

Mr.sc. Dubravko Vučetić

Dr.sc. Ivan Vlahinić

Pomorski fakultet u Rijeci

Rijeka, Studentska 2

Izvorni znanstveni rad

UDK: 629.5.064.5

621.314.26

Primljeno: 19. svibnja 2005.

Prihvaćeno: 28. lipnja 2005.

UTJECAJ SERIJSKOG INDUKTIVITETA NA SMANJENJE HARMONIČKE DISTORZIJE STRUJE MREŽNO KOMUTIRANIH PRETVARAČA FREKVENCije U SUSTAVU ELEKTRIČNE PROPULZIJE BRODA

SAŽETAK

Serijski induktivitet je ukupni induktivitet koji se nalazi između statičkog pretvarača i EMS izvora. Serijski induktivitet je jedini način za smanjenje cijelog spektra viših harmonika primarne struje mrežno komutiranih pretvarača. Učinak serijskog induktiviteta na smanjenje harmonika struje mnogo je veći kod harmonika višeg reda, nego na sedmom i naročito petom harmoniku, tako da se serijski induktivitet dobro nadopunjuje s 12 pulsним pretvaračima. Serijski induktivitet smanjuje faktor snage i tako povećava gubitke na osnovnom harmoniku. Pad napona na serijskom induktivitetu smanjuje napon i snagu na pretvaraču frekvencije. Kod malih vrijednosti serijskog induktiviteta povećanje gubitaka i smanjenje snage je relativno malo u odnosu na primjetno sniženje viših harmonika struje, dok se kod velikih vrijednosti događa upravo suprotno. Da bi se zadržala ista snaga potrebno je smanjiti prijenosni omjer propulzijskih transformatora, čime se povećava napon na elektroničkim ventilima, a time i cijena pretvarača.

Ključne riječi: serijski induktivitet, harmonici, pretvarač frekvencije, električna propulzija

1. UVOD

Nove generacije pretvarača frekvencije, zahvaljujući prije svega višim frekvencijama prekapčanja punouprijavljivih elektroničkih ventila, odlikuje visoka kvaliteta električne energije na izlazu i izuzetno mala distorzija ulazne struje [7, str.1.]. Iako je maksimalna snaga punouprijavljivih elektroničkih ventila već dosegla zavidnu veličinu [3, str.29.], kod frekventno upravljivih elektromotornih pogona velikih snaga, poput električne propulzije većih brodova, još uvijek dominiraju mrežno komutirani tiristorski pretvarači frekvencije, izrijekom: ciklokonverter i sinkrokonverter. Oba pretvarača imaju visoku ukupnu distorziju ulazne struje (THDi). Kako pretvarači frekvencije u sustavu propulzije po ukupnoj snazi uvijek prelaze polovinu instalirane snage brodske električne centrale, riječ je o relativno slabom elektroenergetskom sustavu u kojem distorzirana struja pretvarača frekvencije stvara veliku distorziju mrežnog napona (THDu).

THDu brodske mreže može se smanjiti povećanjem ukupnog serijskog induktiviteta, korištenjem većeg induktiviteta u istosmjernom međukrugu, primjenom pretvarača s većim pulsni brojem (12, 18, 24) ili odgovarajućim spojem fazno pomaknutih 6 pulsni pretvarača sa sličnim efektom te naravno ugradnjom pasivni i aktivni filtera [2, str. 5-9.]. Na smanjenje THDu djeluju i povećanje linearne potrošnje ostali brodski sustava kao i veći stupanj opterećenja propulzijski elektromotora [2, str. 10-12.], što međutim ovisi o režimu plovidbe i nije od koristi pri usklađivanju THDu s pravilima registra, kada treba uzeti najnepovoljniji slučaj.

