



UTICAJ RADA ENERGETSKIH PRETVARAČA VEĆE SNAGE, NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE JEDNOG OD OBJEKATA RB“KOLUBARA“ LAZAREVAC

Nenad Stevanović*, Mihailo Tišma,
Dragan Slavković, Aleksandar Dimitrijević
EPS PD RB“Kolubara” doo “Kolubara Površinski kopovi” Baroševac

Sadržaj: U radu su prikazani praktični rezultati merenja i harmonijske analize napona i struja na više naponskih nivoa napajanja na jednom od revitalizovanih rotornih bagera u okviru površinskih kopova RB“Kolubara“ Lazarevac. Elektromotorni pogoni na ovom bageru napajaju se preko niskonaponskih frekventnih regulatora. Radom su obuhvaćeni različiti naponski nivoi: sredjenaponski nivo (6kV), niskonaponski nivo napajanja frekventnih pretvarača (500V) kao i niskonaponski nivo opšte potrošnje (400/230V).

Cilj rada je da pokaže kakav uticaj ima rad frekventnih pretvarača na ostale elektro uređaje napajane iz opšte potrošnje električne energije na bageru

Ključne reči: viši harmonici - kvalitet napajanja - izobličenje struje - izobličenje napona

1. UVOD

U ovom radu prikazan je uticaj rada frekventnih pretvarača veće snage na kvalitet električne energije kroz praktičan primer jednog većeg rudarskog objekta. Snimani su parametri kvaliteta električnog napajanja, različitih naponskih nivoa, na jednom od revitalizovanih rotornih bagera na površinskom kopu Kolubara. Ovaj bager vrši otkopavanje na jednom od jalovinskih sistema našeg najvećeg površinskog kopa (polje D). To je jedan od revitalizovanih rotornih bagera u Kolubari, na kome su primenjena frekventna pretvarači za napajanje svih elektromotornih pogona (EMP). Obzirom da na EMP ostalih objekata, tehnološke celine u okviru koga ovaj bager radi, nije moguće vršiti regulaciju brzine prednosti primenjenih frekventnih regulatora nisu u potpunosti iskorišćene. Promena brzine na u jednoj ovakvoj celini doprinela bi npr. ujednačavanju kapaciteta i povećanju efikasnosti, kao i smanjenju utroška električne energije.

Međutim pored niza opšte poznatih prednosti primene frekventnih regulatora za napajanje EMP postoji jedan prateći nepoželjan efekat. To je pojava harmonijskog izobličenja struje i napona (deformacija njihovog prostoperiodičnog oblika između ostalog), a time i određenih smetnji na ostalim elementima EES-a kao i na upravljačko-mernoj tehnici.

Doskorašnji nedostatak rešenja sa frekventnim pretvaračima za napajanje EMP, njihova visina cene, prestao je to da bude jer postaje uporediva sa cenom

drugih rešenja, a vreme isplativosti investicionih ulaganja je sve kraći.

2. MERNI POSTUPAK

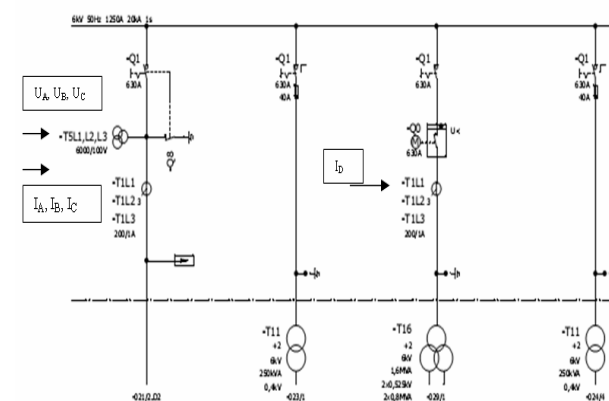
Snimanje parametara kvaliteta električnog napajanja vršeno je trofazno, korišćenjem mrežnog analizatora visokih performansi i velike brzine semplovanja. Dodatna analiza na PC osnovi rađena je uz pomoć softverskog alata specijalizovanog za ovaj mrežni analizator. Rad uređaja, merenje i preračunavanje, saglasno je sa standardima IEE1159, IEC61000 i EN50160.

