

DOI: [10.46793/CIGRE37.A1.03](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A1.03)

A1.03

**KOMPARATIVNA ANALIZA OFFLINE I ONLINE METODA ZA DETEKCIJU
MEĐUNAVOJNIH KRATKIH SPOJEVA NA NAMOTAJU ROTORA VELIKIH TURBO
GENERATORA****COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN OFFLINE AND ONLINE METHODS FOR
TURN-TO-TURN FAULT DETECTION IN ROTOR WINDING OF LARGE TURBO-
GENERATORS****Filip Zec, Đorđe Jovanović, Marko Dimitrijević**

Kratak sadržaj: Rotorski namotaja su generalno gledano pouzdani delovi turbo generatora. Međutim, međunavojna izolacija namotaja rotora u ovim mašinama podložna je degradaciji tokom vremena sa mogućim oštećenjima i/ili probojima, uglavnom zbog termičkog starenja, ciklusa opterećenja i kontaminacije. Iako kratki spojevi između namotaja rotora obično ne uzrokuju odmah kvar mašine, oni mogu dovesti do povećanih vibracija ležajeva, povećanog naprežanja na sistemima pobude, degradacije raspodele (deformacije) magnetnog fluksa, smanjenja kapaciteta generatora i samim tim smanjenje izlazne snage. *Off-line* testovi mogu detektovati međunavojne kratke spojeve u rotorskim namotajima, ali ponekad nisu dovoljno pouzdani. Ovi testovi se izvode dok je rotor u mirovanju, bez termičkih i mehaničkih naprežanja usled centrifugalnih sila, što može da rezultira odsustvom detekcije kratkog spoja između namotaja. *On-line* metoda ispitivanja rotorskog fluksa podrazumeva instalaciju senzora za magnetni fluks u vazдушnom razmaku generatora. Ovaj senzor omogućava praćenje rotorskog fluksa pri nominalnim (radnim) parametrima mašine. Kao rezultat toga, stalni uvid u stanje izolacije između namotaja rotora može se kontinuirano pratiti tokom rada generatora.

Ključne reči: rotor, međunavojna izolacije, RSO test, on line ispitivanje, off line ispitivanje, magnetni flux, monitoring

Abstract: Rotor winding is generally reliable part of the turbine generators. However, the rotor turn insulation in these machines is susceptible to degradation or/and punctures over time, primarily due to thermal aging, load cycling and contamination. Although shorted turns do not usually cause immediate machine failure, they can lead to higher bearing vibrations, increased strain on excitation systems, flux integrity degradation, decreased generator capacity and reduce overall output. Offline tests can detect shorted turns in rotor windings, but they are sometimes not enough reliable. These tests are conducted while the rotor is at standstill, without thermal and mechanical stresses due centrifugal forces, which sometimes results in undetected shorted turns. Online testing of rotor flux includes instalation of magnetic flux sensor in the generator air gap. This sensor allows monitoring of the rotor flux at regular service condition with rated machine parameters. As a result, real-time insight into the condition of the inter-turn insulation of the rotor windings can be continuously obtained during the generator's operation.

Keywords: rotor, turn-to-turn insulation, RSO test, on line test, off line test, magnetic flux, monitoring

1 UVOD

Rotor turbo generatora je obično sastavljen od čvrstog kovanog jezgra od magnetnog legiranog čelika, sa bakarnim namotajima umetnutim u obrađene žljebove. Namotaji su učvršćeni pomoću klinova izrađenih od čelika, bronzе ili aluminijuma. Rotorske kape na oba kraja rotora drže krajnje delove rotornih namotaja. Savremena izolacija za rotorne namotaje uglavnom se sastoji od epoksi/poliester staklenih laminatnih traka i Nomex™ materijala, uz upotrebu oblikovanih kanala za zemljospojnu izolaciju. Trake obezbeđuju izolaciju između navojaka, dok kanali sprečavaju električni kontakt sa jezgrom. Izolacija rotora je projektovana i inženjerski dizajnirana da izdrži električne, mehaničke i toplotne stresove tokom redovne upotrebe. Međunavojni kratki spojevi, čest problem u velikim turbo generatorima, obično nastaju usled oštećenja izolacije između pojedinačnih navojaka. Česti uzroci međunavojnih kratkih spojeva uključuju kontaminaciju provodnim otpadom i kretanje namotaja usled velikih centrifugalnih sila i aksijalne toplotne ekspanzije. Evaluacija stanja izolacije rotorskog namotaja tokom zastoja ponekad je teška zbog ograničenog pristupa i samog karaktera kvarova, koji se ponekad javljaju samo pri nazivnim brzinama tokom normalne eksploatacije. Zbog toga je *online* ispitivanje efikasniji način za identifikaciju međunavojnih kratkih spojeva. [1].

