



REGULACIJA BRZINE TRANSPORTA ŠLJAKE I PEPELA U TE TUZLA

Fahrudin Mehmedović, Asim Hodžić, Mensur Kasumović
ABB, predstavništvo za BiH Sarajevo, Fakultet elektrotehnike Univerziteta u Tuzli
Tuzla, Bosna i Hercegovina

Sadržaj: U termoelektranama (TE) transport čvrstih ostataka sagorijevanja (šljake i pepeo) često se iz kruga TE transportuje primjenom pumpnih postrojenja za hidraulički transport.

Kao tehnički ispravno i racionalno rješenje za regulaciju kapaciteta transporta i ostalih bitnih parametara pumpnog postrojenja, nameće se, upravljanje brzinom vrtnje pogonskih motora pumpi. Jedno od rješenja, koje se u ovom slučaju čini opravdanim, je regulacija brzine vrtnje pogonskih motora promjenom frekvencije napona statora, tj. primjena pretvarača frekvencije. U radu je obrađen ovaj način regulacije protoka i kapaciteta transporta, na primjeru postrojenja za transport šljake i pepela u TE "Tuzla".

Ključne riječi: pumpno postrojenje, pogonski motor pretvarač frekvencije, regulacija brzine, regulacija protoka i kapaciteta

1. UVOD

Pored klasičnog transporta šljake i pepeo se često iz kruga TE transportuje primjenom pumpnih postrojenja za hidraulički transport. U principu, pumpna stanica sa transportnim medijumom (mješavina sirove vode, šljake i pepela), sastoji se iz dvije paralelne linije pumpi, od kojih je jedna radna, a druga rezervna. Svaka linija ima po dvije serijski spojene centrifugalne bager pumpe. Pogonski motori pumpi su najčešće visokonaponski 6 kV asinhroni kavezni elektromotori većih snaga. Regulacija kapaciteta transporta, odnosno protoka kod pumpnog postrojenja ovakvog sistema u ranijim izvedbama, je bila uglavnom ručna, dodavanjem ili smanjenjem količine sirove vode koja učestvuje u hidrauličkom transportu. Zbog česte promjene eksploatacionih uslova rada i troškova zamjene istrošenog rotora pumpe, ovaj način regulacije kapaciteta transporta je ograničen, jer je regulaciju teško ostvariti zbog izražene lokalne abrazije armature i cjevovoda.

Zbog toga se često nameće potreba za regulaciju kapaciteta transporta i ostalih bitnih parametara pumpnog postrojenja. Ovo se uglavnom ostvaruje regulacijom brzine vrtnje pogonskih motora pumpi. Jedno od rješenja, koje se u ovom slučaju čini opravdanim, je regulacija brzine vrtnje pogonskih motora promjenom frekvencije napona statora, tj. primjena frekventnih pretvarača.

2. PRIKAZ TEHNIČKOG RJEŠENJA EMP

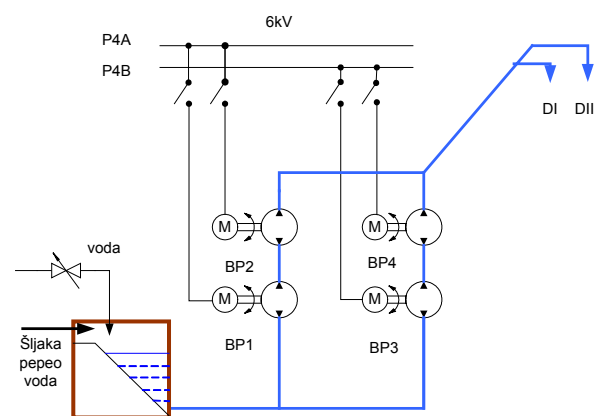
Primjena frekventnog pretvarača i primjena regulacije EMP izvršena je na konkretnom primjeru, tj. na EMP postrojenja za transport šljake i pepela bloka 3 TE Tuzla.

2.1. Postojeće tehničko rješenje EMP

Na sl. 1. prikazana je pricipijelna šema pumpne stanice prije uvođenja frekventne regulacije.

