

UTICAJ RADA FREKVENTNOG REGULATORA NAPONA 690V NA POVEĆANJE SADRŽAJA VIŠIH HARMONIKA U POGONU KOMPRESORA

Aleksandar Nikolić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Kratak sadržaj: U radu je analiziran uticaj rada jednog savremenog frekventnog pretvarača na napojnu mrežu praćenjem parametara kvaliteta električne energije. Reč je o pogonu kompresora u rafineriji koji se napaja preko frekventnog regulatora koji radi na višem naponskom nivou (690V). Iz tih razloga je na ulazu u regulator primenjen suvi transformator prenosnog odnosa $6kV/0,7kV$, pa je posebno analiziran uticaj regulatora na transformator. Prikazani rezultati su dobijeni merenjem potrošnje i sadržaja viših harmonika u naponu i struji napajanja, dok je analiza izvršena prema važećem evropskom standardu o kvalitetu električne energije EN 50160.

Ključne reči: frekventni regulator, merenje, analiza, kvalitet električne energije

1. UVOD

Poznato je da oko 75% ukupne potrošnje električne energije odlazi na napajanje elektromotora, odnosno elektromotornih pogona. U tom smislu je i upravljanje elektromotorima promenom brzine obrtanja, odnosno primena frekventnih pretvarača sve više rasprostranjena kako zbog zahteva različitih industrijskih procesa za povećanjem produktivnosti i kvaliteta krajnjeg proizvoda, tako i radi postizanja veće uštede električne energije [1-3].

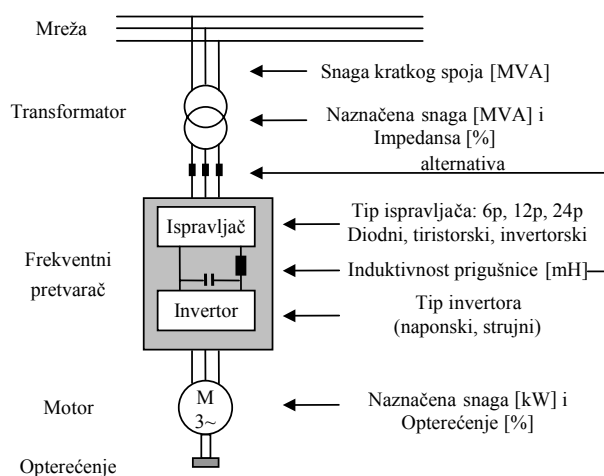
Bez obzira na topologiju frekventnog pretvarača, tj. da li je reč o naponskom ili strujnom invertoru, činjenica je da pri radu dovode do ubrizgavanja struja višeg harmonijskog sadržaja u napojnu mrežu [4-5]. Ovo harmonijsko izobličenje predstavlja neku vrstu „zaprljanja“ u električnim postrojenjima koje može da dovede do problema, ako zbir harmonijskih struja postane veći od nekih utvrđenih granica koje su definisane odgovarajućim standardima [6-8]. Struje i naponi viših harmonika su posledica nelinearnog tipa opterećenja, poput motor startera, računarskih i drugih sličnih elektronskih sistema, napajanja sistema za varenje, sistema besprekidnih napajanja i slično. Negativni efekti pojave viših harmonika mogu biti pregrevanje transformatora, napojnih kablova, motora, generatora i kondenzatorskih baterija priključenih na isti sistem napajanja kao i uređaji koji generišu više harmonike. Takođe, može doći do pojave treptanja (flikera) računarskih ekrana i osvetljenja, aktiviranja prekidača i releja, grešaka u očitavanju mernih sistema, prekida u radu (resetovanja) računara i kompletnih računarskih sistema.

Ako uzrok pomenutih simptoma nije poznat, onda je to razlog da se ispita harmonijsko izobličenje elektro-energetskog sistema u okviru samog postrojenja, jer se navedeni efekti obično prvo javljaju u postrojenju (sistemu) potrošača, pre nego što se mogu uočiti na strani distributivnog sistema. Iz gore navedenog se nameće značaj analize uticaja rada savremenih frekventnih pretvarača na napojnu mrežu sa aspekta harmonijskih izobličenja i opšteg kvaliteta električne energije.