Oštećena izolacija može dovesti do međunavojnih kratkih spojeva, što izaziva magnetnu neravnotežu i različito zagrevanje, uzrokujući blagi ugib celog rotora, što zauzvrat dovodi do višeg nivoa vibracija, dodatno doprinosi mogućem ozbiljnijem mehaničkom oštećenju i čak zaustavljanju generatora. Kako izolacija nastavlja da se degradira, verovatnoća međunavojnih kratkih spojeva i neregularnih zastoja se povećava. Dobijanje ranih uvida u kvarove izolacije i primanje podataka u stvarnom vremenu o ozbiljnosti oštećenja omogućava osoblju da donesu odluke o tome kako da nastave sa radom. Ovo oštećenje može dovesti do:

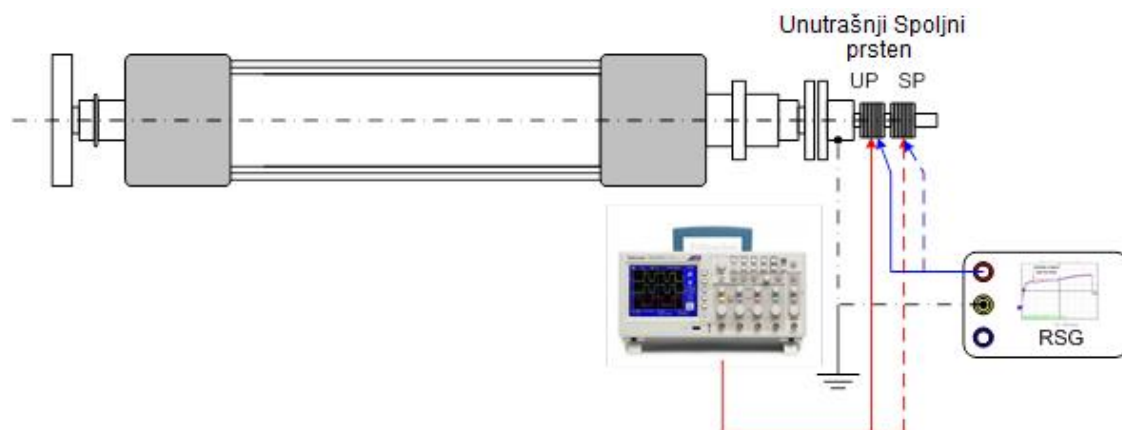
- Povećanog opterećenja na sisteme pobude
- Neravnoteže u rotorskom polju
- Povećanih nivoa vibracija
- Degradacije integriteta magnetnog polja
- Smanjenja kapaciteta generatora
- Povećanog rizika od zemnog spoja na rotoru
- Potencijalnih neočekivanih kvarova generatora ili prisilnih isključenja

2 ISPITIVANJE REPETICIONIM IMPULSNIM GENERATOR KAO METODA ZA ODREĐIVANJE MEĐUNAVOJNIH KRATIH SPOJEVA U NAMOTAJU ROTORA

2.1 Princip metode

Repeticioni generator impulsa (RIG) se vezuje između jednog kontaktnog (kliznog) prstena i tela rotora (zemlje-mase), dok je drugi kontakti prsten slobodan. Odgovarajućim instrumentom se registruje oblik talasa impulsa. Ogled se ponavlja sa vezanim generatorom impulsa između drugog prstena i mase, dok je prvi prsten slobodan. Pouzdaniји uvid u stanje međunavojne izolacije se postiže, ako se ispitivanje vrši pri raznim brzinama obrtanja rotora, s obzirom da je tada prisutno i mehaničko naprezanje.

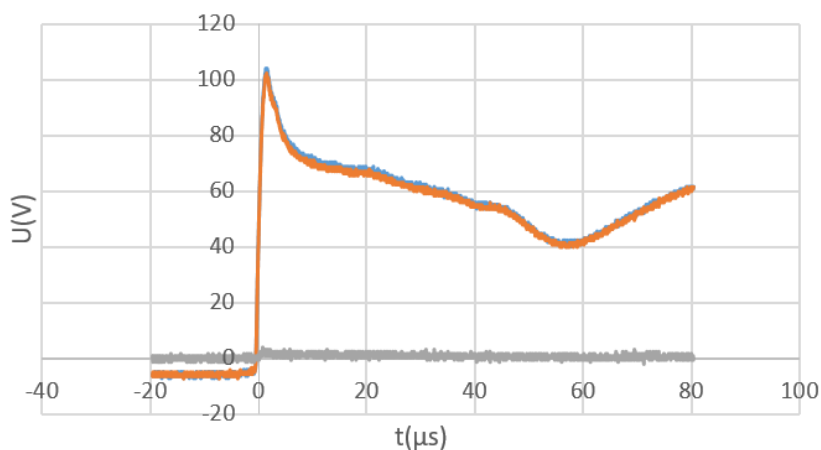
Vrši se poređenje odziva koji se dobijaju sa svakog od kliznih prstenova. Stanje je zadovoljavajuće kada se odzivi poklapaju. Ukoliko postoje međunavojni spojevi, odzivi se znatno razlikuju.



Slika 1: Ispitno kolo za detektovanje međunavojnih kratkih spojeva u namotaju rotora

2.2 Kriterijum za procenu rezultata

Podudarnost oblika talasa pri oba merenja - ako se odzivi talasa poklapaju, ne postoji kratak spoj u međunavojnoj izolaciji dok znatnije odstupanje ukazuje na loše stanje međunavojne izolacije, pa čak i na postojanje kratkog spoja u njoj.

