

HARMONICI U SPEKTRU STRUJE TROFAZNE KAVEZNE ASINHRONE MAŠINE

HARMONICS IN THE CURRENT SPECTRUM OF THREE-PHASE SQUIRREL-CAGE INDUCTION MACHINE

Nadica Vranješ, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – Predmet rada je analiza spektra struja kod asinhronih motora sa akcentom na kavezne asinhronne mašine. U ovom radu biće pojašnjeni uzroci nastajanja viših harmonika u kaveznoj asinhronoj mašini sa osvrtom na rad i konstrukciju iste. Analiziraće se spektar statorske struje na primeru trofaznog kaveznog motora nominalne snage 11kW, koji će biti razmatran u režimu nominalnog opterećenja i režimu sa kvarom (oštećenje rotorskih provodnika). U pomenutim režimima ući će se u trag svakoj značajnoj komponenti strujnog spektra tj. navesti njeno poreklo.

Ključne reči: Asinhroni motor, Spektar struja, kvarovi

Abstract The subject of this paper is the analysis of the current spectrum of asynchronous motors with an emphasis on cage asynchronous machines. In this paper, the stator current spectrum will be analyzed on the example of a squirrel-cage motor with nominal power 11 kW, which will be considered in nominal load mode and failure mode (damage to rotor conductors). In these modes, every significant component of the current spectrum will be traced, i.e. state its origin.

Keywords: Induction Motor, Current spectrum, Faults

1. UVOD

Asinhroni motor kao i svaka električna rotaciona mašina u najgrubljoj podeli sastoji se iz statora i rotora. Stator se izrađuje od feromagnetnog materijala - lameliranjem sa ciljem maksimalnog umanjenja gubitaka u magnetskom kolu. Žlebovi u koje se smeštaju namotaji statora mogu biti otvoreni ili poluzatvoreni, zavisno od snage motora. Kod kaveznog (kratkospojenog) rotora, rotor čine masivni provodnici koji se sa obe strane kratko spajaju takozvanim kratkospojnim prstenovima. Shodno ovakvom načinu izrade nema se električni pristup rotorskom namotaju. Na slici 1 prikazan je razvijeni oblik moderne izvedbe jedne niskonaponske, trofazne kavezne asinhronne mašine namenjeni za horizontalni tip montaže, koji je ujedno i najčešći u industrijskoj eksploataciji.

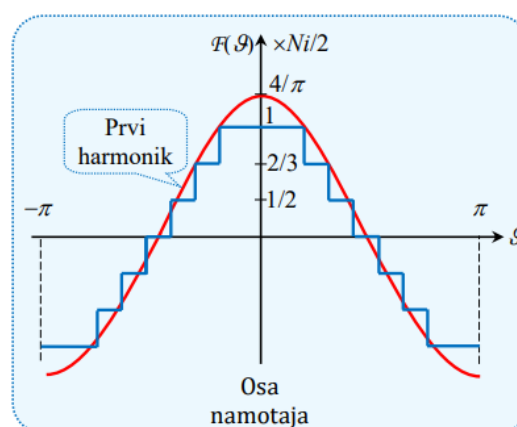


Slika 1.1 - Razvijeni oblik moderne izvedbe niskonaponske trofazne kavezne asinhronne mašine

Zbog specifičnosti konstrukcije mašine, očekuje se da u harmonijskom spektru struje asinhronne mašine postoje razne komponente, a prilikom nastanka određenih vrsta kvarova javljaju se i dodatne komponente, pa to može da posluži kao sredstvo za monitoring ovih vrsta mašina, što i jeste glavna tema rada.

2. SPEKTAR STATORSKIH STRUJA ISPRAVNE ASINHRONE MAŠINE

U idealnom slučaju kod mašina naizmenične struje cilj je dobijanje prostoperiodične (sinusne) raspodele magnetne indukcije u vazдушnom zazoru. To se kod asinhronih mašina postiže raspodeljivanjem trofaznog statorskog namotaja u žlebove.



