

UTICAJ ZASIĆENJA MAGNETSKOG KOLA NA DETEKCIJU LOMA ŠTAPA ROTORA INDUKCIONOG MOTORA

Gojko Joksimović*

Ključne riječi: zasićenje magnetskog kola, permeansa vazdušnog procjepa, analiza spektra struje statora

Sažetak: U radu je opisan način inkorporiranja zasićenja magnetskog kola u matematički model indukcionog motora. Zasićenje magnetskog kola je u model uključeno putem virtualne promjene širine vazdušnog procjepa. Opisani model je prevashodno namijenjen modeliranju različitih režima kvarova i dijagnostikovanju tih kvarova analizom spektra struje statora u ustaljenom stanju. Provjera modela je izvršena na analizi konkretnog slučaja kvara kaveznog indukcionog motora – loma štapa rotora. Analiza spektra struje motora sa slomljenim štapom rotora ukazuje na to da je komponenta struje na učestanosti $(1+2s)f_1$, dosad tumačena kao posledica oscilacija brzine rotora, takođe i posledica zasićenja magnetskog kola motora. Spektar struje statora dobijen iz numeričkog modela poređen je sa eksperimentom dobijenim rezultatima. Eksperimentalni rezultati potvrđuju nalaze dobijene iz numeričkog modela.

1. UVOD

Tehnike kontinuiranog praćenja stanja električnih mašina korišćenjem različitih medijuma kao i matematički modeli razvijeni u ove svrhe, doživljavaju svoj procvat u prehodnoj deceniji, [1]. Pri tom su predmet analize na prvom mjestu indukcioni tj. asinhroni motori kao najšire zastupljeni u industriji. Od mnogih tehnika, kao najzgodnija, sa mnogo aspekata, izdvaja se analiza spektra struje statora [2]. Ona ne zahtijeva korišćenje posebnih senzora već sami namotaj statora koristi kao senzor. Spektar struje statora predstavlja svojevrsan elektrokardiogram električne mašine i iz njega se mogu izvući korisni podaci koji govore o stanju mašine. Međutim, da bi se iz spektra mogli izvući zaključci o aktuelnom stanju mašine, potrebno je dobro poznavati spektar struje statora ispravne mašine. Nažalost, ni početkom dvadesetprvog vijeka, razlog postojanja nekih od komponenti spektra struje statora nije u potpunosti razjašnjen.

Što se tiče matematičkih modela namijenjenih modeliranju indukcionog motora u gore navedene svrhe, oni moraju biti dinamički modeli, tj. na svom izlazu treba da daju

* Elektrotehnički fakultet Podgorica, Džordža Vašingtona b.b. 81000 Podgorica. Rezultati publikovani u ovom radu produkt su aktivnosti na aktuelnom projektu "Analiza spektra linijske struje statora zasićene indukcione mašine" koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Crne Gore.

vremensku promjenu struje motora kako bi se ta struja, u ustaljenom radnom režimu, mogla analizirati korišćenjem brze Furijeove transformacije. U literaturi su opisani i slučajevi analize struje statora u dinamičkim režimima korišćenjem različitih tehnika vremensko frekvencijske analize signala, [3]. Modeli koji se koriste u svrhu analize spektra struje statora trebaju da budu prilično detaljni modeli koji mogu u obzir uzeti više harmonične komponente raspodjele magnetske indukcije u vazдушnom procjepu jer su upravo one odgovorne za pojavljivanje viših harmoničnih komponenti u spektru struje statora. Ti se modeli mogu grubo podijeliti u dvije grupe. Jednu grupu čine modeli koji primjenom metode konačnih elemenata, za poznate granične uslove, omogućavaju numeričko rešavanje diferencijalnih jednačina koje proističu iz teorije elektromagnetskih polja, [4]. Ovi modeli su prilično detaljni, uzimaju u obzir realnu geometriju mašine, kao i karakteristike magnetskog kola. Sa druge strane, vrlo su zahtjevni kako sa aspekta korišćenja računarskih resursa tako i sa aspekta vremena potrebnog za izvršavanje programa. Drugu grupu modela čine modeli koji električnu mašinu posmatraju sa aspekta magnetski spregnutih električnih kola, [5]. Ovi modeli, kakav je i model dat u ovom radu, su takođe prilično detaljni jer uzimaju u obzir realnu konfiguraciju namotaja kako na statoru tako i na rotoru a samim tim u obzir uzimaju sve više harmonike raspodjele magnetomotorne sile (mms) simultano. Sa druge strane, programi zasnovani na ovim modelima, u poređenju sa programima koji se baziraju na metodi konačnih elemenata, izvršavaju se praktično trenutno.

Model mnogostruko spregnutih kola je značajno dobio na snazi pojavom i definicijom pojmova *turns function* i *winding function*, [6]. Uvođenjem ovih pojmova, induktivnosti svih namotaja u indukcionoj mašini su definisane jednim integralom koji se najčešće, zbog složenih, diskontinualnih tj. stepenastih oblika pomenutih funkcija, rešava numerički.

