

DIJAGNOSTIKA KVAROVA ASIHRONIH MOTORA NA OSNOVU ANALIZE SPEKTRA STATORSKIH STRUJA

FAULT DIAGNOSIS OF ASYNCHRONOUS MOTOR USING THE MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS-MCSA

Haris Polutan
Arcelormittal Zenica, Zenica B&H

Mustafa Imamović
University of Zenica, Zenica B&H

REZIME

Analiza spektra statorskih struja danas važi za najpopularniju metodu za detekciju kvarova, zato što se ovom metodom uspješno mogu razotkriti ustaljeni kvarovi kao što su kratki spojevi među zavojima, napukli ili slomljeni štapovi rotora, potrošenost ležajeva, ekscentričnost rotora u odnosu na stator itd. U radu su objašnjeni ustaljeni kvarovi na asinhronim motorima, načela analize spektra statorskih struja i primjena ove analize na monitoring i procjenu stanja asinhronih motora. Kao dodatak prikazana je analiza slučaja dijagnosticiranja kvara asinhronog motora gdje analiza spektra statorskih struja u velikoj mjeri može razotkriti nenormalna radna stanja asinhronih motora.

Ključne riječi: Analiza spektra, kvarovi na motorima, statorske struje, puknuće štapa, monitoring stanja, ekscentričnost

ABSTRACT

The Motor Current Signature Analysis (MCSA) today is one of the most popular fault detection method. With this method common machine faults as turn to turn short circuits, cracked or broken rotor bars, bearing weariness, air gap eccentricity and others can be detected. In this paper common machine faults are mentioned, fundamentals of motor current Signature Analysis method and application of MCSA method for condition monitoring and prediction for induction motor. In addition, the case study of induction motor fault diagnosis, where MCSA can be effectively used, were shown.

Keywords: Spectrum analysis, machine failure, stator currents, broken bar, condition monitoring, eccentricity

1. UVOD

Asinhroni (indukcioni) motori su najčešće korištena vrsta električnih motora. Oni se koriste za različite svrhe u industriji, zanatstvu i transportnim sistemima (pumpe, kompresori, mlinovi, mješalice, liftovi, električna vozila, kranovi, žičare), [1]. Postaju pokretačka snaga i igraju značajnu ulogu kod pretvaranja električne u mehaničku energiju, važni za proizvodnju i sigurnost ljudi i opreme [2]. Postoje mnoge tehnike i mnogi već komercijalni alati za monitoring indukcionih motora s ciljem obezbjeđenja najvišeg nivoa pouzdanosti tokom eksploatacije. Uprkos razvijenim tehnikama i alatima, mnoge kompanije se suočavaju sa iznenadnim kvarovima i skraćenim životnim vijekom motora. Istraživanja na polju indukcionih motora i njihovog ponašanja usljed nepravilnog rada i neprirodnog stanja je veliki izazov za sve one koji

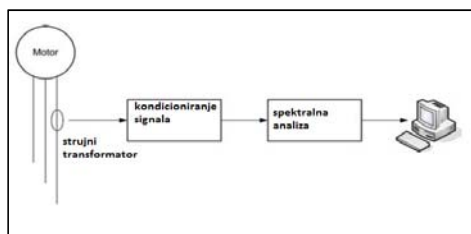
se bave istraživanjem električnih motora. Najznačajnije greške na električnim motorima su: statičke i/ili dinamičke neregularnosti zračnog raspora, polomljeni štapovi rotora ili napuknuća na prstenovima za kratko spajanje, pogrešne veze statorskih namotaja, greške u statoru povezane sa prekidom ili kratkim spojem jednog ili više statorskih namotaja, iskrivljenost osovine koja može dovesti do struganja rotora od stator i na taj način do ozbiljnih oštećenja jezgre statora i namotaja, kvarovi povezani sa ležajevima i reduktorima.

