



UPOTREBA VIŠIH SUBHARMONIKA U SPEKTRU STRUJE STATORA RADI DIJAGNOSTIKE STANJA KAVEZA ASINHRONOG MOTORA

Blagota Jovanović, Žarko Janda, Zoran Lazarević*

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“

*Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Sadržaj: U radu je prikazana diferencijalna dijagnostika oštećenja kaveza rotora asinhronog motora, u odnosu na ostala oštećenja (prvenstveno u odnosu na oštećenje ležajeva), bazirana na višim subharmonicima u spektru struje. Pokazano je da viši subharmonicima u spektru struje delimično nastaju zbog oscilacija u brzini obrtanja i prikazana je eksperimentalna potvrda.

Ključne reči: lom šipke rotora, dijagnostika mašine, spektar struje statora

1. UVOD

U radu je analizirana asinhrona mašina sa slomljenim štapom na rotoru koristeći princip superpozicije. Korišćen je razvijeni potpuni realni model asinhronog motora u skladu sa publikovanim rezultatima drugih autora [1,2,3,4,5]. Rotor sa slomljenim štapom je posmatran kao superpozicija dva različita stanja:

1.) ispravan kavezni rotor sa svim strujama koje kroz štapove protiču u normalnom radnom stanju i

2.) kavezni rotor, takođe ispravan u mehaničkom smislu ali sa Nortonovim generatorom u jednom štapu, koji generiše struju koja je jednaka i suprotna jednoj od struja štapa rotora u prethodnom stanju.

Prikazani su eksperimentalni rezultati koji potvrđuju teorijske zaključke.

Kako je struja rotora složenoperiodična to će istog oblika biti i struja Nortonovog generatora. Nortonova struja će izazvati pulsacionu mps čija prostorna slika pulsira sa učestanošću struja Nortonovog generatora. Po Leblanovoj teoremi ovo polje se može razložiti na direktnu i inverznu komponentu koje će u namotajima statora indukovati nove ems, odnosno struje, na učestanostima date relacijom (1).

$$\left(\frac{v_N}{p}(1-s) \pm s \right) f, v_N = 2,10,14 \quad (1)$$

Gornji izraz se odnosi na četvoropolnu mašinu kod koje su namotaji statora spregnuti u trougao ili izolovanu zvezdu.

Komponenta struje statora na učestanosti $(1-2s)f$ će u interakciji sa osnovnim fluksom u mašini izazvati promjenu momenta $\Delta T(t)$, odnosno brzine $\Delta \omega(t)$ sa učestanošću $2sf$. To je ujedno osnovni harmonik njihove pulsacije.

Pulsacija brzine će dalje izazvati faznu modulaciju osnovne komponente mps rotora u mašini što za posledicu ima indukovanje nove ems, a samim tim i struje u namotajima statora, na učestanosti $(1+2s)f$, [8].

Pojava komponenti struje statora na učestanostima $(1 \pm 2s)f$ ukazuju na oštećenje rotora, ali se ne može pouzdano utvrditi da li je razlog kvara oštećenje ležajeva rotora ili lom štapa odnosno segmenta prstena rotora. Prisustvo komponenti struje statora na karakterističnim učestanostima, koje se nalaze u zoni ispod petog i sedmog harmonika, siguran je znak da je kvar na rotoru izazvan lomom štapa odnosno segmenta prstena.

Kako fluks rotora pored osnovne komponente ima i više harmonike koji u namotajima statora indukuju ems, odnosno struje, na učestanostima date relacijom (1), to će osnovni harmonik pulsacije brzine izazvati i njihovu faznu modulaciju što za posledicu ima indukovanje novih ems, ali sada, na učestanostima

$$\left(\frac{v_N}{p}(1-s) \pm 3s \right) f, v_N = 10,14,22 \quad (2)$$

a čije su amplitude direktno srazmjerne promjeni momenta ΔT .

Tretiranje ovih komponenti struje statora u defektnoj mašini do sada nije publikovano u dostupnoj literaturi. Novoindukovane struje će u iterativnoj proceduri izazvati više harmonike fluktuacije momenta, odnosno brzine, što uzimanjem u obzir samo osnovne komponente fluksa rotora u mašini, za posledicu ima pojavu novih komponenti u spektru struje statora na učestanostima

$$(1 \pm 2ks)f, k=2,3,\dots \quad (3)$$

Kako su amplitude tako indukovanih struja srazmjerne sa amplitudom, odgovarajućeg harmonika, promjene momenta to za posledicu ima njihovo izraženije slabljenje kako se red harmonica povećava. Uzimanje u obzir ovih komponenti struje statora, u cilju određivanja prirode kvara rotora, po saznanju autora do sada nije rađeno.