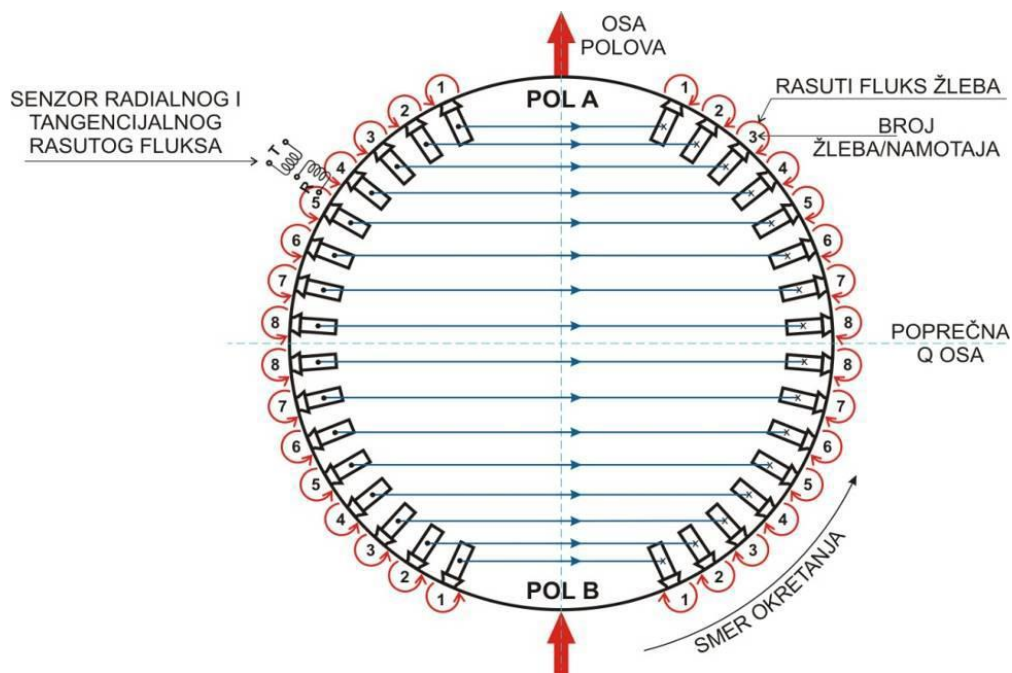


Slika 2: Prikaz odziva sa kontaktnih prstenova na pobudu iz RIG - Plavo – spoljni prsten, narandžasto – unutrašnji prsten, sivo – razlika.

3 ONLINE METODA ZA ODREĐIVANJE MEĐUNAVOJNIH KRATKIH SPOJEVA U NAMOTAJU ROTORA POMOĆU INSTALIRANOH SENZORA U VAZDUŠNOM PROCEPU GENERATORA

Kada kroz namotaj rotora teče struja koja generiše obrtno magnetno polje, u svim žlebovima gde se nalaze provodnici javlja se rasuti fluks. Ovaj fluks je direktno zavisao od ukupnog broja ampernavojaka u svakom žlebu. Ako dođe do kratkog spoja između provodnika u jednom žlebu, to će izazvati smanjenje rasutog fluksa. Idealno bi bilo pratiti samo promene u rasutom fluksu, što bi omogućilo ne samo detekciju kratkospojenih navojaka, već i precizno određivanje njihovog broja i tačne pozicije žleba u kojem se nalaze. Međutim, u stvarnim uslovima postoji resultantni fluks koji je posledica glavnog fluksa rotora, fluksa statora i rasutog fluksa provodnika u žlebovima rotora, pri čemu je za detekciju kratkospojenih navojaka od interesa samo poslednji fluks. Primenom odgovarajućih algoritama i procedura moguće je prevazići problem koji nastaje zbog odstupanja stvarnog stanja od idealnog.

Na slici 3 prikazan je poprečni presek dvopolnog rotora turbogeneratora, kroz koji prolazi struja koja stvara magnetno polje duž ose polova. Kao ilustrativni primer korišćen je rotor sa 8+8 žlebova po polu, odnosno sa 8 namotaja-kanura po polu. Namotaji i žlebovi označeni brojem 1 su najbliži osi polova i najkraći su, dok su namotaji i žlebovi označeni brojem 8 najbliži poprečnoj Q osi polova A i B, te su najduži. Takođe, prikazan je deo rasutog fluksa koji nastaje usled provodnika u svakom žlebu, kao i senzor za praćenje rasutog fluksa. Senzor treba biti postavljen u međugvožđu, na sigurnoj udaljenosti od rotora, kako bi mogao kontinuirano pratiti promene u fluksu rasipanja, a istovremeno ostao na bezbednoj udaljenosti od samog rotora. S obzirom na to da u međugvožđu deluju i fluks rotora i fluks statora, razvijena je metoda koja omogućava otkrivanje, precizno određivanje mesta i procenu broja kratkospojenih navojaka.