Standardni sustavi električne propulzije velikih snaga, zasnivaju se na tzv. para 12-pulsni konfiguracijama sustava 6-pulsni pretvarača koji u kombinaciji s propulzijski transformatorima učinkovito smanjuju harmoničku distorziju struje generatora, a prema tome i THDu visokonaponske brodske mreže [6, str. 84.]. Propisani THDu u niskonaponskoj brodskoj mreži postiže se ugradnjom pasivni harmonički filtera. Ipak jednom stvoreni viši harmonici struje uvijek stvaraju direktne i indirektne gubitke u elektroenergetskom sustavu. Peti i sedmi harmonik struje 6-pulsni pretvarača, čak i u idealnom slučaju potpune simetrije struja, kada se zahvaljujući faznom pomaku sekundarni napona dvaju transformatora poništavaju na visokonaponskoj sabirnici, prolaskom kroz propulzijske transformatore ipak stvaraju značajne gubitke. Kako sistem nikada nije potpuno simetričan, a pogotovo u slučaju fazno pomaknuti transformatora, dio petog i sedmog harmonika kao i preostali viši harmonici struje (11, 13, 17, 19...) ulaze u visokonaponsku mrežu i stvaraju direktne gubitke u generatorima, ali i svim ostalim električnim uređajima u visokonaponskoj i niskonaponskoj brodskoj mreži [1, str. 1.].

Indirektni gubici javljaju se zbog vibracija na električnim strojevima uzrokovani distorziranom strujom, koje ne uzimaju energiju samo od viših već i od osnovnog harmonika struje, povećavajući ukupnu potrošnju električne energije. Indirektni gubici javljaju se i u harmonički filterima, nužni za postizanje propisanog THDu u niskonaponskoj mreži, koji stvaraju gubitke na višim ali i na osnovnom harmoniku.

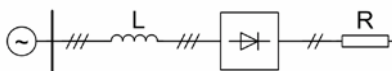
Serijski induktivitet je ukupni induktivitet koji se nalazi između nelinearnog trošila (statičkog pretvarača) i EMS izvora (generatora) i obuhvaća induktivitete generatora i transformatora. Serijski induktivitet može se povećati ugradnjom prigušnice između transformatora i statičkog pretvarača ili korištenjem transformatora s većim naponom kratkog spoja i općenito se smatra najekonomičnijim načinom za smanjenje THDi [4, str. 2.].

Cilj je ovoga rada da analizira utjecaj serijskog induktiviteta na smanjenje harmoničke distorzije struje, mrežno komutiranih statički pretvarača u sustavu električne propulzije broda i istraži opravdanost njegovog povećavanja.

2. ODABIR EKSPERIMENTALNOG MODELA STRUJNOG KRUGA

Uobičajeno korišteni modeli za analizu širenja harmonika zasnivaju se na tretiranju nelinearnog tereta (statičkog pretvarača) kao strujnog izvora. Kako je cilj istraživanja analiza utjecaja serijskog induktiviteta ne samo na prodiranje harmoničke struje u elektroenergetski sustav već i na njeno stvaranje, takvi modeli u ovom slučaju nisu bili prihvatljivi.

Za ispitivanje je odabran strujni krug prikazan na slici 1. Cilj je bio eliminirati iz modela sve nepotrebne elemente koji bi mogli poremetiti rezultate i otežati donošenje zaključka. Odabrani model simulira nastajanje harmonički distorzirane struje iz idealnog sinusoidalnog napona, kao posljedicu rada opterećenog trofaznog diodnog mosta.



Slika 1. Principna shema sustava

Trofazni 6-pulsni diodni most odabran je jer odgovara ponašanju 6-pulsnog tiristorskog mosta, koji je sastavni dio sinkrokonvertera i ciklokonvertera, kod maksimalnog opterećenja (kut vođenja $\alpha=0^\circ$). Model s tiristorskim mostom nije korišten u ovom istraživanju jer bi proširio ispitivanje (promjena kuta vođenja, pojava komutacijskih propada...), a ne bi utjecao na konačni zaključak.

Odabirom beskonačno jake mreže, prezentirane kroz idealni naponski izvor, dakle bez impedancije sustava ($Z=0$), izbjegnuta je harmonička distorzija napona mreže koja bi nastala kao posljedica pada napona i pojačavala učinak serijskog induktiviteta.