Pumpna stanica za transport šljake i pepela sa transportnim medijom (sirova voda) na deponiju izvan kruga TE sastoji se od sabirnog bazena i dvije paralelne linije pumpi (jedna radna i jedna rezervna linija). Svaka linija ima po dvije specijalne centrifugalne pumpe (bager pumpe) spojene u serijsku vezu (BP1 i BP2) (BP3 i BP4) pogonjenih motorima 6kV, 250kW. Motori se napajaju sa dva neovisna 6kV postrojenja P4A i P4B. Transport mješavine vrši se na deponije Divkovići DI i DII.

Regulacija ovog sistema je bila zapravo ručna regulacija nivoa u sabirnom bazenu, dodavanjem ili smanjenjem količine sirove vode, koja učestvuje u hidrauličkom transportu.



Sl. 1. Principijelna šema pumpne stanice prije rekonstrukcije

Kapacitet transporta je u svim eksploatacionim uslovima (opterećenje bloka, kvalitet uglja, količina šljake i pepela, stepen istrošenosti rotora pumpi itd) odgovarao nominalnom kapacitetu pumpi koji se samo djelimično mijenjao sa stepenom istrošenosti protočnog dijela pumpi i promjenom hidraulične karakteristike tlačnog cjevovoda. U cilju optimizacije nominalnog

kapaciteta pumpi povremeno se mijenjao njen rotor, različitog prečnika, ali zbog čestog mijenjanja eksploatacionih uslova rada, troškova rada i troškova nabavke rezervnih rotora ovaj način optimizacije je bio ograničen. Regulacija kapaciteta transporta mješavine, ugradnjom regulacione armature na tlačnom cjevovodu, nije imala smisla zbog jake lokalne abrazije armature i cjevovoda.

Osnovni nedostaci ovako koncipiranog sistema su:

- Velika specifična potrošnja el.energije i sirove vode za hidraulički transport mješavine.
- Ručna regulacija nivoa u sabirnom bazenu mješavine u dozvoljenom opsegu kao važan preduslov stabilnog rada pumpnih agregata zahtjevala je dodatno angažovanje radne snage.
- Povećani troškovi održavanja kao posljedica povećane abrazije protočnog djela pumpi (stalno radi na nominalnom kapacitetu) i loše regulacije nivoa u sabirnom bazenu.
- Otežan start pumpnog agregata zbog taloga šljake i pepela u protočnom dijelu.

Osnovne tehničke karakteristike pumpne stanice:

Pumpa: $Q = 550 \text{ m}^3/\text{h}$ i $H = 75 \text{ m}$

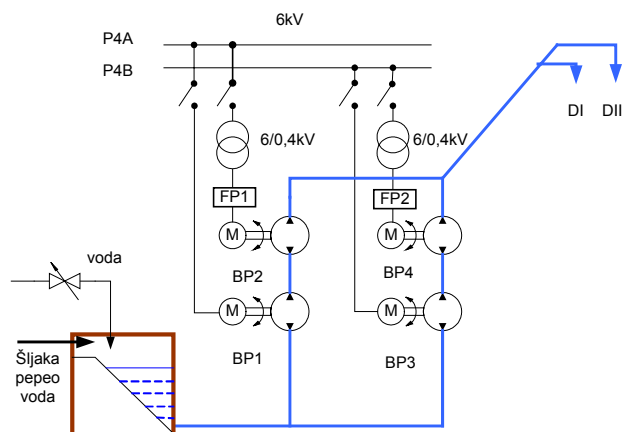
Motor: $U = 6000 \text{ V}$, $P = 250 \text{ kW}$, $n = 1487 \text{ min}^{-1}$, $\cos\varphi = 0,9$

2.2. Modernizovano tehničko rješenje EMP

Osnovna zamisao je da se na jednoj od pumpi zamijeni pogon pumpe sa novim koji će moći ostvariti željenu regulaciju transporta. Obzirom da je postojeći pogonski motor visokonaponski, to je moguće uraditi na dva načina:

- da se za postojeći motor 6 kV napona ugradi VN frekventni pretvarač,
- da se postojeći motor zamijeni sa NN motorom i ugradi NN frekventni pretvarač i odgovarajući transformator.

Prva varijanta ostavlja u sistemu postojeći motor kod koga nisu izolirani ležajevi (što se preporučuje kod upotrebe frekventnih pretvarača), i koristi VN frekventni pretvarač.