Posljednjih godina značajni naporu u istraživanju su uloženi na tehnike za monitoring i dijagnostiku električnih motora, a najznačajnije su: analize vremenske i frekventne domene, analiza vremenske domene elektromagnetnog momenta i fazora fluksa, mjerenje temperature, infracrveno raspoznavanje, radio signal, analiza spektra statorskih struja, detekcija prostornim vektorom, monitoring vibracija, ultrazvučna mjerenja, harmonijske analize momenta i brzine motora, metode zasnovane na vještačkoj inteligenciji i neuralnim mrežama. A od svih nabrojanih metoda, metoda koja bazira na analizi spektra struja statora motora je najbolji izbor. To je metoda koja je nedestruktivna i bazira na analizi statorskog namotaja. Ova metoda nije uplivisana utjecajem tipa tereta i drugim nesimetrijama.

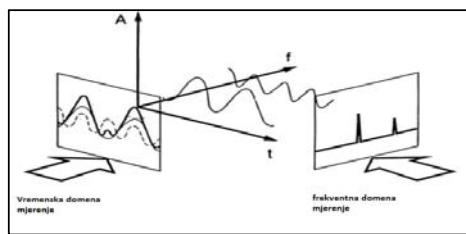
2. SPEKTRALNA ANALIZA STATORSKIH STRUJA KAO DIJAGNOSTIČKA METODA ZA PROCJENU STANJA ASINHRONOG MOTORA

Analiza spektra statorskih struja motora (eng. Motor Current Signature Analysis - MCSA) je tehnika za monitoring stanja koja se koristi za dijagnostiku problema indukcionih motora, generatora, energetskih transformatora i drugih električnih uređaja. [1,2]. Koncept je počeo ranih 70-tih i prvu primjenu je našao u nuklearnim elektranama za ispitivanje motora koji su u nepristupačnim hazardnim sredinama, [1]. Danas rapidno nalazi svoju primjenu u svim industrijama. Testovi se provode bez prekida rada, bez prekida proizvodnje i dok je motor pod opterećenjem, pri normalnim radnim uslovima, [1,2]. MCSA se može koristiti kao alat za predektivno održavanje, da se detektuju greške i prepoznaju ustaljeni kvarovi motora u ranoj fazi i da se izbjegnu katastrofalni kvarovi, značajni zastoji u proizvodnji i da se produži životna dob motora. Može se koristiti kao dijagnostički alat i dobar dodatak analizi vibracija i termoviziji, [2].

Razlozi za ubrzani razvoj ove metode su višestruki. Kao prvo, mjerenje struje ne zahtijeva postavljanje nikakvih dodatnih uređaja, sonda ili mjernih članova, što osjetno poskupljuje provedbu ostalih metoda. Za mjerenje struje koriste se strujni transformatori, najčešće u izvedbi strujnih klijesta. Principijelna shema spektralne analize statorske struje prikazana je na slici 1.



Slika 1. Sistem za monitoring statorskih struja



Slika 2. Odnos između vremenske, frekventne domene i amplitude

Cijela metoda bazira na promjenama u zračnom raspору stator-rotor što se reflektuje na spektar struje motora na način da fluks u zračnom raspору utječe na elektromagnetnu silu. Provedeći nad ovom strujom brzu Furieovu transformaciju dobije se aplikacija zgodna za prediktivno održavanje. Brza Furieova transformacija je matematička operacija koja uzima informaciju o frekvenciji iz vremenskog domena i transformiše u frekventni domen. Frekventni domen je graf

amplitude signala na datoj frekvenciji. U ovom frekventnom domenu, visina vrha predstavlja amplitudu signala. Na slici 2 su dati odnosi vremenske domene (t), frekventne domene (f) i amplitude (A).

