

OTKRIVANJE MEĐUZAVOJNIH KRATKIH SPOJEVA NAMOTA ROTACIJSKIH STROJEVA ANALIZOM MAGNETSKOG POLJA U ZRAČNOM RASPORU

Ante Elez¹, Stjepan Car¹, Krešimir Meštrović², Stjepan Tvorčić¹

¹KONČAR - Institut za elektrotehniku,

²Tehničko veleučilište u Zagrebu

Sažetak

U ovom radu su na osnovu matematičkih MKE modela i mjerenja na stvarnom stroju analizirani međuzavojni kratki spojevi armaturnog i uzbudnog namota sinkronog stroja. Analizom magnetskog polja u zračnom rasporu doneseni su zaključci o stanju stroja. Sensorima za mjerenje magnetske indukcije (Hall sonda) smještenima u zračni raspor, tj. na zub statora i polnu papuču snimana je raspodjela magnetske indukcije. Proračuni na modelima vršeni su za normalno i kvarno stanje stroja pri praznom hodu te opterećenju. Provedena su mjerenja na stvarnom stroju za ista radna stanja, kako bi se potvrdili rezultati proračuna te donijeli zaključci na osnovu kojih je moguće pravovremeno utvrditi međuzavojni kratki spoj. Odabrana mjesta promatranja magnetske indukcije korištena su da bi se pravovremeno i pouzdano detektirao kvar. Na osnovu dobivenih rezultata numeričkog proračuna i mjerenja pokazano je da je za pouzdanu detekciju kratkog spoja između zavoja armaturnog namota potrebno raspodjelu magnetske indukcije promatrati Hall sondom smještenom na polnoj papuči rotora (s rotorske strane). Nasuprot tome, za pouzdanu detekciju međuzavojnog kratkog spoja uzbudnog namota, raspodjelu magnetske indukcije potrebno je promatrati Hall sondom smještenom na zub statora (sa statorske strane). Rezultati su također pokazali da za pouzdanu detekciju kvarova nije dovoljno samo promatrati promjene u amplitudi promatranog valnog oblika, nego je potrebno provesti i frekvencijsku analizu valnog oblika te pratiti promjene u amplitudi karakterističnih harmonika.

Ključne riječi: MKE, sinkroni generator, magnetska indukcija, zračni raspor, Hall senzor, detekcija kvara.

Abstract

This paper explains inter-turn short circuits of the armature and field winding of synchronous machine based on mathematical FEM models and measurements on the real machine. Conclusions about the state of the machine have been drawn based on the magnetic field analysis in the air gap. By sensors (Hall probe) embedded in the air gap, i.e. on the stator tooth and pole shoe, magnetic field distribution has been monitored. Calculations have been performed on the models for normal and faulty machine condition at idling and load. Measurements on the real machine for the same operating conditions have been performed, in order to confirm the calculation results and draw conclusions for detection of inter-turn short circuit in the early stage. The selected places of the monitoring magnetic field distribution were used to detect a fault early and reliably. Based on the numerical calculations and measured results it is shown that for the reliable detection of the inter-turn short circuit in the armature winding, it is required to observe the magnetic field distribution by Hall sensor embedded on the rotor pole pedal (from the rotor side). In contrast, for the reliable detection of the inter-turn short circuit in the field winding, the magnetic field distribution should be observed by Hall sensor embedded on the stator tooth (from the stator side). The obtained results also show that for the reliable faults detection it is not enough to observe only changes in the amplitude of the monitored waveform. It is also necessary to perform frequency waveform analysis and monitor changes in the amplitude of the characteristic harmonics.

1. UVOD

Otkrivanje kvarova rotacijskih strojeva danas ima značajnu ulogu u području proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije te privlači pažnju brojnih inženjera i znanstvenika. Brojne ideje i metode za detekciju kvarova [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] ugrađene su u veliki broj monitoring sustava čime je podignuta vrijednost sustava. Osnovni koncept svih monitoring sustava je prikupljanje i obrada podataka dobivenih od strane senzora koji su ugrađeni na sam stroj. Međutim, razina razvoja monitoring sustava, ekspertno znanje ugrađeno u njega te primjena različitih metoda određuje mogućnosti i vrijednost monitoring sustava. Osnovni koncept tradicionalnih monitoring sustava je procjena vrijednosti mjerenih signala dobivenih od senzora kao prihvatljivih ili neprihvatljivih za siguran rad stroja. Mjereni podaci se kontinuirano ili periodički uspoređuju s unaprijed određenim granicama koje su preuzete iz određenih standarda (ukoliko postoji) ili su određene na temelju dugogodišnjeg iskustva osoblja zaduženog za nadzor i održavanje strojeva ili na temelju inicijalnog stanja koje je uzeto kao referentno. Značajna promjena jedne ili više mjerenih veličina, uspoređena s unaprijed određenom vrijednošću upućuje na promjenu stanja stroja koje zahtijeva zahvat za povratak vrijednosti u početno stanje. Gledano sa strane otkrivanja kvarova na stroju, ovaj koncept ne predstavlja najbolje rješenje. Razlog je taj što se u početku pojave kvara mjerena veličina koja predstavlja srednju veličinu svih elemenata koji utječu na nju neće znatno promijeniti. Stoga parametri poput vršne ili efektivne vrijednosti nisu primjenjivi za ranu detekciju kvarova. Međutim, ako se obradom signala može izdvojiti samo dio iz mjerenog signala, promatrana vrijednost koja bi upućivala na prisutnost kvara značajno će se promijeniti pri pojavi kvara. Na ovaj način, kvar može biti otkriven s većom točnošću znatno ranije te daljnja oštećenja izazvana radom stroja uz prisutan kvar mogu biti smanjena. Ovo predstavlja napredni koncept monitoring sustava koji omogućuje znatno raniju detekciju kvarova na stroju. Danas svi monitoring i zaštitni sustavi koriste digitalne procesore koji kroz programiranje dopuštaju definiranje kompleksnih kriterija za određivanje prisutnosti kvara na stroju. Odabir mjerenja,

metode detekcije i procedure obrade mjerenog signala za otkrivanje kvara predstavljaju ekspertno znanje. Današnji trendovi pokazuju da se broj osoblja odgovornog za nadzor i održavanje strojeva te analizu mjerenih podataka konstantno smanjuje. Stoga je naglasak stavljen na ekspertne monitoring sustave koji će zamijeniti dugogodišnje znanje i iskustvo te omogućiti pravovremeno otkrivanje kvarova. Danas se pored detekcije kvarova od monitoring sustava zahtijeva i dijagnostika kvara koja mora omogućiti utvrđivanje uzroka i mjesto kvara. U monitoring sustave ugrađene su brojne metode za otkrivanje kvarova kako bi se ostvarili ovi ciljevi. Brojna istraživanja su pokazala kako se mjerenjem magnetskog polja u i izvan stroja mogu otkriti različiti kvarovi, poput međuzavojnog kratkog spoja, prekida štapa i prstena kaveznog rotora te ekscentriciteta [1, 12, 13, 14, 15]. U ovom članku primijenjen je upravo taj pristup, gdje se zaključci o stanju stroja donose na osnovu mjerenja i analize izmjenjenog i izračunatog magnetskoga polja u zračnom rasporu stroja. U prvom dijelu istraživanja korišteni su matematički MKE modeli za proračun magnetskog polja stroja i detekciju kvarova, a u drugom dijelu provedena su mjerenja na stvarnom stroju. Analiziran je međuzavojni kratki spoj koji se pojavljuje na statorskom i rotorskom namotu, a odabrano mjesto promatranja stanja stroja je zračni raspor u koji su ugrađeni senzori za mjerenje magnetske indukcije (Hall sonde).