U narednom delu teksta biće malo reči o mernim tačkama korišćenim u mernom postupku.

Na slici br. 1 prikazana je jednopolna šema 6kV razvoda. Na ovoj slici prikazano je 6 kV napajanje u okviru koga se vide:

-energetski transformator (-T16) za napajanje energetskih pretvarača

-energetski transformatori (-T11) opšte potrošnje i drugih EMP manjih snaga koji se ne napajaju preko frekventnih regulatora.



Sl. 1. Jednopolna šema 6kV razvoda na glodaru (sa prikazanim mernim tačkama)

Napajanje bagera (glodara) električnom energijom napona 6kV vrši se preko visokonaponskog kabla za teške rudarske uslove. Prvi deo snimanja je obavljen na 6kV dovodu (slika br. 1-jednopolna šema 6 kV razvoda). Naponski krajevi mrežnog analizatora vezani su, u tom slučaju, direktno na sekundar naponskih mernih transformatora 6/0,1 kV a strujni ulazi na sekundar

strujnih mernih transformatora prenosnog odnosa 200/1A preko amper klješta prilagođenih za priključak na merni uređaj bez prekida strujnog kruga. Merne tačke su prikazane na istoj slici. Za napajanje energetskih pretvarača služi energetski transformator 6/2x0,525kV sprege Dy5/d0 snage 1600kVA (-T16). Transformator je sa dva sekundara od kojih je jedan spregnut u trougao a drugi u zvezdu. Pored tri fazne struje 6kV napajanja istovremeno je snimljena i struja jedne faze primara energetskog transformatora za napajanje frekventnih pretvarača, u cilju dobijanja istovremenih faznih oblika.

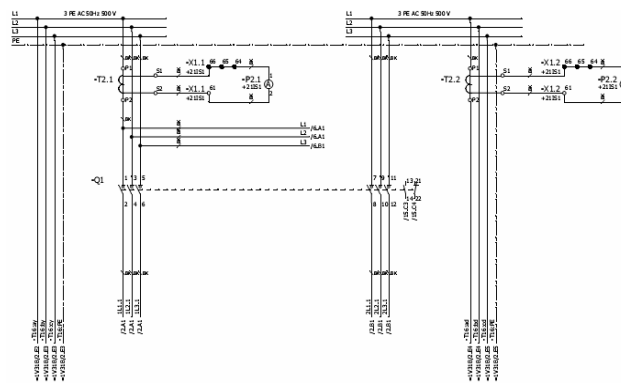
U drugom slučaju vršeno je snimanje faznih oblika struja primara energetskog transformatora za napajanje frekventnih pretvarača i faznih napona 6kV napajanja. Svrha ovog snimka jeste da se mogu uporediti talasni oblici sve tri primarne fazne struje pomenutog transformatora.

Na slici broj 2 prikazano je napajanje frekventno regulisanih EMP. Na toj slici prikazan je samo deo napajanja regulisanih EMP najveće snage, ostali pogoni se napajaju preko sopstvenih invertora napojenih iz dva zajednička mrežna ispravljača (+22IV1 i +22IV2), svaki snage od po 520kVA. Ostali deo regulisanih EMP nije prikazan zbog obima rada. Na ovoj slici uočavamo mrežne diodne ispravljače za napajanje invertora, i to za pogon radnog točka i trake radnog točka dva a za ostale pogone druga dva.