Model mnogostruko spregnutih kola kako je definisan u [5] je linearan model, u smislu da pretpostavlja magnetsko kolo beskonačno velike magnetske permeabilnosti. Drugim riječima, svi procesi u mašini se analiziraju u vazдушnom procjepu. U cilju dobijanja preciznijeg modela, u [7] je predložen način uzimanja u obzir iskošenja štapova rotora kao i linearnog rasta mms preko otvora žljeba statora i/ili rotora. Način uzimanja u obzir ožljebljenosti statora i rotora je predložen u [8]. Zasićenje glavnog puta kojim se zatvara magnetski fluks u mašini je inkorporiran u [9]. Istina, na vrlo složen način, kroz formiranje dvodimenzionih look-up tabela u koje su smještene induktivnosti pojedinih namotaja. U [10] je predložen jednostavniji način implementacije zasićenja u matematički model kaveznog indukcionog motora. Sve ove mjere se preduzimaju u cilju dobijanja što vjernijeg spektra ispravne mašine koji bi poslužio kao polazna tačka u analizi spektra defektne mašine. Međutim, još uvijek nije ostvareno modeliranje mašine istovremenim uzimanjem u obzir i promjenljive permeanse vazdušnog procjepa (kao posledice ožljebljenja statora i rotora) i zasićenja magnetskog kola.

Jedan od kvarova kod kaveznog indukcionog motora koji je najčešće ispitivan i analiziran, jeste lom štapa rotora. Mnogobrojne metode za detekciju ovog kvara su predložene u literaturi. Najpoznatiji pristup se bazira na monitoringu komponenti struje statora u okolini osnovne učestanosti, [11], [12]. Drugi pristupi su zasnovani na analizi harmonika u elektromagnetskom momentu mašine, njegovoj brzini, [13], aksijalnom fluksu, [14] ili aksijalnoj sili, [15]. Neke od metoda su zasnovane na analizi struja motora u

prelaznom procesu tokom zalijetanja motora, [16], ili čak tranzijentnih ems indukovanih u namotajima statora neposredno nakon isključenja motora sa mreže, [17].

Međutim, prvi pokušaj analize spektra struje statora zasićenog motora sa slomljenim štapom, je dat u [10]. U ovom radu je taj pristup proširen i dodatno potkrijepljen eksperimentalnim rezultatima.

2. MATEMATIČKI MODEL

Kompletan matematički model trofazne indukcione mašine sa kaveznom rotorom, dat je sledećim sistemom jednačina,

$$[U_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Psi_s]}{dt} \quad (1)$$

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Psi_r]}{dt} \quad (2)$$

$$[\Psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (3)$$

$$[\Psi_r] = [L_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \quad (4)$$

Mehanički dio sistema je opisan sledećim jednačinama,

$$T_{em} = \frac{1}{2} [I_r]^T \frac{\partial [L_{rr}]}{\partial \theta} [I_r] + [I_s]^T \frac{\partial [L_{sr}]}{\partial \theta} [I_r] \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_{em} - T_L) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (7)$$

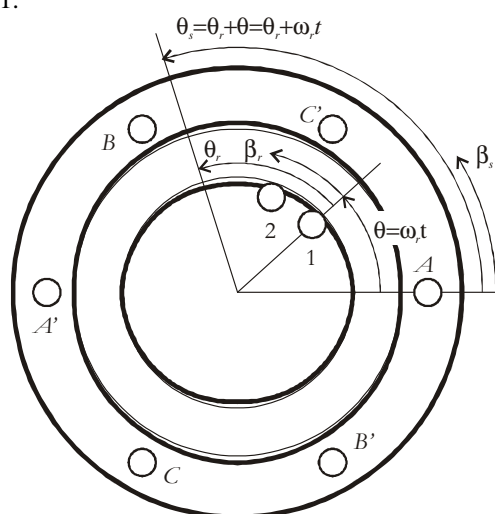
Prethodni sistem jednačina se rešava numeričkim putem za poznate parametre modela. Ključni parametri modela su matrice induktivnosti namotaja za čije je izračunavanje potrebno poznavati permeansu vazdušnog procjepa zasićene mašine.

