

# Identifikacija naponskih asimetrija statora na osnovu harmonijske analize struje rotora asinhronne mašine

Jovana Tuševljak  
Elektroprenos BiH  
Operativno područje Banja Luka  
Bosna i Hercegovina  
[jovanatusevljak@gmail.com](mailto:jovanatusevljak@gmail.com)

Danka Todorović, Željko Đurišić  
Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Beogradu  
Beograd, Srbija  
[dankatodorovic9@gmail.com](mailto:dankatodorovic9@gmail.com), [djurisic@etf.rs](mailto:djurisic@etf.rs)

*Sadržaj*— U radu je predstavljena ideja za identifikaciju naponskih asimetrija statora asinhronne mašine, koja se temelji na harmonijskoj analizi fazne struje rotora. Opisan je značaj zaštite asinhronih mašina od asimetričnog napajanja, kao i sistem za harmonijsku analizu struja rotora, odnosno estimaciju drugog harmonika kao pokazatelja inverznog polja. Eksperimentalnom analizom su verifikovane teorijske pretpostavke i potvrđeno je da ovakav sistem može biti podloga za razvoj realnog sistema za zaštitu.

*Ključne riječi*— asinhrona mašina; naponska asimetrija; zaštita od nesimetričnih stanja; drugi harmonik;

## I. UVOD

Asinhronne mašine su dizajnirane tako da se napajaju sinusoidalnim i simetričnim naponima. Međutim, kada su izložene naponskoj asimetriji i distorziji, njihove performanse se mijenjaju. Nesimetričnim napajanjem asinhronih motora javlja se inverzna komponente obrtnog magnetnog polja, koja uzrokuje pad elektromagnetskog momenta mašine, povećanje struja statora, vibracije, povećanje gubitaka u bakru i gvožđu mašine, pregrijavanje namota i gvožđa mašine, što dovodi do skraćivanja životnog vijeka mašine. Iz tog razloga asinhronne mašine moraju biti zaštićene od prevelikih asimetrija napona napajanja. Standardni sistemi zaštite od asimetričnog napajanja asinhronne mašine zahtjevaju mjerenje sve tri fazne struje statora. U ovom radu je predložen koncept zaštite od asimetrija statorskih struja koji se bazira na mjerenju samo jedne struje u rotorskom namotu. S obzirom da ovaj sistem zahtjeva mjerenje rotorske struje, on je praktično primjenljiv samo za asinhronne mašine sa namotanim rotorom.

Drugi harmonik u struji rotora je posljedica inverzne komponente struje osnovne frekvencije, koja se javlja u slučaju postojanja naponske nesimetrije na statorskom namotu asinhronne mašine. Ideja rada je analizirati da li se mjerenjem i analizom prisustva drugog harmonika u faznoj struji rotora može identifikovati asimetrija u strujama statora.

U daljem tekstu dat je generalni osvrt na efekte harmonijskih izobličenja napona i struja asinhronne mašine kako bi se lakše objasnio koncept zaštite od asimetričnog napajanja.

## II. UTICAJ VIŠIH HARMONIKA NA RAD ASINHRONIH MAŠINA

Glavni efekat harmonijskih izobličenja napona i struja asinhronne mašine je povećano zagrijavanje usljed gubitaka u bakru i gvožđu. Na taj način, harmonici smanjuju stepen iskorišćenja mašine, a imaju uticaj i na obrtni momenat. Osim toga, harmonici struje u motoru mogu dovesti do povećanja buke i vibracija prilikom normalnog rada u odnosu na buku pri čisto sinusnom napajanju. Kvantitativne vrijednosti harmonika ukazuju na nedostatke u radu asinhronog motora.