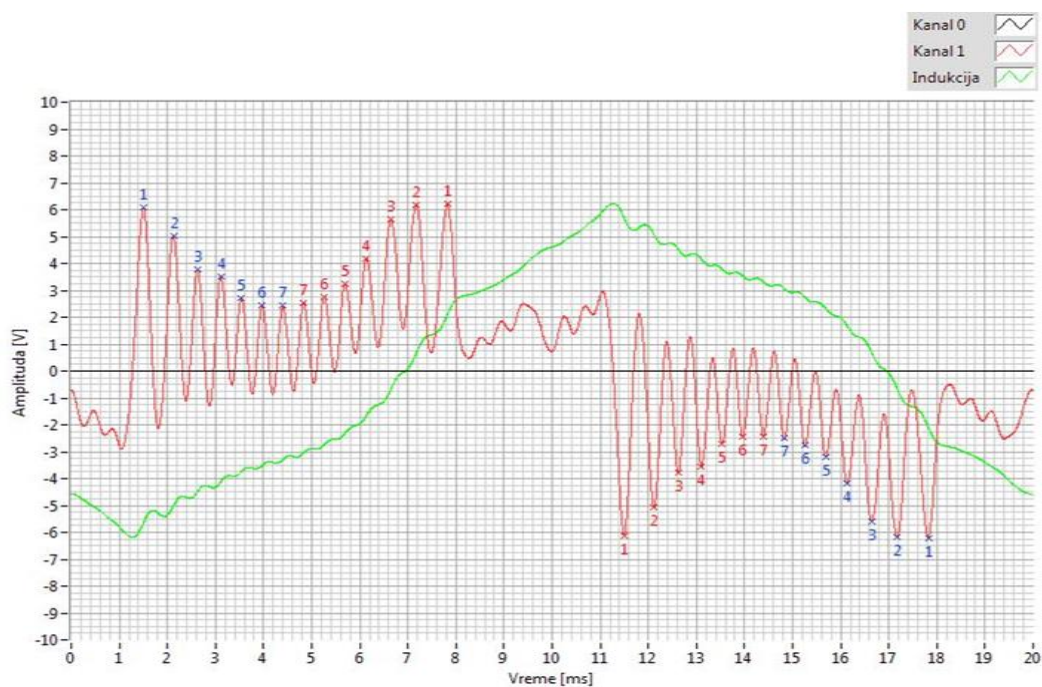


Slika 3: Šema poprečnog preseka dvopolnog rotora sa senzorom i rasutim fluksom u blizini žlebova [2] [3] [4]

Pikovi napona na dijagramu (slika 4) direktno su povezani sa centralnim linijama žlebova i zuba rotora, pri čemu je apsolutna vrednost napona znatno veća na centralnim linijama žlebova nego na centralnim linijama zuba. Ovi pikovi napona, odnosno njihove vrednosti, zavise od ampernavojaka u odgovarajućim žlebovima rotora i rasutog fluksa tih žlebova. Takođe, sa dijagrama se može uočiti da su svi pikovi indukovanih napona numerisani, što je korisno u slučaju kada tokom merenja nije poznat broj žlebova po polu rotora.

Otkrivanje kratkospojenih navojaka zasniva se na poređenju signala sa senzora fluksa, koji se odnose na komplementarne žlebove polova. Poređenjem vrednosti ova dva signala moguće je proceniti broj kratkospojenih navojaka u žlebu, pod uslovom da je poznat ukupan broj navojaka u tom žlebu.

Međutim, očigledno je da je nemoguće otkriti kratkospojene navojke ako su prisutni u oba komplementarna žleba. Ipak, njihovo otkrivanje je moguće korišćenjem aktuelnih rezultata, kao i podataka iz prethodnih perioda monitoringa, kada kratkospojeni navojci nisu postojali.



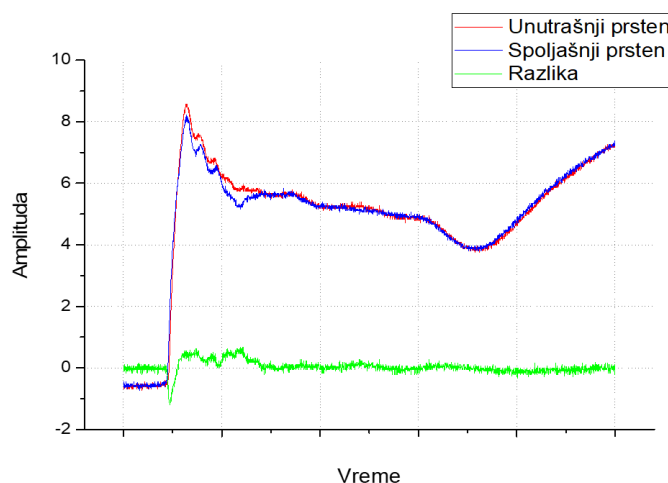
Slika 4: Naponski signal dobijen sa senzora fluksa montiranog u vazdušnom procepu