2. MKE ANALIZA STANJA STROJA

Prilikom projektiranja stroja i određivanja dozvoljenih granica opterećenja važno je poznavati elektromagnetske prilike u stroju. Za proračun strojeva, danas se koriste moćni softverski paketi temeljeni na metodi konačnih elemenata (MKE). Takvi matematički modeli stoga mogu dati detaljan uvid u elektromagnetske prilike stroja za različita pogonska stanja, kako za simetrična tako i za nesimetrična. U normalnom pogonskom stanju, u rotacijskom stroju prisutno je simetrično magnetsko polje te se prilikom pojave kvara javlja nesimetrija u stroju. Cilj rada je pokazati da je upravo zračni raspor ključno mjesto za monitoring magnetskog polja i glavni izvor informacija o stanju stroja te mjesto gdje je moguće pouzdano otkriti prisutnost kvarova,

kao što je međuzavojni kratki spoj armaturnog i uzbudnog namota.

Analiza međuzavojnih kratkih spojeva na namotima stroja provedena je na modelu četveropolnog sinkronoga generatora s istaknutim polovima, čiji su nazivni podaci prikazani u tablici 1. U tablici 2 prikazani su provedeni simulacijski proračuni na navedenome generatoru.

Tablica 1. Nazivni podaci stroja

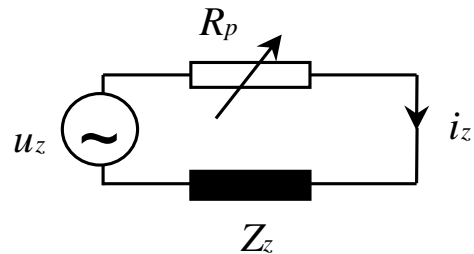
SGBP 160 M-4M			
U [V]	I [A]	n [1/min]	S [kVA]
400	23	1500	16
$\cos\varphi$	u [V]	i [A]	f [Hz]
0,8	24	24,4	50
$2p$	pogon	zagrijavanje	
4	SI	100/100 °C	

Tablica 2. Provedeni simulacijski proračuni

Br	Opis modela	Bez prisutnosti kvara			Uzbudna Smanjena	Pogonsko stanje
		Kvar na uzbudnom namotu	Kvar na armaturnom namotu	Nazivna		
1		•		•	Prazni hod	
2		•		•		
3	10% smanjen broj zavoja		•	•		
4	10% smanjen broj zavoja		•	•		
5	5% smanjen broj zavoja		•	•		
6	5 smanjen broj zavoja		•	•		
7	2,5% smanjen broj zavoja		•	•		
8	2,5% smanjen broj zavoja		•	•		
9	14 kratko spojenih zavoja			•		
10	10 kratko spojenih zavoja			•		
11	5 kratko spojenih zavoja			•		
12	1 kratko spojen zavoj			•		
13	10% smanjen broj zavoja	•		•	Nazivno opterećenje	
14	5% smanjen broj zavoja	•		•		
15	2,5% smanjen broj zavoja	•		•		
16	14 kratko spojenih zavoja		•	•		
17	10 kratko spojenih zavoja		•	•		
18	5 kratko spojenih zavoja		•	•		
19	1 kratko spojen zavoj		•	•		

Ukoliko je međuzavojni kratki spoj prisutan u faznom namotu, struja će teći kroz kratkospojeni zavoj. U tom slučaju, struja stvara vlastito magnetsko polje koje se protivi promijeni magnetskog polja uzbuđe. Struja u kratkospojenom zavoju i_z ovisi o impedanciji tog zavoja Z_z , naponu koji se inducira u tom zavoju u_z te prijelaznom otporu mjesta kratkog spoja R_p . Impedancija zavoja može se izračunati iz tehničkih podataka stroja koji se analizira. Napon koji se inducira u zavoju ovisi o uzbudnom protjecanju i brzini vrtnje rotora. Efektivna vrijednost struje koja teče kroz kratkospojeni zavoj može biti značajno veća nego iznos struje u armaturnom namotu kada

je stroj pod nazivnim opterećenjem. Kako bi se spriječila oštećenja armaturnog namota, potrebno je stroj isključiti te otkloniti nastali kvar (međuzavojni kratki spoj). Slika 1 prikazuje nadomjesnu shemu kratkospojenog zavoja generatora u praznom hodu.



Slika 1. Nadomjesna shema kratkospojenog zavoja generatora u praznom hodu

Najjednostavniji način analize međuzavojnih kratkih spojeva je ukoliko se promotri protjecanje u zračnom rasporu, što je prikazano na slici 2 za analizirani stroj s koncentriranim uzbudnim namotom. Međuzavojni kratki spoj ΔN zavoja uzbudnog namota, promatran je kao dodatni uzbudni svitak koji ima ΔN zavoja omotanih oko pola broj 4. Protjecanje dodatnog svitka prikazano je na slici 2 i označeno je crvenom bojom. Nadalje, njegovo protjecanje raspodijeljeno je po cijelom obodu zračnog raspora te za njega vrijede sljedeće relacije:

$$\theta_{d1} \cdot \tau_p = \theta_{d2} \cdot 3 \cdot \tau_p \quad (2.1.)$$

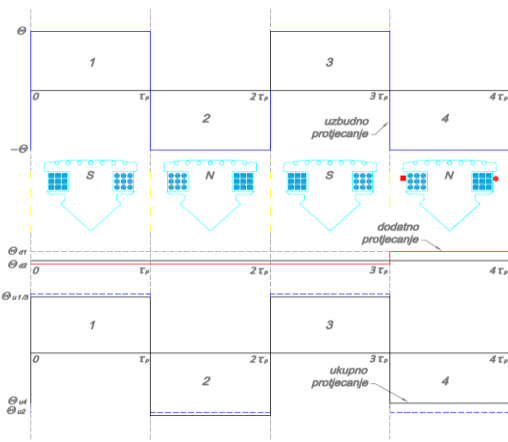
$$\theta_{d1} = 3 \cdot \theta_{d2} \quad (2.2.)$$

$$\theta_{d1} + \theta_{d2} = \theta \cdot \Delta N \quad (2.3.)$$

Ukupno protjecanje u zračnom rasporu stroja u praznom hodu pri smanjenom iznosu broja zavoja jednog pola, rezultat je zbroja uzbudnog protjecanja i dodatnog protjecanja. Slika 2 prikazuje ukupno protjecanje, iz kojeg se može uočiti da smanjenje broja zavoja na jednom polu utječe na protjecanje svih polova na sljedeći način: protjecanje pola broj 1 i pola broj 3, odnosno θ_{u1} i θ_{u3} , smanjiti će se za iznos θ_{d2} ; protjecanje pola broj 2, odnosno θ_{u2} , povećati će se za iznos θ_{d2} ; dok protjecanje pola broj 4, odnosno θ_{u4} , smanjiti će se za iznos θ_{d1} . Iz relacija (2.1), (2.2) i (2.3) slijede iznosi za protjecanje θ_{d1} , odnosno θ_{d2} :

