

Анализа оствареног повећавања енергетске ефикасности погона пумпног постројења са фреквенцијском регулацијом

Раденко Марјановић¹, Петар Матић²

¹ Arcelor Mittal Prijedor, д.о.о. Приједор, Босна и Херцеговина

² Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет, Бања Лука, Босна и Херцеговина

Садржај – Овај рад презентује студију побољшања енергетске ефикасности у пумпном постројењу рудника помоћу регулисаног погона са фреквенцијским регулатором. Циљ рада је да се упореде рачунски резултати очекиваних пројектованих режима рада и ефикасности са измјереним вриједностима радних величина и ефикасности рада погона у експлоатацији.

Кључне ријечи - пумпа, асинхрони мотор, фреквентни регулатор, енергетска ефикасност.

I. Увод

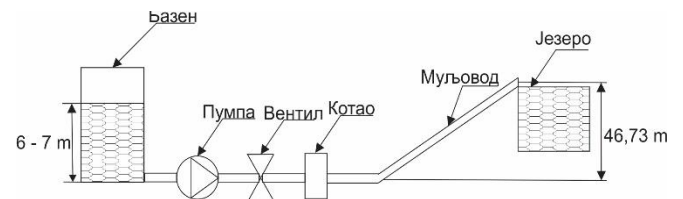
Електромоторни погони пумпних система у рачунима за утрошену електричну енергију заузимају 25 % до 50 % у индустрији. Утрошак електричне енергије за потребе пумпе може бити један од највећих ставки у рачуну ако пумпа ради више од 2000 радних часова годишње. Постоји велика могућност да се трошак за пумпу смањи путем одговарајућег пројектовања и избора пумпног система и контроле. Рад пумпе са промјенљивим протоком или лошим избором пумпе (предимензионасање) уобичајено захтијева коришћење вентила за пригушење, бајпаса и/или мотора са промјенљивом брзином да би се добио жељени проток. Вентил за пригушење може бити извор вибрација и буке, такође може доћи лијеplења материјала, кавитације, цурења, и до оштећења вентила усљед корозије. Најефикаснији начин управљања протоком је подешавање брзине пумпе [1]. Осим тога, снага пумпе зависи од куба брзине, па се управљањем брзином уједно управља и протоком и побољшава енергетска ефикасност. Регулисање брзине обртања пумпе може се вршити на више начина, од којих је најзначајнији примјеном фреквенцијског (или фреквентног) регулатора који има високу ефикасност, једноставно управљање, могућност једноставног уклапања у сложене системе управљања итд.

У раду ће се прво описати претходни систем погона пумпе заснован на синхронном мотору константне брзине и регулацији протока помоћу вентила за пригушење. Након тога, даће се основни елементи прорачуна новог електромоторног погона заснованог на фреквенцијски регулисаном асинхронном мотору који замјењује претходни систем. Процијениће се очекивано рачунско побољшање енергетске ефикасности пројектованог погона у односу на

претходни систем. Коначно, на основу мјерења на реализованом систему, упоредиће се реално остварено побољшање енергетске ефикасности у односу на прорачун, те дати одговарајући коментари.

II. ПРЕТХОДНИ ПУМПНИ СИСТЕМ

За потребе препумпавања муља из пумпне станице муља у руднику ArcelorMittal Prijedor у дугогодишњој експлоатацији кориштен је електромоторни погон кога је чинила центрифугална пумпа ГРТ 4000/71а коју покреће синхрони мотор СДНЗ-16-41-12у3 номиналне брзине 500 об/мин, снаге 1250 kW и напона 6000V. Мотор је при раду узимао из мреже 1000 kW [2]. Капацитет пумпе је 3200 m³/h, а доток муља из система у пријемни базен, односно у пумпу је између 2200 m³/h и 2500 m³/h. Шема претходног пумпног система и муљовода приказана је на слици 1.