2.1. PERMEANSA VAZDUŠNOG PROCJEPJA ZASIĆENE MAŠINE

Indukcioni motor je i u potpuno ispravnom stanju uvijek manje ili više zasićen. Iz ekonomskih razloga a to je na prvom mjestu što efikasnije korišćenje materijala, indukcioni motor se projektuje tako da je i pri nominalnom naponu djelimično zasićen. Ovo je činjenica koja se lako da provjeriti sa tzv. karakteristike praznog hoda indukcionog motora. Pri tom, zasićenje magnetskog kola motora može biti dvojako. Najčešći slučaj zasićenja jeste slučaj zasićenja glavnog puta kojim se zatvara glavni magnetski fluks u mašini. Radi

se o zasićenju zuba statora i rotora na onim mjestima na kojima je, u tom vremenskom trenutku, talas magnetskog fluksa maksimalan ili minimalan, svedjedno. Ova vrsta zasićenja se ogleda u zatupljenom obliku osnovnog talasa magnetske indukcije. Drugi karakterističan slučaj jeste slučaj zasićenja jarma magnetskog kola što rezultuje zašiljenim oblikom rezultantnog talasa magnetske indukcije u vazдушnom procjepu. Ovaj slučaj zasićenja se može javiti samo kod jako zasićenih mašina. Predmet ovog rada je zasićenje prvog tipa.

Kao posledica zasićenja zuba statora i rotora na onom mjestu po obimu mašine gdje se u tom trenutku nalazi minimalna ili maksimalna vrijednost talasa magnetske indukcije, može se smatrati da je na tom mjestu vazdušni procjep širi tj. da je permeansa vazdušnog procjepa manja, slika 1.



Slika 1. Virtuelna promjena širine vazdušnog procjepa kao posledica zasićenja glavnog puta magnetskog fluksa, $p=1$, $\beta_s=\pi/2$.

Kao posledica zasićenja, talasni oblik magnetske indukcije u vazдушnom procjepu je oblika zatupljene sinusoide, što se može modelirati uvođenjem trećeg harmonika talasa magnetske indukcije koji se sabira sa osnovnim. Kako se talas magnetske indukcije dobija množenjem talasa magnetomotorne sile i talasa permeanse, jasno je da funkcija permeanse vazdušnog procjepa zasićene indukcione mašine mora u sebi imati član dvostruko većeg broja polova u odnosu na talas mms. Sa druge strane, kako oba talasa magnetske indukcije, i osnovni i treći, treba da rotiraju istom brzinom i da pri tom ne mijenjaju međusobni položaj to znači da i učestanost ovog talasa treba da bude dvostruko veća od učestanosti talasa mms. Dalje, permeansa vazdušnog procjepa treba da bude manja ili jednaka permeansi vazdušnog procjepa nezasićene mašine. Sve nabrojane uslove zadovoljava sledeća funkcija, [18],

$$P(\theta_s, \beta_s) = \frac{1}{g_0} (1 - k_1 - k_1 \cos(2p\theta_s - 2\beta_s)) \quad (8)$$

gdje je g_0 geometrijska dužina vazdušnog procjepa, p je broj pari polova mašine, ugao θ_s je geometrijski (mehanički) ugao koji definiše položaj tačke po obimu statora a ugao β_s je električni ugao koji definiše položaj maksimalne vrijednosti magnetskog fluksa u koordinatnom sistemu vezanom za stator. Koeficijent k_1 je vezan za stepen zasićenja magnetskog kola i biće definisan u narednom pasusu.

Množenjem talasa permeanse (8) sa osnovnim talasom magnetomotorne sile trofaznog namotaja statora mašine sa p pari polova, $F(t, \theta_s) = F_{1\max} \cos(\omega t - p\theta_s)$, dobijaju se dva talasa magnetske indukcije: jedan osnovni i drugi talas sa tri puta većim brojem pari polova. Iz uslova da amplituda osnovnog talasa odgovara zasićenom stanju mašine koje je opisano faktorom zasićenja k_{zas} (odnos indukovane ems u nezasićenom i zasićenom stanju sa karakteristike praznog hoda mašine), za koeficijent k_1 se dobija:

$$k_1 = \frac{2}{3} \frac{1}{g_0} \frac{k_{zas} - 1}{k_{zas}} \quad (9)$$

2.2. IZRAČUNAVANJE INDUKTIVNOSTI

Primjenom definicije winding funkcije, međusobna induktivnost između ma koja dva namotaja u indukcionoj mašini se može odrediti rešavanjem sledećeg integrala,

$$L_{xy}(\theta_s, \beta) = \mu_0 r l \cdot \int_0^{2\pi} P(\theta_s, \beta) \cdot n_x(\theta_s) \cdot N_y(\theta_s, \beta) d\theta_s \quad (10)$$

gdje x i y mogu biti bilo koji fazni namotaj statora ili petlja rotora (petlju čine dva susjedna štapa rotora i pripadajući segmenti rotorovih prstena), r je srednji poluprečnik vazdušnog procjepa, l je dužina paketa statora, P je funkcija permeanse vazdušnog procjepa, n_x je turns funkcija namotaja x , N_y je winding funkcija namotaja y dok je θ_s ugao u koordinatnom sistemu vezanom za stator. Winding funkcija se određuje na sledeći način, [19],

$$N_y(\theta_s, \beta_s) = n_y(\theta_s) - \frac{\langle n_y(\theta_s) \cdot P(\theta_s, \beta_s) \rangle}{\langle P(\theta_s, \beta_s) \rangle} \quad (11)$$

pri čemu oznaka $\langle f \rangle$ označava srednju vrijednost funkcije f na intervalu $[0, 2\pi]$.