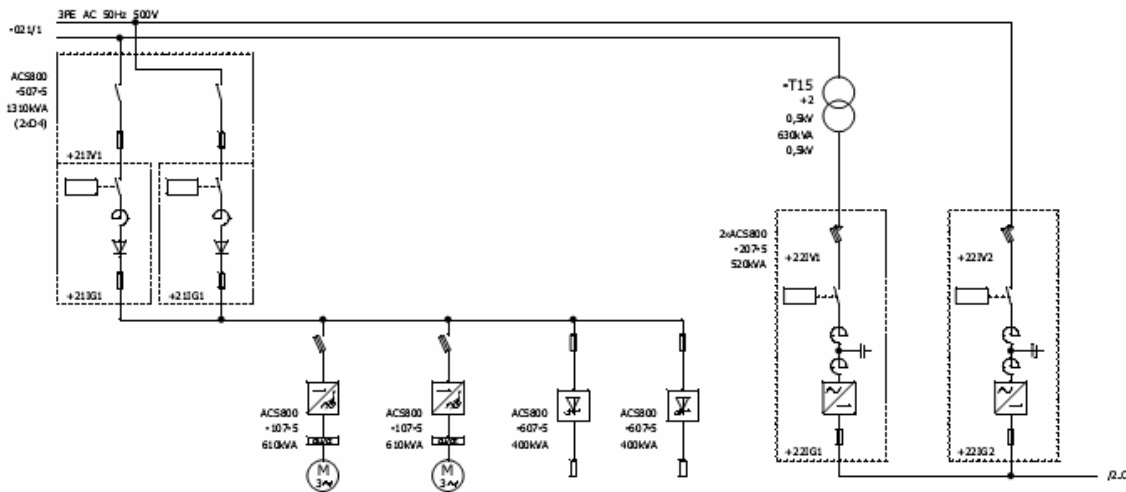
Sljedeći snimak se odnosi na uticaj rada energetskih pretvarača na kvalitet električnog napajanja na naponskom nivou 525VAC. Ovdje su pravljene snimke u dve konfiguracije, jedna se odnosi na napajanje sa sekundara povezanog u trougao a druga na napajanje sa

sekundara povezanog u trougao. Naponski ulazi mrežnog analizatora povezivani su direktno na već predviđene merne krajeve dok je jedan strujni kanal iskorišćen za snimanje jedne fazne struje priključenjem na sekundar strujnih mernih transformatora prenosnog odnosa 200/1A preko strujnih klješta kao kod prvog snimanja (slika 3).

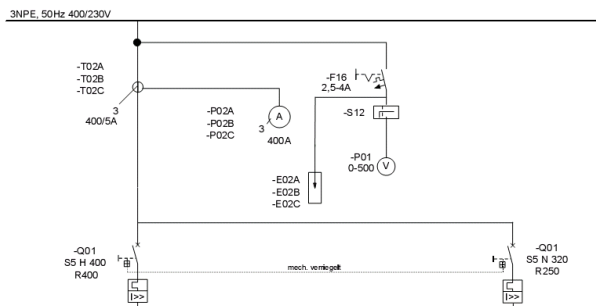
Uticaj rada energetskih pretvarača na parametre kvaliteta električnog napajanja ostalih niskonaponskih potrošača opšte potrošnje, sniman je priključenjem naponskih ulaza analizatora direktno na sekundar energetskog trafoa 6/0,4 kV 250 kVA a strujnih kanala na sekundar strujnih mernih transformatora prenosnog odnosa 400/5 A preko strujnih klješta kao kod prvog snimanja. Mesto priključenja može se videti na slici br.4.