U radu su predstavljeni rezultati analize rada pogona kompresora u rafineriji nafte koji pokreće motor snage 385kW napona 690V, a upravlja se frekventnim pretvaračem Danfoss VLT 5000 napona 690V snage 400kW priključenim na 6kV mrežu rafinerije preko transformatora 6kV/0,7kV, 500kVA.

2. TEHNIČKI ZAHTEVI U POGLEDU HARMONIJSKIH IZOBLIČENJA

Na slici 1 su prikazani faktori koji imaju neki uticaj na više harmonike u elektromotornom pogonu sa frekventnim pretvaračem [4]. Pri tome harmonici struje zavise od konstrukcije pogona, dok harmonici napona predstavljaju harmonike struje pomnožene impedansama napojnog sistema.



Slika 1 - Faktori u elektromotornom pogonu koji utiču na više harmonike

U narednoj tabeli su sumirani različiti faktori i njihovi efekti koji utiču na povećanje i smanjenje sadržaja viših harmonika.

Tabela 1. Različiti faktori u elektromotornom pogonu koji utiču na više harmonike.

Faktor	Efekat
Veća snaga motora	Veći harmonici struje
Veće opterećenje motora	Veći harmonici struje
Veća induktivnost u jednosmernom kolu ili na ulazu u pretvarač	Manji harmonici struje
Veći broj impulsa u ispravljaču	Manji harmonici struje
Veća snaga transformatora	Manji harmonici napona
Manja impedansa transformatora	Manji harmonici napona
Veći napon kratkog spoja napojne mreže	Manji harmonici napona

2.1. Izobličenja struje na strani napajanja

Ispravljač u radu dovodi do izobličenja struje na strani napojne mreže, a takođe proizvodi kratkotrajne skokovite promene na talasnom obliku napona [9-10]. Da bi se

ovi problemi prevazišli, a u skladu sa preporukama uputstava za regulaciju harmonika [7-8], često se primenjuju više-pulsni ispravljači (12 ili 24), a takođe i aktivni ispravljači. Standardni trofazni 6-to pulsni ispravljač generiše visok sadržaj harmonika nižeg reda, prvenstveno 5-tog, 7-mog i 11-tog, naročito ako je induktivnost prigušnice mala. Ukoliko se dva ovakva ispravljača povežu u paralelu radi napajanja istog jednosmernog međukola pretvarača, dobija se 12-to pulsni ispravljač. Ulaz ovakvog ispravljača je tronamotajni transformator ili dva dvonamotajna transformatora, a u oba slučaja su sekundari pomereni fazno za 30° , čime se postiže da na strani napajanja najniži harmonik bude 11-ti. Na sličan način se vezivanjem dva 12-to pulsna ispravljača dobija 24-ro pulsni ispravljač koji pri nižim frekvencijama potpuno eliminiše harmonike, ali mu je glavni nedostatak visoka cena [7].

Ukoliko se primeni fazno regulisani tiristorski ispravljač, dobiće se slični talasni oblik kao kod 6-to pulsnog diodnog ispravljača, ali uz mogućnost vraćanja energije u mrežu pri kočenju pri uglovima paljenja tiristora većim od 90° kada je napon jednosmernog međukola negativan. Loša strana ovog ispravljača, i pored mogućnosti regenerativnog kočenja što mu je značajna prednost za pojedine aplikacije, je relativno loš ukupni faktor snage pri parcijalnom opterećenju. U ovom slučaju se primenom višepulsnog ispravljača istog tipa značajno može smanjiti ukupni faktor izobličenja struje (THD_i) sa 30% koliko obično iznosi kod 6-to pulsnog na 10% kod 12-to pulsnog. Ako se primeni aktivni ispravljač, osim mogućnosti regenerativnog kočenja moguće je kontrolisati i naponski nivo u jednosmernom međukolu i $\cos\phi$ nezavisno od toka snage u kolu. Kod ovog pretvarača ukupni faktor izobličenja struje obično iznosi oko 4%.

2.2. Ulazni faktor snage

Visoka vrednost ulaznog faktora snage je generalni zahtev za svu električnu opremu. Većina distributivnih preduzeća traži od svojih potrošača visok faktor snage od 0,9 i više (kod nas $>0,96$) da bi se izbeglo plaćanje penala. Ovaj zahtev je posebno važan kod pogona većih snaga.

