrolu brzine i napajanje asinhronih motora danas se primenjuju frekventni pretvarači koji fiksirane vrednosti mrežnog napona i frekvencije pretvaraju u promenjive veličine. Broj startovanja i zaustavljanja mašine može se potpunom

kontrolom brzine značajno smanjiti i time povećati radni vek pogona. Primenom soft-start i soft-stop uređaja moguće je izbeći naprezanja i udare mašine, a kod nekih pogona i smanjiti nivo buke i vibracija. Pored frekventnih regulatora, u savremene pogone sve češće se ugrađuju i moduli za proračun utroška i uštede energije u kWh, čime je omogućeno fino podešavanje procesa i optimalno korišćenje energije iz mreže.

### III. KOMPENZACIJA REAKTIVNE ENERGIJE

Induktivni potrošači uzimaju iz mreže veću snagu od one koja je potrebna za vršenje korisnog rada, odnosno uzimaju i reaktivnu snagu pored korisne. Kompenzacijom reaktivne energije moguće je ostvariti smanjenje troškova i poboljšanje kvaliteta električne energije, povećanje faktora snage kao mere efikasnosti korišćenja aktivne električne energije, kao i eliminisanje varijacija i izobličenja napona usled postojanja viših harmonika.

Da bi se ispravno realizovala kompenzacija reaktivne snage neophodno je poznavati specifičnosti elektromotornog pogona. U pogonima sa malim opterećenjima, koja se ne menjaju puno u toku radnog režima, kompenzaciju je moguće ostvariti instaliranjem kondenzatorskih baterija i odgovarajućih prekidačkih elemenata. Ukoliko u pogonima postoje brzo promenljiva opterećenja velike snage, neophodno je realizovati tzv. dinamičku kompenzaciju reaktivne snage, dodavanjem statičkih (tiristorskih) prekidača i prigušnica.

Kondenzatori se, u cilju proizvodnje reaktivne struje potrebne potrošaču, mogu postaviti paralelno bilo kom opterećenju niskog faktora snage. Opterećenje potrošača može biti pojedinačni motor ili veće pogonsko postrojenje. Snaga kondenzatora bira se tako da daje potrebnu reaktivnu snagu u vrhu opterećenja ili da proizvodi celokupnu reaktivnu energiju u toku određenog vremenskog perioda.

Bezobziranavrstuinсталacijeinapona, kondenzatorskebaterijemogusejednostavnopostavitiipremeštati, kaoizamenitinovomjedinicomuslužajukvara. Navedenekarakteristikenaročitosuvažnenapovršniskimkopovim a, gdepostojistalno proširenjeipomeranjerudarskihradova.

Provera faktora snage može se obavljati u uslovima dnevnog opterećenja u cilju kompenzacije reaktivne energije u granicama koje opravdavaju očekivane uštede. U industrijskim pogonima češće se sreće obračun srednjeg mesečnog faktora snage u svrhu njegove popravke.

Kompenzacijsreaktivneenergijevršisenajčešćetakodapopravljenifaktorsnage budeuopseguod 0,95do 0,98. Faktorsnagejednakjednici, odnosnopotpunakompenzacijamožesepostićisekondenzatorskim baterijmarelativnovelikesnage, štododovidoopasnostiodpostojanjakapacitivnihstrujapridelimičnomopterećenjuumrežiisuprotnih efekataod željenih[7].

Lokacija kondenzatorskih baterija može biti na ulazu u pogon, gde kompenzuju samo reaktivnu snagu koja dolazi iz distributivne mreže, ili uz pojedine potrošače, kada neutrališu reaktivnu struju u samomvodu postrojenja, smanjuju gubitke i povećavaju njihovu propusnu moć i održavaju bolji napon kod pojedinih potrošača.

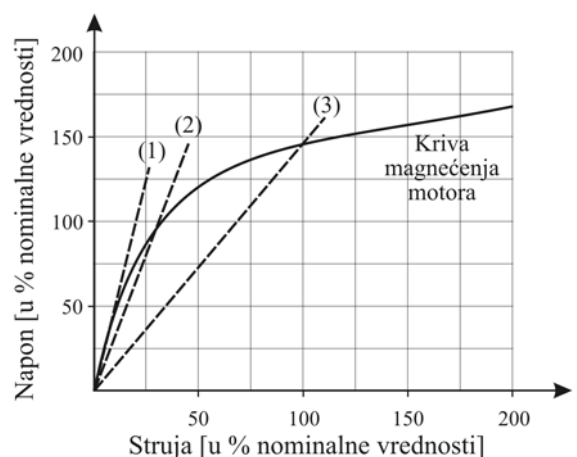
Izborlokacijeiveličinekondenzatorazavisiodželjenog rezultata i menja se sa veličinom opterećenja i lokalnim uslovima.