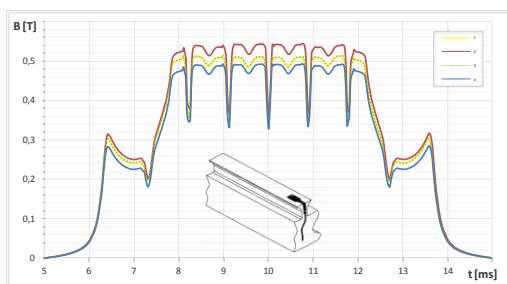
$$\theta_{d1} = \frac{3}{4} (\theta \cdot \Delta N) \quad (2.4.)$$

$$\theta_{d2} = \frac{1}{4} (\theta \cdot \Delta N) \quad (2.5.)$$



Slika 2. Protjecanje u zračnom rasporu stroja u praznom hodu pri smanjenom broju zavoja uzbuđnog svitka: krivulja 1 – uzbuđno protjecanje; krivulja 2 – dodatno protjecanje; krivulja 3 – ukupno protjecanje.

Prema relacijama (2.4) i (2.5), vrijedi da se smanjenjem broja zavoja jednog od polova za 10 % (u ovom specijalnom slučaju pol broj 4), protjecanje pola broj 1 i pola broj 3 smanji za 2.5 %, protjecanje pola broj 2 poraste za 2.5 %, dok se protjecanje pola broj 4 smanji za 7.5 %. Za provjeru gore navedenih tvrdnji, izračunat je valni oblik magnetske indukcije u zračnom rasporu pod svim polovima, pri smanjenom iznosu broja zavoja pola. Rezultati izračuna magnetske indukcije pod svakim polom međusobno su uspoređeni, a načinjena je i usporedba s podacima izračuna magnetske indukcije bez prisutnog smanjenja broja zavoja pola. Na slici 3 prikazana je raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku za sva četiri pola za prazni hod i smanjenu uzbuđnu struju. Prikazana raspodjela magnetske indukcije promatrana je sa statorskog zuba Hall sondom te izračunata u slučaju kada je za 10 % smanjen broj zavoja uzbuđnog namota na jednom polu.



Slika 3. Raspodjela magnetske indukcije na polnom koraku, promatrana sa zuba statorskog paketa za prazni hod:

Krivulja 1 – za pol broj 1, Krivulja 2 – za pol broj 2, Krivulja 3 – za pol broj 3, Krivulja 4 – za pol broj 4.

Tablica 3 prikazuje srednje vrijednosti magnetske indukcije sa slike 3, na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom. Također su prikazane i relativne vrijednosti istih u odnosu na vrijednost magnetske indukcije pod polom broj 4.

Tablica 3. Srednje vrijednosti magnetske indukcije na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporom, pri 10% smanjenom iznosu broja zavoja pola broj 4.

Pol	B_{SR} [T]	B_{SR}/B_{SR4}	ΔB_{SR} [%]
1	0,508	0,950	- 2,5
2	0,535	1,000	+ 2,5
3	0,508	0,950	- 2,5
4	0,482	0,900	- 7,5

Pored smanjenja od 10%, raspodjela magnetske indukcije izračunata je za slučaj smanjenja broja zavoja za 5% i 2.5%, pri sniženoj struji uzbuđne te za nazivnu vrijednost. Na osnovu rezultata izračuna, može se zaključiti da odnos promjene broja zavoja omotanih oko pola i promjene iznosa magnetske indukcije pod polom uzrokovane promjenom broja zavoja ovisi o uzbuđnoj struji. Naime, ovisnost između njih je određena nagibom krivulje praznog hoda u točki promatranja. Navedena ovisnost bit će u skladu s relacijama (2.4) i (2.5), sve dok je magnetski krug stroja nezasićen. Kako magnetski krug stroja postaje zasićen, promjena iznosa magnetske indukcije uslijed promjene broja zavoja na polu postaje sve manje izražena. Stoga se za svaki stroj sa $2p$ polova, za promjenu magnetske indukcije pod polom uzrokovane promjenom broja zavoja ΔN pola n , može pisati:

$$\Delta B_{SRn} = -\frac{2p-1}{2p} \cdot \Delta N \cdot k_{ph} \quad (2.6)$$

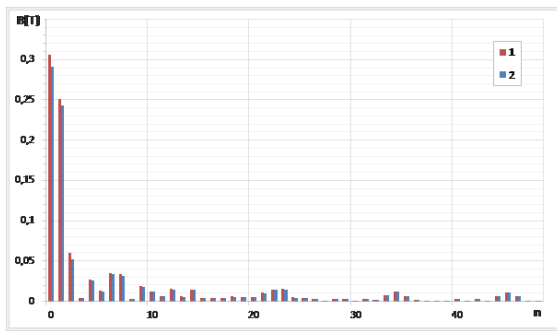
$$\Delta B_{SR(n\pm i)} = -\frac{1}{2p} \cdot \Delta N \cdot k_{ph} \quad (2.7)$$

$$\Delta B_{SR(n\pm j)} = +\frac{1}{2p} \cdot \Delta N \cdot k_{ph} \quad (2.8)$$

gdje je: $i = 1, 3, 5 \dots p$, $j = 2, 4 \dots p-1$, k_{ph} faktor koji je određen nagibom krivulje praznog hoda u točki promatranja magnetske indukcije. Za nezasićeni magnetski krug stroja

$k_{ph} = 1$, a kako magnetski krug stroja postaje zasićen faktor k_{ph} poprima vrijednosti manje od 1.

Utvrđivanje prisutnosti smanjenog broja zavoja (međuzavojnih kratkih spojeva) na nekom od polova nije pouzdana ukoliko je provedena samo na osnovu detekcije promjene amplitude valnog oblika u vremenskom području. Stoga je za donošenje odgovarajućih zaključaka potrebno provesti i frekvencijsku analizu valnog oblika. Na osnovu promjena u frekvencijskom sastavu analiziranog valnog oblika može se nedvojbeno utvrditi je li broj zavoja uzbuđenog namota smanjen, tj. jesu li međuzavojni kratki spojevi prisutni u uzbuđenom namotu. Slika 4 prikazuje frekvencijski sastav raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku pola broj 4 i pola broj 2, koji su prikazani na slici 3.



Slika 4. Frekvencijski sastav raspodjele magnetske indukcije na polnom koraku: 1 – za pol broj 2; 2 – za pol broj 4.