Druga je prednost dijagnostike spektralnom analizom činjenica da se u spektru struje javljaju promjene u slučaju niza grešaka, pa se iz jednog mjerenja može donijeti sud o stanju različitih dijelova motora. Naime, svako kvarno stanje predstavlja određenu nesimetriju, koja u zračnim rasporu mijenja oblik magnetskog polja. Svaka takva promjena u statorskom namotu inducira napone koji u odnosu na napon mreže imaju određen frekvencijski pomak. Nažalost, upravo činjenica da sva kvarna stanja asinkronog motora ostavljaju trag na spektru statorske struje, čini donošenje suda o tačnoj prirodi kvara složenom i zahtijeva povećani oprez. Naime postoji mogućnost da se nepravilnosti spektra nastale istrošenim ležajevima na primjer, pogrešno interpretiraju kao nesimetrije rotorskog kaveza.

Uzorkovani signal struje se vodi u namjenski uređaj radi spektralne analize. U idealnom slučaju struja motora bi trebala biti sinusoidalnog oblika. Ali u stvarnosti u struji su prisutni značajni viši harmonici. Kvarovi u dijelovima motora se odražavaju na magnetno polje motora i time se samoindukcija i međuindukcija mijenjaju, a to se odražava na spektru struje motora, a to su frekvencije bočnih harmonika. Na bazi amplitude frekvencija bočnih harmonika procjenjuje se ozbiljnost kvara. Također, ovdje se može dati opaska da poremećaj od kvarnog motora se može prenijeti na susjedni, ugroziti njegov rad i stvarati značajnu buku.

3. KVAROVI KOJI SE MOGU DETEKTOVATI SA MCSA

Najznačajniji kvarovi su kvarovi ležajeva, kvarovi statora, kvarovi rotora i ekscentričnost ili kombinacija navedenih. Statistika pokazuje da, oko 40% kvarova otpada na kvarove ležajeva, 30-40% otpada na kvarove statora, 10% na kvarove rotora, dok ostatak od 10% otpada na ostale kvarove, [1,2]. Frekvencija koja se pojavljuje sa svakim kvarom zavisi od nazivnih karakteristika motora (sinhrona brzina, klizanje, obrtna brzina) i od radnih uslova, [2]. Svako kvarno stanje predstavlja određenu nesimetriju, koja u zračnim rasporu mijenja oblik magnetskog polja. Svaka takva promjena u statorskom namotu inducira napone koji u odnosu na napon mreže imaju određen frekvencijski pomak. Glavne vrste kvarova koji se mogu dijagnosticirati sa MCSA su:

3.1. Ekscentričnost zračnog raspora

Ekscentricitet zračnog raspora može se pojaviti uslijed nekoliko razloga: središte rotora ne poklapa se sa osi rotacije, svinuta osovin, ekscentrični provrt statora, os rotora i os statora se ne poklapaju, istrošeni ležajevi, osovin ili rotorski paket nisu potpuno cilindrični itd.

U slučajevima kada postoji ekscentricitet zračnog raspora magnetske sile mogu izazvati velike probleme. Naime, na strani na kojoj je zračni raspor manji, manji je magnetski otpor te su sile kojima stator privlači rotor veće, što uzrokuje daljnje smanjenje zračnog raspora. Ukoliko se ovaj proces nastavi može doći do zapinjanja rotora o statorski paket. Ovi problemi rješavaju se konstrukcijom motora, ograničavanjem dozvoljenog ekscentriciteta ili učvršćenjem osovine. Osim ovih problema postojanje ekscentriciteta izaziva vibracije i buku.

Najpouzdanija, i danas najčešće korištena metoda otkrivanja postojanja ekscentriciteta u pogonu (on-line) je spektralna analiza statorske struje.

