

## Detekcija kvara kaveza asinhronog motora analizom talasnog oblika polazne struje

Radmila Partonjić<sup>1,2</sup>, Žarko Janda<sup>1</sup>, Zoran Lazarević<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste Glavinica 8a, 11000 Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija  
[radmila.partonjic@ieent.org](mailto:radmila.partonjic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Kod elektromotornih pogona je veoma važna brza i sigurna identifikacija početka nastajanja kvara, kako bi se preduzele odgovarajuće korektivne mere i tako sprečila značajna oštećenja. U radu će biti prikazana uporedna dijagnostika dva visokonaponska asinhrona motora pomoću analize talasnih oblika struja u periodu zaletanja. Korišćenjem snimljenih signala određena je amplituda obrtnog vektora struje za obe mašine, nakon čega su posmatrani njihovi oblici i prisustvo komponente bliske 100Hz, koja ukazuje na postojanje kvara.

**Ključne reči:** asinhroni motor, dijagnostika kaveza, obrtni vektor struje, 100Hz komponenta.

### 1. Uvod

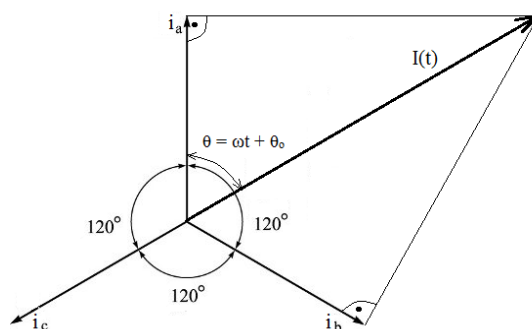
Kada se dogodi kvar i veliki motor ispadne iz pogona rezultat može biti, u najboljem slučaju, gubitak proizvodnje i prihoda ili, u najgorem slučaju, katastrofa za industrijski proces ili potencijalna opasnost za rukovaoca. Zato se kvarovi u sistemu proizvodnja – prenos – potrošnja moraju svesti na minimum. To se postiže preventivnim kontrolama i tehničkom dijagnostikom elektroenergetske opreme.

Razlozi koji dovode do kvarova kod obrtnih električnih motora se u suštini nalaze u samoj konstrukciji, proizvodnim tolerancijama, u načinu sklapanja i kvalitetu izrade i upotrebljenih materijala (cena), instaliranju, radnom okruženju, prirodi i specifičnosti opterećenja, planu održavanja itd. Kada je reč o kaveznim motorima često dolazi do loma šipki ili spojnih prstenova [1], kao i stradanja ležajeva i kvarova vezanih za statički i dinamički ekscentricitet rotora. Postoje mnoge tehnike za otkrivanje problema ove vrste. Neke od njih su metod analize spektra struje statora – motor current signature analysis (MCSA) i analiza

rasutog aksijalnog magnetskog fluksa [2], [3]. Upoređivanjem rezultata spomenutih metoda na konkretna dva motora iz jedne termoelektrane – toplane, od kojih je jedan ispravan, a za drugi se sumnjalo da je u kvaru, dijagnostikovano je oštećenje tri šipke rotora. Za potrebe ove dve metode korišćeni su snimci iz stacionarnog stanja, pri određenom opterećenju asinhronih motora. Postupak je obrađen u [4]. Vodeći se tom logikom došlo se na ideju da li se takva vrsta kvara može otkriti još ranije, odnosno dok je motor u fazi zaletanja, što je i prikazano u radu.

## 2. Modelovanje

Posmatra se simetričan trofazni sistem struja prikazan na slici 1. Projekcija vrhova vektora struja  $i_a$  i  $i_b$  predstavlja obrtni vektor struje  $I(t)$ . On je postavljen u odnosu na struju faze "a" pod uglom  $\theta = \omega t + \theta_0$ . Struje  $i_a$  i  $i_b$  se mogu predstaviti pomoću relacija (1) i (2).