Analizirajući mašinu sa slomljenim segmentom prstena utvrđeno je da se u struji statora javljaju potpuno iste komponente kao i prilikom oštećenja štapa rotora. Analizom rezultatne mps rotora utvrđeno je da je kod mašine sa oštećenim segmentom izraženiji deformitet nego kod iste sa oštećenim štapom rotora. Drugim riječima, mps koja je posledica Nortonove struje više deformiše rezultatno obrtno polje u mašini sa slomljenim segmentom nego u onoj sa oštećenim štapom rotora. Kao posledica toga javljaju se veće amplitude komponenti u spektru struje statora čije su učestanosti date relacijom (1). Posebno je izražen porast komponente na učestanosti $(1-2s)f$, što za posledicu ima veće fluktuacije momenta, odnosno brzine obrtanja rotora u slučaju defekta ove vrste.

Činjenica da se veće oscilacije momenta javljaju za slučaj oštećenja segmenta je iskorišćena da bi se utvrdila tačna priroda kvara na rotoru. Naime, prilikom oštećenja segmenta prstena komponente struje statora, čije su amplitude srazmjerne promjeni momenta i čije su učestanosti

$$(1 \pm 2ks)f, k = 2,3,\dots \quad (4)$$

$$\left(\frac{v_N}{p}(1-s) \pm 3s \right) f, v_N = 2,10,14,\dots$$

su znatno izraženije nego u slučaju oštećenja štapa rotora.

Novonastale komponente struje statora predstavljaju reakciju statora na mps stvorenu strujom Nortonovog generatora i kao takve izazivaju njegovo intezivno zagrijavanje.

Eksperimentom na realnom motoru je utvrđeno postojanje karakterističnih komponenti struje statora na učestanostima:

- $(1 \pm 2s)f$,
- $(5 - 6s)f$, $(5 - 4s)f$, a takođe i na učestanostima
- $(1 - 4s)f$, $(5 - 8s)f$ i $(5 - 2s)f$.

Poslednje tri se javljaju kao posledica oscilovanja brzine što je znak da je došlo do oštećenja segmenta prstena.

Teorijska razmatranja su u skladu sa eksperimentalnim rezultatima i rezultatima simulacije.

Rezultati istraživanja prikazani u radu su:

- upotreba subharmonika struje statora na frekvencijama

$$\left(\frac{v_N}{p}(1-s) \pm 3s \right) f \quad (5)$$

radi detektovanja egzistencije i vrste kvara rotora,

- upotreba subharmonika struje statora na frekvencijama $(1 \pm 2ks)f, k=2,3,\dots$

radi detektovanja egzistencije i vrste kvara rotora.

Dalji pravci istraživanja u ovoj oblasti su detaljna analiza oštećenja kaveza asinhronog motora sa dubokim žljebovima kao i detekcija kvara rotora pomoću analize tranzijentnih stanja.

2. VIŠI SUBHARMONICI U SPEKTRU STRUJE STATORA

U literaturi [8] je pokazano da će se u struji statora defektnog motora pojaviti komponente na učestanostima $(1 \pm 2ks)f, k=1,2,\dots$ čije su amplitude srazmjerne promjeni momenta. Razlog postojanja ovih učestanosti jeste efekat pulsacije brzine koji će izazvati faznu modulaciju osnovne komponente mps rotora u mašini.

Kako u analiziranoj defektnoj četvoropolnoj mašini pored osnovne komponente mps rotora ($v_N = 2$) postoje i viši harmonici to će osnovna komponenta promjene brzine izazvati i njihovu faznu modulaciju.

Osnovna komponenta promjene brzine se u skladu sa [8] može napisati u obliku:

$$\Delta \omega_r(t) = -\frac{\Delta T}{J2s\omega} \cos(2s\omega t) \quad (6)$$

gdje je ΔT amplituda osnovnog harmonika naizmenične komponente momenta.