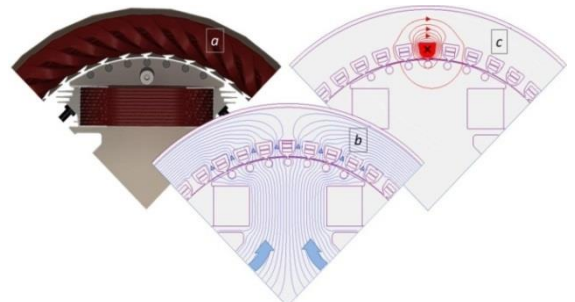
Podaci prikazani na slici 4 ukazuju da se promjena broja zavoja pola ne odražava jednako na sve izražene harmoničke članove. Na osnovu rezultata izračuna utvrđeno je da različiti iznosi uzbuđene struje i različito smanjenje broja zavoja na polu različito utječe na promjenu amplitude pojedinih izraženih harmonika te nije u skladu s danim odnosima, tj. nije ih moguće predvidjeti. Stoga je potrebno izdvojiti samo one harmoničke članove kod kojih je promjena amplitude uzrokovana promjenom iznosa broja zavoja pola, u skladu s ranije donesenim zaključcima te samo njih koristiti kao indikatore prisutnosti smanjenja broja zavoja uzbuđenog svitka. Za analizirani generator, odabrani pokazatelji prisutnosti broja zavoja na polu su nulti, prvi i drugi harmonički član, kao i harmonički članovi uzrokovani prigušnim namotom i

njegovim višim harmonicima. Promjena amplituda odabranih harmoničkih članova zbog smanjenja broja zavoja na polu prikazana je u tablici 4.

Tablica 4. Prikaz promjene amplitude odabranih harmoničkih članova zbog smanjenja broja zavoja na polu za 10 %.

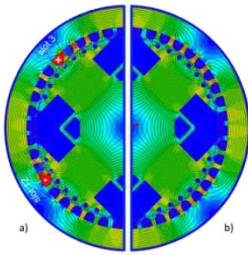
Harmonički član	Promjena u amplitudi ΔA [%]	Harmonički član	Promjena u amplitudi ΔA [%]
0	-10,3	7	-11,3
1	-9,9	12	-10,1
2	-11,1	14	-11,9
6	-10,1		

Analiza međuzavojnog kratkog spoja armaturnog namota također je provedena na istom generatoru. Slika 5 redom prikazuje: segment generatora (označeno brojem 1), magnetsko polje u praznom hodu (označeno brojem 2), magnetsko polje nastalo uslijed međuzavojnog kratkog spoja armaturnog namota u praznom hodu (označeno brojem 3).



Slika 5. Prikaz: 1 - segment analiziranog generatora, 2 - magnetsko polje u generatoru tijekom praznog hoda, 3 – magnetsko polje nastalo uslijed međuzavojnog kratkog spoja armaturnog namota tijekom praznog hoda

Slika 6 prikazuje magnetsko polje u generatoru tijekom praznog hoda bez i uz prisutnost kvara, odnosno međuzavojnog kratkog spoja armaturnog namota. Svitak s kratko spojenim zavojem označen je crvenom bojom.

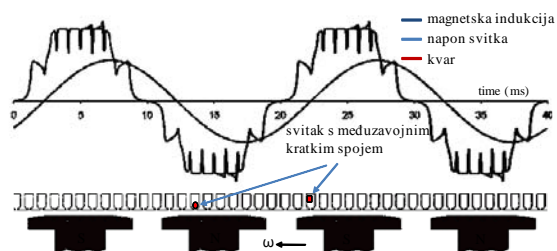


Slika 6. Magnetsko polje u generatoru prilikom praznog hoda:

a - uz prisutnost međuzavojnog kratkog spoja u armaturnom svitku,

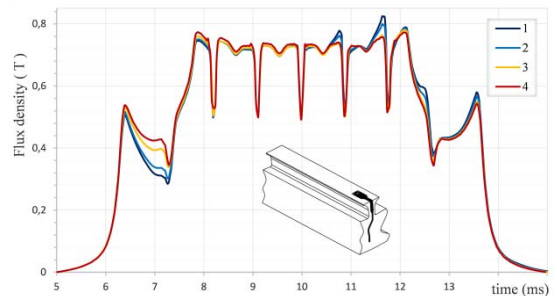
b - bez prisutnosti međuzavojnog kratkog spoja u armaturnom svitku.

Jedna strana svitka s kratko spojenim zavojem smještena je u utor broj 3, dok je druga strana smještena u utor broj 12. Slika 6 prikazuje da je gustoća silnica magnetskog polja veća u zubima smještenima desno od utora broj 3 i to tamo gdje je smještena jedna strana svitka s kratko spojenim zavojem, nego što je gustoća magnetskih silnica u zubima smještenima lijevo od istog utora. Jednaka pojava prisutna je u utoru broj 12, gdje je smještena druga strana svitka s međuzavojnim kratkim spojem. Razlog tome je što magnetsko polje kratko spojenog zavoja i magnetsko polje uzbuđenog namota, u zubu s desne strane utora broj 3 i 12, imaju isti smjer i potpomažu se, dok u zubu s lijeve strane utora broj 3 i 12 imaju suprotni smjer i međusobno se oduzimaju. Koliki će biti intenzitet poremećaja magnetskog polja u stroju uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem ovisi o iznosu struje i_z te o broju zavoja koji sudjeluju u kratkom spoju. Ovaj efekt moguće je uočiti na realnom stroju, ukoliko se kontinuirano promatra raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu. Na slici 7 prikazano je kako pojava međuzavojnog kratkog spoja utječe na raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu, promatranu sa zuba statora.



Slika 7. Utjecaj međuzavojnog kratkog spoja na raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu promatranu sa zuba statora

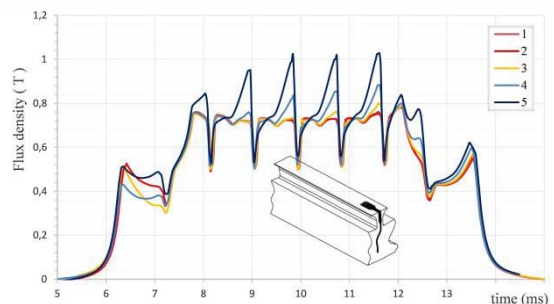
Raspodjela magnetske indukcije izračunata je uz 14, 10 i 1 kratko spojeni zavoj te bez kratko spojenih zavoja svitka armaturnog namota, a rezultati izračuna prikazani su na slici 8.



Slika 8. Raspodjela magnetske indukcije promatrana sa zuba statorskog paketa u generator za prazni hod:

Krivulja 1 – 14 kratko spojenih zavoja; Krivulja 2 – 10 kratko spojenih zavoja; Krivulja 3 – 1 kratko spojeni zavoj; Krivulja 4 – bez prisutnih međuzavojnih kratkih spojeva.

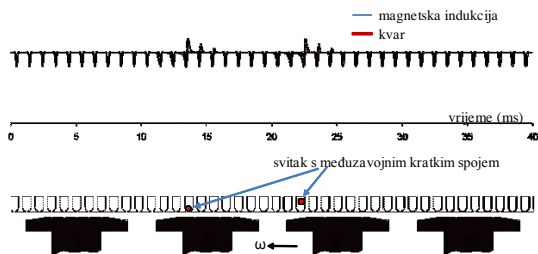
Udaljenost između mjesta promatranja magnetske indukcije i utora s kratkospojenim svitkom značajno utječe na detekciju kratkospojenog zavoja. Što je mjesto promatranja magnetske indukcije bliže utoru s kratkospojenim svitkom, intenzitet poremećaja bit će veći, što je i prikazano na slici 9.