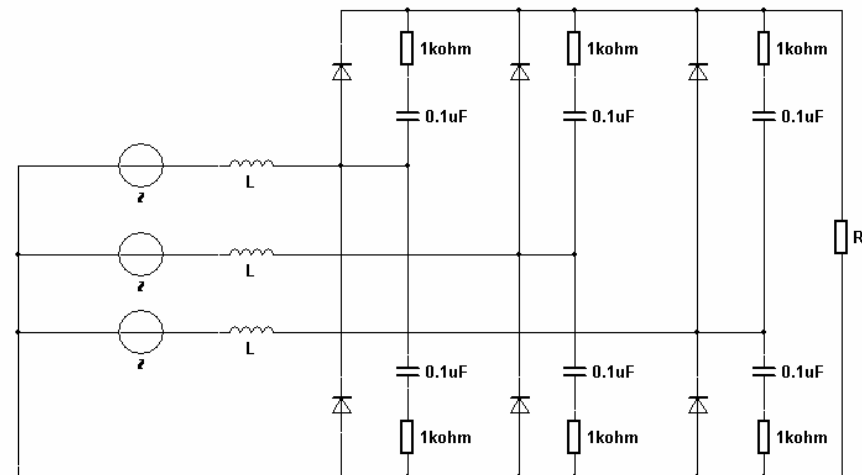
Sa stanovišta ovog ispitivanja može se smatrati i da su reaktancije generatora i transformatora uključene u iznos serijskog induktiviteta. Utjecaj paralelno spojene potrošnje ovdje je namjerno izbjegnuto i biti će zasebno obrađen u posebnom ispitivanju.

U modelu se koristi idealna prigušnica bez zasićenja i djelatnog otpora. Induktivitet sa zasićenjem predstavljao bi nelinearni element i prema tome pokvario simulaciju generirajući vlastite harmonike struje. Djelatni otpor realnog induktiviteta nije uključen u model jer bi, iako minimalno ipak utjecao na THDi, a cilj rada je analizirati isključivo utjecaj serijskog induktiviteta.

Ispravljač je opterećen djelatnim teretom. Iako je u stvarnosti teret induktivnog karaktera (prigušnica u istosmjernom međukrugu, induktivitet motora), faktor snage pretvarača s diodnim mostom je uvijek jednak 1. Induktivitet u istosmjernom međukrugu utječe na THDi pretvarača kod većih kutova vođenja (malog opterećenja elektromotornog pogona), dok je njegov utjecaj kod punog opterećenja i $\alpha=0$ vrlo mali. Ipak, kako bi ovisnost izobličenja struje pretvarača isključivo o serijskom induktivitetu bila što preciznije analizirana, u ovom je ispitivanju izostavljen. Njegov utjecaj bit će zasebno obrađen u posebnom istraživanju zasnovanom na modelu s tiristorskim mostom.

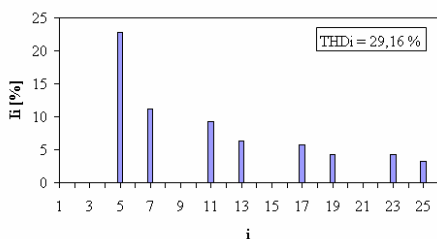
3. SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA

Simulacija je izvedena pomoću programskog paketa MULTISYM. Model je prikazan na slici 2.

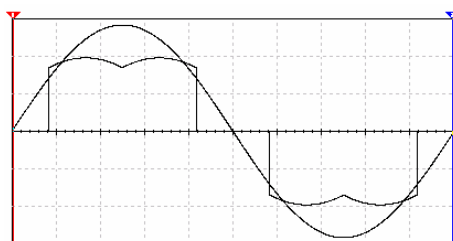


Slika 2. Simulacijski model

Kapacitet $0,1\mu\text{F}$ i otpor $1\text{k}\Omega$ spojeni paralelno diodama stabiliziraju simulaciju i nemaju utjecaja na rezultate [5, str. 99.]. Najprije je izvršena analiza za slučaj direktnog spoja pretvarača na beskonačnu mrežu ($L=0$).



Slika 3. Harmonički spektar struje za $X_{\%}=0\%$



Slika 4. Valni oblik struje i napona na generatoru za $X_{\%}=0\%$

Rezultati su prema očekivanju pokazali visok stupanj ukupne distorzije struje ($\text{THDi}=29,16\%$) s dominantnim petim harmonikom (slika 3.) i faktorom snage $\cos \phi = 1$.

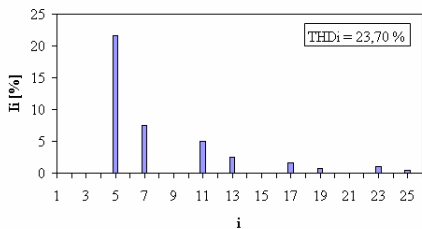
Dobiven je valni oblik karakterističnog oblika prikazan na slici 4. koji potvrđuje vjerodostojnost simulacije. Uzlazni i silazni rub su vertikalni, a svaka bestrujna pauza traje $1/6$ periode. Jako je izražen središnji propad u trenutku komutacije između dvije diode koji odgovara karakterističnim pulzacijama u izlaznom naponu ispravljača kod djelatnog opterećenja (nije prikazan).