Viši harmonici struja stvaraju svoje harmonijske komponente obrtnog magnetnog polja. Ove komponente nemaju isti smjer obrtanja. Tako npr. peti harmonik struje statora stvara komponentu obrtnog polja koja se obrće nasuprot smijeru polja usljed osnovnog harmonika struje. Komponenta momenta usljed sedmog harmonika struje se pak okreće u istom smijeru kao i ona usljed osnovnog harmonika struje. Usljed obrtanja asinhronog motora sa brzinom približno jednakoj sinhronoj, sa aspekta rotora ova komponentna obrtna polja izgledaju drugačije. Dakle, ako se zanemari klizanje, komponente obrtnog polja usljed 5. i 7. harmonika indukujuće elektromotornu silu u rotoru čija je učestanost približno 300 Hz. Naime, pošto se obrtno polje usljed petog harmonika obrće u suprotnom smijeru pet puta brže od rotora, onda se sa aspekta rotora ono obrće brzinom šest puta većom od sinhronne. Kako se obrtno polje usljed sedmog harmonika obrće u istom smijeru kao i rotor, ali sedam puta brže, sa aspekta rotora se ono obrće šest puta brže. Isti slučaj je i sa parovima harmonika 11. i 13, koji stvaraju 600 Hz komponentu u struji rotora, dok 17. i 19. harmonik statorske struje uzrokuje 900 Hz komponentu u struji rotora.

Primjećuje se da se harmonici javljaju u parovima (peti i sedmi, jedanaesti i trinaesti itd.). Tako se usljed ovih harmonika na rotoru javljaju harmonici struja: šesti, dvanaesti, osamnaesti itd. Ove struje uzrokuju dodatno zagrijavanje rotora, a time i kompletnog motora. Dva su osnovna problema sa rotorskim harmonicima struje:

- povećano zagrijavanje rotora,
- pulsirajući ili redukovani obrtni moment.

U slučaju sinusoidalnog rasporeda magnetomotorne sile bi bile oblika [4]:

$$F_a = (A_1 \cos \theta) i_a(t), \quad (1)$$

$$F_b = [A_1 \cos(\theta - 120^\circ)] i_b(t), \quad (2)$$

$$F_c = [A_1 \cos(\theta - 240^\circ)] i_c(t), \quad (3)$$

gdje su:

$$i_a(t) = I_m \cos \omega_1 t, \quad (4)$$

$$i_b(t) = I_m \cos(\omega_1 t - 120^\circ), \quad (5)$$

$$i_c(t) = I_m \cos(\omega_1 t - 240^\circ). \quad (6)$$

Oznake u prethodnim jednačinama imaju sljedeće značenje:

$F_a, F_b, F_c$  - magnetomotorne sile,

$A_1$  - amplituda magnetomotorne sile,

$\theta$  - fazni pomjeraj,

$i_a(t), i_b(t), i_c(t)$  - trenutne vrijednosti faznih struja

$I_m$  - amplituda fazne struje.

Za nesinusoidalne magnetomotorne sile (koje sadrže osnovni, treći i peti harmonika) dobija se:

$$F_a = (A_1 \cos \theta + A_3 \cos 3\theta + A_5 \cos 5\theta) i_a(t), \quad (7)$$

$$F_b = \begin{bmatrix} A_1 \cos(\theta - 120^\circ) + A_3 \cos 3(\theta - 120^\circ) \\ + A_5 \cos 5(\theta - 120^\circ) \end{bmatrix} i_b(t), \quad (8)$$

$$F_c = \begin{bmatrix} A_1 \cos(\theta - 240^\circ) + A_3 \cos 3(\theta - 240^\circ) \\ + A_5 \cos 5(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} i_c(t). \quad (9)$$

Ukupna magnetomotorna sila je:

$$F_{tot}(\theta, t) = F_a + F_b + F_c, \quad (10)$$

gdje je:

$$F_a = \{A_1 \cos \theta + A_3 \cos 3\theta + A_5 \cos 5\theta\} I_m \cos \omega_1 t \quad (11)$$

$$F_a = \left\{ \begin{aligned} &A_1 I_m \cos \theta \cos \omega_1 t + A_3 I_m \cos 3\theta \cos \omega_1 t + \\ &+ A_5 I_m \cos 5\theta \cos \omega_1 t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Transformacijom prethodnog izraza se dobija:

$$F_a = \frac{A_1 I_m}{2} \{ \cos(\theta - \omega_1 t) + \cos(\theta + \omega_1 t) \} \\ + \frac{A_3 I_m}{2} \{ \cos(3\theta - \omega_1 t) + \cos(3\theta + \omega_1 t) \} \\ + \frac{A_5 I_m}{2} \{ \cos(5\theta - \omega_1 t) + \cos(5\theta + \omega_1 t) \} \quad (13)$$

Analogno se dobijaju izrazi za  $F_b$  i  $F_c$ .