Slika 9. Raspodjela magnetske indukcije promatrana sa zuba statorskog paketa, uz prisutne kratke spojeve 10 zavoja svitka namota armature generatora u praznom hodu: Krivulja 1 – mjesto promatranja udaljeno 4.5 utorskih koraka; Krivulja 2 – mjesto promatranja udaljeno 3.5 utorskih koraka; Krivulja 3 – mjesto promatranja udaljeno 2.5 utorskih koraka; Krivulja 4 – mjesto promatranja udaljeno 1.5 utorskih koraka; Krivulja 5 - mjesto promatranja udaljeno 0.5 utorskih koraka.

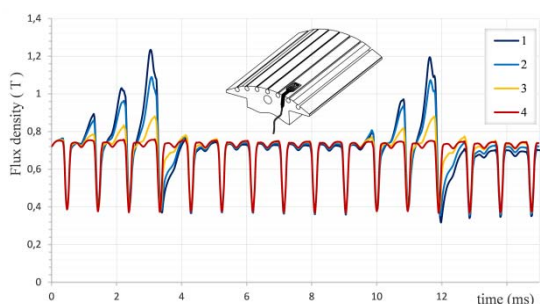
Ukoliko je udaljenost između točke promatranja magnetske indukcije i utora u kojem se nalazi kratkospojeni zavoj veća od polnog koraka, poremećaj magnetskog polja u zračnom rasporu uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem neće utjecati na raspodjelu magnetske indukcije u točki promatranja. Iz

navedenoga slijedi da, ukoliko se analizirani poremećaj želi otkriti, raspodjela magnetske indukcije trebala bi biti promatrana simultano i to na $2p$ mjestima koja su jednoliko raspodijeljena po zračnom rasporu. Budući da udaljenost točke promatranja magnetske indukcije i utora u koji je smješten vodič s kratkospojenim zavojima, značajno utječe na izraženost poremećaja, najpraktičnije mjesto promatranja poremećaja uzrokovanog međuzavojnim kratkim spojem armaturnog namota je polna papuča rotora. Slika 10 prikazuje utjecaj međuzavojnog kratkog spoja na raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu generatora, promatranu s polne papuče rotora.



Slika 10. Utjecaj međuzavojnog kratkog spoja na raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče rotora generatora.

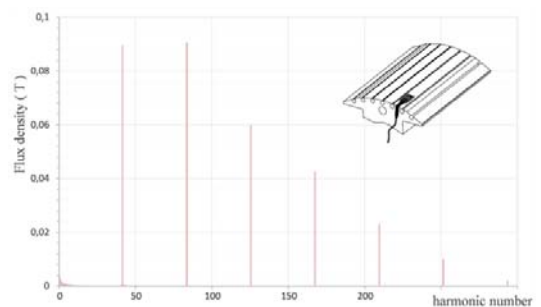
Raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče rotora, izračunata je uz 14, 10 i 1 kratko spojeni zavoj te bez kratkospojenih zavoja armaturnog namota i prikazana je na slici 11.



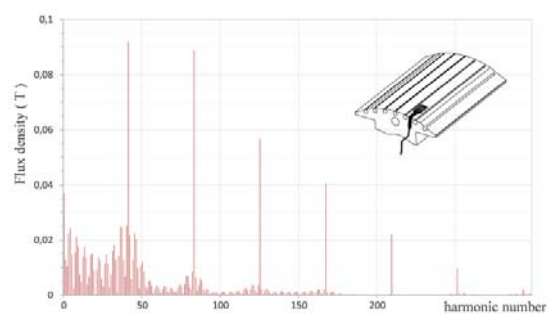
Slika 11. Raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče u generatoru za prazni hod: Krivulja 1- 14 kratkospojenih zavoja; Krivulja 2 – 10 kratkospojenih zavoja; Krivulja 3 – 1 kratkospojen zavoj; Krivulja 4 – bez kratkospojenih zavoja.

Određivanje prisutnosti međuzavojnih kratkih spojeva armaturnog namota na temelju promjene u valnom obliku magnetske

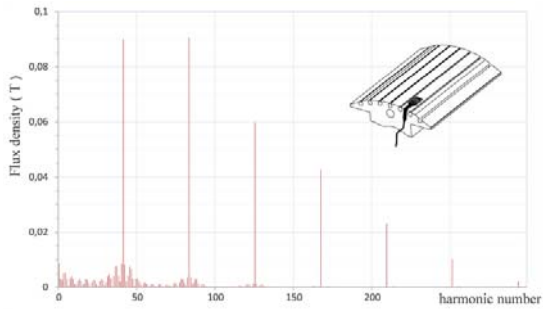
indukcije u vremenskoj domeni nije preporučljiva metoda. Razlog za to je složenost algoritma za prepoznavanje kvarova za različita pogonska opterećenja. Detekcija promjena u određenim amplitudama harmonika analiziranog valnog oblika u frekvencijskoj domeni ne samo da daje bolje rezultate, nego je i metoda detekcije značajno pouzdanija. Stoga, kako bi se izveli odgovarajući zaključci o prisutnosti međuzavojnih kratkih spojeva armaturnog namota generatora, provedena je kontinuirana frekvencijska analiza valnog oblika magnetske indukcije u zračnom rasporu. Na osnovu promjena u harmonijskom sastavu analiziranog valnoga oblika, nedvojbeno se može utvrditi jesu li u svicima armaturnog namota prisutni međuzavojni kratki spojevi. Na slikama 12, 13 i 14 prikazane su frekvencijske analize raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrane s polne papuče, uz prisutne kratke spojeve 14 i 5 zavoja svitka namota armature i bez prisutnosti istih. Prikazane frekvencijske analize računane su za vremenski period kojem odgovara jedan puni okret rotora.



Slika 12. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče generatora u praznom hodu, bez prisutnosti kratkih spojeva zavoja svitka namota armature.



Slika 13. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče generatora u praznom hodu, uz prisutne kratke spojeve 14 zavoja svitka namota armature.



Slika 14. Frekvencijska analiza raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče generatora u praznom hodu, uz prisutne kratke spojeve 5 zavoja svitka namota armature.

Kako se može vidjeti sa slika 13 i 14, kada se pojavi međuzavojni kratki spoj u svitku namota armature u frekvencijskom sastavu analiziranog valnoga oblika magnetske indukcije pojavi se niz harmoničkih članova. Promjena amplitude harmoničkih članova, uzrokovana kratkim spojevima 14 i 5 zavoja svitka namota armature prikazana je u tablicama 5 i 6

Tablica 5. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 14 zavoja svitka namota armature.

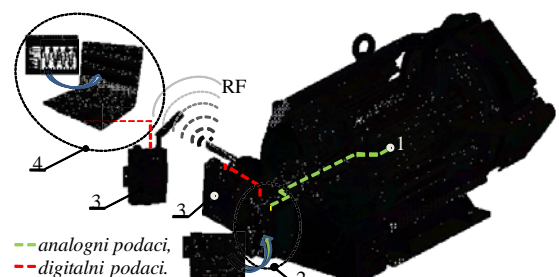
Harmonički član	Magnetska indukcija (T)		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkih spojeva	S kratkim spojevima	
1	0,003468	0,03681	961,13
4	0,000893	0,022551	2423,81
9	0,000447	0,021141	4624,66
10	0,000399	0,017521	4283,86
14	0,000268	0,017433	6396,36
19	0,000211	0,015061	7055,75
32	0,000122	0,015914	13077,11
37	0,000138	0,024813	17859,61
38	0,000128	0,024583	18995,07
46	0,000203	0,022602	11000,08

Tablica 6. Prikaz promjena amplituda izraženih harmoničkih članova uslijed kratkog spoja 5 zavoja svitka namota armature.