4 ANALIZA SLUČAJA

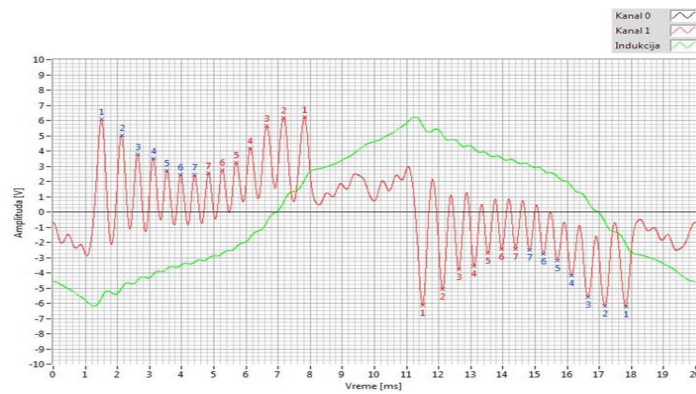
4.1.1 Generator 1

Kontrola međunavojne izolacije *offline* metodom ukazuje na postojanje najmanje jednog međunavojnog kratkog spoja u namotaju rotora (slika 5)

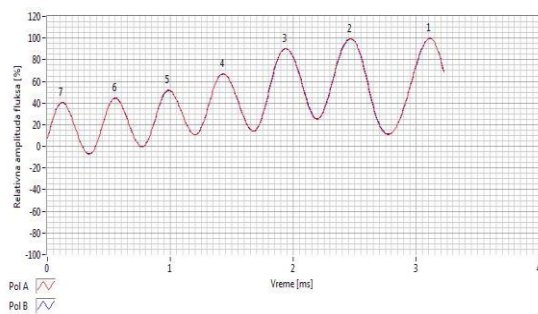
Ispitivanje magnetnog fluksa online metodom pomoću senzora u vazdušnom procepu ne ukazuje na prisustvo međunavojnog kratkog spoja u namotaju rotora (slika 6).



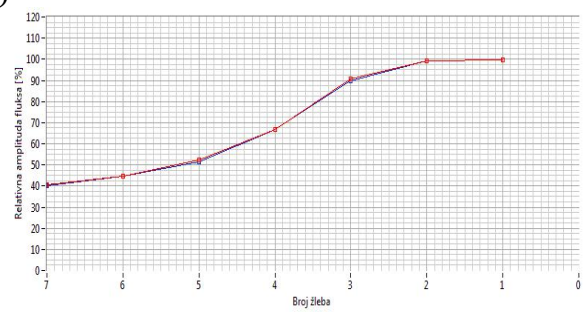
Slika 5: Snimljeni odzivi sa kontaktnih prstenova na pobudu iz RIG rotora u mirovanju, Generator 1. Plavo – spoljni prsten, narandžasto – unutrašnji prsten, zeleno – razlika.



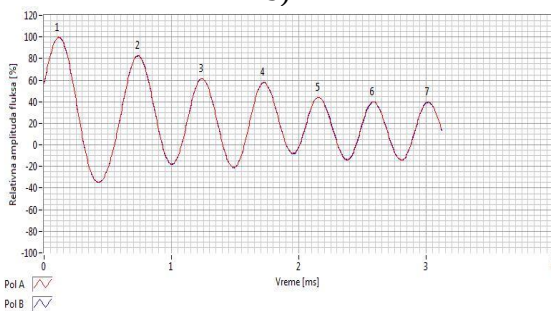
a)



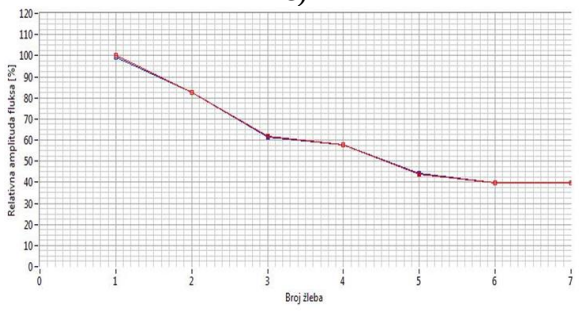
b)



c)



d)



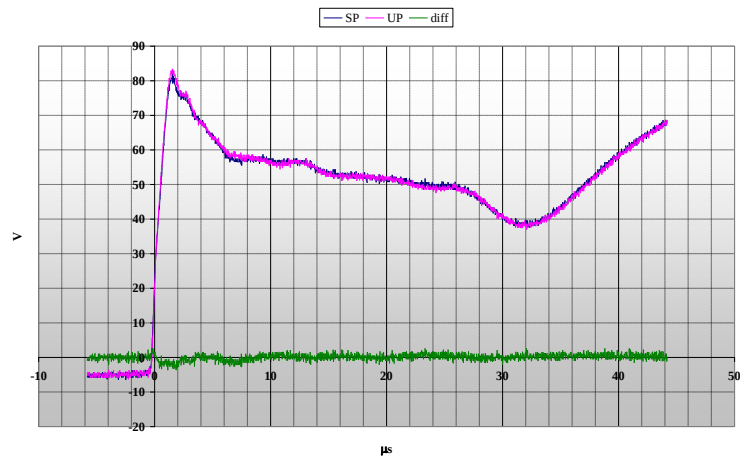
e)