2.3. Prevazilaženje pojave rezonanse

Ako se radi smanjenja THD faktora struje ili za kompenzaciju faktora snage upotrebe kondenzatorske baterije na napojnoj strani pretvarača, kondenzatori zajedno sa linijskom induktivnošću sistema formiraju LC rezonantno kolo. Slično je i u slučaju primene kondenzatorskih filtera na strani motora radi kompenzovanja veće dužine kabla između pretvarača i motora. Rezonantni režim se javlja ili pojavom viših harmonika napona na strani napojne mreže ili viših harmonika struje proizvedenih od strane ispravljača. Pošto napojna mreža pri srednjem naponskom nivou obično ima veoma malu linijsku otpornost, slabo prigušena LC rezonansa može da izazove ozbilje oscilacije ili prenapone koji mogu da oštete poluprovodničke prekidače u pretvaraču kao i druge komponente ispravljačkog kola [9]. Prevazilaženje pojave rezonanse se rešava još u fazi projektovanja elektromotornog pogona.

2.4. Povećavanje gubitaka u motoru

Pretvarači velikih snaga mogu da generišu značajne vrednosti viših harmonika struje i napona. Ovi harmonici mogu da dovedu do dodatnih energetske gubitaka u namotajima motora i magnetnom jezgru. Kao posledica, snaga motora se smanjuje i motor ne može da radi sa punim kapacitetom. Dodatni gubici u motoru se javljaju kao posledica rada prekidača u ispravljaču i invertoru, kada zbog pojave zajedničkih napona

u odnosu na masu dolazi do značajnog porasta napona između faze motora i mase u odnosu na fazni napon motora, čime se kao rezultat javljaju oštećenja u izolaciji namotaja motora i skraćuje njegov radni vek.

3. KONFIGURACIJA MERNOG SISTEMA

Merni instrument koji se koristi za merenje električnih veličina (napona i struja) i računanje ostalih veličina (snage, faktor snage, faktori izobličenja, viši harmonici napona i struja) na osnovu kojih se određuje kvalitet električne energije prema važećim svetskim standardima je analizator kvaliteta električne energije, premda se mogu koristiti i rešenja sa akvizicionim mernim sistemima [11].

Za ispitivanje je od opreme upotrebljen analizator kvaliteta električne energije proizvođača Chauvin Arnoux tip CA8334, sa pripadajućim setom strujnih senzora tipa AmpFlex 193 i sledećim karakteristikama [12]:

- Merenje napona do 960VAC TRMS (max. 1350VAC) sa tačnošću od $\pm 0.5\%$,
- Merenje struja do 3000A TRMS sa tačnošću od $\pm 0.5\%$,
- Određivanje snage sa tačnošću od $\pm 1\%$,
- Određivanje utrošene/proizvedene energije sa tačnošću od $\pm 1\%$,
- Određivanje faktora snage sa tačnošću od $\pm 0.01\%$,
- Određivanje vrednosti harmonika struja i napona do 50-tog reda,
- Određivanje faktora ukupnog izobličenja sa tačnošću od $\pm 1\%$,
- Instrument ispunjava standard EN IEC 61010, 600 V cat. IV, pollution 2, a ulazi i izlazi su dvostruko izolovani.

Ispitivanje je izvršeno merenjem međufaznih napona i struja i sračunavanjem svih ostalih relevantnih parametara (snage, energije, faktora snage, faktora izobličenja, sadržaja viših harmonika).

Merna oprema je priključenja na kablovskim priključcima sekundarne strane transformatora odakle se napaja samo frekventni regulator koji je sa transformatorom povezan kablom PP41 2x3x95mm², orijentacione dužine oko 6m.

Ispitivanja su obavljena u dva navrata i to prvo pri uslovima normalnog rada kompresora, a zatim je merna oprema ostavljena u stanju konstantnog 24-ro časovnog monitoringa svih relevantnih parametara u trajanju od 5 dana. Ispitivanja su ponovljena i u režimu praznog hoda transformatora.

Uslovi pod kojima je rađeno odgovaraju kalibracijskim uslovima ispitivanja (sobna temperatura), obzirom da je prostor objekta u kome su vršena ispitivanja dodatno klimatizovan.