Sl. 2. Principijelna šema pumpne stanice poslije rekonstrukcije

Kako je za ovu snagu motora cijena VN frekventnog pretvarača gotovo jednaka ukupnoj cijeni koštanja NN frekventnog pretvarača i NN motora, prihvaćena je druga varijanta jer daje kompletno novi pogon sa NN motorom. Ova varijanta zahtijeva ugradnju transformatora. Međutim troškovi investicije opravdavaju izbor ove varijante.

Zadatak se svodi na izbor motora koji će zadovoljiti zahtjeve pumpe. Kod izbora motora korišten je softverski program DriveSize, koji nudi mogućnost izbora motora, frekventnog pretvarača i transformatora za veći broj aplikacija, a koji uvažava sve kriterije koji su navedeni za definisanje i izbor elemenata sistema upravljanja [6].

3. IZBOR ELEMENATA SISTEMA

Većina proizvođača frekventnih pretvarača nudi i računarski program za izbor frekventnih pretvarača, koji je uglavnom baziran na poznatom matematskom modelu za skalarno i vektorsko upravljanje brzinom vrtnje asinhronog motora. Na taj način se proračuni rade puno preciznije u odnosu na postupak izbora koji se koristi ako se to radi ručno.

Za izbor motora i frekventnog pretvarača korišten je program DriveSize firme ABB.

Baze podataka uključuju sve neophodne informacije o motorima, frekventnim pretvaračima i transformatorima ovog proizvođača. Svi rezultati koji se dobiju tokom izbora elemenata sistema memorišu se pod vlastitim nazivom projekta.

DriveSize nudi nekoliko funkcija za dimenzionisanje sistema. Ove funkcije su dostupne u glavnom meniju ili u Toolbar-u.

Tokom izbora vodi se računa o slijedećem:

- Ambijentni uslovi, odvojeno za pretvarače i motore,
- Temperaturna klasa motora,
- Vrsta tereta: Konstantna snaga, Konstantan moment, Konstantan moment i snaga, Kvadratičan moment (pumpe i ventilatori),
- Tipovi preopterećenja: Jedno preopterećenje pri startanju motora, Jedno ciklično, Multi ciklično sa različitim formama i
- Faktor snage ulazne jedinice.

Kao rezultat izbora i dimenzionisanja mogu se dobiti:

- Proračun mrežnih harmonika: Harmonici za inverter ili napojnu jedinicu, Kombinovani harmonici,
- Rezultati u numeričkoj formi,
- Rezultati u grafičkoj formi (opterećenje, motor, inverter),
- Mogućnost izbora alternativnog invertora, motora i napojne jedinice,
- Štampanje rezultata i podataka,

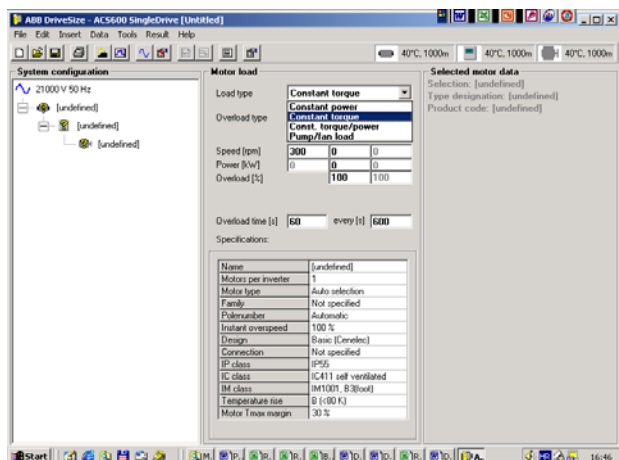
Aktiviranjem programa DriveSize uz naznake naziva projekta i izbora serije frekventnog pretvarača na kome će se bazirati projekat dobija se ekran kao na slici 3.

Sa lijeve strane ispod glavnog menija nalaze se tri ikone transformatora, frekventnog pretvarača i motora. Na osnovu početnih uslova tj. pogona prvo se odabira motor.

Postoje dvije opcije:

- korištenje postojećeg asinhronog motora ili
- izbor novog motora.

Nakon izbora motora provjeravaju se njegove karakteristike momenta i snage u ovisnosti od brzine, da bi se provjerilo da li motor zaista zadovoljava traženu aplikaciju.