Sl. 3. Tropolna šema razvoda napajanja frekventnih pretvarača naponom 525VAC



Sl. 2. Jednopolna šema napajanja frekventno regulisanih elektromotornih pogona na glodaru

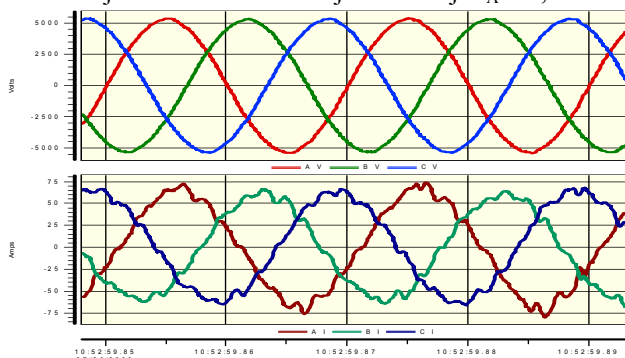


Sl. 4. Jednopolna šema razvoda napajanja opšte potrošnje (400/230V)

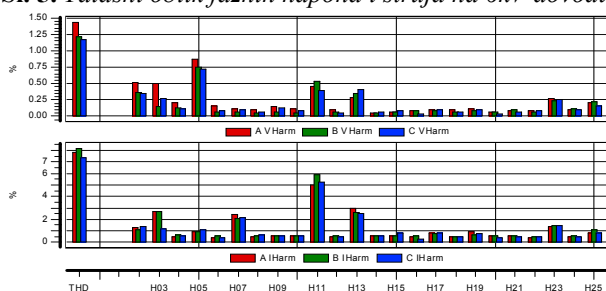
3. REZULTATI MERENJA

Talasni oblik faznih napona i struja snimljenih na dovodu 6kV, prikazan je na slici br. 5, dok je harmonijski sastav prikazan na slici br. 6. U momentu snimanja ovih talasnih oblika efektivne vrednosti međufaznih napona iznosile su $U_{AB}=6497,28V$; $U_{BC}=6463,48V$ i $U_{CA}=6537,80V$ dok su struje opterećenja bile $I_A=48,05A$; $I_B=43,97A$ i $I_C=45,64A$. Ove struje opterećenja ujedno predstavljaju ukupno

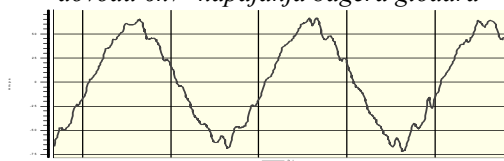
opterećenje bagera. Može se konstatovati da je opterećenje u velikoj meri simetrično raspoređeno po fazama. Istovremeno je iskorišćen još jedan preostali strujni kanal (kanal D) i snimana je primarna struja faze A trafoa za napajanje energetskih pretvarača a njen talasni oblik je prikazan na slici br 7. Efektivna vrednost ove struje u momentu snimanja iznosila je $I_A=43,12A$.



Sl. 5. Talasni oblik faznih napona i struja na 6kV dovodu



Sl. 6. Harmonijski sastav faznih napona i struja na dovodu 6kV napajanja bagera glodara



Sl. 7. Talasni oblik fazne struje primara transformatora za napajanje energetskih pretvarača na glodaru

Ukupno harmonijsko izobličenje napona izraženo je prema relaciji br. 1 a u odnosu na prvi harmonik odgovarajućeg faznog napona.

$$THDU[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

Ukupno harmonijsko izobličenje struje izraženo je prema relaciji br. 2 a u odnosu na prvi harmonik odgovarajuće fazne struje.

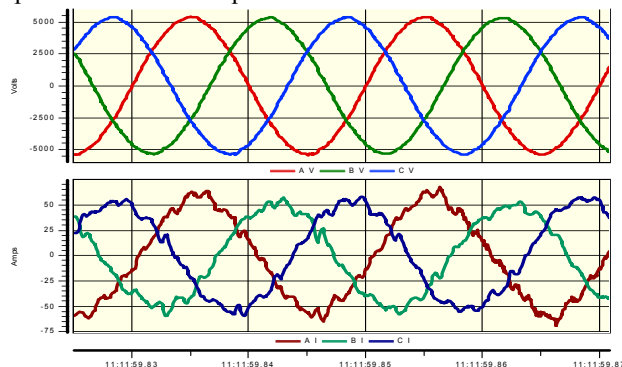
$$THDI[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Iz harmonijskog spektra faznih napona i struja 6kV napajanja (sl.6) uočavamo sledeće:

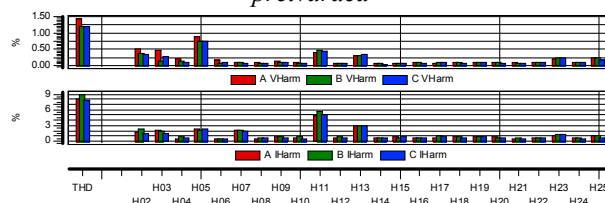
- kod naponskog spektra dominantan je 5-ti, a izraženi su još 2.,3.,11.-ti i 13.-ti harmonik
- kod strujnog spektra dominantan je 11.-ti, a izraženi su još 3., 7. i 13.-ti harmonik.

U momentu snimanja talasnih oblika struja napajanja zabeležena su sledeća ukupna harmonijska izobličenja tih struja: $THDI_A=7,82\%$ od I_{A1} , $THDI_B=8,21\%$ od I_{B1} i $THDI_C=7,40\%$ od I_{C1} dok je za struju faze A primara transformatora energetskih pretvarača iznosila $THDI=8,53\%$ od I_1 .

Talasni oblici faznih napona i struja primara energetskog transformatora za napajanje frekventnih pretvarača prikazan je na slici br.8 dok je harmonijski spektar istih veličina prikazan na sl.br.9.



Sl. 8. Talasni oblici faznih napona i struja primara energetskog transformatora za napajanje frekventnih pretvarača



Sl. 9. Harmonijski sastav faznih napona i struja primara transformatora za napajanje energetskih pretvarača

Tabela 1. Numerički podaci snimka sa slika 8. i 9.

f	RMS		THDU _f (% U _{f1})	THDI _f (% I _{f1})
	U _f (V)	I _f (A)		
A	3789,53	40,45	1,43	8,11
B	3737,37	37,27	1,20	8,92
C	3752,80	39,16	1,18	7,93

Dalja snimanja se odnose na parametre kvaliteta električne energije na niskonaponskom nivou. Sledeće snimanje je vršeno na niskonaponskom (525V) nivou napajanja samih energetskih pretvarača pogona radnog točka. Najpre je sniman talasni oblik faznih napona sa sekundara trafoa energetskih pretvarača, koji je spregnut u vezu zvezda.

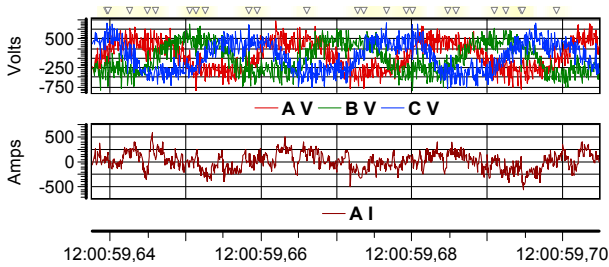
Talasni oblik faznih napona napajanja energetskih pretvarača, uzetih sa sekundara transformatora koji je spregnut u zvezdu, prikazan je na slici br. 10. Na njoj može se uočiti značajno izobličenje prostoperiodičnog talasnog oblika napona.