Radi univerzalnosti prezentacije u analizi rezultata je umjesto induktiviteta L korištena, kako je uobičajeno, njegova fazna reaktancija na osnovnoj frekvenciji koja se izračunava kao relativni pad napona pri nazivnoj struji.

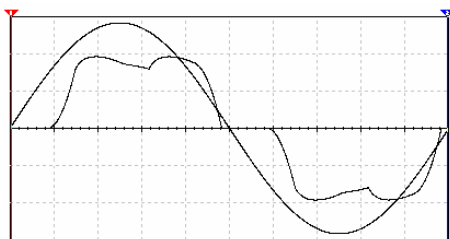
gdje je:
$$X_{\%} = \frac{I_1 2\pi f L}{U_f} 100 = \frac{I_1 X}{U_f} 100 \quad (1)$$

- I_1 - nazivna struja (prvi harmonik) [A]
- L - induktivitet jedne faze [H]
- U_f - fazni napon [V]
- f - frekvencija [Hz]
- X - fazna reaktancija [Ω]

Simulacija je ponovljena uz postepeno povećavanje induktiviteta. Ovdje su prikazana samo tri karakteristična slučaja. Na slici 5. i 6. prikazani su harmonički spektar i oblik struje za slučaj $X_{\%}=8,7\%$.



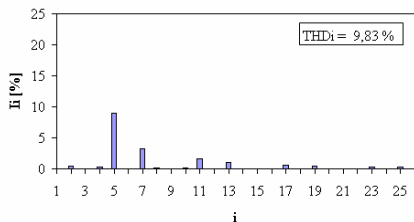
Slika 5. Harmonički spektar struje za $X_{\%}=8,7\%$



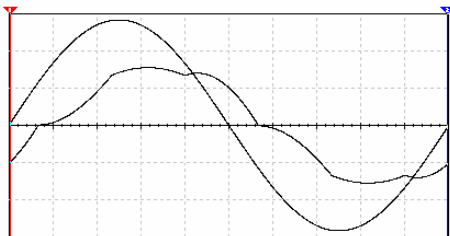
Slika 6. Valni oblik struje i napona na generatoru za $X_{\%}=8,7\%$

Vidljivo je značajno smanjenje harmonika i bolji $THDi=23,70\%$. Na oscilogramu struje (slika 6.) vidi se skošavanje uzlaznog i silaznog ruba te skraćivanje bezstrujne pauze. Pojavio se fazni pomak između struje i napona, što znači da se pokvario faktor snage (analiza je pokazala $\cos \phi = 0,96$).

Na slici 7. i 8. prikazani su harmonički spektar i oblik struje za slučaj $X_{\%}=41,9\%$. Vidljivo je daljnje smanjivanje harmonika i mnogo bolji $THDi=9,83\%$.



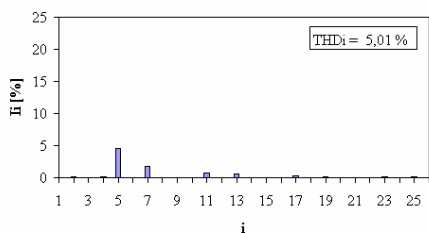
Slika 7. Harmonički spektar struje za $X_{\%}=41,9\%$



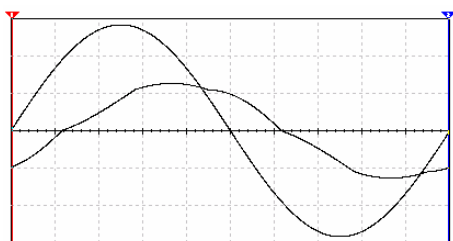
Slika 8. Valni oblik struje i napona na generatoru za $X_{\%}=41,9\%$

Na oscilogramu struje (slika 8.) uočljivo je daljnje skošavanje uzlaznog i silaznog ruba i nestanak bestrujne pauze. Središnji propad se smanjio. Fazni pomak između struje i napona je prilično velik, što upućuje na niži faktor snage (analiza je pokazala $\cos \varphi = 0,83$). Uočava se nesimetrija unutar poluperiode struje što ima za posljedicu pojavu slabih parnih harmonika vidljivih u harmoničkom spektru na slici 7.