Prema prethodnim jednačinama, ukupna magnetomotorna sila je pojednostavljena:

$$F_{tot} = \frac{3}{2} A_1 I_m \cos(\omega_1 t - \theta) + \frac{3}{2} A_5 I_m \cos(\omega_1 t + 5\theta) \quad (14)$$

Prethodna analiza pokazuje da treći harmonik struja rotora ne učestvuje u stvaranju obrtne magnetomotorne sile, pa on nema uticaja na struje u rotorskom namotu.

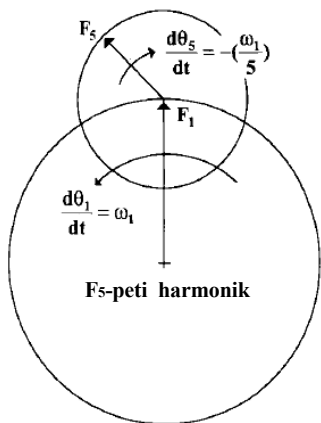
Ugaona brzina osnovnog harmonika magnetomotorne sile

$$\frac{d\theta_5}{dt} \text{ je: } \begin{aligned} \omega_1 t - \theta_1 &= 0, \\ \theta_1 &= \omega_1 t, \\ \frac{d\theta_1}{dt} &= \omega_1 \end{aligned} \quad (15)$$

Ugaona brzina petog harmonika magnetomotorne sile

$$\frac{d\theta_5}{dt} \text{ je: } \begin{aligned} \omega_1 t + 5\theta_5 &= 0, \\ 5\theta_5 &= -\omega_1 t, \\ \frac{d\theta_5}{dt} &= -\frac{\omega_1}{5} \end{aligned} \quad (16)$$

Grafička prezentacija fazora harmonika magnetomotorne sile (u prisustvu osnovnog, trećeg i petog harmonika magnetomotorne sile) je data na sl. 1. Primjetiti da se treći harmonik poništava (jednak je nuli), tako da on ne utiče na struju u rotorskom namotu.



Slika 1. Grafički prikaz fazora harmonika magnetomotorne sile

Osnovni i peti harmonik rotiraju u suprotnim smjerovima;  $F_1$  rotira u pozitivnom matematičkom smjeru (smjeru suprotnom okretanju kazaljke na satu) (+), dok  $F_5$  rotira u suprotnom (matematički negativnom) smjeru (-), odnosno u smjeru kazaljke na satu. Slična analiza je izvedena u cilju određivanja smjera rotacije magnetomotorne sile svakog pojedinačnog harmonika (tabela 1).

TABELA I. SMIJER ROTACIJE MAGNETOPOBUDNE SILE KOJU STVARAJU POJEDINI HARMONICI U STRUJI STATORA

| Komponente harmonika | +  | -  | 0  |
|----------------------|----|----|----|
| Red harmonika        | 1  | 2  | 3  |
|                      | 4  | 5  | 6  |
|                      | 7  | 8  | 9  |
|                      | 10 | 11 | 12 |
|                      | 13 | 14 | 15 |

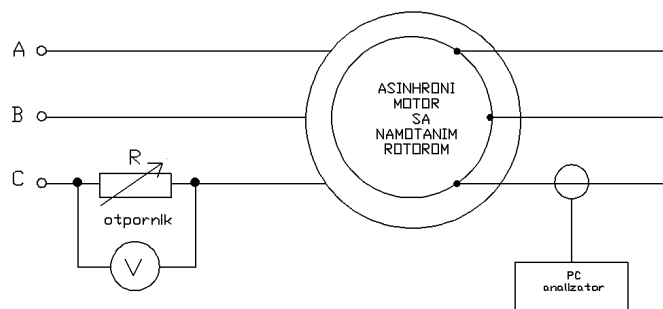
### III. IDENTIFIKACIJA NAPONSKIH ASIMETRIJA STATORA NA OSNOVU HARMONIJSKE ANALIZE FAZNE STRUJE ROTORA