Slika 2.1 – Raspodela magnetopobudne sile trofaznog statorskog napotaja [4]

Usled proticanja struje kroz raspodeljeni namotaj uspostavlja se magnetno polje. Ako na cilindričnom magnetnom kolu postoje tri raspodeljena namotaja sa po N

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada, čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, vanr. prof.

navojaka, koji su međusobno prostorno pomereni za $2\pi/3$ i neka kroz njih teku struje koje obrazuju trofazan naizmeničan sistem formiraće se obrtno polje koje je ključno za funkcionisanje asinhronih mašina.

Usled rasporeda trofaznog namotaja u žlebovima statora talasni oblik rotirajuće MPS je stepeničast, stoga ona sadrži pored osnovnog i više prostorne harmonike.

Magnetno kolo mašine je "diskretizovano" konačnim, i u pogledu prostoperiodične prostorne raspodele, vrlo malim brojem žlebova (obično nekoliko desetina) rezultujući, takođe, konačnim brojem položaja u kojem se mogu naći provodnici, što onemogućuje idealnu sinusnu raspodelu. Posledica navedenog činjeničnog stanja odražava se pojavom viših harmonika u prostornoj raspodeli polja. Prisustvo viših harmonika ogleda se u tome da prostorna raspodela magnetne indukcije $B(\theta)$ nije prostoperiodična funkcija ugla (θ).

Ovi prostorni harmonici mogu se opisati poznatim izrazom:

$$v = 6g + 1, \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.1)$$

(v) predstavlja red harmonika. Glavni žlebni harmonici (*Principal slot harmonics* - *PSH*) su dva najistaknutija viša harmonika u stepeničastoj MPS statora.

U slučaju kaveznog asinhronog motora, od mnogo većeg značaja su rotorski žlebni harmonici. Rotorski kavez reaguje na talase magnetne indukcije sa statorske strane sledećim talasima MPS:

$$M_1 = M_{1m} \cos(s_v \omega t - v p \theta_r) \quad (2.2)$$

$$M_2 = M_{2m} \cos\left(s_v \omega t + \left(\frac{\lambda R}{p} - v\right) p \theta_r\right) \quad (2.3)$$

$$M_3 = M_{3m} \cos\left(s_v \omega t - \left(\frac{\lambda R}{p} + v\right) p \theta_r\right) \quad (2.4)$$

gde je S_v :

$$s_v = 1 - v(1 - s) \quad (2.5)$$

U mašini sa nepromenljivom magnetnom otpornošću, pomenuti talasi MPS i konstantna permeabilnost u vazдушnom zazoru u međusobnoj reakciji daju istovetne talase magnetne indukcije, koji gledano sa strane statora izgledaju:

$$B_1 = B_{1m} \cos(\omega t - v p \theta_s) \quad (2.6)$$

$$B_2 = B_{2m} \cos\left(\left(1 - \lambda \frac{R}{p}(1 - s)\right) \omega t + \left(\frac{\lambda R}{p} - v\right) p \theta_s\right) \quad (2.7)$$

$$B_3 = B_{3m} \cos\left(\left(1 + \lambda \frac{R}{p}(1 - s)\right) \omega t - \left(\frac{\lambda R}{p} + v\right) p \theta_s\right) \quad (2.8)$$

Sve prostorne harmonike magnetne indukcije sa statorske strane rotor reflektuje pri baznoj frekvenciji i dva niza frekvencija koje su funkcija klizanja. Ove komponente se nalaze prilično visoko u spektru statorske struje i poznati su kao donji i gornji RSH (*rotor slot harmonic*), respektivno:

$$f_{RSH-L} = \left(1 - \lambda \frac{R}{p}(1 - s)\right) f_1 \quad (2.9)$$

$$f_{RSH-U} = \left(1 + \lambda \frac{R}{p}(1 - s)\right) f_1 \quad (2.10)$$

Međutim, postojanje komponenti statorske struje pri navedenim frekvencijama zavisi od broja pari polova p u talasima magnetne indukcije. Preciznije rečeno, egzistencija komponente struje statora uslovljena je time da (v) u $\left(\frac{R}{p} - v\right)$ mora da uzima neku vrednost iz skupa

$$H = (6k + 1), \text{ tj.:} \quad (2.11)$$

$$R_{L_PSH} = p[6(g + k) + 2], \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad (2.12)$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$R_{L_PSH} = (6n + 2)p, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.13)$$