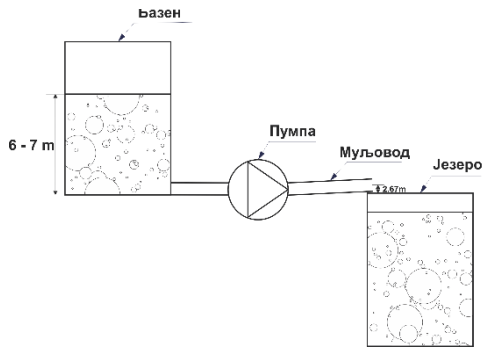
Сл. 1. Шема пумпног система и муљовода

Пошто пумпа има већи капацитет него што је доток муља у пумпну станицу, регулација протока се вршила пригушењем вентила. Котао за компензацију хидрауличног удара (приказан на слици 1) служи за смањење хидрауличног удара, односно смањења притиска у муљоводу.

III. НОВИ ПУМПНИ СИСТЕМ

Због технолошких потреба, дошло је до промјене конфигурације постојећег система, па се одлагање муља врши на мјесту старог површинског копа. Удаљеност новог мјеста одлагања од пумпне станице је 3000 m, док висинска разлика између осе излазне цијеви пумпе и осе цијеви на акумулационом језеру износи 2,67 m (слика 2). Пошто је дошло до промјене технолошког процеса, искориштена је прилика да се инсталише нови асинхрони мотор мање снаге са фреквентном регулацијом чиме би се

уједно извршило побољшање енергетске ефикасности читавог постројења.



Сл. 2. Шема новог пумпног система и муљовода

За пројектовање новог пумпног система, потребно је прво израчунати губитке новог муљовода и одредити радну криву новог система [3].

Манометарска висина дизања је:

$$H_m = H_g + H_l \quad (1)$$

гдје су:

H_m - манометарска висина дизања [m];

H_g - геодетска висина дизања [m];

H_l - линијски губици у муљоводу [m].

Геодетска висина дизања при запуњености пријемног базена од 6 m је:

$$H_g = 2,67 - 6 = -3,33m \quad (2)$$

Линијски губици у муљоводу промјера цијеви $D=700mm$ и протока $Q=2500m^3/h=0,6944m^3/s$ се рачунају на основу [2]:

$$H_l = L \cdot i \quad (3)$$

Гдје су L дужина цјевовода, i пад притиска у цијеви.

Пад притиска у цијеви износи:

$$i = 0,54 \sqrt{\frac{Q}{0,27854 \cdot C \cdot D^{2,63}}} = 0,54 \sqrt{\frac{0,6944}{0,27854 \cdot 100 \cdot 0,7^{2,63}}} = 0,0061 \text{ m/m} \quad (4)$$

Гдје је C коефицијент условљен унутрашњим стањем цијеви, за челичне цијеви старије од 5 година $C=100$. На основу тога линијски отпори у цјевоводу износе:

$$H_l = L \cdot i = 3000 \cdot 0,0061 = 18,3m \quad (5)$$

Потребан напор (манометарска висина дизања) муљне пумпе износи:

$$H_m = H_g + H_l + \Delta p = -3,33 + 18,3 + 5 = 19,97m \quad (6)$$

гдје је Δp општи напор пумпе.

С обзиром на малу густину муља није потребна корекција напора за његов транспорт, па се усваја да је потребни напор муљне пумпе 19,97 m или 196 J/kg.