Na lokaciju kondenzatorskih baterija utiče više faktora, kao što su: broj vodova u postrojenju, dužina vodova, promene opterećenja, faktor snage, tipovi motora, raspored opterećenja, konstantnost raspodele opterećenja i drugi. Kod grupne popravke faktora snage kondenzatori se mogu postaviti na primarnoj strani transformatora, na sekundarnoj strani transformatora i izvan postrojenja, za celu etažu pogona. Lokalna popravka faktora snage može se izvesti na malim napojnim linijama, na mestima grananja napojnih vodova motora i neposredno kod motora ili grupe motora, pri čemu se uključuje zajedno sa motorima.

Grupna popravka faktora snage ima smisla kada se opterećenje znatno menja u odnosu na pojedine napojne vodove i kod niskonaponskih motora. Kod promene opterećenja od jednog do drugog napojnog voda može se desiti da je popravka faktora snage potrebna prvo za jedan, a zatim za drugi deo pogona, pa je povoljnija centralna lokacija baterije kondenzatora, koja je u svakom trenutku približno podjednako udaljena od svih potrošača. Primena individualnih kondenzatora kod motora zahtevala bi veće investicije zbog neravnomernosti opterećenja, osim u slučaju dugih napojnih linija, kada prednost primene individualne kompenzacije opravdava veće početne investicije u kondenzatore.

Kod lokalne popravke faktora snage, kondenzatorske baterije treba postavljati što je moguće bliže opterećenju ili blizu krajeva napojnih vodova jer se na taj način smanjuju gubici u vodovima između potrošača i napojne tačke, podiže napon u blizini potrošača i snagakondenzatora se može automatski smanjiti kada se potrošač isključi. Efekat delovanja kondenzatora ispoljava se u stalnom povišenju napona u svakoj tački gde su oni priključeni, a koje je praktično konstantno od praznog hoda do punog opterećenja napojnog voda.

Kondenzatorise često postavljajunakrajeveasinhroneh motorai uključuju zajedno sa motorom i njihova veličinatreba da je ograničena navrednostkojane izazivapreteranporastnaponanamotoruzbog samopobuđivanja (sl. 5).



Struja kondenzatora: (1) manja od struje motorapri praznom hodu i nominalnom naponu; (2) jednaka struji motora pri praznom hodu i nominalnom naponu; (3) jednaka nominalnoj struji motora

Slika 5. Samopobuđivanje asinhronih motoraprirazličitim veličinama otočnov ezanih kondenzatora i pri otvorenom napojnom prekidaču

Upogoni makod kojih supromene opterećenje znatne, kao što je slučaj kod pogona pumpi i ventilatora, kompenzacija reaktivne energije može se postići isinhronim motorima, kod kojih se povećanje pobude može ostvariti kapacitivnim režimom kojim se proizvode višereaktivne energije u odnosu na sopstvenu potrebu, čime utiču na celumrežu. Ukoliko se primenjuju za kompenzaciju reaktivne energije, sinhroni motor se dimenzionišu za faktorsnagu jednak 0,9.

Negativan uticaj na potrošnju reaktivne energije ima dugotrajni period praznog hoda. Strujapraznog hoda asinhronih motorarelativno je velika i može iznositi do 80% nominalne struje, tako da i potrošnja reaktivne snage može imati procentualno veliku vrednost nominalne snage. Potrošnja reaktivne snage obrnuto je proporcionalna snazi i broju obrtaja motora, tako da asinhroni motorivećih snaga i brzina predstavljaju većepotrošačereaktivne snage.

Analizom promene struje i faktora snage motorasapromenom opterećenja, zaključuje se da su slučajumanjih opterećenja, faktorsnagenaglo padakao rezultat reaktivne strujemagnetizacije. Takođe, smanjenje opterećenja motora ispod 60% nominalne snage, iporedsprovedenih mera poboljšanja faktora snage, on zavisi do opterećenja. Prematome, u cilju optimalnog iskorišćenja svojih potencijala u vezi sa faktorom snage, neophodno je da motorirade u blizini svojih nominalnih opterećenja.