Slično tome za postojanje gornjeg PSH u spektru statorske struje mora biti zadovoljeno sledeće:

$$R_{U_PSH} = (6n - 2)p, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.14)$$

Na kraju za postojanje obe komponente potrebno je da broj šipki rotora u motoru sa p pari polova bude jednak srednjoj vrednosti prethodna dva uslova:

$$R_{BOTH_PSH} = 6np, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.15)$$

Rotorski i statorski žlebni efekat je efekat koji se javlja kao posledica promene veličine vazдушnog zazora usled obrtanja rotora - funkcija pozicije rotora.

Rotorski prostorni harmonici će se pojaviti jedino kada struja protiče kroz namotaje kaveza, dok za postojanje rotorskih permeabilnih harmonika ovaj uslov ne mora biti ispunjen, naprotiv ovaj efekat će biti izražen i kada u žlebovima rotora nema namotaja već se njegovo kretanje podstiče nekim spoljašnjim izvorom (npr. pomoćnim motorom). Obrtanje rotora, promena njegove pozicije, u ovom slučaju će takođe imati kao posledicu pojavu komponenti struje definisanih izrazima (2.9) i (2.10) u statorskom namotaju.

U zasićenoj mašini očekuju se nove komponente u struji statora samo na sledećim frekvencijama:

$$f_{S-L} = \left(3 - \lambda \frac{R}{p}(1 - s)\right) f_1 \quad (2.16)$$

$$f_{S-U} = \left(3 + \lambda \frac{R}{p}(1 - s)\right) f_1 \quad (2.17)$$

To su niži i viši harmonici zasićenja. Za postojanje ovih harmonika u spektru, neophodno je da bude ispunjen uslov da $R/p - (v + 2)$ pripada $H = (6k + 1)$, $k = 0, \pm 1, \pm 2$.

3. SPEKTAR NEISPRAVNE ASINHRONE MAŠINE

Kvarovi asinhronih motora se mogu klasifikovati u dve kategorije: mehanički i električni. Mehanički kvarovi obuhvataju oštećenja ležaja i ekscentricitet rotora, dok su tipični električni kvarovi vezani za oštećenja statorskog namotaja – međunavojni kratak spoj i rotora – delimični ili potpuni prekidi štapnih provodnika i kratkospojnih prstenova.

Kvarovi ležaja predstavljaju najčešću vrstu kvarova asinhronih mašina (do 50% svih kvarova). Većina električnih mašina koristi kuglične ili valjkaste ležaje. Oni se sastoje od unutrašnjeg i spoljašnjeg prstena i kuglica/valjčica smeštenih u odgovarajuću kliznu stazu. Oštećenja ležaja kuglične/valjkaste konstrukcije mogu se podeliti na: oštećenja klizne staze spoljašnjeg prstena, oštećenja klizne staze unutrašnjeg prstena, oštećenja kuglica ležaja i oštećenja kaveza ležaja. Ova oštećenja stvaraju vibracije specifičnih frekvencija koje su funkcija geometrije ležaja i mogu se izračunati kao:

- Frekvencija vibracije usled oštećenja klizne staze spoljašnjeg prstena:

$$f_{c1} = \frac{N}{2} f_s \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right), \quad (3.1)$$

- Frekvencija vibracije usled oštećenja klizne staze unutrašnjeg prstena:

$$f_{c2} = \frac{N}{2} f_s \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right), \quad (3.2)$$

- Frekvencija vibracije usled oštećenja kuglica ležaja:

$$f_{c3} = \frac{D_c}{D_b} \frac{1}{2} f_s \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right)^2 \right), \quad (3.3)$$