За проток $Q=2500 \text{ m}^3/h$ или $0,6944 \text{ m}^3/s$, напор $Y=196 \text{ J/kg}$ и максималну густину муља $\gamma_{\text{муљ}}=1060 \text{ kg/m}^3$ потребан је електромотор снаге:

$$N = 1,05 \cdot \frac{Q \cdot Y \cdot \gamma_{\text{муљ}}}{1000 \cdot \eta} = 1,05 \cdot \frac{0,6944 \cdot 196 \cdot 1060}{1000 \cdot 0,65} = 233 \text{ kW} \quad (7)$$

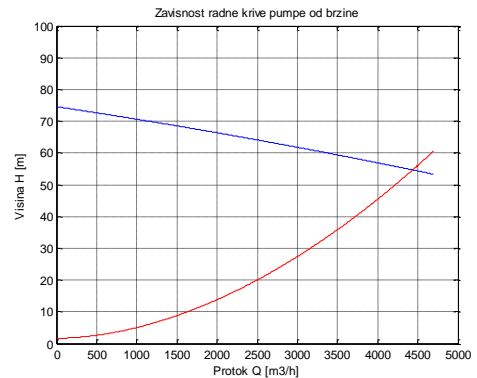
гдје је η степен искоришћења пумпе.

Због могућих нових потреба препумпавања муља на стару локацију, усваја се мотор снаге 500 kW и 500 ob/min чије карактеристике на основу [4] одговарају потребама старог система.

На основу радног дијаграма из [5] и коришћењем функције *polyfit* програмског пакета *Matlab* добијамо функцију која описује висину дизања пумпе у зависности од протока, односно:

$$H = -2,014 - 12,259Q + 79,285Q^2 \quad (8)$$

Радна крива пумпе означена плавом бојом и крива система (црвеном бојом) за ново мјесто одлагања муља приказани су на слици 3.



Сл. 3. Зависност пумпног система од протока

Са слике 3 се види да је са новим радним системом пресјек криве система и пумпе при $4500 \text{ m}^3/s$ и да је потребна мања брзина обртања пумпе у односу на постојећи систем.

IV. ПРОРАЧУН ОПСЕГА ПОТРЕБНЕ БРЗИНЕ

Да бисмо одредили оптималну брзину конкретне пумпе за различите радне режиме, што је кључно за побољшање енергетске ефикасности, потребно је да одредимо зависности радних величина пумпе, односно протока Q , висине дизања пумпе (напора пумпе) H , и снаге пумпе P од промјене брзине.

$$Q \sim n \quad (9)$$

$$H \sim n^2 \quad (10)$$

$$P \sim n^3 \quad (11)$$

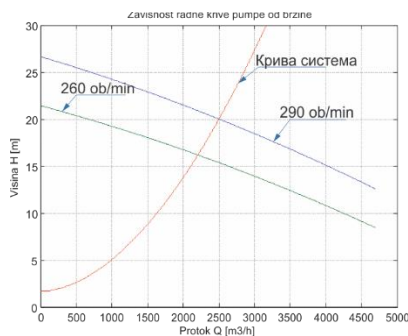
Посматраћемо два карактеристична радна режима пумпе. Пумпа је у 2014. години радила око 4800 радних часова. Од тога је 4100 радних часова радила при стандардном режиму рада постројења (доток муља

$Q=2500\text{m}^3/\text{h}=0,6944\text{m}^3/\text{s}$, а 700 радних часова је радила при режиму филтрације постројења (доток муља $Q=2200\text{m}^3/\text{h}=0,6111\text{m}^3/\text{s}$). На основу једначина (2) до (6) и једначина (9) и (10) подаци за ове протоке приказани су у Табели 1.

TABELA 1. ОПТИМАЛНИ ПОДАЦИ ПУМПНОГ СИСТЕМА ЗА РАЗЛИЧИТЕ ПРОТОКЕ

	H_g [m]	i	H_t [m]	H_m	n [ob/min]
$Q=2500\text{m}^3/\text{h}$	-3,33	0,0061	18,3	19,96	290
$Q=2200\text{m}^3/\text{h}$	-3,33	0,0048	14,45	16,12	260

На слици 4 приказане су радне криве пумпе при брзинама обртања 290 ob/min, односно 260 ob/min.