Harmonički član	Magnetska indukcija (T)		Promjena amplitude ΔA (%)
	Bez kratkih spojeva	S kratkim spojevima	
1	0,003468	0,00854	146,51
4	0,000893	0,00511	472,57
9	0,000447	0,00409	814,19
10	0,000399	0,00311	675,73
14	0,000268	0,00312	1064,82
19	0,000211	0,00282	1241,10
32	0,000122	0,00409	3294,63
37	0,000138	0,00759	5397,03
38	0,000128	0,00763	5832,73
46	0,000203	0,00764	3655,18

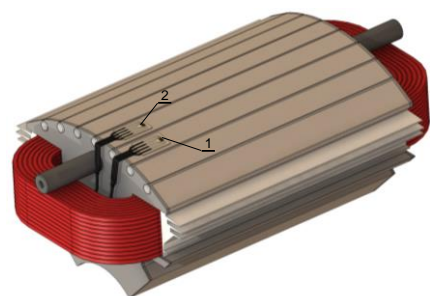
3. REZULTATI MJERENJA

Za potrebe ovog članka, mjerenja su provedena za normalno stanje (bez prisutnosti kratkih spojeva) i za kvarna stanja, a s ciljem izrade analize i usporedbe mjerenja za ta stanja. Na ovaj način omogućeno je otkrivanje karakterističnih promjena u mjerenom signalu uzrokovanih pojavom kvara. Za provedbu mjerenja korištene su tehnike i tehnička rješenja prisutna u monitoringu rotacijskih strojeva. Upotrijebljena je oprema koju se može svrstati u sljedeće cjeline: prednji rub, procesna jedinica, jedinica za bežični prijenos podataka i serversko računalo. Principna shema mjernog sustava prikazana je na slici 15. Procesna jedinica putem ulaznih modula prikuplja mjerne signale s Hall senzora te vrši njihovu obradu. Obradeni podaci se putem bežične jedinice prosljeđuju u serversko računalo, gdje se podaci pohranjuju i analiziraju.



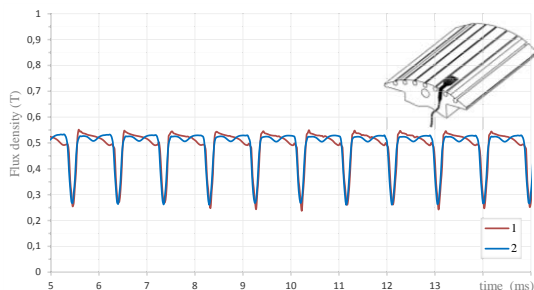
Slika 15. Principna shema mjernog sustava: 1- Hall senzor, 2 – procesna jedinica, 3 – jedinice za bežični prijenos podataka, 4 – računalo.

Iz mjerenih rezultata vidljivo je da odabrano mjesto mjerenja značajno utječe na valni oblik raspodjele magnetske indukcije. Na slici 16 prikazana je ugradnja dvaju Hall senzora na polnu papuču rotora i to na dio s konstantnim zračnim rasporom.



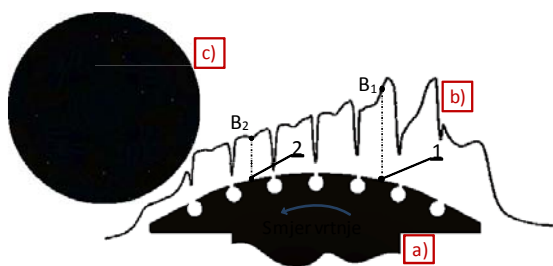
Slika 16. Hall senzori ugrađeni na polnu papuču rotora na dio s konstantnim zračnim rasporom.

Iako se mjerna mjesta, označena brojevima 1 i 2 na slici 16, nalaze na dijelu polne papuče s konstantnim zračnim rasporedom, dobiveni valni oblici raspodjele magnetske indukcije na navedenim mjestima nisu jednaki, što je i prikazano na slici 17.



Slika 17. Raspodjela magnetske indukcije promatrana s polne papuče rotora na pozicijama označenima na slici 12: Krivulja 1 – na mjestu 1, Krivulja 2 – na mjestu 2.

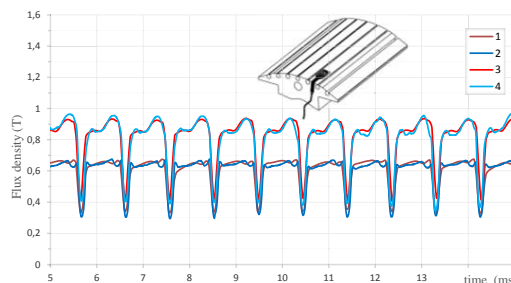
Razlog odstupanja valnih oblika prikazanih na slici 17 vezan je za raspodjelu silnica magnetskog polja u polnoj papuči na promatranim mjestima. Kod opterećenog generatora, ovaj efekt u velikoj mjeri utječe na rezultate mjerenja. To zapravo proizlazi iz prostorne raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu na polnom koraku. Na slici 18 prikazana je rotorska polna papuča, raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu na polnom koraku za opterećeni generator, dvije pozicije ugradnje mjernih senzora te magnetsko polje opterećenog generatora.



Slika 18. a) Rotorska polna papuča, b) – prostorna raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu na polnom koraku za opterećeni generator, c) magnetsko polje opterećenog generatora.

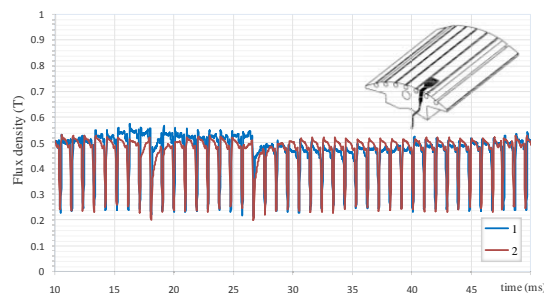
Za prikazani smjer vrtnje rotora, senzor broj 1 mjeriti će najviše iznose magnetske indukcije nego senzor broj 2. To je moguće uočiti iz raspodjele silnica magnetskog polja za opterećeni generator prikazan na slici 18, gdje je gustoća magnetske indukcije veća na desnoj strani pola. Slika 19 prikazuje raspodjelu

magnetske indukcije u zračnom rasporu za dvije pozicije ugradnje mjernih senzora na polnoj papuči rotora. Valni oblici prikazani na slici 19 dobiveni su jednim senzorom ugrađenim na polnoj papuči (pozicija 1) za jednake radne uvjete, ali uz različiti smjer okretanja generatora. Naime, valni oblik prikazan na slici 19 -krivulja 2 mjereno je za desni smjer vrtnje, a valni oblik prikazan na slici 19 - krivulja 4 mjereno je istim senzorom uz jednake radne uvjete, ali za lijevi smjer vrtnje. Magnetska indukcija dobivena MKE izračunima za ista mjerna mjesta kod jednakih radnih uvjeta te za dva smjera vrtnje generatora, prikazana je na slici 19 - krivulja 1 i slika 19 - krivulja 3. Iz prikazanog se vidi da je odstupanje između mjerenih i izračunatih rezultata zanemarivo.