- Frekvencija vibracije usled oštećenja kaveza ležaja:

$$f_{c4} = \frac{1}{2} f_s \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right). \quad (3.4)$$

Gde je f_{ck} – frekvencija vibracije, f_s – frekvencija rotacije, N – broj kuglica, D_b – prečnik kuglice, D_c – prečnik kaveza ležaja i θ – ugao kontakta kuglice sa stazom. Ove vibracije karakterističnih frekvencija se oslikavaju u pojavi viših harmonika u linijskoj struji motora na frekvencijama:

$$f_c = |f_e \pm m f_c|, m = 1, 2, \dots \quad (3.5)$$

gde je f_e – frekvencija napajanja.

Međunavojni kratak spoj predstavlja najčešći električni kvar kod asinhronih mašina. Za razliku od kvarova koji obuhvataju navojke dve različite faze ili zemljospojevi koji se mogu lako otkriti jer dovode do naglog povećanja amplitude struje i brzog širenja kroz električno kolo, međunavojni kratki spoj statorskog namotaja u jednoj fazi uglavnom se u početku neće manifestovati makroskopski i prekostrujna zaštita ga neće blagovremeno otkriti. Ovakva vrsta kvara nije jednostavna za ranu dijagnostiku i najčešće se otkriva tek kada kratak spoj obuhvati značajan deo namotaja. Postoji nekoliko naučno prihvaćenih metoda za neinvazivnu ranu dijagnostiku međunavojnog kratkog spoja u jednoj fazi. Neki od njih obuhvataju spektralnu analizu struja motora, analizu fluksa koristeći spoljašnji i unutrašnji probni namotaj i spektralnu analizu indukovano napona na priključcima motora nakon njegovog isključenja. Najnovija metoda koja se nameće kao i najpouzdanija do sada obuhvata praćenje putanje vrha polifazora statorskih struja u transformisanom Parkovom području.

Kod asinhronih mašina ekscentricitet rotora predstavlja stanje nejednake širine vazdušnog zazora po njegovom obodu. Postoje tri vrste ekscentriciteta vazdušnog zazora: statički, dinamički i mešoviti ekscentricitet. Najčešća tehnika za detekciju ekscentriciteta koja se koristi jeste spektralna analiza linijske struje motora. Jedan od najpouzdanijih pokazatelja mešovitog ekscentriciteta jeste pojava specifičnih harmonika u okolini mrežnih harmonika čija je frekvencija jednaka:

$$f_{ecc} = [m f_e \pm k f_r], \quad (3.6)$$

gde je f_e – osnovna frekvencija napajanja, m – red višeg mrežnog harmonika, f_r – brzina rotacije rotora ($f_r = \frac{1-s}{p} f_e$) i k red harmonika ekscentriciteta koji se pojavljuje u okolini mrežnog harmonika.

Oštećenja štapnih provodnika - oštećenja rotora, mogu dovesti do neželjenih pojava u samom motoru i pogonu, kao što su pulsacije elektromagnetskog momenta i brzine obrtanja motora (što vodi ka ubrzanom habanju ležaja) i stvaranje debalansa rotora koji uzrokuje povišene vibracije motora, a može biti i uzrok stvaranju ekscentriciteta rotora.

Najefikasnija neinvazivna metoda za detekciju kvarova u rotorskom kavezu obuhvata spektralnu analizu struje motora i proveravanje postojanja karakterističnih harmonika – obeležja ove vrste kvara. U slučaju potpunog ili delimičnog prekida štapova u rotoru u struji motora se indukuju subharmonici na specifičnim frekvencijama u okolini svih normalno prisutnih harmonika u spektru struje. Njihove frekvencije se mogu izračunati kao:

$$f_b = [m \pm k 2s] f_e, \quad (3.7)$$

gde je f_e – osnovna frekvencija napajanja, m – red višeg harmonika, s – klizanje i k – red harmonika kvara u rotorskom kavezu.