4. REZULTATI MERENJA

Sumarni rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 2, dok su u tabelama 3 i 4 dati podaci o sadržaju viših harmonika napona i struja, respektivno, sve do 49. reda. Pri tome su harmonici napona upoređeni sa vrednostima datim u standardu EN 50160 za harmonike do 25. reda i sa standardom IEEE 519 za harmonike od 25. do 49. reda, dok su harmonici struje analizirani u odnosu na granične vrednosti predviđene standardom IEEE 519.

Tabela 2. Rezultati ispitivanja parametara kvaliteta električne energije

Veličina	Opis	Min	Max	Srednje
f [Hz]	Frekvencija napona napajanja	49,89	50,07	50,00
U ₁ [V]	Međufazni napon faza 1-2	702,0	727,6	711,9
U ₂ [V]	Međufazni napon faza 2-3	699,7	724,7	709,4
U ₃ [V]	Međufazni napon faza 1-3	702,9	727,3	712,4
V ₁ [V]	Fazni napon prve faze	405,3	420,1	411,0
V ₂ [V]	Fazni napon druge faze	404,0	418,4	409,6
V ₃ [V]	Fazni napon treće faze	405,8	419,9	411,3
I ₁ [A]	Struja opterećenja prve faze	0	337,3	256,7
I ₂ [A]	Struja opterećenja druge faze	0	323,6	246,3
I ₃ [A]	Struja opterećenja treće faze	0	326,0	248,0
THDu [%]	Faktor izobličenja napona	0,3	10,6	8,4
THDi [%]	Faktor izobličenja struje	0	55,1	25,6
P [kW]	Aktivna snaga	0	375,7	287,6
Q [kVAr]	Reaktivna snaga	0	182,9	138,7
S [kVA]	Prividna snaga	0	417,6	319,3
cos (φ)	Faktor snage	0	0,974	0,834

Tabela 3. Harmonici napona prema standardima EN50160 i IEEE 519

	Izmereno [%]	EN50160 [%]	+ / -		Izmereno [%]	IEEE 519 [%]	+ / -
Uh ₂	0,3	2,0	-	Uh ₂₆	0,3	3,0	-
Uh ₃	0,4	5,0	-	Uh ₂₇	0,2	3,0	-
Uh ₄	0,4	1,0	-	Uh ₂₈	0,2	3,0	-
Uh ₅	7,5	6,0	+	Uh ₂₉	0,9	3,0	-
Uh ₆	0,3	0,5	-	Uh ₃₀	0,2	3,0	-
Uh ₇	3,2	5,0	-	Uh ₃₁	1,0	3,0	-
Uh ₈	0,3	0,5	-	Uh ₃₂	0,3	3,0	-
Uh ₉	0,2	1,5	-	Uh ₃₃	0,1	3,0	-
Uh ₁₀	0,3	0,5	-	Uh ₃₄	0,3	3,0	-
Uh ₁₁	3,4	3,5	-	Uh ₃₅	0,7	3,0	-
Uh ₁₂	0,4	0,5	-	Uh ₃₆	0,4	3,0	-
Uh ₁₃	2,6	3,0	-	Uh ₃₇	0,9	3,0	-
Uh ₁₄	0,2	0,5	-	Uh ₃₈	0,4	3,0	-
Uh ₁₅	0,1	0,5	-	Uh ₃₉	0,2	3,0	-
Uh ₁₆	0,3	0,5	-	Uh ₄₀	0,3	3,0	-
Uh ₁₇	1,9	2,0	-	Uh ₄₁	0,5	3,0	-
Uh ₁₈	0,4	0,5	-	Uh ₄₂	0,3	3,0	-
Uh ₁₉	2,0	1,5	+	Uh ₄₃	0,8	3,0	-
Uh ₂₀	0,3	0,5	-	Uh ₄₄	0,3	3,0	-
Uh ₂₁	0,2	0,5	-	Uh ₄₅	0,1	3,0	-
Uh ₂₂	0,3	0,5	-	Uh ₄₆	0,2	3,0	-
Uh ₂₃	1,1	1,5	-	Uh ₄₇	0,4	3,0	-
Uh ₂₄	0,3	0,5	-	Uh ₄₈	0,4	3,0	-
Uh ₂₅	1,2	1,5	-	Uh ₄₉	0,6	3,0	-

Kao što se vidi iz tabele 3, nešto su veće vrednosti 5-tog i 19-tog harmonika. S druge strane, kod harmonika faznih napona utvrđena je značajno visoka vrednost trećeg harmonika (26,2% više od osnovnog) kao i viša vrednost tridesetog harmonika što je posledica radne učestanosti invertora u frekventnom regulatoru (~1,5kHz).