Slika 6: Generator 1. a) Sirov naponski signal sa senzora magnetnog fluksa; b) Preklapanje signala za vodeće žljebove; c) Preklapanje maksimuma signala za vodeće žljebove; d) Preklapanje signala za zaostajuće žljebove; e) Preklapanje maksimuma signala za zaostajuće žljebove;

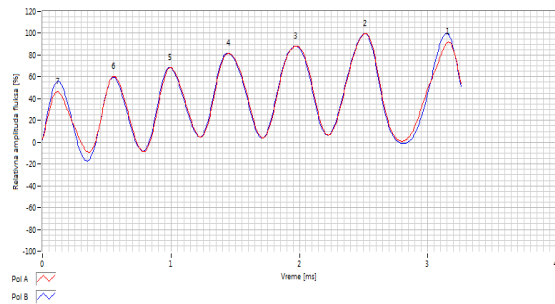
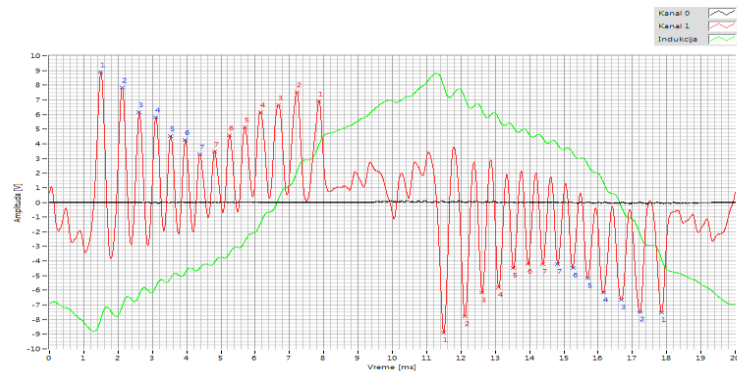
4.1.2 Generator 2

Kontrola međunavojne izolacije *offline* (RIG) metodom ne ukazuje na postojanje međunavojnih kratkih spojeva u namotaju rotora (slika 7).

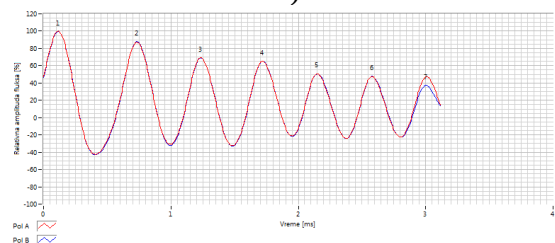
Međutim, sa slike 8 se može videti značajno odstupanje naponskih signala dva pola (crvena i plava linija) se može videti na vodećem žljebu 1 i 7, kao i na zaostajućem žljebu broj 7. Ovo indicira na postojanje najmanje jednog međunavojnog kratkog spoja u namotaju rotora.



Slika 7: Snimljeni odzivi sa kontaktnih prstenova na pobudu iz RIG rotora u mirovanju, Generator 2. Plavo – spoljni prsten, Roze – unutrašnji prsten, Zeleno – razlika.

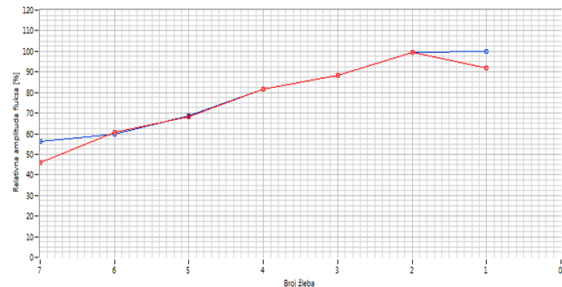


b)

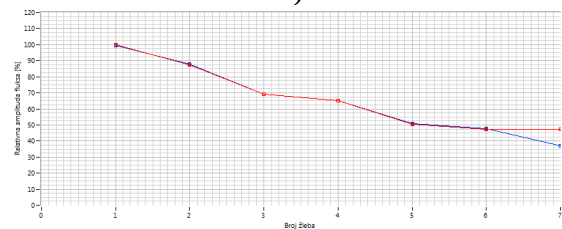


d)

a)



c)



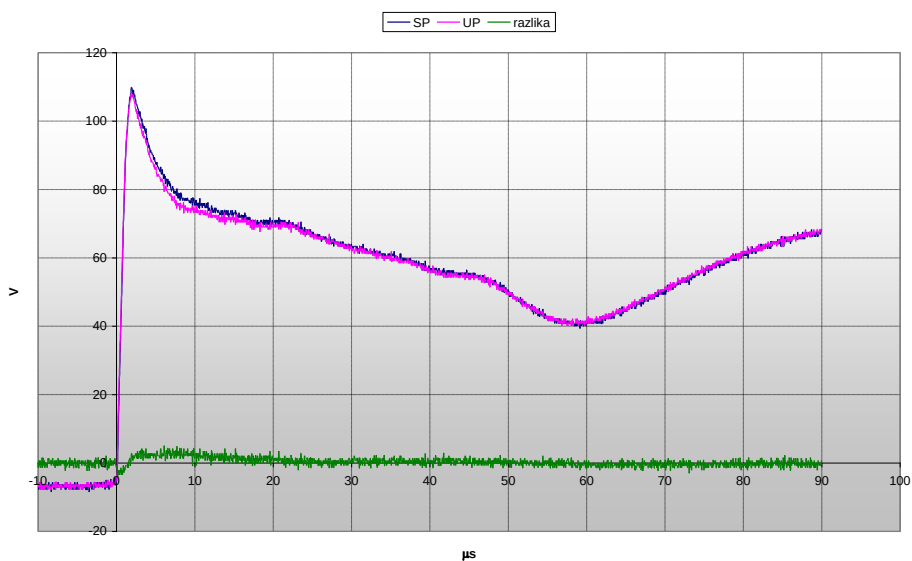
e)