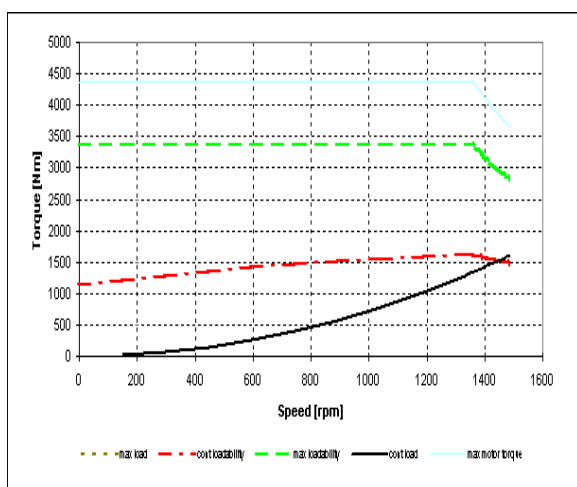


Sl. 3. Osnovni meni - korisnički interfejs za unošenje osnovnih parametara.

Ako se smatra da treba izabrati drugi motor tada se to može uraditi ručno iz ponuđene baze motora proizvođača ABB. Nakon izbora motora automatski se bira frekventni pretvarač koji treba da ispuni sve zahtjeve pogona za koji se bira. Za izabrani tip pretvarača takođe se mogu dobiti grafovi ovisnosti momenta i struje od brzine. Na osnovu ovih grafova opet se može izvršiti provjera da li izabrani pretvarač zaista zadovoljava potrebe aplikacije u kojoj se koristi, te možemo ručno odabrati frekventni pretvarač iz baze za red veće ili manje snage.

3.1. Izbor pogonskog motora

U ovom slučaju se bira tip opterećenja Pump/fan load. Za razmatranu pumpu potrebna je snaga motora od 250 kW, sa brzinom od 1487 min⁻¹. Kod izbora tipa preopterećenja nude se tri opcije: "Lagan pogon", "Pogon sa različitim preopterećenjima" i "Preopterećenje samo pri startanju". Za razmatranu pumpu odabran je motor sa karakteristikama koje su prikazane na slici 4.



Sl. 4. Dijagram promjene momenta izabranog motora u ovisnosti o brzini

Na grafu su date momentne karakteristike u ovisnosti o brzini vrtnje motora i to:

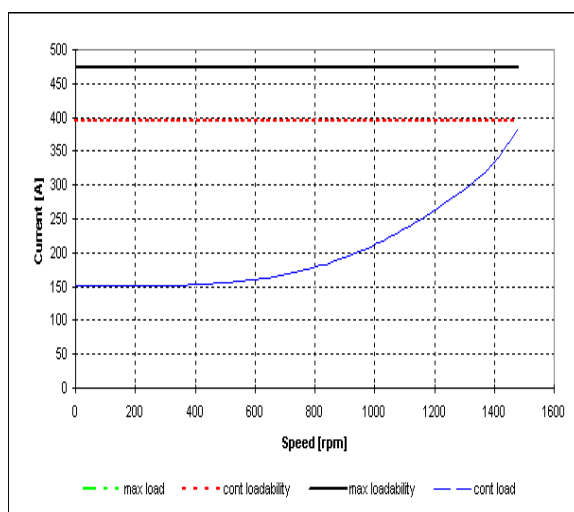
- momentna karakteristika tereta (crna),
- maksimalni moment motora (plava),
- maksimalno preopterećenja motora (zeleni),
- trajno opterećenja motora (crveni).

Maksimalni moment motora i preopterećenje motora su konstantni do brzine od 1370 min⁻¹, nakon čega dolazi do promjene ovih vrijednosti obrnuto proporcionalno brzini vrtnje. Može se takođe primijetiti da je momentna karakteristika tereta ovisna o kvadratu promjene brzine vrtnje motora. Pri brzini od 1487 min⁻¹ koja je nominalna brzina motora moment motora je jednak momentu tereta. Pored ovog daje se tabelarni prikaz, gdje su dati nominalni parametri o izabranom motoru kao što su: napon, struja, frekvencija, snaga, broj polova, brzina, moment, odnos prekretnog i nominalnog momenta, faktor snage, efikasnost, preopterećenje, klasa zaštite, temperaturna klasa i sl.

3.2. Izbor frekventnog pretvarača

Na osnovu izabranog motora softverski se odabira frekventni pretvarač i to je u ovom slučaju tip ACS 607-0260-3.