Povećanjem serijskog induktiviteta na $X_{\%} = 67,5\%$ dobiveni su rezultati prikazani na slikama 9. i 10. Uz $\text{THDi} = 5,01\%$ oblik struje se jako približio sinusoidi. Nesimetrija unutar poluperiode skoro se izgubila pa su gotovo nestali i parni harmonici. Fazni pomak se jako povećao i faktor snage sada iznosi samo 0,68.

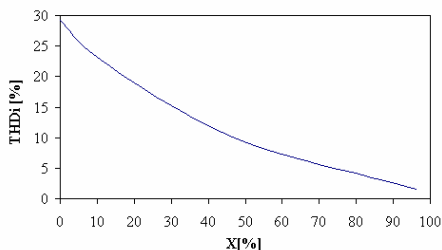


Slika 9. Harmonički spektar struje za $X_{\%} = 67,5\%$

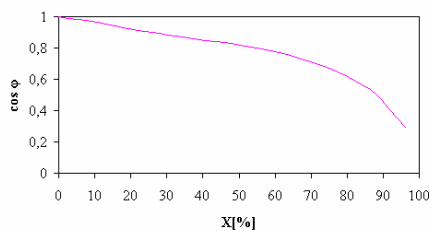


Slika 10. Valni oblik struje i napona na generatoru za $X_{\%} = 67,5\%$

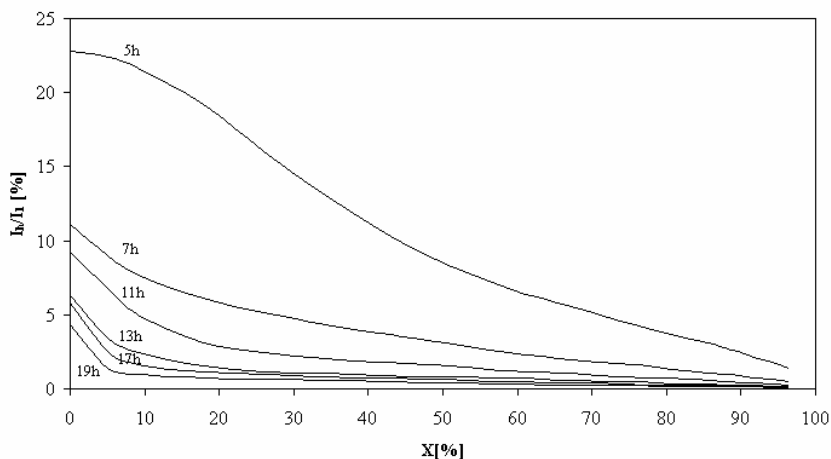
Rezultati svih simulacija obrađeni u dijagramima na slikama 11. do 14. pokazuju neupitno smanjivanje THDi kod povećanja serijskog induktiviteta.



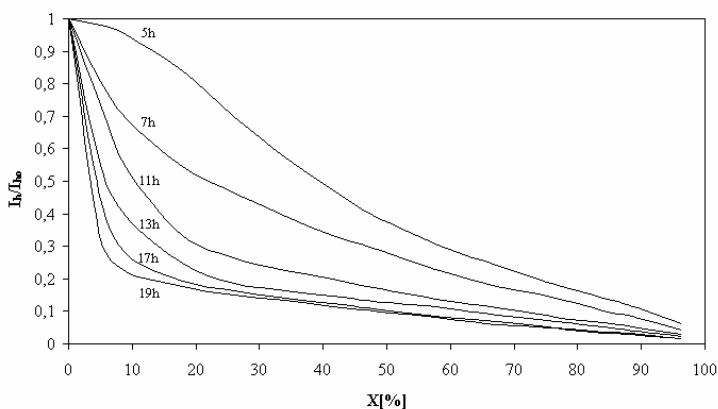
Slika 11. Ovisnost ukupne harmoničke distorzije struje o serijskom induktivitetu