Na slici br. 11 prikazan je harmonijski sastav napona čiji su talasni oblici prikazani na slici br. 10. Uočavamo da je dominantan uticaj trećeg harmonika, koji možemo izraziti preko individualne harmonijske distorzije (izobličenja) napona HDU_h definisanog relacijom br. 3 preko osnovnog harmonika

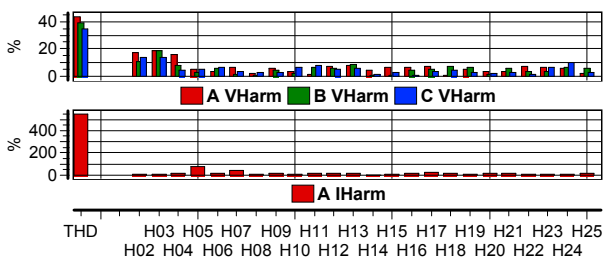
$$HDU_h[\%] = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

Uticaj pojedinih harmonika fazne struje na ukupno izobličenje (distorziju) prostoperiodičnog oblika izrazićemo preko tzv. individualne harmonijske distorzije struje prema relaciji br.4

$$HDI_h [\%] = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \dots\dots\dots(4)$$



Sl. 10. Talasni oblik faznih napona i struje napajanja energetskih pretvarača (sa sekundara vezanog u zvezdu)



Sl. 11. Harmonijski sastav faznih napona i struje napajanja energetskih pretvarača (sa sekundara vezanog u zvezdu)

Pored dominantnog trećeg harmonika napona zapažamo značajno prisustvo drugog i četvrtog harmonika. Numeričke vrednosti su pregledno prikazane u okviru tabela 2. i 3.

Tabela 2. Numerički podaci snimka sa slika 10. i 11.

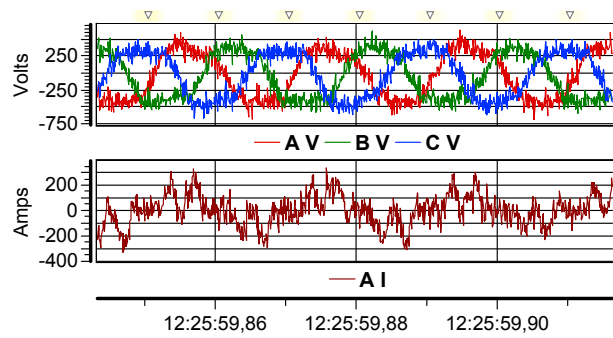
f	RMS			THD U _f (% U _{f1})	THD U _L (% U ₁)	THDI _f (% I _{f1})
	U _f (V)	I _f (A)	U _L * (V)			
A	382,80	219,6	589,37	43,77	18,18	548,18
B	374,69		590,25	38,89	16,28	
C	392,41		619,77	34,95	21,91	

Tabela 3. Dominantni harmonici snimka sa slika 10. i 11

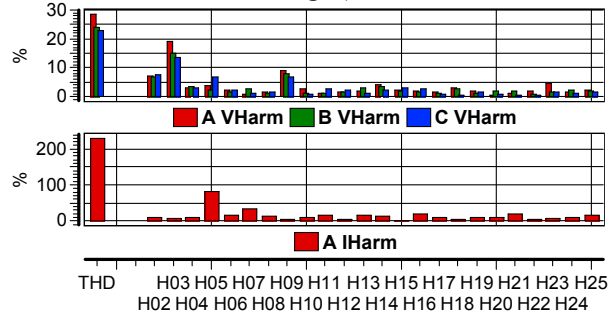
f	HDI _{f3} (% U _{f1})	HDI _{f2} (% U _{f1})	HDI _{f5} (%) I _{f1}	HDI _{f7} (% I _{f1})
A	18,655	16,964	75,42	47,44
B	19,068	10,500		
C	13,283	13,611		

Talasni oblici napona i jedne fazne struje na sekundaru trafo (sprega u trougao) za napajanje energetskih pretvarača prikazani su na slici br.12 dok je njihov harmonijski sastav prikazan na slici br.13. Numeričke vrednosti sa ovih slika pregledno su date u tabelama br. 4 i 5.

Može se uočiti veliko izobličenje, kako struje tako i napona, i to značajno veće od dozvoljenih i preporučenih limita. Međutim ovo napajanje čini jednu nezavisnu galvansku celinu i rad energetskih pretvarača je bez ikakvih poremećaja i smetnji.