Često se u praksi dešava da se za već postojeću pumpu i motor definiše samo frekventni pretvarač koji treba da frekventno reguliše broj obrtaja motora, odnosno pumpe. Kod takvih pogona često se dešava da su pumpa i motor predimenzionisani tj. pumpa je npr. veće snage za 20 do 30% te je izabran motor za nominalnu snagu pumpe. Ako bi se birao frekventni pretvarač za nominalnu snagu pumpe i motora (što u praksi neće biti dostignuto) onda će i frekventni pretvarač takođe biti predimenzionisan. Tada se posmatraju strujni dijagrami momenta i često se dešava da se može izabrati za red snage manji frekventni pretvarač koji može zadovoljiti sve neophodne zahtjeve. Naravno, za ovakve korake treba dobro proanalizirati pogon na koji se ugrađuje pretvarač.



Sl. 5. Promjena struje pretvarača pri promjeni brzine vrtnje motora

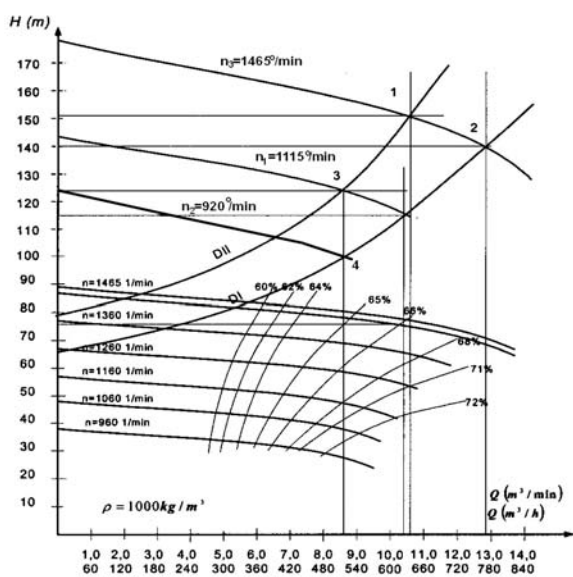
Takođe treba voditi računa i o mnogim drugim faktorima, pa ako je radna temperatura umjesto 40°C, što je početno u softveru, 30°C - to takođe može za red smanjiti potrebnu snagu frekventnog pretvarača i sl. Frekventni pretvarač serije ACS 607-260-3 firme ABB, ostvaruje funkciju DTC (Direct Torque Control), direktnog upravljanja momentom, tako da kontroliše brzinu i moment bilo kojeg standardnog asinhronog kaveznog motora. Podesan je praktično za većinu aplikacija kako jednostavnijih (pumpe i ventilatori) tako i složenijih (dvomotorski kranovi u topionicama i sl.).

3.3. Analiza rezultata istraživanja

Ušteda električne energije i vode

Nakon ugradnje frekventne regulacije brzine vrtnje pumpi stvoreni su tehnički uslovi za optimizaciju volumetrijskog protoka mješavine u hidrauličnom transportu. Nakon sprovedene optimizacije odnosa volumetrijskog protoka transportnog fluida i čvrste mase u transportnoj mješavini za prosječne eksploatacione uslove rada bloka i sistema hidrauličkog transporta, optimizirani radni protok transportne mješavine je iznosio 500 m³/h. Radni kapacitet pumpne linije prilagođen je optimiziranom radnom protoku hidrauličkog transporta smanjenjem brzine vrtnje regulacijske pumpe (BP 2 ili BP 4).

Na slici 6. data je Q-H karakteristika serijski vezanih pumpi za hidraulički transport mješavine do deponije Divkovići I ili Divkovići II sa hidrauličkim karakteristikama transportnih cjevovoda. Parametri za snimanje ove karakteristike dobijeni su mjerenjem.



Sl. 6. Q-H karakteristika serijski vezanih pumpi tipa PŽ-2001 za hidraulički transport transport šljake i pepela

Tačke 1 i 2 u Q-H dijagramu su radne tačke serijske veze jedne linije pumpi za transport mješavine bez primjene regulacije brzine vrtnje.