U slučaju da su namotaji na suprotnim stranama vazdušnog procjepa, treba voditi računa o transformaciji koordinata sa statora na rotor ili obratno,

$$\theta_s = \theta_r + \omega_r t = \theta_r + \frac{(1-s)}{p} \omega t \quad (12)$$

gdje je s klizanje. U slučaju kada je $x=y$, izraz (10) daje sopstvenu induktivnost namotaja.

U opštem slučaju, zbog složenosti oblika winding funkcija pojedinih namotaja, integral (10) se određuje numeričkim putem. U nekim slučajevima, pogotovo kada se radi o

induktivnostima petlji rotora koje imaju prilično jednostavan oblik, gornji integral je moguće riješiti i analitičkim putem, [10].

3. TALASI MAGNETSKE INDUKCIJE U VAZDUŠNOM PROCJEPU

Kako bi se rezultati dobijeni numeričkim modelom mogli tumačiti, neophodno je pri analizi različitih režima kvarova uposliti i analitički model koji može dati odgovor na pitanje zašto se u spektru struje statora na nekim učestanostima javljaju komponente struje. Najčešći pristup koji se koristi u ove svrhe je dobijanje različitih harmoničnih obrtnih talasa magnetske indukcije u vazdušnom procjepu množenjem talasa magnetomotorne sile i talasa permeanse vazdušnog procjepa. Režim loma štapa rotora se može posmatrati kao superpozicija dva različita stanja: ispravnog rotora u prvom slučaju i slučaja kada samo u jednom štapu rotora teče struja. U drugom stanju, kroz štap rotora teče struja osnovne učestanosti $f_{21}=sf_1$. Kao posledica ove struje, u motoru se javlja i inverzni talas mms sa strane rotora, koji u nezasićenom motoru, preko konstantne permeanse vazdušnog procjepa daje sledeći talas magnetske indukcije,

$$B(t, \theta_r) = \cos(s\omega t + p\theta_r) \quad (13)$$

koji se, posmatran sa strane statora, vidi kao,

$$B(t, \theta_s) = \cos((1-2s)\omega t - p\theta_s) \quad (14)$$

i koji, kako je osnovnog broja pari polova, u namotaju statora indukuje ems i struju na učestanosti $(1-2s)f_1$.

U slučaju zasićenog motora, isti, inverzni talas mms sa strane rotora, a kao posledica loma štapa rotora, djeluje preko permeanse vazdušnog procjepa koja više nije konstantne vrijednosti već je opisana sa (8). Sada, se dakle, u vazdušnom procjepu imaju sledeći talasi magnetske indukcije:

$$B(t, \theta_r) = \cos(3s\omega t - p\theta_r) \quad (15)$$

$$B(t, \theta_r) = \cos(s\omega t - 3p\theta_r) \quad (16)$$

Ovi se talasi sa strane statora vide kao:

$$B(t, \theta_s) = \cos((1+2s)\omega t - p\theta_s) \quad (17)$$

$$B(t, \theta_r) = \cos((3-2s)\omega t - 3p\theta_s) \quad (18)$$

Talas magnetske indukcije (17) ima osnovni broj pari polova pa će on u namotajima statora indukovati ems i struju na učestanosti $(1+2s)f_1$. Talas magnetske indukcije (18), imajući

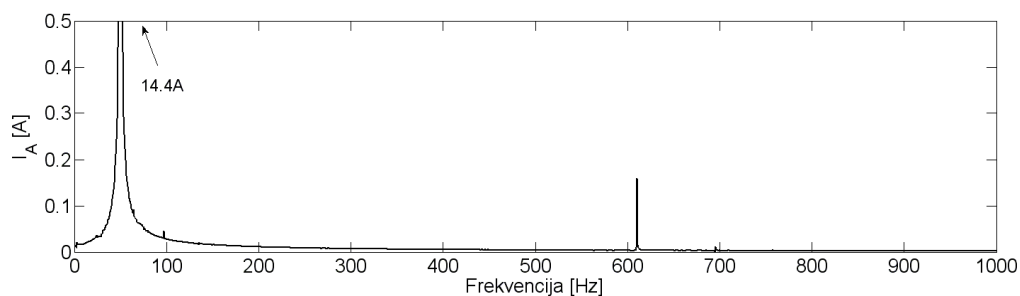
trostruko veći broj pari polova od osnovnog talasa, u simetričnom trofaznom motoru ne može indukovati ems i struju na učestanosti $(3-2s)f_1$.