Slika 12. Ovisnost faktora snage o serijskom induktivitetu



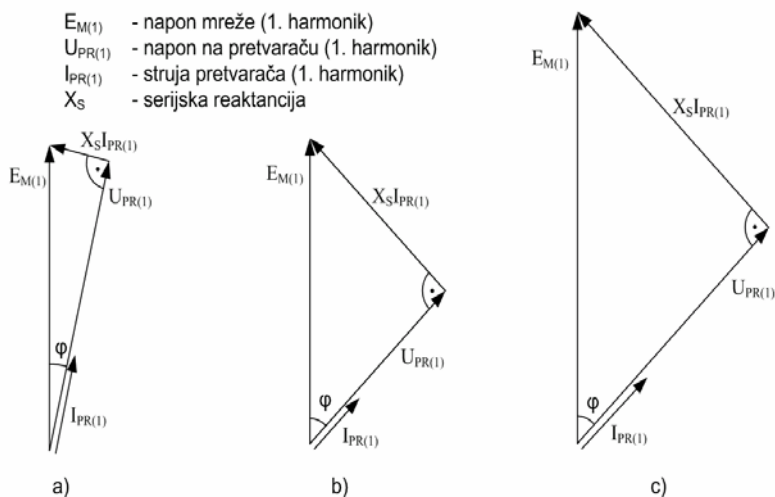
Slika 13. Prigušenje harmonika u zavisnosti od serijskog induktiviteta



Slika 14. Relativno prigušenje harmonika u odnosu na $X=0\%$ u zavisnosti od serijskog induktiviteta

Kako se unosenjem induktiviteta u seriju s nelinearnim teretom povećava ukupna impedancija, jasno je da se smanjuje ne samo struja viših harmonika, već i struja osnovnog harmonika, a prema tome i snaga predana pretvaraču i elektromotoru.

Obzirom da napon na induktivitetu prethodi struji za 90° , dok je napon na diodnom mostu u fazi sa strujom, smanjenje osnovnog harmonika napona na pretvaraču i osnovnog harmonika struje je relativno malo kod malih vrijednosti serijskog induktiviteta (slika 15a), koje međutim već daju značajne rezultate u smanjenju harmonika, obzirom da za više harmonike induktivitet predstavlja mnogostruko veću reaktanciju, nego za osnovni harmonik.



Slika 15. Vektorski dijagrami: a) Mali serijski induktivitet; b) Veliki serijski induktivitet bez korekcije napona; c) Veliki serijski induktivitet s korekcijom napona napajanja

Kod velikih vrijednosti serijskog induktiviteta smanjenje osnovnih harmonika struje i napona na pretvaraču je vrlo veliko (slika 15b). Da bi se zadržala ista snaga treba povećanjem napona izvora kompenzirati pad prvog harmonika napona na pretvaraču zbog serijskog induktiviteta (slika 15c). Iako se time pored osnovnog harmonika povećavaju i viši harmonici struje, njihov relativni odnos prema osnovnom harmoniku ostaje nepromijenjen jer amplituda napona idealnog naponskog izvora nema nikakvog utjecaja na valni oblik struje.

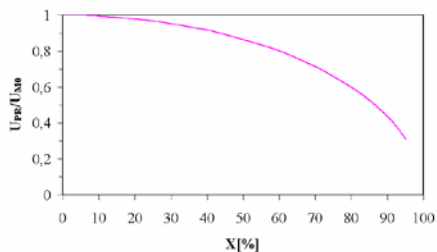
To znači da će, kada se prilagodbom napona izvora postigne ista vrijednost struje osnovnog harmonika kod različitih vrijednosti induktiviteta, odnosi među harmonicima struje izraženim u postocima vrijednosti osnovnog harmonika, biti isti kao i da su izraženi u amperima.

Reaktancija $X_{\%}$ prikazana u dijagramima na slikama 11. do 14. izračunata je prema jednadžbi (1) na osnovi prvog harmonika struje iz rezultata simulacije, faznog napona i frekvencije mreže te serijskog induktiviteta L .

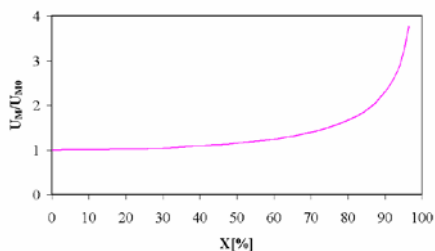
Slika 11. dokazuje da se povećavanjem serijskog induktiviteta smanjuje THDi. Nažalost, iz slike 12. vidljivo je usporedno smanjenje faktora snage. Ipak treba primijetiti da je kod malih vrijednosti induktiviteta krivulja $THDi=f(X_{\%})$ strmija nego kod većih vrijednosti, dok je u slučaju krivulje $\cos \phi=f(X_{\%})$ situacija obrnuta. Može se dakle izvući zaključak da se kod manjih vrijednosti serijskog induktiviteta može očekivati relativno dobar učinak na smanjenje THDi, uz relativno malo smanjenje faktora snage. Korištenje jako velikih induktiviteta nije prihvatljivo zbog vrlo niskog faktora snage (slika 12.) koji višestruko povećava gubitke i nazivne snage generatora i transformatora.