Sl. 12. Talasni oblik faznih napona i struje napajanja energetskih pretvarača (sa sekundara vezanog u trougao)



Sl. 13. Harmonijski sastav faznih napona i struje napajanja energetskih pretvarača (sa sekundara vezanog u trougao)

Tabela 4. Numerički podaci snimka sa slika 12. i 13.

f	RMS			THDU _f (% U _{f1})	THDU _L (% U ₁)	THDI _f (% I _{f1})
	U _f (V)	I _f (A)	U _L * (V)			
A	313,41	117,43	552,08	28,58	7,68	230,10
B	343,47		543,21	23,93	7,90	
C	344,33		553,65	22,95	10,07	

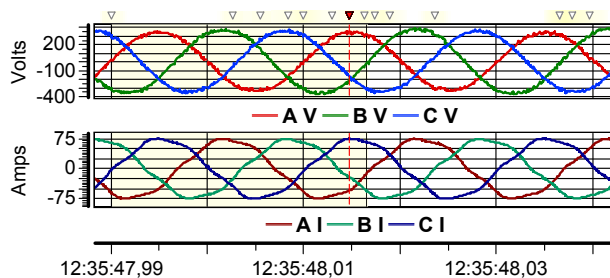
* U_{A-B}, U_{B-C}, U_{C-A}

Tabela 5. Dominantni harmonici snimka sa slika 12. i 13

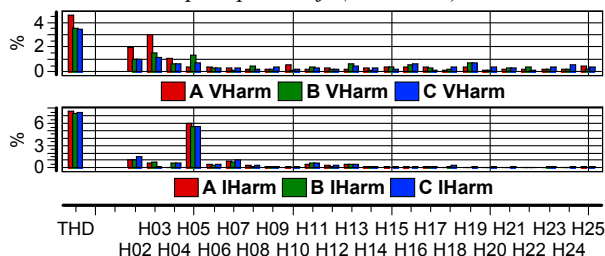
f	HDI _{f3} (% U _{f1})	HDI _{f2} (% U _{f1})	HDI _{f5} (% I _{f1})	HDI _{f7} (% I _{f1})
A	19,107	9,157	81,8	32,95
B	14,954	7,744		
C	13,419	6,831		

Sada dolazimo do, možemo slobodno reći glavnog cilja ovog rada, a to je da pokažemo kakav je uticaj viši harmonika napona i struje prouzrokovanih radom frekventnih regulatora, na opštu potrošnju na bageru. Naredni snimak (slika br.14) vremenske promene faznih napona i struja ovog napajanja pokazuju da postoji izvesno izobličenje. Sa slike br.15, iz prikaza harmonijskog spektra tih signala uočavamo pored ukupne harmonijske distorzije i uticaj pojedinih harmonika. Kod naponkog izobličenja dominantan je treći harmonik uz prisustvo drugog harmonika, dok kod struje izrazito je dominantan treći harmonik.

Može se reći da ukupno harmonijsko izobličenje napona zadovoljava kriterijume standarda IEC 61000-2-4 čak i za klasu 1 potrošača (veoma osjetljivih laboratorijskih elektrouređaja) čija granica je THDU=5% (u našem slučaju je ono maksimalno 4,6% za fazu) dok je od limita za industrijske potrošače (10%) veoma daleko.



Sl. 14. Talasni oblik faznih napona i struja –opšta potrošnja(230/400V)



Sl. 15. Harmonijski sastav faznih napona i struja –opšta potrošnja(230/400V)

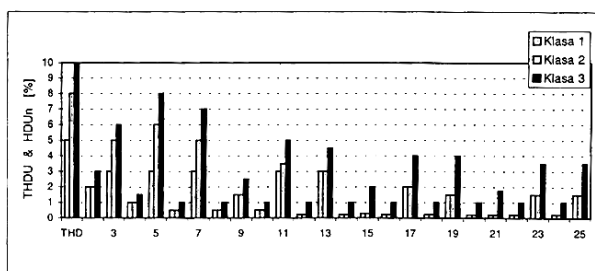
Tabela 6. Numerički podaci snimka sa slika 14. i 15.