Komponenta struje na učestanosti $(1+2s)f_1$ je pored dobro poznate komponente $(1-2s)f_1$ koja ima i svoje analitičko objašnjenje, dosad objašnjavana kao posledica efekta oscilacije brzine koja se javlja kod neispravnog kaveza rotora, [13]. Međutim, na način na koji je to pokazano, uzrok postojanja ove komponente u spektru struje statora može biti i zasićenje magnetskog kola motora.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

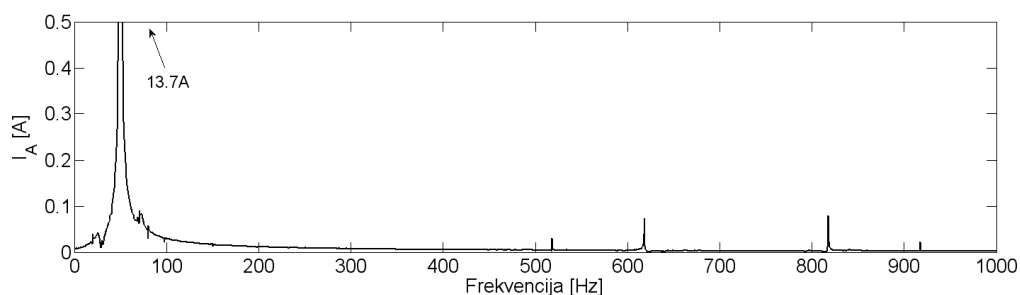
Opisani model je u cilju njegove provjere primijenjen na slučaj trofaznog kaveznog indukcionog motora sa slomljenim štapom. Podaci o motoru su dati u Dodatku. U literaturi je ovaj slučaj detaljno opisan ali isključivo za slučaj nezasićenog indukcionog motora. Pokazano je da se u tom slučaju, kao posledica kvara, javljaju spektralne komponente struje, prvenstveno na učestanostima $(1\pm 2s)f_1$, pri šemu je komponenta na učestanosti $(1+2s)f_1$ tumačena oscilovanjem brzine rotora kao posledice kvara, [13]. Preliminarni rezultati koji se tiču loma štapa u zasićenom motoru prikazani su u [10] ali nijesu potkrijepljeni eksperimentalnim rezultatima.

Slika 2. prikazuje spektar struje statora nezasićenog, ispravnog, opterećenog motora. Na slici je uočljivo postojanje samo jedne komponente struje statora na višim učestanostima i to na učestanosti 611.3Hz koja je poznata kao donji rotorov žljebni harmonik koji je dat sledećim analitičkim izrazom $f=(1-(R/p)(1-s))f_1$, gdje je R broj štapova rotora.



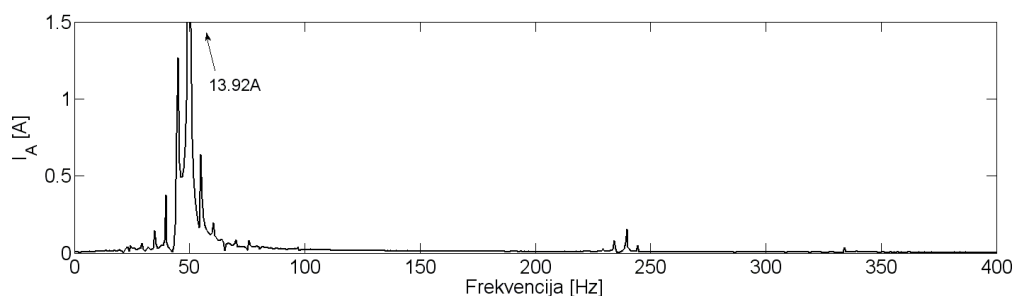
Slika 2. Spektar struje statora nezasićenog, ispravnog, opterećenog motora: $k_{zas}=1$, $s=5.53\%$

Slika 3. prikazuje spektar struje statora zasićenog, ispravnog, opterećenog motora. Kao posledica zasićenja magnetskog kola, javljaju se i dodatne dvije učestanosti u spektru. One su opisane sledećim izrazom, $f=(3\pm(R/p)(1-s))f_1$, [9]. Za klizanje $s=4.43\%$, $R=28$ i $p=2$ ove komponente su na učestanostima 518.3Hz, 618.3Hz i 818.3Hz. Komponenta struje na učestanosti 918.3Hz za sada nema analitičko objašnjenje.