Tačke 3 i 4 u Q-H dijagramu su radne tačke serijske veze jedne linije pumpi za transport mješavine sa frekventnom regulacijom elektromotornog pogona:

- na 1155 min⁻¹ za transport na deponiju D II (radna tačka 3 u Q-H krivnoj)
- na 925 min⁻¹ za transport mješavine na D I (radna tačka 4 u Q-H krivnoj)

Radni parametri pumpnih agregata dobiveni su mjerenjem u različitim režimima rada i sa neznatnim odstupanjem odgovaraju računskim vrijednostima iz proračuna po jednačinama:

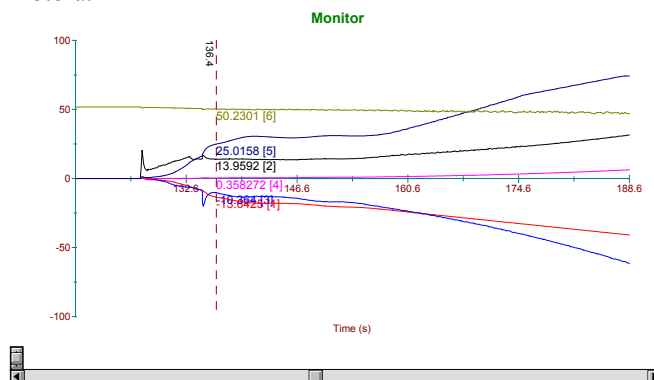
$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0} ; \frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 ; \frac{P}{P_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad (1)$$

$$P_p [kW] = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot g}{\eta_p} \quad (2)$$

$$P_m [kW] = \frac{P_p}{\eta_m} \quad (3)$$

Mekši start pumpnog agregata

Pri startanju EMP sa frekventnom regulacijom izbjegavaju se poznati problemi vezani za direktno pokretanje motora, kao što su velike polazne struje i sl. Naime, u ovom slučaju struja i napon se postepeno mijenjaju do vrijednosti koje odgovaraju zadatom momentu, odnosno zadatoj brzini vrtnje. Frekventni pretvarač ograničava porast ovih veličina i time obezbjeđuje funkciju mekog upuštanja. Na ovaj način se eliminišu "udari" na elektroenergetsku mrežu sustava vlastite potrošnje koji nastaju kod direktnog upuštanja motora.



Sl. 7. Promjena parametara kod startanja motora

Tabela 1. – Promjena parametara kod startanja motora

t(s)	0,5	9,9	20,5	35	47,6	51,2
Brzina (min ⁻¹)	40,8	434	613	829	1077	1423
Snaga(%)250kW	0,01	3,58	6,74	15	31,4	70,9
Struja motora (A)	150	139	138	177	226	347
Izlazni napon (V)	6,54	125	147	189	290	367
Moment %	0,18	11,5	16,4	27	43,3	74,0

Snimljeni primjer promjena parametara pri startanju pogonskog motora i vođenju do neke zadane brzine je prikazan na sl. 7. U ovom slučaju pomoću potencijometra je zadana brzina od 1423 min⁻¹, a snimana je promjena snage, momenta, struje, napona motora i istosmjernog napona u pretvaraču. Da se primijetiti da je za period od nešto više od 50s postignuta zadana vrijednost brzine računajući da su motor i pumpa krenuli iz stanja mirovanja.

U tabeli 2. su prikazane ovisnosti promjene snage i momenta u ovisnosti o brzini vrtnje motora

Tabela 2. – Promjena parametara kod promjene brzine

Brzina (min ⁻¹)	1073	1155	1307	1439,17
Snaga(%) (250kW)	31,47	38,62	55,5	74,05
Struja motora (A)	226,9	247,6	294,5	359,29
Izlazni napon (V)	290,47	316,5	359	365,07
Moment %	43,79	49,94	63,3	76,7

Pojednostavljena ekonomska analiza

Razlika ili ušteda u potrebnoj snazi elektromotornih pogona i ušteda u potrošnji sirove vode daje ulazne podatke za ekonomsku analizu efekata rekonstrukcije.

Uštede el. energije zbog smanjenje angažovane snage pumpnog agregata:

- Za transport na deponiju Divkoviće I

$$\Delta P = \Delta P(\text{BP1}) + \Delta P(\text{BP2})$$

$$\Delta P = 17 + 138,6 = 155,6 \text{ kW}$$

$$\Delta E = \Delta P \times T_I = 155,6 \cdot 1000 = 155.600 \text{ kWh}$$

T-godišnji broj sati rada transporta

- Za transport na deponiju Divkoviće II

$$\Delta P = \Delta P(\text{BP1}) + \Delta P(\text{BP2})$$

$$\Delta P = 37,2 + 126,6 = 163,8 \text{ kW}$$

$$\Delta E = \Delta P \times T_{II} = 163,8 \cdot 6000 = 982.800 \text{ kWh}$$

Ako se pretpostavi da će se transport na deponije obavljati isti vremenski period srednja godišnja ušteda električne energije je $\Delta E = 1.200.400 \text{ kWh}$.