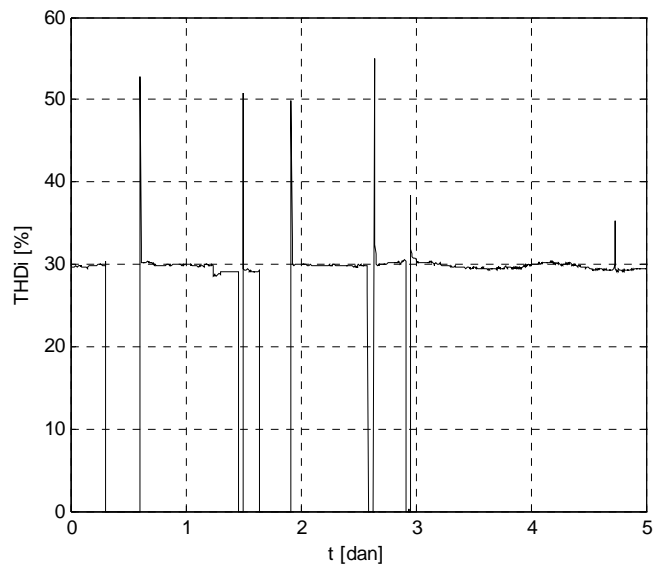
Radi dodatne provere da na ovu vrednost harmonika ne utiče napojna mreža, izvršeno je i merenje na transformatoru pri radu u praznom hodu gde je konstatovana dosta niska vrednost ukupnog izobličenja od 0,71%.

Tabela 4. Harmonici struje prema standardu IEEE 519

	Izmereno [%]	IEEE 519 [%]	+ / -		Izmereno [%]	IEEE 519 [%]	+ / -
Ah ₂	1,2	10,0	-	Ah ₂₆	0,1	1,5	-
Ah ₃	0,6	10,0	-	Ah ₂₇	0,1	1,5	-
Ah ₄	0,3	10,0	-	Ah ₂₈	0,1	1,5	-
Ah ₅	26,9	10,0	+	Ah ₂₉	0,6	1,5	-
Ah ₆	0,1	10,0	-	Ah ₃₀	0,1	1,5	-
Ah ₇	8,1	10,0	-	Ah ₃₁	0,6	1,5	-
Ah ₈	0,2	10,0	-	Ah ₃₂	0,0	1,5	-
Ah ₉	0,2	10,0	-	Ah ₃₃	0,1	1,5	-
Ah ₁₀	0,1	10,0	-	Ah ₃₄	0,1	1,5	-
Ah ₁₁	5,6	4,5	+	Ah ₃₅	0,5	0,7	-
Ah ₁₂	0,1	4,5	-	Ah ₃₆	0,1	0,7	-
Ah ₁₃	3,7	4,5	-	Ah ₃₇	0,5	0,7	-
Ah ₁₄	0,1	4,5	-	Ah ₃₈	0,0	0,7	-
Ah ₁₅	0,2	4,5	-	Ah ₃₉	0,1	0,7	-
Ah ₁₆	0,2	4,5	-	Ah ₄₀	0,0	0,7	-
Ah ₁₇	1,9	4,0	-	Ah ₄₁	0,3	0,7	-
Ah ₁₈	0,0	4,0	-	Ah ₄₂	0,0	0,7	-
Ah ₁₉	1,9	4,0	-	Ah ₄₃	0,4	0,7	-
Ah ₂₀	0,1	4,0	-	Ah ₄₄	0,0	0,7	-
Ah ₂₁	0,1	4,0	-	Ah ₄₅	0,1	0,7	-
Ah ₂₂	0,1	4,0	-	Ah ₄₆	0,0	0,7	-
Ah ₂₃	0,8	1,5	-	Ah ₄₇	0,2	0,7	-
Ah ₂₄	0,0	1,5	-	Ah ₄₈	0,1	0,7	-
Ah ₂₅	1,0	1,5	-	Ah ₄₉	0,3	0,7	-

