

## Potencijal vratila kod turboagregata

Ilija Klasnić<sup>1,2</sup>, Dušan Joksimović<sup>1</sup>, Zoran Ćirić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste  
Glaviniča 8a, 11000 Beograd, Srbija

[Ilija.klasnic@ieent.org](mailto:Ilija.klasnic@ieent.org)

<sup>2</sup> Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja  
Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

**Kratak sadržaj:** U radu je analizirana pojava potencijala vratila i ležajnih struja kod električnih mašina. Dat je pregled uzroka nastanka ovih napona i struja kao i eventualnih posledica. U nastavku je analiziran uticaj tiristorskog sistema pobude na veličinu potencijala vratila, prikazana je metoda za merenje potencijala vratila, predložene su preventivne mere za smanjenje potencijala vratila kod turboagregata. Na kraju su prikazani rezultati merenja potencijala vratila na jednom turboagregatu u okviru Elektroprivrede Srbije.

**Ključne reči:** turboagregat, potencijal vratila, statički sistem pobude, ležajne struje

### 1. Uvod

Tokom rada električnih mašina, naizmernični (AC) i jednosmerni (DC) naponi se mogu indukovati u vratilu agregata. Preveliki potencijal vratila može dovesti do prevelikih ležajnih struja koje mogu prouzrokovati ozbiljna oštećenja ležajeva obrtnih električnih mašina. U ovom radu prikazani su rezultati merenja potencijala vratila turboagregata sa osvrtom na načine i uzroke nastanka ovih napona i njihove eventualne posledice. Merenja su izvršena na jednom turboagregatu u sklopu Elektroprivrede Srbije čiji su osnovni podaci dati u tabeli 1.

**Tabela 1.** Osnovni podaci o ispitivanom generatoru

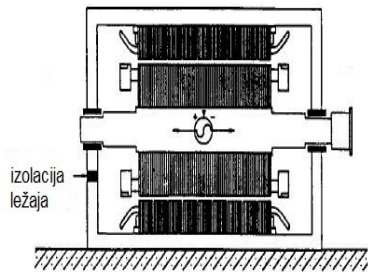
Tip generatora	GTHW - 360	Nominalna struja rotora	2737 A
Nominalna snaga	410 MVA	Nominalni faktor snage	0,85
Nominalni napon	22000 V	Učestanost	50 Hz
Nominalna struja statora	10770 A	Nominalna brzina obrtanja	3000 ob/min

## 2. Uzroci nastanka potencijala vratila i ležajnih struja

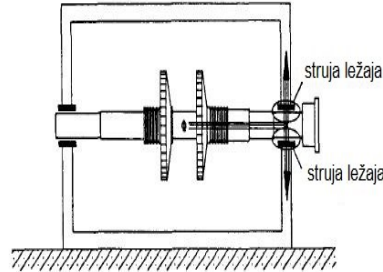
Uzroci postojanja potencijala vratila kod savremenih turboagregata su:

- Magnetna nesimetrija izazvana ekscentričnošću rotora, ugibom statora ili rotora, vazdušnim zazorima u magnetnom kolu statora (slika 1).
- Aksijalni magnetni fluks u vratilu koji je posledica remanentnog magnetizma, ekscentričnosti rotora, zasićenja i nesimetrije rotorskog namotaja. Posledica aksijalnog magnetnog fluksa su lokalne struje ležajeva (slika 2).
- Elektrostatičko naelektrisanje kao posledica trenja pare i kapljica vode o lopatice turbine. (slika 3).
- Napon spoljašnjeg porekla na namotaju rotora usled statičkog sistema pobude generatora, nesimetrije izolacije rotorskog namotaja i aktivnim sistemom zaštita rotora (slika 4).

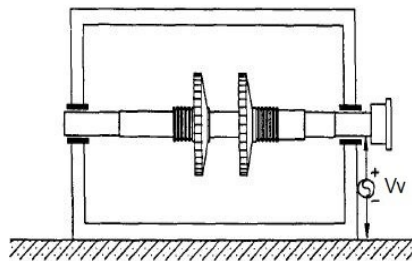
Prva dva uzroka su induktivne prirode sa naponima manje amplitude. Međutim, ukoliko je otpor električnog kola (vratilo – ležajevi – kućište generatora) mali, mogu se javiti velike vrednosti struje kroz ležajeve koje mogu izazvati oštećenje ležajeva. Druga dva uzroka ne mogu dovesti do velikih vrednosti niskofrekventnih struja, ali mogu prouzrokovati velike vrednosti napona koje ukoliko su prisutne duže vreme mogu dovesti do razaranja ležaja. Ovi naponi se sastoje od niskofrekventne (NF) komponente sa trostrukom osnovnom učestanošću i visokofrekventne (VF) komponente. VF komponenta napona koja potiče od komutacije tiristora statičkog sistema pobude se superponira na NF komponentu i od nje može biti veća i nekoliko desetina puta. Dakle, statički sistemi pobuda su jedan od uzroka postojanja potencijala vratila kod turboagregata. U nastavku rada analiziraće se uticaj tiristorakog sistema pobude na vrednost potencijala vratila i biće razmotrene preventivne mere za sprečavanje pojave ležajnih struja i potencijala vratila. [1], [2], [4], [5]