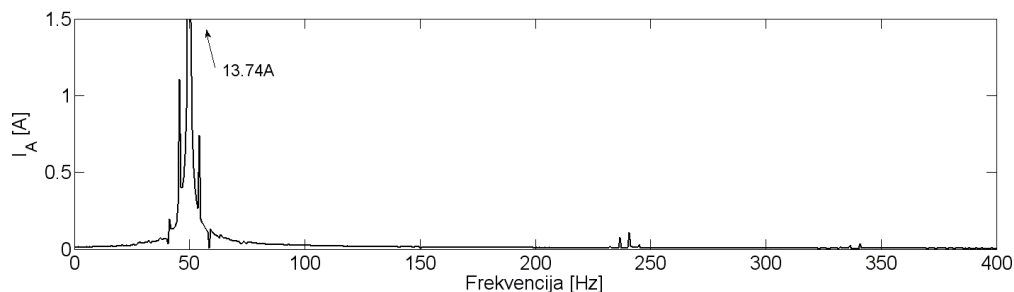
Slika 3. Spektar struje statora zasićenog, ispravnog, opterećenog motora: $k_{zas}=1.25$, $s=4.43\%$

Slika 4. prikazuje spektar struje statora nezasićenog, opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora. Najizraženije komponente struje statora kao posledica kvara se javljaju na dobro poznatim komponentama $(1\pm 2s)f_1$ a to su 45.12Hz i 54.88Hz. Njihove amplitude su 1.27A za donji i 0.64A za gornji harmonik. Amplituda osnovnog harmonika struje je 13.92A. Kako je u ovom slučaju razmatran nezasićen motor očigledno je da je pojava komponente struje na učestanosti $(1+2s)f_1$ posledica oscilacija brzine motora.



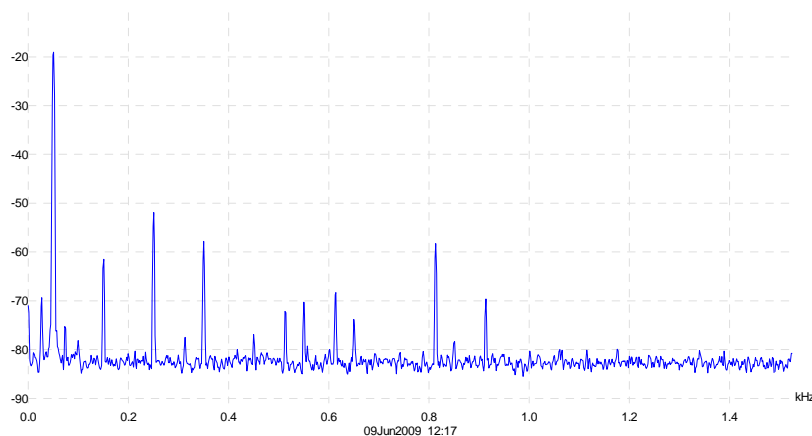
Slika 4. Spektar struje statora nezasićenog opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora: $k_{zas}=1$, $s=5.09\%$

Slika 5. prikazuje spektar struje statora zasićenog, opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora. Stepem zasićenja je opisan koeficijentom zasićenja $k_{zas}=1.25$. Komponente struje u okolini osnovnog harmonika se javljaju na učestanostima 45.74Hz i 54.27Hz sa amplitudama 1.1A i 0.75A, respektivno. Kako su oba numerička eksperimenta izvedena pri istom opterećenju i istom naponu, iz datih brojnih podataka se zaključuje da jedino komponenta struje na učestanosti $(1+2s)f_1$ raste kao posledica zasićenja. U nezasićenom motoru ova komponenta struje u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika struje iznosi 4.6%. Kod zasićenog motora je taj procenat 5.46% što je rast od skoro 20%.



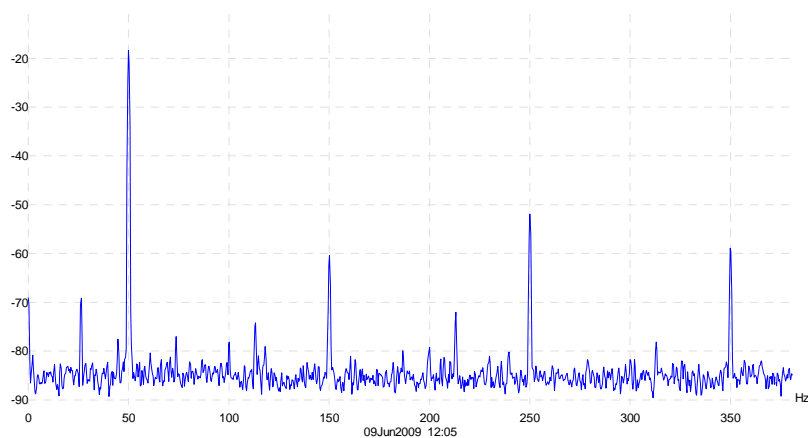
Slika 5. Spektar struje statora zasićenog opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora:
 $k_{zas}=1.25$, $s=4.36\%$

Slika 6. prikazuje spektar struje statora zasićenog ispravnog motora koji je dobijen eksperimentalno. Sa karakteristike praznog hoda je ustanovljeno da je u ovom radnom režimu koeficijent zasićenja $k_{zas}=1.25$. Pored komponenti struja na učestanostima 150Hz, 250Hz, 350Hz, 550Hz, 650Hz, 850Hz, čiji je uzrok, po današnjim saznanjima, nesimetrija napona napajanja kao i nesimetrija namotaja motora, jasno se uočavaju i komponente na učestanostima 513Hz, 613Hz i 813Hz koje su prediktovane numeričkim modelom, slika 3.