Finansijski efekti zbog smanjenja potrošnje električne energije

Računajući da je cijena kWh - 0,035 EUR na izlazu iz TE dobija se:

$$\Delta C_1 = \Delta E \cdot C_{el.en.} = 1.138.400 \cdot 0,035$$

$$\Delta C_1 = 39.844 \text{ EUR/god.}$$

Finansijski efekti zbog smanjenja potrošnje sirove vode

Smanjenje potrošnje vode kod transporta na deponiju Divkoviće I iznosi (sa slike 6):

$$\Delta Q_I = 150 \text{ m}^3/\text{h.}$$

Smanjenje potrošnje vode za transport na deponiju Divkoviće II iznosi (sa slike 6):

$$\Delta Q_{II} = 137 \text{ m}^3/\text{h.}$$

Srednja ponderisana vrijednost uštede sirove vode iznosi 153,5 m³/h

Računajući da je cijena tehnološke vode - 0,02 EUR/m³:

$$\Delta C_2 = 138 \cdot 0,02 \cdot 7.000 = 19.320 \text{ EUR/god}$$

Ukupna ušteda postignutog efekata smanjenja vlastite potrošnje električne energije i smanjenja potrošnje sirove vode je 63.462 EUR/godišnje.

4. ZAKLJUČAK

Primjenom frekventne regulacije brzine vrtnje pogonskih motora pumpnih postrojenja za transport pepela i šljake u TE, postiže se slijedeće:

- Mekši start pumpnog agregata.

- Parametri relevantni za tehnološki proces, računarskim putem se mogu regulisati i nadzirati. Ovdje se posebno misli na regulisanje protoka medija (kapaciteta transporta) regulacijom brzine vrtnje pogonskih asinhronih kaveznih motora i to zadavanjem parametara frekventnom pretvaraču.
- Povećava se stabilnost sistema i obezbjeđuje fina regulacija kapaciteta transporta. Povećava se efikasnost pri održavanju, skraćuje vrijeme veoma skupih zastoja, a samim tim se povećava raspoloživost ovog sistema, odnosno raspoloživost bloka i TE u cjelini.

Osim navedenog evidentni su i ekonomski efekti, tj.:

- Smanjena vlastita potrošnje električne energije za hidraulički transport mješavine bl.3 za 30% .
- Smanjena potrošnja sirove vode za hidraulički transport mješavine na bl.3 za 26%.
- Smanjena količina otpadne vode iz ovog transporta za 20%.
- Smanjeni troškovi održavanja i radne snage.

5. LITERATURA

- [1] W. Leonhard: *Control of Drives*, Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- [2] V. Vučković: *Električni pogoni*, Akademska misao, Beograd 2002.
- [3] V. Ambrožič, *Sodobne regulacije pogonov z izmjeničnimi stroji*, Fakultet za elektrotehniko Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1996.
- [4] F. Mehmedović: *Računarsko vođenje parametara i primjena U/f regulacijekod EMP pumpnih postrojenja za transport čvrstih ostataka sagorijevanja u TE*, magistarski rad, Fakultet elektrotehnike Univerziteta u Tuzli, 2004.
- [5] EMC Compliant Installation and Configuration for a Power Drive System, ABB Industry Oy, Helsinki 1999.
- [6] *Dimensioning of Drive System*, ABB Industry Oy, Helsinki 2000.

SPEED REGULATION OF SLUG AND ASH TRANSPORTATION SYSTEM IN TP TUZLA

Abstract: *Transportation of hard resets (slug and ash) in thermal power plants is often by using pump substations for hydraulics transport.*

Applying of pump driving motors speed regulation is technically legitimate solution for transport capacity regulation. The solution is speed regulation of driving motors by varying frequency of voltage on motor's stator, i.e. frequency converter applying. In this paper is described this way for transport capacity and flow regulation, on the example of substation for slug and ash transportation in thermal power plant "Tuzla".

Key Words: *pump substation, driving motor, frequency converter, speed regulation, capacity and flow regulation*