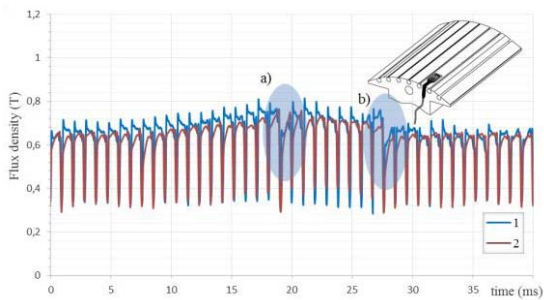


Slika 19. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s pozicije 1 na polnoj papuči opterećenog generatora: Krivulja 1 – izračun, lijevi smjer vrtnje, Krivulja 2 – mjerenje, lijevi smjer vrtnje, Krivulja 3 – izračun, desni smjer vrtnje, Krivulja 4 – mjerenje, desni smjer vrtnje.

Na slikama 20 i 21 prikazana je raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu dobivena mjerenjima i proračunima za poziciju mjerenja 1 i lijevi smjer vrtnje. Dobiveni rezultati su mjereni i izračunati uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka namota armature za prazni hod, tj. neopterećeno stanje (slika 20) te za nazivno opterećenje (slika 21).



Slika 20. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora za generator u praznom hodu uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka namota armature: Krivulja 1 – mjerenje; Krivulja 2 – izračun.



Slika 21. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu promatrana s polne papuče rotora za nazivno opterećeni generator uz prisutne međuzavojne kratke spojeve svitka namota armature: Krivulja 1 – mjerjenje; Krivulja 2 – izračun.

Iz rezultata prikazanih na slikama 20 i 21, može se vidjeti da postoje određene razlike u valnim oblicima dobivenima mjerenjem i izračunima. Glavni razlog ovih odstupanja je razlika struje kratkog spoja između mjerenja i izračuna. Međutim, prisutna odstupanja valnih oblika ne dovode u pitanje ispravnost metode detekcije međuzavojnih kratkih spojeva armaturnog namota. Glavni efekt kratkospojenih zavoja, detalj a) i b) na slici 21, može se vidjeti iz mjerenih i izračunatih podataka.

4. ZAKLJUČAK

U članku su prikazani rezultati numeričkog proračuna i mjerenja raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, a koji su korišteni za utvrđivanje stanja sinkronog stroja te detekciju međuzavojnih kratkih spojeva u armaturnom i uzbudnom namotu. Odabranom metodom promatra se magnetska indukcija u zračnom rasporu za jednu periodu koja odgovara jednom punom okretu rotora. Poremećaj magnetskog polja u stroju uzrokovan međuzavojnim kratkim spojem, koji je uočljiv kao lokalizirani poremećaj, rezultira promjenama značajnog broja harmoničkih članova analiziranog valnog oblika raspodjele magnetske indukcije.

Relativne promjene u vrijednosti magnetske indukcije ΔA snimljene na dijelu oboda u zračnom rasporu $(Z-N)\tau_s$, gdje je Z broj zuba statora, N broj statorskih zuba obuhvaćenih analiziranim poremećajem i τ_s korak između zuba statora, sastoje se od $(Z-N)$ harmonika čije amplitude su u rasponu od ΔA i njihovih viših harmonika s nešto nižim amplitudama. Ukoliko se ti harmonici usporede s istim harmonicima kada nije prisutan međuzavojni

kratki spoj, mogu se uočiti izražene promjene koje se mogu koristiti kao pouzdani indikatori međuzavojnih kratkih spojeva armaturnog i uzbudnog namota. Ovakav način detekcije kvarova namota primjenjiv je na širok raspon sinkronih generatora i motora. Detekcija međuzavojnog kratkog spoja namota u stvarnom stroju zahtijeva mjerenje magnetske indukcije u zračnom rasporu, koje se može ostvariti ugradnjom Hall senzora na zub statora ili na polnu papuču rotora. Rezultati proračuna pokazali su da se pojava međuzavojnog kratkog spoja armaturnog i uzbudnog namota može detektirati sa zuba statora ili polne papuče. Međutim, postoje značajne razlike u primjeni navedene metode detekcije, što naravno ovisi o odabiru točke mjerenja magnetske indukcije i kvarovima koji se žele pravovremeno detektirati. Odabrana mjesta promatranja magnetske indukcije korištena su kako bi se pravovremeno i pouzdano detektirao međuzavojni kratki spoj namota. Na osnovu dobivenih rezultata numeričkog proračuna i mjerenja pokazano je da je za pouzdanu detekciju kratkog spoja između zavoja armaturnog namota potrebno raspodjelu magnetske indukcije promatrati Hall sondom smještenom na polnoj papučici rotora, tj. s rotorske strane. Nasuprot tome, za pouzdanu detekciju međuzavojnog kratkog spoja uzbudnog namota, raspodjelu magnetske indukcije potrebno je promatrati Hall sondom smještenom na zub statora, tj. sa statorske strane. Rezultati su također pokazali da za pouzdanu detekciju kvarova nije dovoljno samo promatrati promjene u amplitudi promatranog valnog oblika, nego je potrebno provesti i frekvencijsku analizu valnog oblika te pratiti promjene u amplitudi karakterističnih harmonika. Stoga su promjene u amplitudama karakterističnih harmonika glavni indikatori na osnovu kojih se može pravovremeno i pouzdano utvrditi prisutnost kratkih spojeva svitka namota. Budući da rotor rotira zajedno s ugrađenim mjernim sensorima, kada senzor nailazi na kvar, on može biti detektiran iz samih podataka mjerenja. Ograničavajući faktor u ovom načinu detekcije kvara je potreba za bežičnim prijenosom podataka s rotirajućeg dijela stroja, čime je tehničko rješenje monitoring sustava kompliciranije i skuplje.