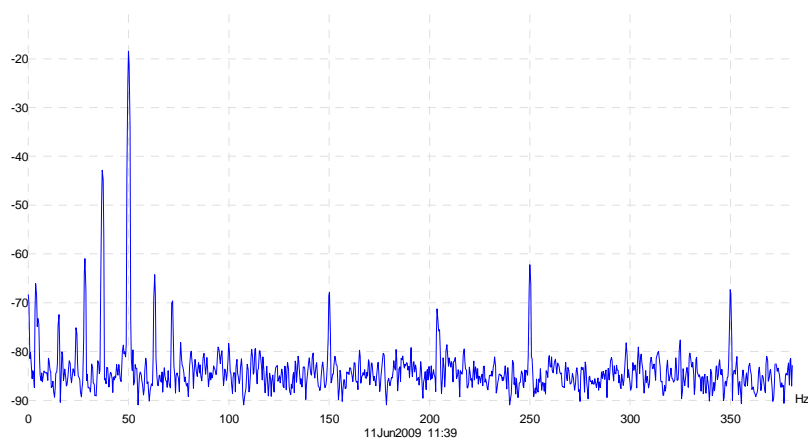
Slika 6. Eksperimentalno dobijeni spektar struje statora zasićenog, opterećenog, ispravnog motora: $U=380V$, $I=8.6A$, $k_{zas}=1.25$, $s=5.3\%$

Slika 7. prikazuje spektar struje statora motora u istom radnom režimu ali na užem opsegu učestanosti.



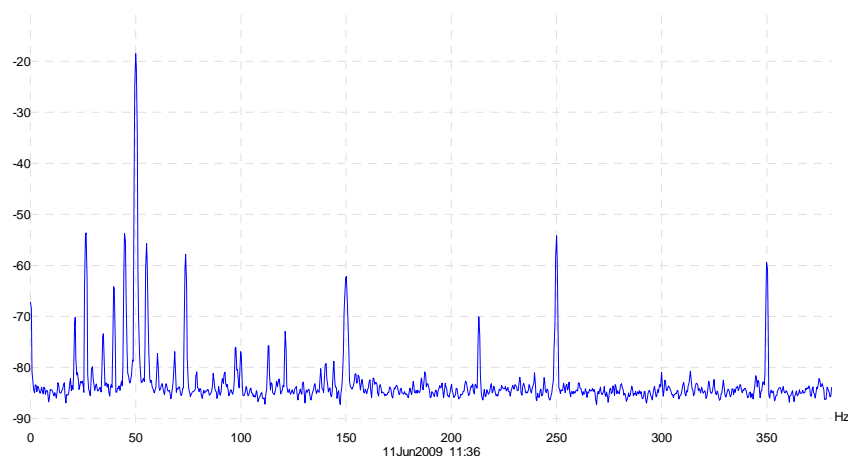
Slika 7. Eksperimentalno dobijeni spektar struje statora zasićenog, opterećenog, ispravnog motora: $U=380V$, $I=8.6A$, $k_{zas}=1.25$, $s=5.3\%$

Slika 8. prikazuje spektar struje statora zasićenog opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora dobijen eksperimentalno, pri sniženom naponu pri kom je motor nezasićen, $k_{zas}=1$. Na slici se jasno uočava postojanje komponenti struje statora na učestanostima 36.78Hz i 63.22Hz.



Slika 8. Eksperimentalno dobijeni spektar struje statora nezasićenog, opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora: $U=200V$, $I=8.6A$, $k_{zas}=1$, $s=13.22\%$

Slika 9. prikazuje spektar struje statora zasićenog opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora dobijen eksperimentalno, pri punom naponu. Sa karakteristike praznog hoda je ustanovljeno da je u ovom radnom režimu koeficijent zasićenja $k_{zas}=1.25$. Na slici se jasno uočava postojanje komponenti struje statora na učestanostima 44.79Hz i 55.17Hz ali i ostalih komponenti u okolini osnovne učestanosti.



Slika 9. Eksperimentalno dobijeni spektar struje statora zasićenog, opterećenog motora sa slomljenim štapom rotora: $U=380V$, $I=8.6A$, $k_{zas}=1.25$, $s=5.21\%$

Poređenjem rezultata sa slike 8 i 9 uočava se značajan rast komponente struje na učestanosti $(1+2s)f_1$ pri nepromijenjenoj amplitudi osnovnog harmonika struje. Taj rast iznosi oko 250%. Pri tom je amplituda komponente struje na učestanosti $(1-2s)f_1$ u zasićenom motoru svega 25% od njene amplitude u nezasićenom motoru.