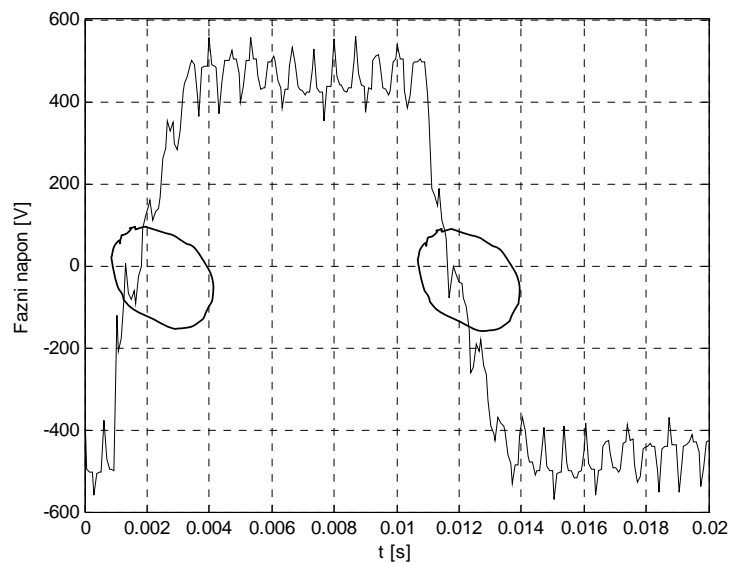
U prethodnim tabelama gde su predstavljene vrednosti viših harmonika sa znakom "+" su označene vrednosti koje su veće od graničnih vrednosti koje predviđa standard.

Rezultati ispitivanja ukazuju na neophodnost da se na ulazu frekventnog regulatora (između transformatora i regulatora) postavi odgovarajući filter, čime bi se smanjio ukupni faktor izobličenja struje, a tako i napona. Vršne vrednosti faktora izobličenja struje prelaze 45% (THDi = 55,1%), koliko iznosi dozvoljena granična vrednost koju može regulator da podnese u radu, ali se ove vrednosti javljaju samo prilikom uključanja regulatora što se jasno vidi na trendu snimljenom u trajanju od 5 dana (slika 2). U ovom periodu je registrovano nekoliko ispada pogona usled pojave alarmnog stanja na frekventnom regulatoru, pri čemu su korišćeni rezultati pogonskih dijagrama SCADA sistema. Trenuci ispada se vide i na sledećoj slici, a odgovaraju periodima kada je faktor izobličenja jednak nuli.



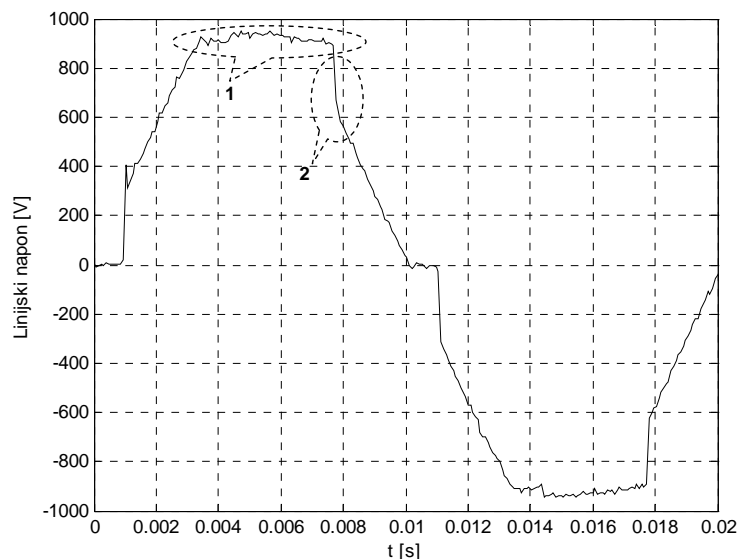
Slika 2 – Promena faktora ukupnog izobličenja struje tokom 5 dana

Na rad regulatora, prvenstveno njegovog upravljačkog dela, mogu da utiču i oscilacije napona pri prolasku kroz nulu, što je označeno na slici 3 na kojoj je prikazan talasni oblik faznog napona u jednoj periodi mrežne učestanosti 50Hz. Visokofrekventne oscilacije koje se vide na talasnom obliku potiču od radne učestanosti prekidača u regulatoru od 1,5kHz.