Varijacija brzine rotora se sa strane statora vidi kao varijacija mehaničkog ugla i može se izračunati integracijom brzine rotora kao:

$$\int \Delta \omega_r(t) dt = \int -\frac{\Delta T}{J2s\omega} \cos(2s\omega t) dt = -\frac{\Delta T}{J4s^2\omega^2} \sin(2s\omega t) \quad (7)$$

Trenutna vrijednost v_N -og prostornog harmonika mps rotora koji je eksitovan strujom osnovne učestanosti $s\omega t$ se, ne vodeći računa o amplitudi, sa strane statora vidi kao [9]:

$$F_{rot}^{v_N}(t, \theta) = F_m^{v_N} \sin \left(\left(\left(s \pm \frac{v_N}{p}(1-s) \right) \omega t \mp v_N \theta \right) \mp v_N \Delta \theta_r \sin(2s\omega t) \right) \quad (8)$$

gde se gornji znak odnosi na direktno, a donji na inverzno polje rotora. Nakon niza elementarnih matematičkih operacija prethodni izraz se može napisati kao [9]:

$$F_{rot}^{v_N}(t, \theta) = F_m^{v_N} \left[\sin \left(\left(s \pm \frac{v_N}{p}(1-s) \right) \omega t \mp v_N \theta \right) - \frac{v_N \Delta \theta_r}{2} \left[\sin \left(\left(\frac{v_N}{p}(1-s) \pm 3s \right) \omega t \mp v_N \theta \right) + \sin \left(\left(\frac{v_N}{p}(1-s) \mp s \right) \omega t \mp v_N \theta \right) \right] \right] \quad (9)$$

Iz gornjeg izraza važno je zapaziti pojavu novih komponenti u spektru struje statora koje se javljaju na učestanostima:

$$\left(\frac{v_N}{p} (1-s) \pm 3s \right) f, \quad v_N = 2,10,14,\dots \quad (10)$$

$$p = 2$$

Pojava ovih komponenti uslovljena je postojanjem mehaničke vibracije rotora. Takođe, važno je zapaziti da je *amplituda novo-indukovanih struja direktno srazmjerna promjeni momenta ΔT* . U tome upravo i leži osnovni razlog njihovog postojanja u mašini sa slomljenim segmentom, ali ne u tolikoj mjeri, i u mašini sa slomljenim štapom rotora

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Eksperimentalni podaci su dobijeni ispitivanjem visokonaponskog motora cirkulacione pumpe CP1 u pogonu Beogradskih elektrana u Mirijevu. Nazivni podaci motora su

1ZK 6400 SB2
2974 ob/min
6 kV
400 kW
46 A
cos ϕ 0,9

Radna tačka pri snimanju struje statora je definisana sa sledećim linijskim strujama i naponima:

48 A, 47,5 A, 47,5 A
5,96 kV, 5,94 kV, 5,97 kV

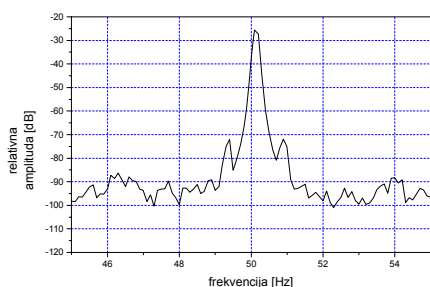
Opterećenje visokonaponskog motora je nešto iznad nominalnog. Uz linearnu aproksimaciju klizanja ceni se na

$$s = s_{nom} \frac{I}{I_{nom}} = \frac{3000 - 2974}{3000} \cdot \frac{47,5}{46} = 0,895\% \quad (11)$$

Pikovi u spektru struje statora, a zbog oštećenja rotora, treba da se nalaze na frekvencijama koje su u odnosu na fundamental pomerene za

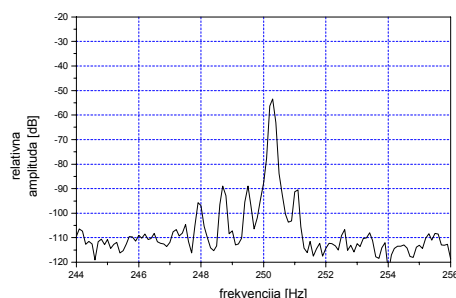
$$\Delta f = 2 \cdot s \cdot f_o = 0,00895 \cdot 2 \cdot 50 = 0,895 \text{ Hz} \quad (12)$$

Očigledno je da postoji poklapanje pikova u spektru sa predviđanjima.