Сл. 4. Зависност радне криве пумпе од брзине

При новим брзинама имамо да мотор из мреже узима следеће снаге:

$$\left. \begin{array}{l} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{290} \sim n_{290}^3 \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} 500 \cdot 10^3 \sim 500^3 \\ P_{290} \sim 290^3 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{290} = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{290}{500} \right)^3 = 97,5 \text{ kW} \quad (12)$$

$$\left. \begin{array}{l} P_{500} \sim n_{500}^3 \\ P_{260} \sim n_{260}^3 \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} 500 \cdot 10^3 \sim 500^3 \\ P_{260} \sim 260^3 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{260} = 500 \cdot 10^3 \left(\frac{260}{500} \right)^3 = 70,3 \text{ kW} \quad (13)$$

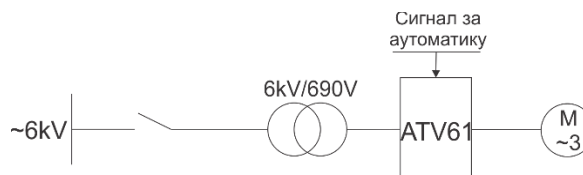
На бази једначине (8) хидрауличне снаге за протоке и одговарајуће висине $(Q;H)=(2500; 19,96)$, $(Q;H)=(2200; 16,12)$ су респективно:

$$P_{hid1} = \gamma_{\text{муља}} g H_1 Q_1 = 1060 \cdot 9,81 \cdot 19,96 \cdot 0,6944 = 144 \text{ kW} \quad (14)$$

$$P_{hid2} = \gamma_{\text{муља}} g H_2 Q_2 = 1060 \cdot 9,81 \cdot 16,12 \cdot 0,6111 = 102,4 \text{ kW} \quad (15)$$

Из једначина (14) и (15) се види да је потребна хидрауличка снага већа од снаге мотора при смањеним брзинама. Додатна регулација протока би се морала вршити пригушењем вентила. Међутим, у пракси, на бази искустава, очекује се да због старости пумпе, односно лошијег стања радног кола и кућишта пумпе, регулација вентилом ће се вршити врло мало или уопште неће бити потребна.

За нови електромоторни погон одабрана је следећа опрема: суви трансформатор *Schneider Electric „Trihal“* 6 kV/690 V 850 kVA, фреквентни регулатор *Schneider Electric Altivar 61* и асинхрони електромотор *АТБ Север* 500 kW и 496 ob/min. Трансформатор се напаја из већ постојеће СН ћелије. За аутоматизацију регулације брзине *Altivar 61* има *PID* регулатор који регулише брзину мотора на основу нивоа воде у пријемном базену. Податке о нивоу воде *PID* регулатор добија од мјерне сонде која се налази на дну пријемног базена. Шема цјелокупног система приказана је на слици 5.

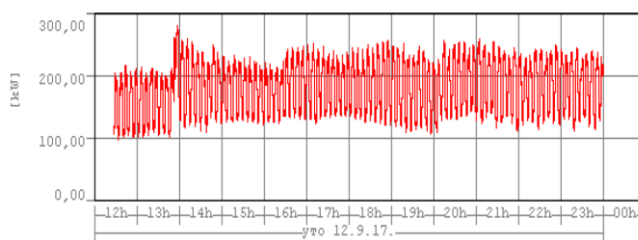


Сл. 5. Шема електромоторног погона

V. ИЗМЈЕРЕНЕ РАДНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОГОНА

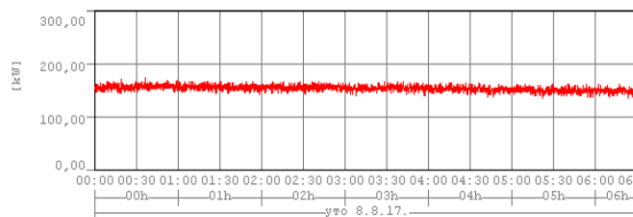
Након инсталације и подешавања погона, измјерене су стварно добијене карактеристике погона. Мјерење електричних величина је вршено на 6 kV страни помоћу мрежног анализатора *Janitza UMG604*. Извршено је више дуготрајних мјерења у току различитих циклуса производње, односно током пумпања и током филтрације.