Slika 1. Obrtni vektor struje

$$i_a = I \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$i_b = I \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \quad (2)$$

Primenom osnovne trigonometrijske jednačine za kosinus razlike uglova dolazi se do izraza (3).

$$i_b = I \cdot [\cos \theta \cdot \cos 120^\circ + \sin \theta \cdot \sin 120^\circ] \quad (3)$$

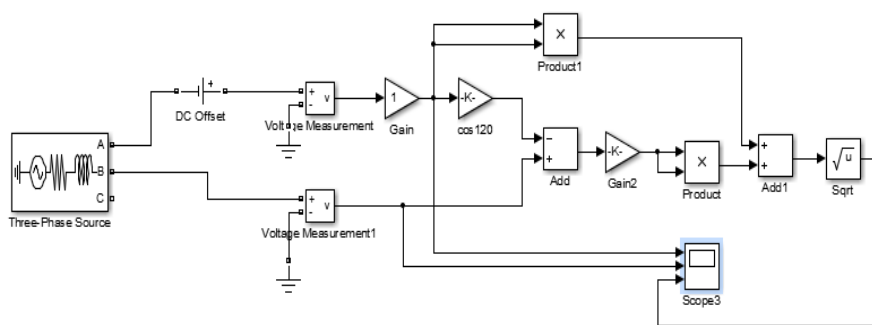
Kako se vidi sa slike 1  $\cos \theta = \frac{i_a}{I}$ , dok se  $\sin \theta$  može predstaviti kao

$\sin \theta = \sqrt{1 - \frac{i_a^2}{I^2}}$ . Uvrščavanjem ovih jednakosti u relaciju (3) dolazi se do izraza

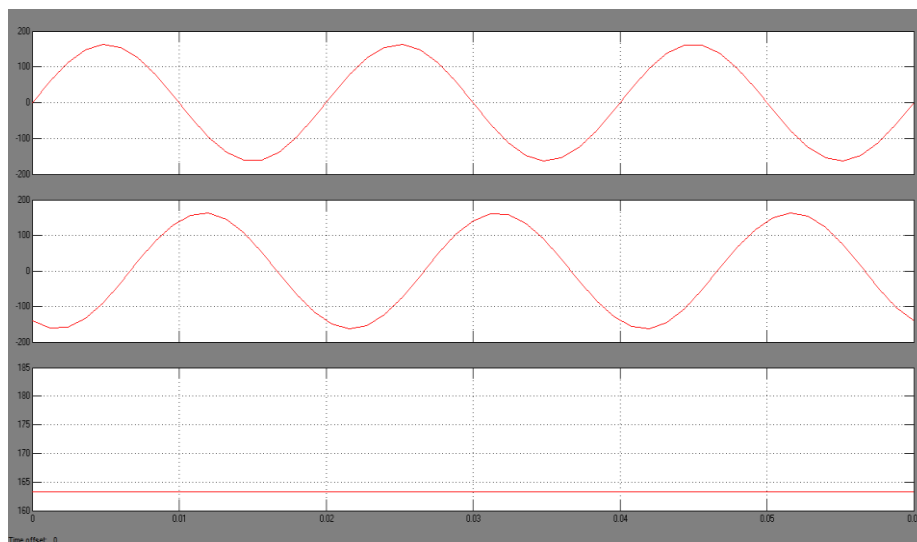
(4) koji predstavlja trenutnu vrednost amplitude obrtnog vektora struje  $I$ .

$$I = \sqrt{\left(\frac{i_b - i_a \cdot \cos 120^\circ}{\sin 120^\circ}\right)^2 + i_a^2} \quad (4)$$

Za neku konkretnu vrednost  $i_a = I_x \cdot \sin(\omega t)$  i  $i_b = I_x \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$  dobija se da je  $I = I_x$ , odnosno obrtni vektor struje je jednak konstanti. Ova tvrdnja je proverena simulacijom u programskom alatu Matlab. U Simulinku je napravljena blok šema (slika 2) za simulaciju obrtnog vektora struje. Snimani signali su dužine tri periode prostoperiodičnog 50Hz signala, odnosno 60ms. Na slici 3 prvi dijagram predstavlja struju  $i_a$ , drugi struju  $i_b$ , a treći amplitudu obrtnog vektora struje  $I(t)$ .