Trofazni sistemi napona i struja u elektroenergetskom sistemu su sinusoidalne veličine. Prema tome, riječ asimetrija je vezana za sinusne funkcije. Sa tog gledišta, asimetrija se može dogoditi zbog razlike u efektivnim vrijednostima tri veličine, ili zbog različitog faznog pomaka. Prva je poznata kao amplitudska asimetrija, a druga kao fazna asimetrija.

Kao rezultat naponske asimetrije, bilo ugaone ili amplitudske, doći će do stvaranja određene vrednosti inverzne komponente napona. Ova komponenta napona uzrokuje postojanje inverznih struja u statorskom namotu, koje će stvoriti inverzno obrtno magnetsko polje. Fazor fluksa, koji je posljedica ovog polja, se obrće u suprotnom smjeru od rotora, pa u njemu indukuje elektromotorne sile koje su učestanosti oko 100 Hz. Struju ove učestanosti u rotoru može samo uzrokovati asimetrija u napajanju ili kvar u samoj mašini. Dakle, 100 Hz komponenta struje u rotoru ne može biti posljedica harmonijskih izobličenja struje statora [5], tako da je ona pouzdan pokazatelj asimetrije u naponima statora ili asimetrije u samoj mašini (prekid provodnika statora ili rotora).

### IV. REZULTATI EKSPERIMENTALNE ANALIZE

U Laboratoriji za elektrane Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu izvršena je eksperimentalna provjera teorijskog prijedloga za razvoj sistema za identifikaciju naponskih asimetrija statora asinhronne mašine sa namotanim rotorom. Ideja izvedenog eksperimenta jeste da se na osnovu harmonijske analize fazne struje rotora identifikuju naponske asimetrije statora. Šema veza, prema kojoj je vršen eksperiment, je prikazana na sl. 2. Na sl. 3 je data fotografija korišćenog eksperimentalnog sistema tokom vršenja mjerenja.



Slika 2. Šema veza prema kojoj je izvršen eksperiment



Slika 3. Praktična realizacija sistema za detekciju asimetričnog napajanja asinhronne mašine sa namotanim rotorom

Za sprovedeni eksperiment korišćen je trofazni asinhronni motor sa kliznim prstenovima, nazivne snage 5 kW i nazivnog napona statora 220/380 V, koji je bio u praznom hodu tokom izvođenja eksperimenta.

Naponska asimetrija statora je vještački izazvana dodavanjem rednog otpornika u samo jednu fazu u napojnoj mreži asinhronne mašine. Sa povećanjem otpornosti raste pad napona na otporniku ( $\Delta U$ ), a samim tim se povećava i inverzna komponenta napona na priključcima statora. Na ovaj način se javlja i ugaona i amplitudska asimetrija.

U tabeli 2 su prikazane vrijednosti amplitudske i ugaone asimetrije koje su vještački izazvane tokom eksperimenta. Oznake u tabeli imaju sljedeće značenje:

$U_{Am}$  – nazivni napon mreže,

$\Delta U$  – pad napona na rednom otporniku,

$\Delta\rho$  – ugaoni pomjeraj napona nakon dodavanja rednog otpornika u fazu napojne mreže,

$U_{Ai}$  (V)– apsolutna vrijednost inverzne komponente napona u napajanju asinhronne mašine,

$U_{Ai}$  (%)– procentualna vrijednost inverzne komponente napona napajanja asinhronne mašine u odnosu na nazivni napon mreže.