Slika 8: Generator 2. a) Sirov naponski signal sa senzora magnetnog fluksa; b) Preklapanje signala za vodeće žljebove; c) Preklapanje maksimuma signala za vodeće žljebove; d) Preklapanje signala za zaostajuće žljebove; e) Preklapanje maksimuma signala za zaostajuće žljebove;

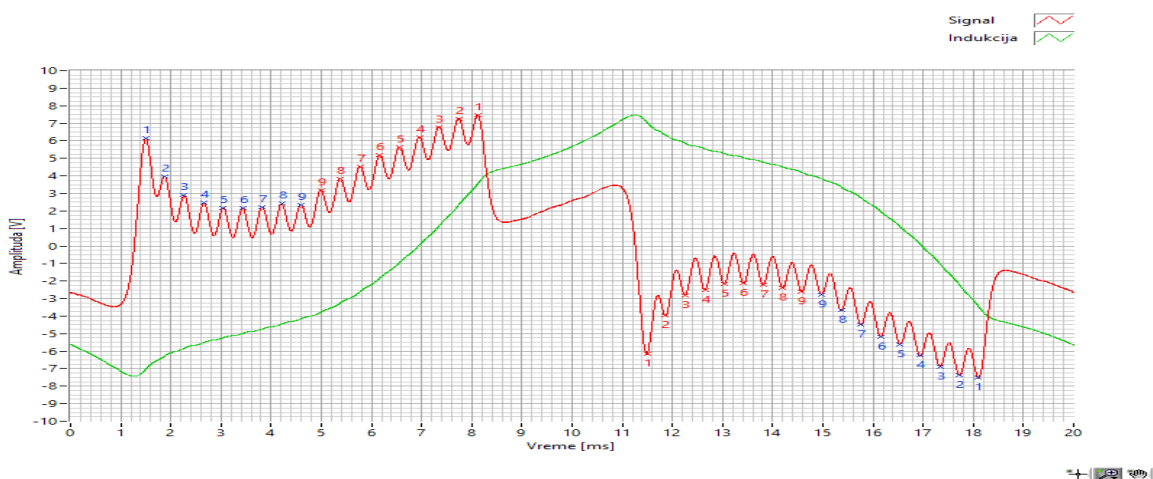
4.1.3 Generator 3

Kontrola međunavojne izolacije *offline* (RIG) metodom pokazuje neznatno odstupanje između snimljenih odziva, tako da se ne može sa sigurnošću reći da postoje slabo mesto u međunavojnoj izolaciji namotaja rotora (slika 9). Ovo je primer nedovoljne osetljivosti metode ispitivanja rotora u mirovanju.

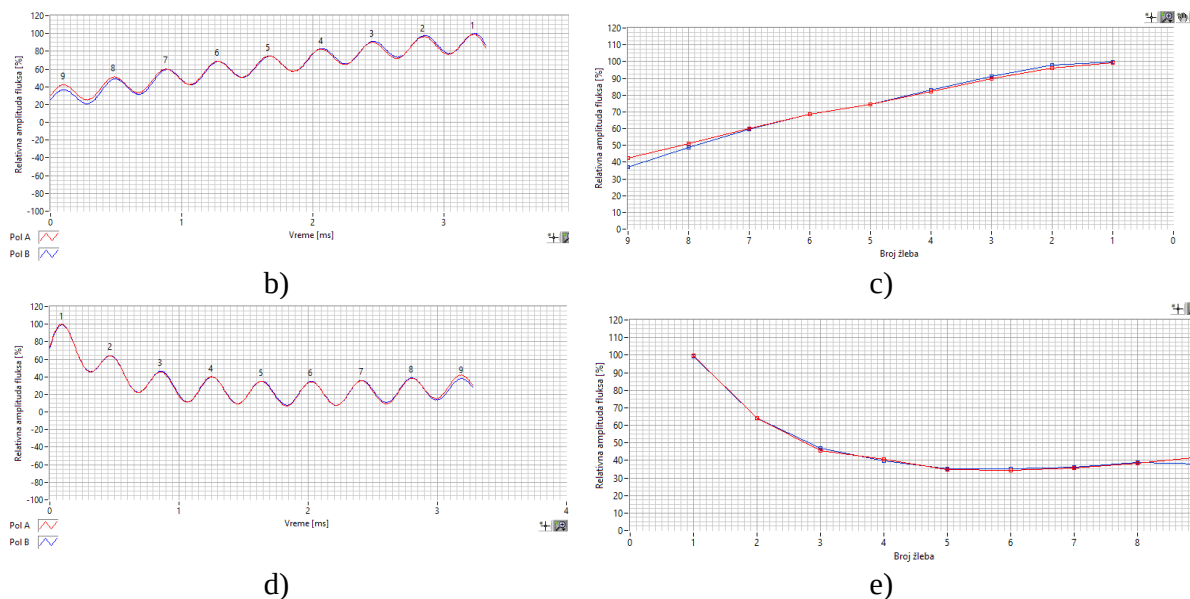
Sa slike 10 se može videti značajno odstupanje naponskih signala dva pola (crvena i plava linija) se može videti na vodećem žljebu 9. Ovo indicira na postojanje najmanje jednog međunavojnog kratkog spoja u namotaju rotora.