Мјерењем је утврђено да електромоторни погон пумпе из мреже узима снагу од око $P_{280} = 180 \text{ kW}$, при брзини од око 280 ob/min и протоку од 2500 m³/h. На слици 6 је приказан дијаграм утрошене активне снаге за посматрани период.



Сл. 6. Дијаграм потрошње активне снаге у процесу пумпања

У режиму филтрације погона, односно при протоку 2200 m³/h, погон троши око $P_{250} = 160 \text{ kW}$ при брзини 250 ob/min. На слици 7 приказан је дијаграм гдје се види потрошња у филтрацији.



Сл. 7. Дијаграм потрошње активне снаге у процесу филтрације

Током рада постројења сви пригушни вентили су били отворени, односно није било потребно вршење пригушења.

При томе је висина муљног стуба у пријемном базену била око 5 метара, тј. електромоторни погон је омогућио фину регулацију нивоа базена. На овај начин нису настајали скокови и пропади нивоа муља у пријемном базену, јер није било великих и изненадних промјена брзина обртања пумпе.

VI. ОЧЕКИВАНЕ И РЕАЛНЕ УШТЕДЕ

Са новим системом очекивале су се велике уштеде у потрошњи електричне енергије као и једноставнија експлоатација. Као прво, замјеном синхроног мотора 1250 kW, који је при константној брзини 500 об/мин из мреже узимао снагу $P_{500}^{SM} = 1000 kW$, новим асинхроним од 500 kW остварено је једноставније и јефтиније одржавање. Даље, коришћењем регулације брзине мотора са фреквентним регулатором, очекивано је да мотор из мреже узима око 100 kW, односно 70 kW. Са електротехничке стране добре особине регулацијом брзине фреквентним регулатором су „мекан“ старт (полазна струја је $1,5I_n$), а и мања струја у трајном раду. На овај начин су елиминисани струјни удари на мрежу при старту, а такође и механички удари на мотор и пумпу.

Кориштен је нисконапонски систем (трансформатор 6kV/690 V, фреквентни регулатор, мотор) који је мање инвестиције у односу на средњенапонски систем (цијена НН система је око 135000 ВАН, а цијена СН система је око 180000 ВАН).

Очекиване уштеде у електричној енергији у два нова радна режима, у односу на претходни режим рада са синхроним мотором су:

$$\Delta P_{290} = P_{500}^{SM} - P_{290} = 1000 - 97,5 = 902,5 kW \quad (16)$$

$$\Delta P_{260} = P_{500}^{SM} - P_{260} = 1000 - 70,3 = 929,7 kW \quad (17)$$

Како пумпа током године ради са протоком $Q=2500 m^3/h$ око 4100 часова и са протоком $Q=2200 m^3/h$ око 700 часова, а цијена за потрошену електричну енергију је 0,065 ВАН/kWh, имамо да су уштеде електричне енергије промјеном брзине за ова два режима:

$$C_{e1} = \Delta P_{290} \cdot c_e \cdot T_1 = 902,5 \cdot 0,065 \cdot 4100 = 240.516 ВАН \quad (18)$$

$$C_{e2} = \Delta P_{260} \cdot c_e \cdot T_2 = 929,7 \cdot 0,065 \cdot 700 = 42.301 ВАН \quad (19)$$

Укупна уштеда у електричној енергији и одржавању при регулацији брзине пумпе фреквентним регулатором је:

$$C_e^{укупно} = C_{e1} + C_{e2} = 240516 + 42301 = 282817 ВАН \quad (20)$$

Из (20) видимо да су укупне очекиване уштеде у електричној енергији око 283.000 ВАН на годишњем нивоу, добијене рачунским путем.