Zbog velikog broja potrošača na rudarskim površinskim kopovima i prirode posla, opterećenje pogona je veoma dinamično, često praćeno velikim brzinama promene. Na primer, aktivna snaga bagera koji se primenjuju na površinskim kopovima nalaze se u opsegu od 0,5 MW do reda nekoliko MW, a reaktivna snaga u opsegu od 1 MVar do nekoliko MVar. Prosečni faktor snage manji je od 0,7. Zbog velikih promena snage, kao rezultat nastaju velike varijacije napona. Usled niske vrednosti faktora snage dolazi do povećanih padova napona, kao i do povećanih gubitaka u vodovima i transformatorima do smanjenja energetske efikasnosti.

U slučaju izražene dinamike procesa rada i nelinearnosti potrošača na površinskom kopu, kompenzacija reaktivne snage kontaktorskom regulacijom dovela bi do velikih promena reaktivne snage i nedozvoljenih varijacija u naponu napajanja. Primenom odgovarajuće opreme sa aktivnim filterima, u nepromenjenom režimu rada bagera, moguće je smanjiti reaktivnu snagu na opseg od -50 kVar do nekoliko stotina kVar. Faktor snage moguće je popraviti na 0,95 do 0,98. Primenom kompenzacije reaktivne snage ostvaruje se rasterećenje struje transformatora preko 30% čime je omogućeno proširenje radova i priljučenje novih potrošača na površinskom kopu.

## ZAKLJUČAK

Racionalizacija potrošnje električne energije predstavlja imprintsavremenih pogona, pa i površinskih kopova u rudarstvu. Čak i male mere optimizacije energije namestupotrošnje, mogu predstavljati veliki doprinos namestuproizvodnje. Skorodvetećine ukupne potrošnje električne energije u industrijskim pogonima odnosi se na asinhroni motor i samim tim energetske efikasnosti pogonskih sistema mogu značajno smanjiti zahtev za ukupnom energijom i indirektno smanjiti pogonske troškove emisije ugljen-dioksida. U ovom radu analizirane su neke od mera za racionalno korišćenje električne energije na rudarskim površinskim kopovima, sa posebnim osvrtom na primenu efikasnog pogonskog sistema i kompenzaciju reaktivne snage.

## LITERATURA

- [1] W. C. Turner and S. Doty, "Effective Energy Management," in Energy management handbook, 6th ed, Lilburn, GA: The Fairmont Press, pp. 9–17, 2006.
- [2] M. G. Patterson, "What Is Energy Efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues," Energy Pol, vol. 24, pp. 377-390, 1996.
- [3] T. Litman, "Efficient Electric Motor Systems Handbook," Lilburn, GA: The Fairmont Press, pp. 21-37, 1995.
- [4] C. U. Brunner, A. A. Niederberger, A. T. de Almeida and H. de Keulenaer, "Standards for efficient electric motor systems SEEEM building a worldwide community of practice," Eceee 2007 Summer Study Saving Energy – Just Do It!, pp. 1443-1455, 2007.
- [5] "Improving motor and drive system performance – A Sourcebook for Industry," U.S. Department of Energy's: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE). U.S. Department of Energy's (DOE).
- [6] "Rotating electrical machines. Part 1: Rating and performance," BSI Standards Publication, BS EN 60034-1, 2010.
- [7] C. Khanchi and V. K. Garg, "Power Factor Improvement of Induction Motor by Using Capacitors," Int J Eng Tr and Technol, vol. 4, pp. 2967-2971, 2013.

## ABSTRACT

Optimising in electrical energy consumption in mining, in open-pit mines, can be achieved not only by constant monitoring and analysing of its flow, but by checking the efficiency of consumer work, since even the most efficient supply represents a loss for an unnecessary or unproductive consumption. In most industries a considerable portion of electrical energy goes to motor driven systems. One of the major factors of electrical energy saving is the use of energy efficient electrical motors. Although each type of drive has its own specific nature, by comparative overview of the characteristics of standard and energy efficient motors of different power and load, some common and universally applicable results can be reached. This paper addresses the way efficiency of the entire drive depends on the motor power factor, and discusses the modes by which reactive power can be compensated.

## OPTIMISING IN ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION IN MINING PLANTS

Snežana Aleksandrović, Vesna Damnjanović, Ilija Jeftenić