f	RMS			THDU _f (% U _{fl})	THDU _L (% U _l)	THDI _f (% I _{fl})
	U _f (V)	I _f (A)	U _L [*] (V)			
A	245,68	52,21	439,76	4,60	2,43	7,67
B	261,41	51,81	434,76	3,54	1,64	7,32
C	253,75	52,61	440,90	3,44	2,58	7,46

* U_{A-B}, U_{B-C}, U_{C-A}

Tabela 7. Dominantni harmonici snimka sa slika 14. i 15

f	HDI _{f3} (% U _{fl})	HDI _{f2} (% U _{fl})	HDI _{f5} (%) I _{fl}	HDI _{f2} (% I _{fl})
A	3,0016	1,9888	6,035	1,1070
B	1,4887	1,0277	5,604	1,0258
C	1,1783	1,0144	5,628	1,5731



Sl. 16 Limiti ukupnog harmonijskog izobličenja kao i limiti pojedinih harmonika napona prema standardu IEC 61000-2-4

4. ZAKLJUČAK

Iz ovako dobijenih praktičnih rezultata može se reći da i pored velikog harmonijskog izobličenja napona napajanja energetskih pretvarača elektromotornih pogona na ovom bageru, nema značajnijih izobličenja na drugim naponskim nivoima. Može se zaključiti, da se izvan te galvanske celine ne prostiru, bar ne u značajnijoj meri, harmonici višeg reda. Komandno-signalni naponi za

upravljačku elektroniku su obezbeđeni iz drugih galvanskih celina na koje pomenuti viši harmonici nemaju većeg uticaja.

Harmonijsko izobličenje 6kV-tnog napona napajanja bagera je zanemarljivo, takođe i na ostalim naponskim nivoima je slična situacija. Ovime je pokazano i potvrđeno da rad frekventnih pretvarača na ovom bageru-glodararu nema većih štetnih uticaja na potrošače kako na samom objektu tako i van njega tj. na potrošače koji se napajaju iz iste 6kV-tne napojne mreže.

Napretkom tehnologije materijala, prekidačkih poluprovodnih elemenata (povećanjem njihove brzine i pouzdanosti) kao i primena novijih rešenja, postiže se sve veća opravdanost primene frekventno regulisanih EMP i na rudarskim objektima.

5. LITERATURA

- [1] V. Katić, V. Terzija, *Kvalitet električne energije u elektrodistributivnim mrežama*, Studija Elektroprivrede Srbije, 2004., Beograd
- [2] IEC Standard 61000-2-4- "Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 2-4: Environment-Compatibility levels in industrial plants for low frequency conducted disturbances"-Internacional Standard, IEC, Geneve, 2002
- [3] European standard: "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", EN 50160, 1995
- [4] Power Guide-User manual-Drantez BMI Inc USA
- [5] Dran View 6.0-Power quality browser- User manual-Drantez BMI Inc USA

IMPACT WORK OF HIGHER ENERGY CONVERTERS, ON POWER QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY FROM ONE OBJECT RB "KOLUBARA" LAZAREVAC

Abstract - Growing number of mining facilities on „Kolubara „ open - pit mining is equipped with power converters for power supply and control of high power motor drives. There used to be thyristor rectifiers for DC electric motor drives, then to a lesser extent, so-called soft starters, and nowadays are mainly used frequency regulators (in new and revitalized facilities). Considering that the application of these devices brings, in addition to many significant advantages, also the fault (beside their high price which has decreasing trend) distortion of supply voltage and other electric power quality parameters. This paper presents results of supply quality measuring obtained in a such facility on several voltage levels.

Key words: power quality – distortion currents - higher harmonics- distortion voltage – measurement