Sl. 1. Spektar struje statora pod teretom, okolina 50 Hz, od 45 Hz do 55 Hz.

Na slici 1 se vide karakteristični bočni pikovi u spektru struje statora koji ukazuju na postojanje rotacione nesimetrije na kavezu, a mogu se povezati i sa oštećenjem ležajeva, ako nema karakterističnih linija u spektru struje statora ispod 250 Hz.



Sl. 2. Spektar struje statora pod teretom, okolina 250 Hz, od 244 Hz do 256 Hz.

Na slici 2 je prikazan spektar struje statora u okolini 250 Hz. Uočava se postojanje karakterističnih pikova u spektru struje na frekvencijama

$$(5 - 6s)f, (5 - 4s)f \text{ i } (5 - 2s)f \quad (13)$$

Uočene linije u spektru struje statora opterećenog motora predstavljaju indicaciju postojanja oštećenja na rotoru motora kao i postojanje dosta visokih vibracija brzine obrtanja.

4. ZAKLJUČAK

Prikazana je jedna metoda za diferencijalnu dijagnostiku oštećenja kaveza rotora asinhronog motora, u odnosu na ostala oštećenja (prvenstveno u odnosu na oštećenje ležajeva), bazirana na višim subharmonicima u spektru struje. Konkretni rezultati istraživanja prikazani u radu su:

- upotreba subharmonika struje statora na frekvencijama

$$\left(\frac{v_N}{p} (1-s) \pm 3s \right) f \quad (14)$$

radi detektovanja egzistencije i vrste kvara rotora,

- upotreba subharmonika struje statora na frekvencijama $(1 \pm 2ks) f$, $k=2,3,\dots$ radi detektovanja egzistencije i vrste kvara rotora.

Prikazani pristupi se slažu sa rezultatima dobijenim obradom eksperimentalnih snimaka.

Dalji pravci istraživanja u ovoj oblasti su detaljna analiza oštećenja kaveza asinhronog motora sa dubokim žljebovima kao i detekcija kvara rotora pomoću analize tranzijentnih stanja.

5. REFERENCE

- [1] Gojko M.J, Đurović D.M, *Analiza dinamičkih režima indukcionog motora metodom mnogostrukog spretnutih kola – winding function theory approach*, JUKO-CIGRE, Herceg Novi, maj 1997
- [2] Ž. Janda, D. Petrović, Z. Lazarević, *New approach for broken rotor bars detection in induction motors*, International Conf. on Electrical Machines, 1994, Paris, 5-8 Sept.
- [3] Ž. Janda, D. Petrović, B. Maoduš, Z. Lazarević, M. Demek, *Kvarovi u rotoru visokonaponskih asinhronih motora, njihova detekcija i saniranje*. JUKO CIGRE, 22.savjetovanje, Vrnjačka Banja, 1995
- [4] Z. Lazarević, D. Petrović, Ž. Janda, *Iskustvo u nadgledanju stanja kaveza visokonaponskih asinhronih motora*, ETRAN'96, Budva 1996.
- [5] P.J. Tavner, J. Penman, *Condition monitoring of electrical machines*, Research Studies Press Ltd, Letchworth, England, 1987
- [6] M. Petrović, *Elektromehaničko pretvaranje energije*, Beograd, 1994
- [7] B. Mitraković, N. Lj. Nikolić, *Asinhrona mašine*, Naučna knjiga, Beograd, 1986
- [8] Filippetti F, Francheschini G, Tassoni C, Vas P. *AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect*, IEEE Trans. Energy Conversion, vol.34, 98-107, 1998
- [9] B.Jovanović *Dinamički model asinhronog motora za proučavanje efekta viših harmonika magnetskog polja pri pojavi kvarova na rotoru*, Magistarski rad, ETF Beograd, april 2008.

THE INDUCTION MOTOR CAGE DIAGNOSTICS BASED ON CURRENT SUBHARMONICS

Abstract: *In the paper the induction motor cage failure diagnostics is presented, based on sub-harmonics in the current spectrum. The main purpose is to make difference between the bearings failure and the cage failure. It is shown that sub-harmonics are partially induced by the mechanical speed vibrations. The proposed diagnostics technique is successfully a recorded on real motor current data.*

Key words: *Broken rotor bar, machine diagnostics, stator current spectrum*