Slika 2. Blok šema za simulaciju izračunavanja obrtnog vektora struje



Slika 3. Struje faze "a", "b" i amplituda obrtnog vektora u vremenu, u slučaju simetričnog sistema; ukupno vreme simulacije je 60 ms

### 3. Princip ispitivanja i analiza rezultata

Predmet ispitivanja su asinhroni motori napojne pumpe br. 2 i napojne pumpe br. 4 u objektu termoelektrane-toplane Zrenjanin. Na osnovu povećanih vibracija, kako mehaničkih tako i u struji motora, postavljena je osnovana sumnja da postoji određeno oštećenje motora pumpe br. 4. Kao što je već spomenuto ova analiza se zasniva na poređenju rezultata merenja u približno istim radnim tačkama oba motora. Poželjno je da motor bude nominalno opterećen, ali u ovakvom slučaju, kada se porede dobar i sumnjiv motor, određeni zaključci se mogu dobiti i pri manjem teretu.

Ispitivani motori su asinhroni dvokavezni nazivnih podataka:

- nazivni napon 6 kV
- nazivna struja 365 A
- nazivna snaga 3,15 MW
- nazivna brzina 2 982 rpm
- $\cos(\varphi) = 0,92$

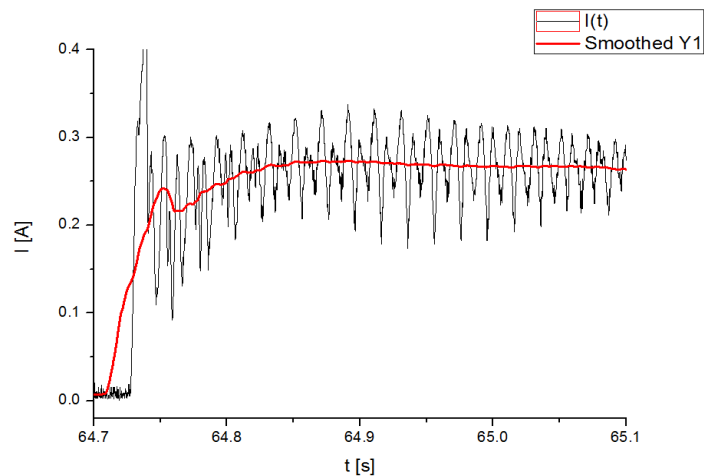
Broj žlebova na rotoru je 56, a na statoru 60.

Snimanje je izvršeno pri zaletanju motora. Odabiranje signala je vršeno učestanošću 4kHz.

Analiza signala je rađena u programskom alatu Origin. Za uklanjanje šuma iz snimljenog signala korišćeno je procesiranje komandom *Smoothing*, odnosno urednjavanje signala. Ova komanda se još može koristiti i kao filtar za uklanjanje željene učestanosti iz signala. Odabirom broja tačaka u prozoru za usrednjavanje kontroliše se potiskivanje željene učestanosti. Za konkretne motore rađeno je u prozoru širine 40ms, tj. sa  $4000\text{Hz} \cdot 40 \cdot 10^{-3}\text{s} = 160$  tačaka. Na taj način se iz originalnog signala filtriraju 25Hz komponenta, kao i svi njeni umnošci, među njima i 50Hz i 100Hz, koje su od značaja za analizu.

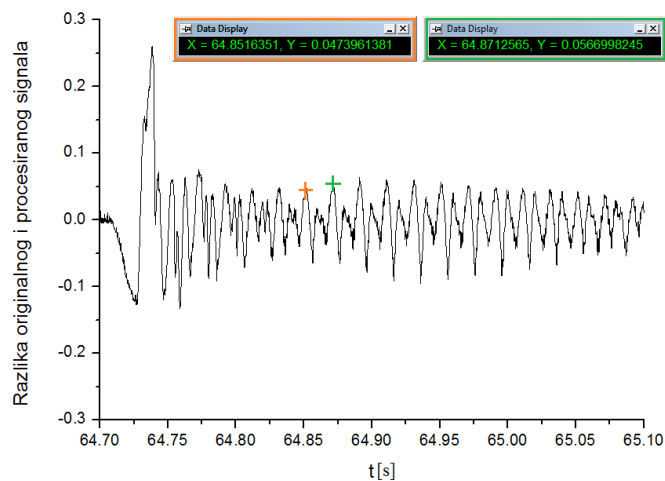
- 1) Asinhroni motor napojne pumpe br. 2 (ispravan)