4. ANALIZA SPEKTRA NA REALNOM KAVEZNOM ASINHRONOM MOTORU

Analiza signala struje motora (MCSA) predstavlja jednu od najpopularnijih korišćenih tehnika za detekciju pomenutih kvarova rotora. Prednosti ove metode nad ostalima su: pristupačna i jednostavna merna oprema, merenje se može vršiti iz kontrolnog centra bez direktnog pristupa samom motoru (za razliku od metode merenja vibracija gde se akcelerometar mora fizički ugraditi na motor), nezavisna je u odnosu na parametre motora, merenje struje može se vršiti na bazi Holovog efekta (Holovom sondom) koja za razliku od vrednosti koje daje ampermetar pruža mogućnost snimanja kompletnog talasa struje u vremenskom domenu što je neophodno za dalju analizu (FFT), takođe ovaj način ima širok opseg radnih frekvencija (0-500)Hz, i merenje se vrši u realnom vremenu tokom rada motora tako da sam pogon ne trpi gubitke, a istovremeno ovakav vid merenja otvara vrata prediktivnim i preventivnim održavanjima motora.

Analizira se spektar statorske struje na primeru realnog asinhronog kaveznog motora sa $S = 36, R = 28, 2p = 4$, nominalne snage $11kW$, nominalnog napona $400V$ i $s_n = 3.1\%$ klizanje, koji će biti razmatran u režimu nominalnog opterećenja i režimu sa kvarom (oštećenje rotorskih provodnika). Analiza je urađena u programskom paketu MATLAB.

Prvo se obrađuje slučaj zdravog asinhronog motora pri nominalnom (100%) opterećenju. Komponente u spektru na frekvencijama $25.775Hz$ i $74.225Hz$, kao i komponente na $728.2Hz$ i $1406.6Hz$, posledica su neuravnoteženosti odnosno ekscentriciteta rotora. One su značajne i pojavile su se u ovom slučaju tako da se ne mogu ignorisati. Prema formuli 1.18 dobijaju se pomenute vrednosti.

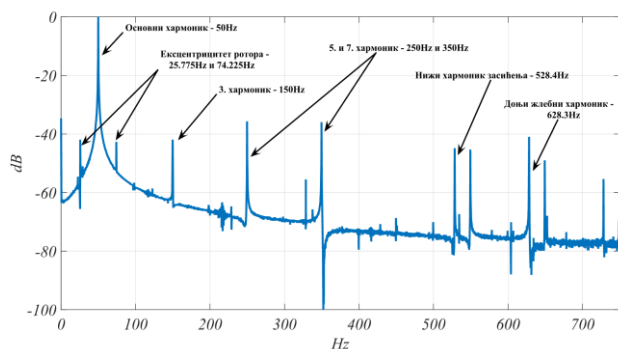
$$f_{ecc} = \left\{ (n_{rt} R \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n_v \right\} f_1; \quad n_{rt}, n_d, n_v \in \mathbb{Z} \quad (4.1)$$

Izvor napajanja je simetričan, ali usled neuravnoteženosti elementa (asinhronog motora), posledično će se pojaviti sve komponente trećeg umnoška osnovnog harmonika, koje inače (teorijski) ne bi smele da postoje izvan trougla. To su prema formuli 1.19

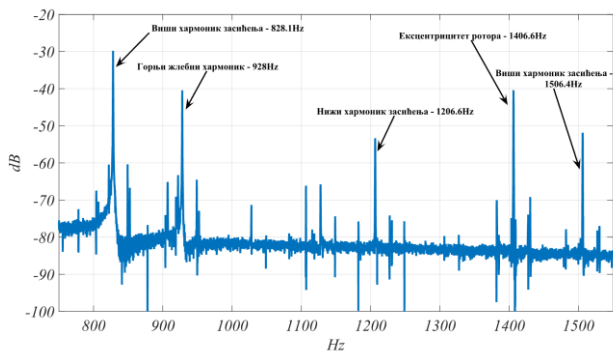
$$f_{usv} = (1 + 2 \cdot k) f_s, k \in \mathbb{Z} \quad (4.2)$$