Slika 13. pokazuje smanjenje pojedinih harmonika u postotku osnovnog harmonika, dok slika 14. pokazuje prigušenje pojedinih harmonika u odnosu na njihovu vrijednost kod $X_{\%}=0\%$. Treba uočiti da je učinak serijskog induktiviteta na harmonike višeg reda u području manjih vrijednosti induktiviteta znatno jači, nego na sedmi i posebno peti harmonik.

Slika 16. prikazuje smanjenje prvog harmonika napona na pretvaraču zbog pada napona na serijskom induktivitetu.



Slika 16. Sniženje napona na pretvaraču u zavisnosti od veličine serijskog induktiviteta kada nema korekcije sekundarnog napona propulzijskog transformatora



Slika 17. Povećanje sekundarnog napona propulzijskog transformatora u zavisnosti od veličine serijskog induktiviteta

Treba naglasiti da je kod manjih vrijednosti serijskog induktiviteta smanjenje napona pretvarača relativno malo, tako da se u sustavima kod kojih se pretvarač preko prigušnice spaja direktno na mrežu standardnog napona, iako smanjuje maksimalnu snagu na izlazu iz pretvarača, može se donekle tolerirati. Veće vrijednosti serijskog induktiviteta zahtijevaju pažljivo usklađivanje napona napajanja, pretvarača frekvencije i elektromotora. U sustavu sa zasebnim propulzijskim transformatorima smanjenje napona na pretvaraču se zbog povećanog serijskog induktiviteta lako kompenzira smanjenjem prijenosnog omjera, odnosno povećanjem napona praznog hoda U_{20} . Slika 17. pokazuje koliko treba povećati napon da se zadrži nazivna vrijednost napona na pretvaraču, a prema tome i njegova izlazna snaga, kod različitih vrijednosti serijske reaktancije.

Treba uočiti da je kod manjih vrijednosti serijske reaktancije (ispod 50%-60%) krivulja položenija tako da potrebno povećanje napona raste relativno sporo. Kod velikih vrijednosti (iznad 70%) krivulja naglo postaje sve strmija, a potrebno povećanje napona vrlo veliko.

Povećanje napona praznog hoda propulzijskog transformatora poskupljuje elektroničke ventile pretvarača zbog nužnog povećanja njihovog nazivnog napona jer su u isključenom stanju, zbog odsutnosti struje i a prema tome i pada napona na serijskom induktivitetu, izloženi proporcionalno većem naponu.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati simulacije potvrđuju tezu da serijski induktivitet ne samo smanjuje harmonike struje generatora, već smanjuje i harmonike struje pretvarača, jer je u simuliranom modelu to ista struja. Dok se ostali načini smanjenja THDu mreže zasnivaju na smanjivanju THDi struje generatora, kako bi se smanjio pad napona a time i THDu, jedino serijski induktivitet smanjuje generiranje viših harmonika struje, odnosno THDi pretvarača.

Manje vrijednosti serijskog induktiviteta primjetno smanjuju THDi pretvarača uz relativno malo smanjenje $\cos \phi$ i snage. Velike vrijednosti serijskog induktiviteta, kojim se THDi može višestruko smanjiti, jako pogoršavaju faktor snage i uzrokuju veliki pad napona te zbog toga značajno smanjenje snage pretvarača. Time je upotreba prigušnica kod uređaja koji rade na standardnim naponima ograničena na relativno male vrijednosti induktiviteta s ograničenim učinkom na smanjenje THDi.