Razlikuju se dva osnovna tipa ekscentriciteta: statički i dinamički. U slučaju statičkog ekscentriciteta, mjesto smanjenog ili povećanog zračnog raspora ne giba se sa rotacijom motora. Takav tip ekscentriciteta javlja se npr. u slučaju nepravilnog provrta statora ili netačno ugrađenog rotora u stator. Skica nastanka statičkog ekscentriciteta prikazana je na slici 3. Nivo statičkog ekscentriciteta se, ako je rotor čvrsto učvršćen, ne mijenja tokom rada, i stoga je manje opasan od dinamičkog ekscentriciteta. Zbog postojanja nesimetrije zračnog raspora ovaj tip ekscentriciteta stvara dodatne komponente u spektru statorske struje. U slučaju dinamičkog

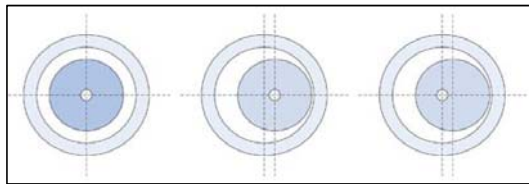
ekscentriciteta mjesto izmijenjenog zračnog raspora slijedi rotaciju motora. Dinamički se ekscentricitet javlja u slučajevima kada os rotacije nije u osi rotora, loših ležajeva, necilindričnog rotora, mehaničke rezonancije na kritičnim brzinama itd. Dinamički je ekscentricitet opasan, budući da mu se vrijednost mijenja tokom rada i u nekim slučajevima može dovesti do struganja rotora o paket statora.

Postojanje ekscentriciteta zračnog raspora, u frekvencijskom spektru statorske struje, stvara dodatne komponente [2], koje su date izrazom:

$$f_{eksc} = f_1 \left[(k \cdot N_R \pm n_d) \frac{1-s}{p} \pm n_{vh} \right] \quad \dots(1)$$

gdje su:

- | | |
|---|--|
| f_1 - frekvencija napona mreže | s - klizanje |
| k - bilo koji cijeli broj | p - broj pari polova |
| N_R - broj rotorskih utora | n_{vh} - red višeg harmonika (1,3,5,7,...) |
| n_d - stepen ekscentriteta (0 za statički i 1 za dinamički) | |



Slika 3. Koncentričnost, statička ekscentričnost i dinamička ekscentričnost

3.2. Puknuti štapovi rotora

Kada je statorski namot trofaznog asinkronog motora napajan trofaznim simetričnim naponom, u zračnom se rasporu motora stvara okretno polje, koje rotira sinhronom brzinom u odnosu na stator [1]. U slučaju kada je motor simetričan ne postoji inverzna komponenta okretnog polja. Statorsko okretno polje u rotorskom namotu inducira napon, čija je frekvencija ovisna o brzini vrtnje rotora, odnosno o klizanju i određena je izrazom:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad \dots(2)$$

gdje su: s - klizanje i f_1 - frekvencija mrežnog napona.

Kao posljedica induciranog napona, rotorskim namotom poteku struje, koje stvaraju rotorsko okretno polje. Ono, u odnosu na rotor, rotira brzinom $n_s \cdot s$. U slučaju kada je rotorski namot (kavez) simetričan u rotorskom okretnom polju postoji samo direktna komponenta. Ukoliko se u rotorskom kavezu pojavi nesimetrija iz bilo kojeg razloga, zbog pucanja jednog štapa na primjer, u okretnom polju rotora pojavljuje se i inverzna komponenta. Inverzna komponenta rotira brzinom klizanja u odnosu na rotor, ali u suprotnom smjeru. Kao rezultat ovog protjecanja u statorskom se namotu inducira napon i struja na frekvenciji:

$$f_{bh} = f_1(1 - 2s) \quad \dots(3)$$

Ovakve oscilacije struje su nepoželjne za mrežu. Dodatne komponente struje, na frekvenciji dvostrukog klizanja, uzrokuju ujedno i pulsiranje momenta dvostrukom frekvencijom klizanja ($2sf_1$), što se odražava i na brzini. Oscilacije brzine djelimično smanjuju amplitude