komponente na: $150Hz, 250Hz, 350Hz \dots$

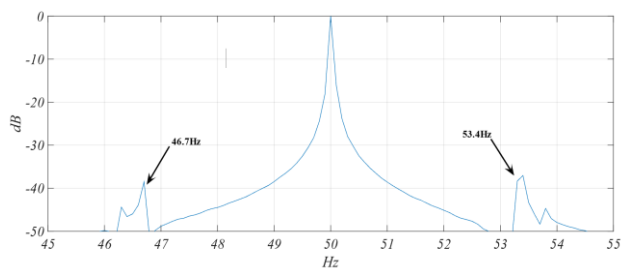
U spektru će se takođe naći i niži (528.4Hz, 1206.6Hz) i viši (828.1Hz, 1506.4Hz) harmonici zasićenja kao i donji žlebusni harmonik na 628.3Hz, ali ne i gornji žlebusni zbog broja rotorskih provodnika. U strujnom spektru motora sa oštećenim rotorskim provodnicima (režim sa kvarom), u blizini osnovnog harmonika javljaju se dve komponente (46.7Hz, 53.4Hz) koje ukazuju na navedeni kvar.



Slika 4.1 – Frekvencijski spektar ispravne mašine od 0 – 750 Hz



Slika 4.2 – Frekvencijski spektar ispravne mašine od 750 - 1500 Hz



Slika 4.3 – Komponente usled oštećenih rotorskih provodnika

5. ZAKLJUČAK

U radu je izložena i objašnjena analiza spektra statorskih struja asinhronih kaveznih mašina. Navedeni su uzroci nastanka i posledice viših harmonika kao i načini da se iskoristi njihovo prisustvo u okviru teme rada. Takođe rad se bavio tehnikama akvizicije i obrade signala kao i njegovom prirodom. Na kraju su teoretske osnove primenjene na primeru realnog asinhronog kaveznog motora i priloženi su dobijeni rezultati. Analiza spektra statorskih struja MCSA metodom predstavlja vrlo koristan alat za praćenje rada asinhronih motora i dijagnostikovanje raznih kvarova u ranoj fazi u realnom vremenu kod pomenutih mašina. Navedene prednosti, konkretno

neinvazivnost i monitoring u realnom vremenu, čine ovu metodu vrlo primamljivom za implementaciju u velikim pogonima jer omogućava prediktivno održavanje koje ne zahteva prekid rada pogona i time osetno redukuje troškove. Sa razvojem veštačkih neuronskih mreža i veštačke inteligencije otvaraju se vrata i za unapređenje MCSA metode u pravcu kreiranja autonomnog sistema koji bi na osnovu naučenih šablona mogao da prepoznaje anomalije u frekvencijskom spektru i samostalno, bez nadzora čoveka, otkrivao eventualne kvarove na mašini i u skladu sa tim reagovao.

6. LITERATURA

- [1] Dr Dejan Reljić: *Otkrivanje kvara rotora kaveznog asinhronog motora primenom tehnika analize terminalnih veličina*, Novi Sad, 2017.
- [2] Emil Levi, Vladan Vučković, Vladimir Strezoski: *Osnovi elektroenergetike – elektroenergetski pretvarači*, FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2013.
- [3] Gojko Joksimović, Jakša Riger, Thomas Wolbank, Nedjeljko Perić, Mario Vašak: *Stator line current spectrum content of a healthy cage rotor induction machine*, 2011.
- [4] Veran Vasić, *Skripta Uvod u električne mašine*, Novi Sad, 2023.
- [5] Toliyat, H. A., Nandi, S., Choi, S., & Meshgin-Kelk, H. (2017). *Electric Machines - Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*
- [6] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni and G. Capolino, "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4109-4126, Dec. 2008, doi:10.1109/TIE.2008.2007527.

Kratka biografija:

Nadica Vranješ rođena je u Novom Sadu 1997. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2024.god.

Dejan Jerkan je vanr. prof. na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su mu modelovanje i dijagnostika električnih mašina, kao i metoda konačnih elemenata.