Na slici 4 je prikazan grafik talasnog oblika amplitude vektora obrtne struje (crna linija) kao i njena usrednjena vrednost (crvena linija).



Slika 4. Talasni oblik amplitude vektora obrtne struje  $I(t)$  i njena usrednjena vrednost

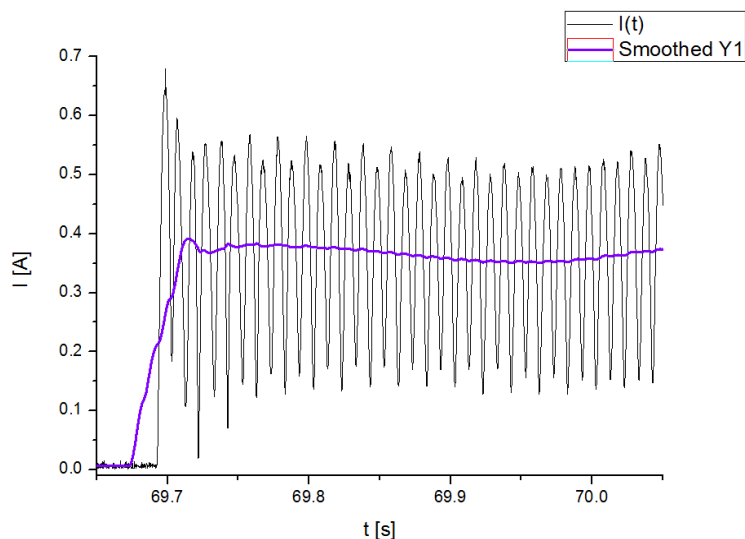
Za dalje razmatranje je od interesa posmatranje razlike originalnog i procesiranog (usrednjenog) signala. Taj signal je prikazan na slici 5. Primećuje se da je nakon kraćeg vremena zaletanja dominantna 50Hz komponenta signala superponirana sa još nekom drugom učestanošću, što pokazuju narandžasti i zeleni marker na slici.



Slika 5. Razlika originalnog i procesiranog signala obrtnog vektora struje

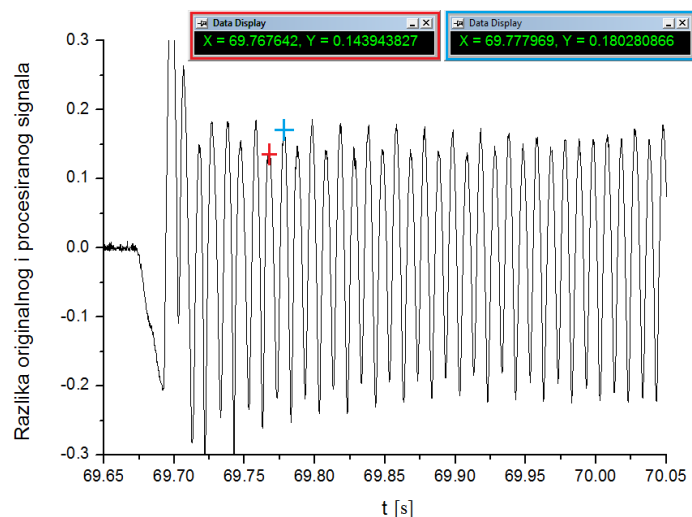
2) Asinhroni motor napojne pumpe br. 4 (neispravan)

Za motor napojne pumpe br. 4, za koji se sumnja da je u kvaru, talasni oblik vektora obrtne struje (crna linija) i njena usrednjena vrednost (ljubičasta linija) prikazani su na slici 6.