Реалне уштеде на основу извршених мјерења су међутим другачије:

$$\Delta P_{280} = P_{500}^{SM} - P_{280} = 1000 - 180 = 820 kW \quad (21)$$

$$\Delta P_{250} = P_{500}^{SM} - P_{250} = 1000 - 160 = 840 kW \quad (22)$$

$$C_{e1} = \Delta P_{280} \cdot c_e \cdot T_1 = 820 \cdot 0,065 \cdot 4100 = 218.530 ВАН \quad (23)$$

$$C_{e1} = \Delta P_{250} \cdot c_e \cdot T_1 = 840 \cdot 0,065 \cdot 700 = 38.220 ВАН \quad (24)$$

Из (21) и (20) укупна реална уштеда је око 257.000 ВАН. Разлика у очекиваној и реалној уштеди је 26.000 ВАН, односно око 10%.

На основу спроведене анализе, одступање око 10% у оствареној ефикасности је очекивано и прихватљиво, јер у њој нису уважени губици у сувом трансформатору и инвертору, као и додатни губици у пумпи који су настали због промјене радних режима.

VII. ЗАКЉУЧАК

У раду смо истражили како одабир регулисаног електромоторног погона са асинхроним мотором на постојећој пумпи утиче на смањење трошкова пумпног система и потрошње електричне енергије, односно увећање енергетске ефикасности. Такође, упоредили смо очекиване радне карактеристике електромоторног погона пумпе добијене рачунским путем са измјереним вриједностима у конкретном реализованом погону.

Показали смо да израчунате карактеристике рада пумпног постројења (брзина обртања за одређени проток) одговарају експлоатационим карактеристикама и дају значајно побољшање ефикасности, повећавање робусности система, те лакше управљање и одржавање.

Међутим, очекивана потрошња електричне енергије, добијена прорачунима у фази пројектовања, је за око 10% мања од измјерених вриједности за оба радна режима због занемарења која су начињена у фази идејног пројектовања (губитке у сувом трансформатору и инвертору, који на основу спецификација Schneider Electric-а укупно износе око 30kW, те промијењеној ефикасности пумпе због промјене радне тачке). Самим тим, и уштеде у електричној енергији су мање од очекиваних. Ипак, разлика очекиваних и реалних уштеда је толика да се не доводи у питање исплативост самог пројекта и инвестиције која ће се отплатити у врло кратком року. Осим тога, у фази пројектовања очекивало се да ће бити потребно вршити додатну регулацију протока вентилима, али у експлоатацији се показало да за тиме нема потребе, што додатно смањује трошкове одржавања и увећава робусност и ефикасност новог система.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Muhammad H Al-Khalifah and Gregory K. McMillan, "Control valve versus variable speed drive for flow control," Presented at ISA Automation Week 2012.
- [2] Раденко Марјановић, „Моделовање и анализа рада високонапонског синхроног мотора у погону помпне станице,“ Електротехнички факултет Бања Лука, 2013.
- [3] Допунски рударски пројекат – Пројект депоније муља, Приједор, 2014.
- [4] Раденко Марјановић, „Побољшање енергетске ефикасности у пумпном постројењу коришћењем фреквентног регулатора,“ ЕНЕФ Бања Лука, 2013.
- [5] Technical and accompanying document for 4000/71&4000/71a, USSR, 1982.

ABSTRACT

This paper presents a study of improving energy efficiency in the pumping plant inside mine using regulated drives with the frequency converter. The aim was to compare the calculation results of the expected projected mode and efficiency, with measured of working values and efficiency of the plant in exploitive.

ANALYSIS OF THE ACHIEVED INCREASE IN THE ENERGY EFFICIENCY OF THE PUMPS PLANT WITH FREQUENCY REGULATION

Radenko Marjanović, Petar Matić