Kada je riječ o pretvaračima u sustavu električne propulzije velike snage, smanjenje napona nema presudan utjecaj na izbor serijske reaktancije jer se odgovarajućim izborom prijenosnog omjera propulzijskih transformatora ili čak njihovim uklanjanjem isti može dovoljno povećati. Ograničavajući čimbenici su međutim veličina i cijena prigušnice, gubici u njenim namotajima te naročito: sniženje faktora snage i povećanje probojnog napona elektroničkih ventila. Kako gubici u bakru generatora uz istu predanu djelatnu snagu rastu obrnuto proporcionalno kvadratu faktora snage i relativno malo sniženje $\cos \phi$ značajno smanjuje stupanj korisnosti sustava te povećava troškove eksploatacije. Sniženje $\cos \phi$ također povećava i nazivnu snagu generatora što poskupljuje investiciju. Povećanje nazivnog napona ventila značajno poskupljuje pretvarač, posebno kada su u pitanju velike snage.

Povećanje serijskog induktiviteta, prema tome, nije prihvatljivo kao jedina mjera kada se zahtjeva veliko smanjenje harmoničke distorzije struje pretvarača, odnosno napona mreže. Serijski induktivitet manjih vrijednosti dat će vrlo dobre rezultate u kombinaciji s 12-pulsnim ili para 12-pulsnim pretvaračima, kod kojih se 5. i 7. harmonik, na koje ima relativno slabiji utjecaj, u najvećoj mjeri poništavaju.

Serijski induktivitet ne treba shvaćati samo kao prigušnicu dodanu u strujni krug pretvarača. On predstavlja ukupni zbroj serijski spojenih induktiviteta na putu od pretvarača do generatora. Reaktancije glavnih generatora i naročito propulzijskih transformatora također predstavljaju serijski induktivitet i značajno smanjuju THDi.

Iz svega navedenog može se zaključiti da pri povećavanju serijskog induktiviteta treba napraviti sveobuhvatnu analizu koja će, pored smanjenja THDi, uzeti u obzir i opisane negativne utjecaje na povećanje investicijskih i eksploatacijskih troškova.

LITERATURA

- [1] K.M.Hink, Harmonic Mitigation of 12-pulse Drives With Unbalanced Input Line Voltages, <http://www.mtecorp.com/12pulse.pdf>
- [2] R.Hoadley, Getting a Handle on Harmonics, [http://domino.automation.rockwell.com/applications/gs/region/gtswebst.nsf/files/Getting_a_Handle_on_Harmonics.pdf/\\$file/Getting_a_Handle_on_Harmonics.pdf](http://domino.automation.rockwell.com/applications/gs/region/gtswebst.nsf/files/Getting_a_Handle_on_Harmonics.pdf/$file/Getting_a_Handle_on_Harmonics.pdf)
- [3] N.Mohan, T.M.Undeland, W.P.Robbins, Power Electronics – Converters, Applications and Design, Wiley & Sons Inc, New York, 1995.
- [4] MTE Corporation, Performance of Harmonic Mitigation Alternatives, <http://www.mtecorp.com/mitigation.pdf>
- [5] R.Ramshaw, D.Schuurman, PSpice Simulation of Power Electronics Circuits – An introductory guide, Chapman & Hall, London, 1997.
- [6] L.Ran, K.S.Smith, R.Yacamini, Cycloconverter Configurations and Control for Marine Propulsion Applications, Trans IMAE, Vol 107, Part 2, pp 83-99.
- [7] I.Vlahinić, D.Vučetić, Perspektiva razvoja statičkih pretvarača frekvencije u sustavu električne propulzije broda, Pomorstvo, 15(2001), str. 117-131, Rijeka 2001.

Summary

THE INFLUENCE OF SERIAL INDUCTANCE ON THE DECREASE OF CURRENT HARMONIC DISTORTION OF LINE COMMUTATED FREQUENCY CONVERTERS IN ELECTRIC PROPULSION SYSTEM OF SHIPS

Serial inductance is a total inductance located between the static converter and the source EMF. Serial inductance is the only way for a reduction of the whole primary current harmonic spectrum of line commutated frequency converters. Because the mitigation effect of serial inductance on the harmonics of higher order is much greater than on the seventh and especially on the fifth harmonic, it is well suited with 12-pulse converters. Serial inductance decreases the power factor and therefore increases power losses on the fundamental harmonic. Voltage drop on serial inductance decreases voltage and power of the frequency converter. With lower values of the serial inductance, power losses increase and power reductions are relatively small in comparison with the noticeable mitigation of current harmonics. With higher values of serial inductance the situation is quite opposite. In order to maintain frequency converter power, the transformation ratio of propulsion transformers has to be reduced. The consequence is higher voltage on electronic switches and therefore a more expensive converter.

Key words: AC line reactance, harmonics, frequency converter, electric propulsion