komponente na frekvenciji $f_1(1 - 2s)$, ali se zbog njih pojavljuje dodatna komponenta na frekvenciji $f_1(1 + 2s)$. Viši harmonik dodatno pojačan trećim vremenskim harmonikom toka. Oba harmonika ovise i o tromosti motora. Prema tome slomljeni rotorski štapovi stvaraju dodatne harmonike na frekvencijama datim izrazom:

$$f_{bh} = f_1(1 \pm 2s) \quad \dots(4)$$

Promatranjem veličine dodatnih harmonika moguće je otkriti kvarove rotorskog kaveza u najranijoj fazi. U stvarnosti se dodatne komponente javljaju i na višim harmonicima osnovnih bočnih harmonika, pa izraz poprima oblik:

$$f_{bh} = f_1(1 \pm 2ks) \quad \dots(5)$$

Iznos bočnih harmonika osim što ovisi o stepenu kvara rotora ovisi o još nekoliko faktora koje je potrebno uzeti u obzir prilikom dijagnostike. To su:

- Izvedba rotorskog kaveza – na rezultate spektralne analize mogu utjecati na primjer različite izvedbe rotorskog kaveza, različito izvedeni spojevi štapova ili prstena,
- Snaga motora – iznosi bočnih harmonika, za isti nivo kvara mogu se razlikovati ovisno o veličini motora,
- Iznos tereta – spektar struje znatno se mijenja ovisno o veličini terete (na primjer vremenski promjenjivi tereti) može se u spektru struje izazvati pomak harmonika,
- Mehaničke komponente uzrokovane prijenosnim mehanizmom – prijenosni mehanizam u spektru struje često stvara dodatne harmonike.

Zbog svih ovih razloga, analizu spektra struje treba provoditi oprezno. Dodatni se problem pojavljuju u slučajevima motora kod kojih rotorski štapovi nisu izolirani od rotorskog paketa. U tim slučajevima, posebno kada je kontakt između štapova i paketa dobar, javljaju se struje među štapovima (kroz željezo rotora). Pojava tih struja može analizu učiniti nepouzdanom. Iz tih se razloga preporučuje, kada je moguće, a posebno kod manjih motora, dijagnostiku provjeriti nekom dodatnom metodom, na primjer analizom spektra brzine vrtnje. U nekim specifičnim slučajevima (npr. drobilice) mogu se pojaviti bočni harmonici koji se mogu zamijeniti sa harmonicima koji nastaju usljed slomljenih štapova.

U spektru struje asinhronog motora sa oštećenim štapovima mogu se pojaviti i frekvencije date sa:

$$f_{bh} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1 - s) \pm s \right] f_1 \quad \dots(6)$$

gdje su: f_1 je frekvencija napona mreže, k je bilo koji cijeli broj, s je klizanje i p je broj pari polova.

Frekvencije date izrazom 5 mogu se uočiti i u spektru napona induciranog u svitku na vanjskoj strani motora. Iznos bočnih harmonika ovisi o stepenu oštećenja rotorskog kaveza. Naime, u slučaju kada je oštećeno više štapova, bočni će harmonici biti veći. Omjer vrijednosti bočnog i osnovnog harmonika u ovisnosti o broju puknutih štapova dat je izrazom:

$$A_s = \frac{\sin \alpha}{2p(2\pi - \alpha)} \quad \dots(7)$$

gdje su:

$$\alpha = \frac{2\pi n_p p}{N_2}$$

A_s - omjer vrijednosti bočnog i osnovnog harmonika;

n_p - broj puknutih štapova

N_2 - broj štapova kaveza

p - broj pari polova

U stvarnim uslovima, odnos je mali, pa se pregledniji uvid ima uloliko se spektar prebaci u logaritamski prikaz, u kojem su vrijednosti prikazane u dB.