Slika 3 – Talasni oblik faznog napona pri nominalnom opterećenju pogona

Na rad regulatora utiče i snaga transformatora, koja bi trebalo da je 30% veća od instalisane snage regulatora obzirom da se preko transformatora napaja frekventni regulator [5]. U radu transformatora nije konstatovano povećanje temperature, a isti je neposredno pre merenja bio na detaljnom remontu i proveru. Ono što je uočeno na talasnom obliku međufaznog napona (slika 4), a što bi moglo da ukazuje na potencijalno ograničenje transformatora, je zaravnjen vršni deo sinusoide (označen sa 1 na slici 4), kao i moguće zasićenje transformatora zbog izobličenja sinusoide (označeno sa 2).



Slika 4 – Talasni oblik međufaznog napona na izlazu transformatora

5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati analize uticaja savremenih frekventnih pretvarača na napojnu mrežu, a takođe i mogućnost da se metodologija iskoristi za sagledavanje načina rada i eventualnih problema u radu koji mogu da utiču na sam pogon a takođe i na napojnu mrežu i ostale uređaje priključene na istu mrežu. Rezultati su dobijeni merenjima na pogonu kompresora, naponskog nivoa od 690V. Sprovedena je dodatna analiza uticaja regulatora na ulazni transformator, obzirom da je registrovan veći sadržaj harmonika od onog predviđenog proizvođačkom specifikacijom, kao da i sam transformator nije dimenzionisan u skladu sa činjenicom da se preko njega napaja frekventni regulator. Zaključak je da je neophodno ugraditi ulazni filter kojim je za očekivati da se navedeni uticaj harmonika značajno smanji, a to bi trebalo potvrditi i merenjima posle ugradnje filtra. Nakon toga bi trebalo ponovo izvršiti analizu rada regulatora i videti da li je osim filtra neophodno izvršiti i ugradnju transformatora veće snage.

LITERATURA

- [1] A.Bonnett, "An Overview of How AC Induction Motor Performance Has Been Affected by the October 24, 1997 Implementation of the Energy Policy Act of 1992",

IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, January/February 2000, pp. 242-256.

- [2] Eleonora Darie, Emanuel Darie, "The High-Frequency Interferences Produced in Systems Including Pulse Width Modulation Inverter and AC Motors", in Proceedings of the 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilization EPQU 2007, Barcelona, Spain, October 2007, pp. 357-340.
- [3] D.Rice, "A Suggested Energy-Savings Evaluation Method for AC Adjustable-Speed Drive Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 6, November/December 1988, pp. 1107-1117.
- [4] ABB, Technical Guide No. 6 – Guide to Harmonics with AC Drives. Finland, 2000.
- [5] Danfoss, Total Harmonic Voltage Distortion, Application note MN90D102 Rev. 2003-09-11, Denmark, 2003.
- [6] Power Quality Standard EN 50160:2008, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution system, 2008.
- [7] Harmonic Emission Standard IEC 61000-3-2.
- [8] Harmonic Standard IEEE 519, Revision 1992.
- [9] Wu, High-Power Converters and AC Drives, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [10] E.Fuchs, W.Hanna, "Measured Efficiency Improvements of Induction Motors With Thyristor/Triac Controllers", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, December 2002, pp. 437-444.
- [11] J.McInroy, S.Legowski, "Using Power Measurements to Diagnose Degradations in Motor Drivepower Systems: A Case Study of Oilfield Pump Jacks", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001, pp. 1574-1581.
- [12] Chauvin Arnoux, Three Phase Power Quality Analyzer C.A 8334 User's Guide, France, 2002.

Abstract: In the paper the influence of state-of-art frequency converter to the supply network is analyzed. It's a compressor drive in refinery, which is fed by frequency converter working on higher low voltage level (690VAC). For that purpose on the converter input a 6kV/0.7kV transformer is used and additionally is analyzed converter influence to the transformer. Shown results are obtained by measuring of power consumption and high-order voltage and current harmonics and analysis is performed using existing EU power quality standard EN 50160.

Key words: *frequency converter, measurement, analysis, power quality*

INFLUENCE OF 690VAC FREQUENCY CONVERTER TO THE INCREASE OF HIGH-ORDER HARMONICS IN COMPRESSOR DRIVE

Aleksandar Nikolić
Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Beograd