Slika 9: Repeticioni impulsni generator kao metoda za određivanje međunavojnih kratih spojeva u namotaju rotora, Generator 3. Plavo – spoljni prsten, Roze – unutrašnji prsten, Zeleno – razlika.



a)



Slika 10: Generator 3. a) Sirov naponski signal sa senzora magnetnog fluksa; b) Preklapanje signala za vodeće žljebove; c) Preklapanje maksimuma signala za vodeće žljebove; d) Preklapanje signala za zaostajuće žljebove; e) Preklapanje maksimuma signala za zaostajuće žljebove;

5 ZAKLJUČAK

Rad predstavlja poređenje *offline* i *online* metoda za detekciju kratkih spojeva između namotaja u rotoru turbo-generatora. Prikazani primeri pokazuju da su ovi kvarovi dinamične prirode, što znači da se uglavnom pojavljuju pod uslovima nominalnog rada mašine.

Stanje izolacije rotorskog namotaja je teško proceniti tokom tekućeg održavanja generatora zbog ograničenog pristupa namotajima, što zahteva uklanjanje rotorskih kapa i klinova. Klasična *offline* ispitivanja metodom RIG koja se standardno izvode na mašini u mirovanju (tokom remonta) kako bi se detektovali kratki spojevi u namotajima i/ili zemni spojevi često nisu pouzdana zbog prirode kvara, koji se može manifestovati samo tokom rada generatora, kada su pored električnih naprezanja uključene centrifugalne sile ali i termički stresovi.

Online metode za praćenje rotorskog magnetnog fluksa tokom rada generatora pokazale su se vrlo korisnim i pouzdanim u praksi, nadomestujući mane klasične *offline* RIG metode. Ovo zahteva početnu investiciju u montažu senzora za praćenje magnetnog fluksa, što omogućava periodično prikupljanje naponskih signala za analizu rotorskog magnetnog fluksa i procenu stanja izolacije između namotaja. Trošak ove investicije i instalacije je relativno mali u poređenju sa koristima mnogo sigurnijeg pogona, a može se realizovati u kratkom vremenskom periodu tokom godišnjeg generalnog pregleda. Instalacija senzora magnetnog fluksa može se obaviti čak i bez vađenja rotora, ali je mnogo lakša i sigurnija kada je rotor van mašine tokom većeg remonta.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije kroz Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2025. godini.

This work was supported in part by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia under the Contract on the realization and financing of the scientific research work of Research and Innovation Organizations in 2025.

6 LITERATURA

- [1] M. Šašić, G. C. Stone, J. Stein and C. Stinson, "Detecting Turn Shorts in Rotor Windings: A New Test Using Magnetic Flux Monitoring," *IEEE Industry Applications Magazine*, no. 19(2):63-69, 2013
- [2] Z. Obradović, "Magnetni monitoring obrtnih električnih mašina u elektrana Elektroprivrede Srbije," in *I Faza*, Beograd, EPS, 2009. I. S. Jacobs and C. P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in *Magnetism*, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271–350
- [3] J. Kapler, S. Campbell and M. Credland, "Continuous automated flux monitoring for turbine generator rotor condition assesment," *EPRI Workshop Charlotte, NC*, July 2004. R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press
- [4] F. Zec and N. Kartalović, "Sistem za online monitoring međunavojne izolacije namotaja rotora turbogenerators," in *CIGRE*, Zlatibor, 2013
- [5] G. C. Stone, M. Šašić, J. Stein and C. Stinson, "Using magnetic flux monitoring to detect synchronous machine rotor winding shorts," in *Record of Conference Papers Industry Applications Society 58th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*, 2011
- [6] K. Eves and J. Valasek, "Adaptive control for singularly perturbed systems examples," Code Ocean, Aug. 2023. [Online]. Available <https://codeocean.com/capsule/4989235/tree>
- [7] D. P. Kingma and M. Welling, "Auto-encoding variational Bayes," 2013, arXiv:1312.6114. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1312.6114>
- [8] S. Liu, "Wi-Fi Energy Detection Testbed (12MTC)," 2023, gitHub repository. [Online]. Available: <https://github.com/liustone99/Wi-Fi-Energy-Detection-Testbed-12MTC>
- [9] "Treatment episode data set: discharges (TEDS-D): concatenated, 2006 to 2009." U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, August, 2013, DOI:10.3886/ICPSR30122.v2