TABELA II. VRIJEDNOSTI AMLITUDNE I UGAONE ASIMETRIJE

| $U_{Am}$ [V] | $\Delta U$ [V] | $\Delta\rho$ | $U_{Ai}$ [V] | $U_{Ai}$ [%] |
|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 230          | 3              | 0,7 °        | 0,99         | 0,43         |
| 230          | 13             | 3,2 °        | 4,32         | 1,88         |
| 230          | 25,2           | 6,3 °        | 7,69         | 3,35         |
| 230          | 61,3           | 15,5 °       | 20,46        | 8,89         |
| 230          | 110            | 28,6 °       | 36,65        | 15,93        |

Mjerenje i spektralna analiza struja rotora je vršena pomoću mjerno-akvizicionog sistema na bazi personalnog računara, koji je razvijen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, [6,7]. S obzirom da je u spektru struje rotora zanemarljiva vrijednost referentne (50 Hz) komponente, proračun pojedinih harmonijskih komponenti je vršen u odnosu na ukupnu efektivnu vrijednost struje rotora, prema relaciji (17).

$$I_i(r.j.) = \frac{I_i(A)}{I_{eff}(A)} \quad (17)$$

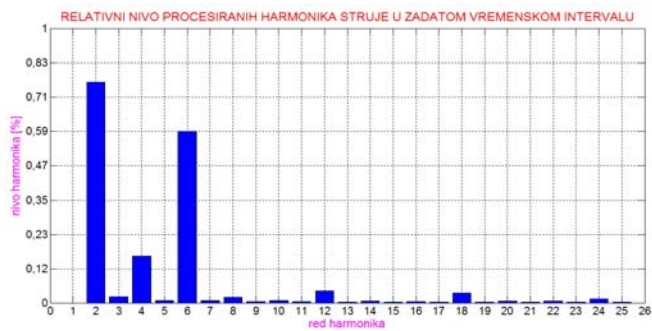
Oznake u relaciji (17) imaju sljedeće značenje:

$I_i(r.j.)$  - relativna vrijednost  $i$ -tog harmonika struje rotora,  $I_i(A)$  izmjerena vrijednost  $i$ -te harmonijske komponente struje u rotorskom faznom namotaju,  $I_{eff}(A)$  - izmjerena efektivna vrijednost struje u rotorskom faznom namotaju.

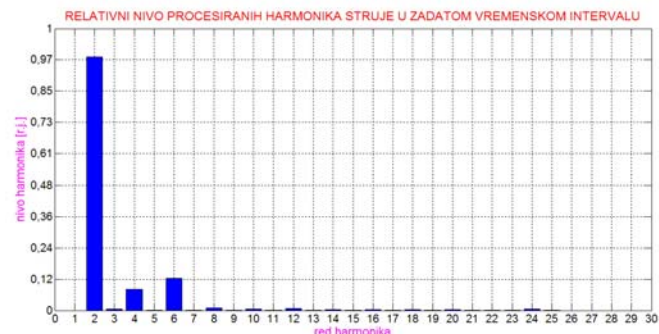
U analizama koje slijede red harmonika struja rotora se odnosi na referentu 50 Hz vrednost frekvencije. Zbog postojanja klizanja, ove harmonijske komponente nisu strogo cjelobrojan umnožak referentne frekvencije, ali je taj efekat zanemaren u ovom proračunu, s obzirom na malu vrijednost klizanja.

Na sl. 4 – 8 su grafički prikazani rezultati harmonijske analize struje rotora pri prisustvu različitih vrijednosti inverzne komponente napona ( $U_i$ ) u naponu napajanja asinhronne mašine. Bitno je istaći da su sva mjerenja rađena u režimu neopterećene asinhronne mašine.