Slika 6. Talasni oblik vektora obrtne struje  $I(t)$  i njena usrednjena vrednost

Primećuje se bitna promena u talasnom obliku u odnosu na signal sa slike 4. Razlika originalnog i procesiranog signala je prikazana na slici 7.



Slika 7. Razlika originalnog i procesiranog signala obrtnog vektora struje

Crveni i plavi marker na slici pokazuju dominantno prisustvo 100Hz komponente signala u samom početku zaletanja. Signal na slici 7, koji odgovara neispravnom motoru, ima više nego tri puta veću amplitudu u odnosu na signal sa slike 5, koji odgovara ispravnom motoru.

#### 4. Zaključak

Ukoliko postoji kvar na kavezu AM snimanjem polazne struje motora i njenom analizom može se konstatovati njegova egzistencija. U ovom radu, poređenjem signala struja zaletanja na ispravnom i neispravnom motoru, došlo se do zaključka da će se kvar na kavezu pokazati u vidu dominantne komponente na frekvenciji od približno 100Hz amplitude obrtnog vektora struje u prvim trenucima zaleta. Ova komponenta se javlja zbog toga što se u početnim trenucima zaleta kavez motora okreće sporo, praktično miruje u samom početku, a preko kaveza prelazi polje statora sa električnom kružnom frekvencijom od  $100\pi$  rad/sec koje dva puta u toku periode prelazi preko oštećenog dela kaveza. To dalje znači da (približno) dva puta u toku periode ne može struja indukovana u statoru da doprinese sinusnom magnetskom obrtom polju glavnog fluksa i taj „nedostatak“ struje magnećenja radi održanja polja mora da se nadoknadi od strane statora. Zato se u toku zaleta motora sa oštećenim kavezom javlja modulacija amplitude obrtnog vektora struje sa frekvencijom od 100 Hz koja opada u toku trajanja zaleta, kako se zaleće kavez rotora i to prema izrazu ( $100 \text{ Hz} * \text{klizanje}$ ), što se može uočiti analizom filtriranih signala, kao što je prikazano u radu. Prvi doprinos rada je upotreba postojanja karakteristične modulacije amplitude obrtnog vektora struje statora u toku zaleta za detektovanje oštećenja kaveza. Drugi doprinos rada je prost primenljiv algoritam za izdvajanje približno 100 Hz komponente struje statora motora u toku početnog dela zaleta, koji je isproban na praktičnom primeru dvokavezni motora snage 3,15 MW.

#### Literatura

- [1] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni and G. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4109 - 4126, 2008.
- [2] A. Ceban, R. Pusca, R. Romary, "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis", *IEEE trans. on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, pp 2082 – 2093. 2012
- [3] N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham and G. E. Dawson, "Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine", *IEEE trans. on Industry Applications*, vol. 28, no. 1, pp 165 – 171, 1992.

- [4] Ž. Janda, M. Janković, M. Milošević, B. Jovanović, "Napredna dijagnostika ekscentriciteta i loma kaveza visokonaponskih asinhronih motora", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla*, 2012, Knj. 22, pp. 235-250, DOI:10.5937/zeint22-2946, <http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0350-85281222235J>

**Abstract.** In the case of large induction motors, it is very important to quickly and safely identify the onset of failure. In that way one should take appropriate corrective measures to prevent significant damage. In this paper, the comparative diagnostics between two high-voltage large induction motors using the specific proposed waveform analysis of current during the direct-on-line start is presented. Using the previously recorded signals, a rotating current vector amplitudes for both machines are determined. Their shapes are analysed and the presence of the initial 100Hz stator current component, indicating the existence of a rotor failure, is observed.

**Keywords:** large induction motor, machine diagnostics, rotating current vector, 100Hz component.

## Detection of Large Induction Motor Cage Failure by Novel Analysis of the Waveform of the Start up Current

Radmila Partonjić, Žarko Janda, Zoran Lazarević

Rad primljen u uredništvo: 10.11.2017. godine.

Rad prihvaćen: 17.11.2017. godine.