5. LITERATURA

- [1] A. Elez, B. Tomičić, A. Čolak, "The Comparison of Magnetic Values Obtained from Hall Probes and Measuring Coils in Synchronous Generators", International Conference on Electrical Machines ICEM'08- XVIII, Portugal - Vilamoura 2008, pp 1-6
- [2] A. Elez, "Intelligent system for synchronous generators fault detection", PhD dissertation, Dept. of Electrical Machines, Drives and Automation, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER), Zagreb, Croatia, 2010.
- [3] H. C. Karmaker; - "Broken Damper Bar Detection Studies Using Flux Probe Measurements and Time-Stepping Finite Element Analysis For Salient – Pole Synchronous Machines", Sdemped 2003, Symposium for Electric Machines, Atlanta USA August 2003.
- [4] R. Rajeswari and N. Kam; - "Diagnosis of Inter Turn Fault in the Stator of Synchronous Generator Using Wavelet Based ANFIS", International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol.2, October 2007.
- [5] D. R. Albright, D. J. Albright, J. D. Albright; - "Generator field winding shorted turn detection technology", Power Engineering September 1999, Volume 103, Issue 9, p. 28-32.
- [6] E. Garbe, R. Helmer, B. Ponick; - "Modelling and Fast Calculating The Characteristics of Synchronous Machines With The Finite Element Method", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines.
- [7] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors", IEEE Trans. on Energy. Conversion, vol. 20, pp. 106-114, Mar. 2005.
- [8] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 47, nr. 5, pp. 984-993, Oct. 2000.
- [9] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd and W. T. Fink, "Detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors", IEEE Trans. on Energy. Conversion, vol. 9, no. 4, pp. 652-658, Dec. 1994.
- [10] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G.-A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4109-4126, Dec. 2008.
- [11] J. S. Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through AirGap Torque Observation," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 31, no. 5, pp.1016-1021, Sep./Oct.1995.
- [12] S. Nandi, H. Toliyat; - Novel Frequency-Domain-Based Technique to Detect Stator Inter-turn Faults in Induction Machines Using Stator-Induced Voltages After Switch-Off, IEEE Transactions on industry applications. Vol. 38. No. 4. January 2002.
- [13] F. Zidani, M. Benbouzid, D. Diallo, M. Said; - Induction Motor Stator Faults Diagnosis by a Current Concordia Pattern- Based Fuzzy Decision System, IEEE Transactions on energy conversion. Vol. 18. No. 4. December 2003.
- [14] R. Ong, J. H. Dymond, R. D. Findlay, B. Szabados; - Shaft Current in AC Induction Machine- An Online Monitoring System and Prediction Rules, IEEE Transactions on industry applications. Vol. 37. No. 4. July 2001.
- [15] Sergio M. A. Cruz, A. J. Marques Cardoso; - Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 37. No. 5. September 2001.



Ante Elez rođen je 14. svibnja 1979.g. u Splitu, Hrvatska. Tehničku školu završio je 1998.g. u Splitu, a diplomirao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (Sveučilište u Zagrebu), Zavod za elektrostrojstvo i automatizaciju 2003. Nakon diplome zaposlio se u KONČAR - Institutu za elektrotehniku, gdje radi i danas te se bavi razvojem, istraživanjem i monitoringom u Zavodu za rotacijske strojeve. Pohađao je i poslijediplomski studij na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, gdje je prvo 2008. završio magistarski studij, a potom i doktorski studij te 2010.g. stekao titulu doktora tehničkih znanosti. Znanstvene aktivnosti usmjerene su na mjerenja, proračune i analizu parametara električnih strojeva. Autor je i koautor brojnih članaka objavljenih u časopisima, znanstvenim i stručnim konferencijama i skupovima kod kuće i inozemstvu te dobitnik mnogih priznanja i nagrada.



Stjepan Car završio je Elektrotehnički fakultet u Zagrebu 1972. godine. Sedam godina kasnije, 1979. stekao je akademsku titulu doktora tehničkih znanosti, područje elektrotehnika. Pohađao niz specijaliziranih seminara i tečajeva iz područja poslovnog upravljanja kod kuće i u inozemstvu. Nakon diplome zaposlio se u KONČAR Institutu, gdje se preko 18 godina bavio istraživanjem i razvojem na području rotacijskih strojeva i elektromotornih pogona. Osam je godina proveo na poziciji člana uprave KONČAR Elektroindustrije, zaduženog za korporativni razvoj i poslovno područje industrija. Od 1998.g. obnaša dužnost predsjednika Uprave KONČAR - Institutu za elektrotehniku. Držao je predavanja na predmetu Električni strojevi na fakultetima u Rijeci i Varaždinu. Godine 2004. izabran je u nastavno zvanje kao izvanredni profesor te je od 2006.g. predavač na predmetu Menadžment u inženjerstvu na

Fakultetu elektrotehnike i računarstva (Sveučilište u Zagrebu). Profesor Car objavio je preko 70 znanstvenih i stručnih članaka i studija. Također, član je brojnih organizacija (tehničkog odbora Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti (HAZU), član Povjerenstva fonda Jedinstvo pomoću znanja Ministarstva znanosti obrazovanja i športa i Svjetske banke, Udruge inovatora Hrvatske, itd.) te dobitnik brojnih priznanja, nagrada i odlikovanja.



Dr. sc. Krešimir Meštrović rođen je 1958. godine u Zagrebu. Diplomirao je 1982., magistrirao 1988. i doktorirao 2008. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Godine 2009. izabran je u profesora visoke škole u trajnom zvanju. Radio je u KONČAR - Institutu za elektrotehniku na poslovima istraživanja i razvoja visokonaponskih sklopnih aparata i sklopnih postrojenja, poslovima rukovođenja odjelom i poslovima rukovođenja zavodom. Od 1991. godine radi na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu kao predstojnik zavoda, a danas je pročelnik Elektrotehničkog odjela. Bio je tajnik i predsjednik studijskog odbora SO A3 HRO CIGRÉ te predsjednik hrvatskog ogranka Vijeća za velike elektroenergetske sustave HRO CIGRÉ od 2008. do 2012. godine. Bio je član međunarodnih radnih grupa, član međunarodnog studijskog komiteta SC A3 CIGRÉ, kao i član Administrativnog vijeća CIGRÉ. Bio je tajnik, a danas je predsjednik elektrotehničkog odbora ETO 17 Hrvatskog zavoda za norme (HZN). Više je puta bio član stručnog i programskog odbora domaćih i međunarodnih stručnih skupova. Senior Member je američkog udruženja IEEE. Član je Znanstvenog vijeća za energetiku Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti (HAZU). Suradnik je Akademije tehničkih znanosti Hrvatske (HATZ). Član je Matičnog povjerenstva za područje tehničkih znanosti Vijeća veleučilišta i visokih škola. Dobitnik je nagrade "7 sekretara SKOJ-a" za tehniku 1985. godine. Sedam puta je dobio priznanje i četiri puta nagradu SOUR- Rade Končar. Dobio je

srebrnu plaketu RAST YU 88', priznanje RAST YU 89' te zlatnu plaketu INOVA 88'. Dobitnik je nagrade CIGRÉ „Eminent Member Award”. Dobitnik je povelje HAZU „Josip Juraj Strossmayer“. Dobitnik je „Nagrade za životno djelo” HRO CIGRÉ. Odlikovan je "Spomenicom domovinskog rata 1990. - 1992."



Stjepan Tvorčić rođen je 1. listopada 1985.g. u Zagrebu, Hrvatska. Srednju školu (gimnaziju) završio je 2004.g. u Vrbovcu, a diplomirao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (Sveučilište u Zagrebu), Zavodu za visoki napon i energetiku 2009. Tijekom studija sudjelovao je na projektu o utjecaju elektromagnetskog zračenja trafostanica na ljudsko zdravlje, naručenog od strane HEP-a kod Zavoda za osnove elektrotehnike i električna mjerenja (FER ZOEEM). Nakon diplome zaposlio se u KONČAR - Institutu za elektrotehniku, gdje radi kao razvojni inženjer u Odjelu za istraživanje i razvoj koji djeluje u sklopu Zavoda za rotacijske strojeve. Autor je i koautor nekoliko članaka objavljenih u časopisima, znanstvenim i stručnim konferencijama i skupovima kod kuće i inozemstvu. Trenutno pohađa poslijediplomski doktorski studij na Fakultetu elektrotehnike i računarstva.