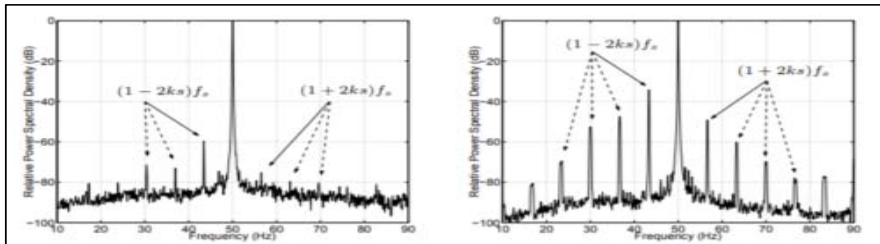
Izraz za prebacivanje u logaritamski domen je:

$$A = 20 \cdot \log A_s \quad \dots(8)$$

Ako se u izraz (6) uvrste vrijednosti harmonika u dB i vrijednosti α , dobiva se izraz pomoću kojega se može procijeniti broj puknutih štapova, zavisno o vrijednosti bošnih harmonika u dB, a to je:

$$n_p = \frac{2N_2}{10^{\frac{A}{20} + 2p}} \quad \dots(9)$$

Vrijednosti bočnih harmonika se mijenjaju sa opterećenjem, oni su niži za manja opterećenja. Da bi se donio ispravan sud o stanju štapova neohoda je imati opterećen motor više od 50%.



Slika 4. Frekvencijski spektar sa neoštećenim i sa oštećenim rotorskim štapovima, [2]

3.3. Oštećenje ležajeva

Oštećenje ležajeva motora mnogo je teže detektovati nego li probleme sa kavezom rotora. Sa MCSA metodom mogu se detektovati oštećenja ležajeva na način da se promatra frekvencija. Vibracije, uzrokovane problemima sa ležajevima, odražavaju se na spektru struje na frekvencijama datim izrazom:

$$f_{lež} = |f_1 \pm m \cdot f_v| \quad \dots(10)$$

gdje su:

$f_{lež}$ - frekvencija harmonika nastalih zbog kvara ležaja;

f_1 - frekvencija mreže;

m - 1,2,3,...,

f_v - karakteristična frekvencija vibracije zbog kvara ležaja;

3.4. Kratkospojeni zavoji u statorskim namotajima

Većina kvarova statora povezana je sa statorskim namotajima. Kratkospojeni zavoji dovode do značajnog zagrijavanja namotaja i do debalansa struje. MCSA koristi činjenicu da obrtno polje dovodi do induciranja odgovarajućih komponenti u statorskom namotaju. Komponente struje motora koje su uplvisane samo kratkospojenim zavojima mogu se detektovati na frekvencijama datim izrazom:

$$f_{st} = f_g \left[\frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right] \quad \dots(11)$$

gdje su: f_{st} - frekvencija komponente povezana sa kratkospojenim zavojem, f_g - frekvencija mrežnog napona i $n = 1, 2, 3, \dots$

3.5. Efekt opterećenja

Motori su električne mašine koje električnu energiju, preuzetu iz električne mreže, pretvaraju u mehaničku energiju. Proizvedena mehanička energija se predaje, preko pokretnog dijela motora (rotor) različitim vrstama radnih mašina koje mehaničku energiju prilagođavaju za različite potrebe. Moment opterećenja može se mijenjati sa pozicijom rotora. Ove promjene dovode do promjena u statorskoj struji. U takvim slučajevima struja sadrži harmonične komponente povezane sa promjenom opterećenja. Promejna momenta opterećenja sa umnoškom rotacione brzine stvara struje frekvencije prema formuli:

$$f_{load} = f_s \pm m f_r = f_s \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{s} \right) \right] \quad \dots(12)$$

gdje su:

f_s - frekvencija električne mreže
 f_r - frekvencija rotora

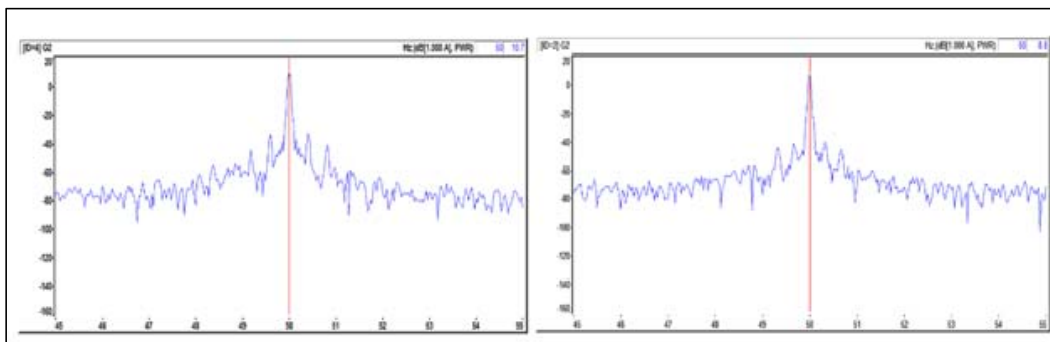
p - broj pari polova
 s - klizanje
 m - 1, 2, 3, ...

4. ANALIZA SLUČAJA

Nakon izvršenog vibrodijagnostičkog ispitivanja motora ekstraktora broj 2, nazivnih podataka 1250 kW, 6 kV, 1490 o/min, bila je indikacija da postoji puknuće štapova rotora, te je provedeno snimanje i analiza spektra statorskih struja, radi potvrde ove tvrdnje. Vremenski zapisi signala struje i prateći zumirani spektri (oko 50 Hz mrežne frekvencije su prikazani na donjim slikama).

Na osnovu snimljenih zumiranih spektara izmjerene su relativne visine bočnih pojaseva na rastojanju dvostruke frekvencije klizanja u odnosu na mrežnu frekvenciju i one iznose za fazi A 45 dB i za fazu C 42 dB, na fazi B nije vršeno mjerenje, jer na toj fazi nije ugrađen strujni transformator. Po iskustvenim preporukama i preporukama IEEE, snimljene vrijednosti ukazuju na mogućnost postojanja jednog ili više loših štapova odnosno kratkospojnih prstenova na rotoru.

Nakon što je motor zaustavljen, rastavljen i nakon što je provedeno ispitivanje penetrantima, potvrđeno je oštećenje više štapova.



Slika 5. frekventni spektar struje oko mrežne frekvencije za fazu A i C

5. ZAKLJUČAK

Električni motori, gdje su u velikoj mjeri zastupljeni asinhroni motori, su pokretačka snaga u savremenim industrijama. Otkazi asinhronih motora dovode do zastoja u proizvodnji i mogu uzrokovati velike gubitke, značajne troškove održavanja i kao posljedica svega toga dovesti do negativnog poslovanja. Pravovremena detekcija sitnih grešaka igra veoma važnu ulogu u prevazilaženju gore pomenutih posljedica. Sve nenormalosti koje nastanu u motoru odražavaju se na valni oblik veličina i na zastupljenost pojedinih harmonika struje i napona. MCSA se može primjeniti svugdje u industriji gdje se koriste asinhroni motori. Provođi se na nedestruktivna način, u radu motora (čak i sa udaljenog mjesta), a metoda počiva na analizi struje motora detektujući greške motora, dok je još motor u radu i neometajući njegov rad. Korisna je za detekciju i lokalizaciju različitih vrsta kvarova i prema tome je veoma značajna u programu preventivnog i prediktivnog održavanja asinhronih motora.

6. LITERATURA

- [1] Dubravko Miljković: Brief review of Motor current signature analysis,
- [2] Alan Miletić: Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu stanja asinhronih motora, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002,
- [3] Šemsudin Mašić: Električni strojevi, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 2006.