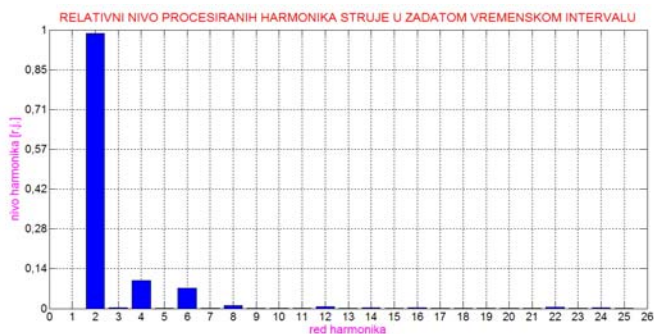
Pri malim vrijednostima asimetrije napona statora, dominantni su drugi i šesti harmonik struje rotora. Sa povećanjem naponske asimetrije, odnosno inverzne komponente napona napajanja, drugi harmonik struje rotora postaje dominantniji u odnosu na sve ostale harmonike. Šesti harmonik u struji rotora je direktna posljedica postojanja petog i sedmog harmonika u naponu statora, pa je njegova apsolutna vrijednost praktično nepromjenljiva. Sa porastom efektivne vrednosti struje rotora, zbog povećanja struje drugog harmonika, relativna vrijednost šestog harmonika, kao i ostalih harmonika čiji je red  $i > 2$ , shodno relaciji (17) se smanjuje.



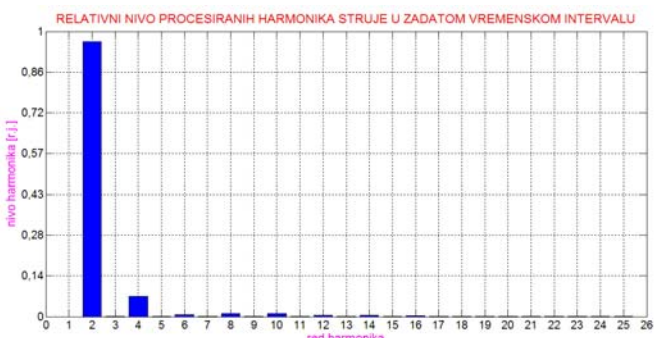
Slika 4. Harmonijska analiza fazne struje rotora za slučaj asimetričnog napajanja asinhronne mašine, gdje je inverzna komponenta napona napajanja  $U_i=0,43$  %



Slika 5. Harmonijska analiza fazne struje rotora za slučaj asimetričnog napajanja asinhronne mašine, gdje je inverzna komponenta napona napajanja  $U_i=1,88$  %



Slika 6. Harmonijska analiza fazne struje rotora za slučaj asimetričnog napajanja asinhronne mašine, gdje je inverzna komponenta napona napajanja  $U_i=3,35$  %



Slika 7. Harmonijska analiza fazne struje rotora za slučaj asimetričnog napajanja asinhronne mašine, gdje je inverzna komponenta napona napajanja  $U_i=8,89$  %



## V. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran slučaj nesimetričnog napajanja asinhronog motora sa namotanim rotorom. Opisani su negativni efekti koji se pri tome javljaju i time je ukazano na značaj sistema za zaštitu asinhronih mašina od asimetričnog napajanja. Predložen je sistem za identifikaciju asimetričnog rada asinhronog motora na osnovu harmonijske analize fazne struje rotora. Sistem se bazira na estimaciji drugog harmonika struje, kao pokazatelja inverznog polja. Rezultati sprovedenog eksperimenta jasno ukazuju na opravdanost i smislenost predloženog principa.

## LITERATURA

- [1] George J. Wakileh, "Harmonics in rotating machines", Electric Power Systems Research, 2003, pp. 31-37,
- [2] Neidhoefer, G; "Early three-phase power," IEEE Power & Energy, vol. 5, no. 5, September/October 2007, pp. 88-102,
- [3] Richter, R.; Elektrische Maschinen, Verlag von Julius Springer, Berlin, vol. 1, 1924,
- [4] Lin, D.; Batan, T.; Fuchs, E.F.; and Grady, W.M.; "Harmonic losses of single-phase induction motors under nonsinusoidal voltages," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 11, no. 2, June 1996,
- [5] Unbalance and Harmonics Detection in Induction Motors Using an Optical Fiber Sensor, Jesus M. Corres, Javier Bravo, Francisco J. Arregui, Ignacio R. Matias, IEEE sensors journal, vol.6, No. 3, June 2006.
- [6] Ž. Đurišić, M. Đurić, J. Krstivojević, Monofazni analizator kvaliteta električne energije, Energija, br. 1-2, mart, 2007. ISSN: 0354-8651, str 275 – 280.
- [7] Ž. Đurišić, M. Đurić, Opis merno-akvizicionog sistema za kontrolu kvaliteta električne energije u distributivnom sistemu, Zbornik radova 27 savetovanja CIGRE, Zlatibor 2005.