5. ZAKLJUČAK

U radu je opisan način implementacije zasićenja glavnog puta magnetskog fluksa u indukcionom motoru u model mnogostrukog spregnutih kola. Dobijeni model je provjeren primjenom na slučaj simulacije loma štapa rotora kaveznog indukcionog motora i analize spektra struje statora motora u tom radnom režimu. Analitičkim postupkom se došlo do zaključka da se komponenta struje statora koja se u slučaju loma štapa rotora javlja na učestanosti $(1+2s)f_1$ može objasniti ne samo oscilacijama brzine motora već i zasićenjem magnetskog kola motora. Rezultati dobijeni iz numeričkog modela i posebno eksperimentalno dobijeni rezultati ukazuju na to da ova komponenta struje značajno raste sa rastom stepena zasićenja motora sa slomljenim štapom kaveza rotora.

DODATAK

Parametri motora i podaci sa natpisne pločice:

$P_n=4kW$, Y , $U_n=380V$, $I_n=8.6A$, $n_n=1435$ obr/min, $\cos\varphi=0.83$, $\eta=0.85$, $50Hz$, $p=2$,
 $J=0.0113$ kgm^2 , $R_{s(faze)}=1.3\Omega$, $R_{štapa}=200\mu\Omega$, $R_{segmenta_prstena}=10\mu\Omega$, $L_{štapa}=10nH$,
 $L_{segmenta_prstena}=2nH$

Dimenzije motora i konstrukcioni podaci:

$l=0.14m$, $r=0.05m$, $S=36$ žljebova na statoru, $R=28$ štapova rotora, $w=15$ navojaka u navojnoj grupi, $g_0=0.8mm$, $\gamma=\pi/18$ ugao iskošenja štapova rotora.

Šema namotaja faze A ispod jednog para polova:
 $A_1-1-9'-2-10'-3-11'-20-12'-19-11'-18-10'-X_1$

LITERATURA

- [1] S.Nandy, H.A. Toliyat, X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.20, No.4, pp.719–729, 2005.
- [2] M.E.H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.47, No.5, pp.984–993, 2000.
- [3] S. Rajagopalan, J.A. Restrepo, J.M. Aller, T.G. Habetler, R.G. Harley, "Nonstationary motor fault detection using recent quadratic time-frequency representations", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.44, No.3, pp.735–744, 2008.
- [4] J. Faiz, B.M. Ebrahimi, B. Akin, H.A. Toliyat, "Finite-element transient analysis of induction motors under mixed eccentricity fault", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.44, No.1, pp.66–74, 2008.
- [5] X. Luo, Y. Liao, H.A. Toliyat, A. El-Antalby, T.A. Lipo "Multiple coupled circuit modeling of induction machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31, No.2, pp.311–318, 1995.
- [6] N.L. Schmitz, D.W. Novotny, *Introductory electromechanics*, New York, Ronald, 1965.
- [7] G.M. Joksimović, M. Đurović, A. Obradović, "Skew and linear rise of MMF across slot modeling", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.14, No.3, pp.315–320, 1999.
- [8] S. Nandy, "Modeling of induction machines including stator and rotor slot effects", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.40, No.4, pp.1058–1065, 2004.
- [9] S. Nandy, "A detailed model of induction machines with saturation extendable for fault analysis", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.40, No.5, pp.1302–1309, 2004.
- [10] G. Joksimović, "Broken rotor bar detection in saturated induction machine", *IEMDC 2009*, pp. 1379–1383, 2009.
- [11] N. M. Elkasagby, A. R. Eastham, G. E. Dawson, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 22, pp. 165–171, Jan./Feb. 1992.
- [12] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, pp. 241–247, June 1995.
- [13] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas, "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, pp. 98–108, Jan./Feb. 1998.
- [14] P. J. Tavner, J. Penman, *Condition monitoring of electrical machines*, Letchworth, UK.: Research Studies Press, 1987.
- [15] G.H. Müller, C.F. Landy, "A novel method to detect broken rotor bars in squirrel cage induction motors when interbar currents are present", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Volume 18, No. 1, pp. 71–79, March 2003.

- [16] F. Briz, M.W. Degner, P. Garcia, D. Bragado “Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 44, No. 3, pp. 760–768, May/June 2008.
- [17] J. Milimonfared, H.M. Kelk, S. Nandi, A.D. Minassians, H.A. Toliyat, “A novel approach for broken rotor bar detection in cage induction motors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 35, Issue 5, pp. 1000 – 1006, September/October 1999.
- [18] J.C. Moreira, T.A. Lipo, “Modeling of saturated AC machines including air gap flux harmonic components”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.28, pp.343-349, 1992.
- [19] J. Faiz, I. Tabatabaei, “Extension of winding function theory for nonuniform air gap in electric machinery,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, No.6, pp. 3654-3657, November 2002.