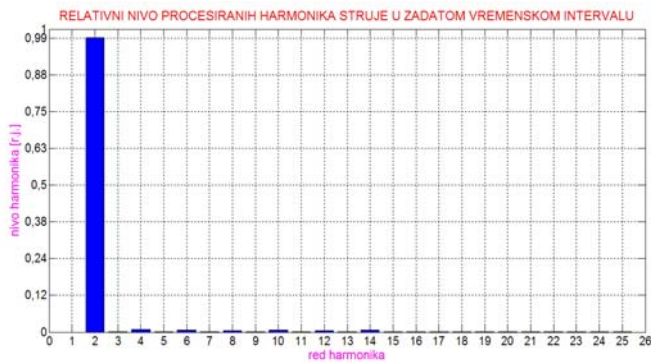
## ABSTRACT

The paper presents the idea for the identification of stator voltage asymmetry of asynchronous machine, which is based on the harmonic analysis of rotor phase current.

Foremost, the importance of asymmetric power supply protection system of induction machine is explained. The system for harmonic analysis of rotor current is introduced. Thus, approach for estimation of second harmonic as indicator of inverse field is established. Experimental analysis verified theoretical assumptions and confirmed that such a system could be basis for development of real protection system.

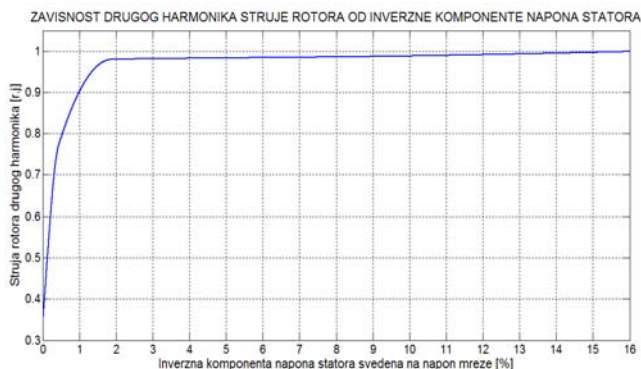
## IDENTIFICATION OF THE STATOR VOLTAGE ASYMMETRY BASED ON THE HARMONIC ANALYSIS OF THE ROTOR PHASE CURRENT OF INDUCTION MACHINE

Jovana Tuševljak  
Danka Todorović  
Željko Đurišić



Slika 8. Harmonijska analiza fazne struje rotora za slučaj asimetričnog napajanja asinhronne mašine, gdje je inverzna komponenta napona napajanja  $U_i=15,93\%$

Na sl. 9. je dat grafik zavisnosti relativne vrijednosti drugog harmonika struje rotora od procentualne vrijednosti inverzne komponente napona statora. Može se zaključiti da vrijednost struje rotora drugog harmonika znatno raste sa povećanjem naponske asimetrije statora, odnosno sa povećanjem inverzne komponente napona statora. Treba napomenuti da se grafik na sl. 9. odnosi na prazan hod asinhronne mašine. U opterećenom stanju u rotoru bi postojala značajna struja, tako da bi relativno učešće drugog harmonika u ukupnoj struji rotora bilo značajno niže. Ipak, i u uslovima opterećenja, identifikacija naponske asimetrije statora kroz predstavljeni algoritam je efikasna, s obzirom da je učestanost komponente struje rotora koja je posljedica opterećenja jednaka klizanju, odnosno iznosi nekoliko Hz. Tako da, sa aspekta harmonijske analize izdvajanje 100 Hz komponente struje rotora ne predstavlja zahtjevan zadatak.



Slika 9. Zavisnost drugog harmonika struje rotora od inverzne komponente napona statora neopterećene asinhronne mašine

Sprovedeni eksperimenti pokazuju da harmonijska analiza struje rotora, u pogledu drugog harmonika, može biti efikasan kriterijum za procjenu postojanja inverzne komponente u naponu napajanja.