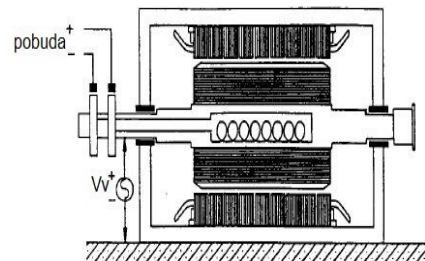
Slika 1. Magnetna nesimetrija kao uzrok postojanja potencijala vratila



Slika 2. Aksijalni magnetni fluks kao uzrok postojanja potencijala vratila



Slika 3. Elektrostatičko naelektrisanje kao uzrok postojanja potencijala vratila



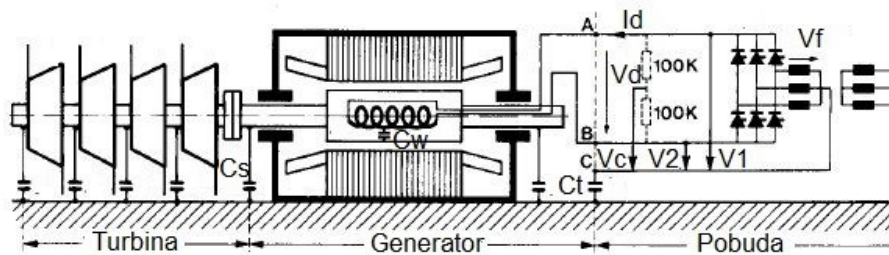
Slika 4. Napon spoljašnjeg porekla na namotaju rotora kao uzrok postojanja potencijala vratila

### 3. Uticaj statičkog sistema pobude na potencijal vratila

Na osnovu prethodnog razmatranja jasno je da pikovi napona usled komutacije tiristora u statičkim pobudnim sistemima mogu da dovedu do opasnih posledica čak iako su preduzete mere za sprečavanje nastajanja opasnih ležajnih struja i potencijala vratila. Ovi naponi se prenose na ležajeve zahvaljujući parazitskoj kapacitivnosti pobudnog transformatora prema zemlji ( $C_t$ ), parazitskoj kapacitivnosti namotaja rotora prema gvožđu rotora ( $C_w$ ) i parazitskoj kapacitivnosti linije vratila prema zemlji koja se pre svega svodi na kapacitivnost ležaja prema zemlji ( $C_s$ ). Potencijal na poslednjoj kapacitivnosti upravo predstavlja potencijal vratila  $V_s$ . [3], [5]

Na slici 5 je prikazana podužna dispozicija turboagregata. Ispravljeni napon trofaznog punoupovršljivog tiristorskog mosta ( $V_d$ ) dat je sledećim izrazom:

$$V_d = V_1 - V_2 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_f \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X I_d \quad (1)$$

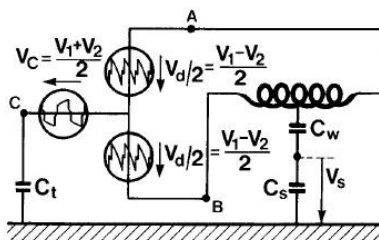


Slika 5. Podužna dispozicija turboagregata

gde su  $V_1$  i  $V_2$  - potencijal anodne i katodne grupe tiristorskog mosta prema zvezdištu pobudnog (ispravljačkog) transformatora respektivno,  $V_f$  - fazni napon sekundara pobudnog transformatora,  $X$  – komutaciona reaktansa i  $I_d$  – ispravljena pobudna struja. Napon tiristorskog mosta prema zvezdištu pobudnog transformatora  $V_c$  je pravougaonog oblika trostruke osnovne frekvencije i dat je sledećim izrazom:

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2)$$

Na slici 6 prikazana je uprošćena zamenska šema sistema pobude na kojoj su definisane veličine i parametri koje imaju uticaja na formiranje niskofrekventne komponente potencijala vratila. [3], [5]



Slika 6. Zamenska šema pobudnog sistema u analizi potencijala vratila

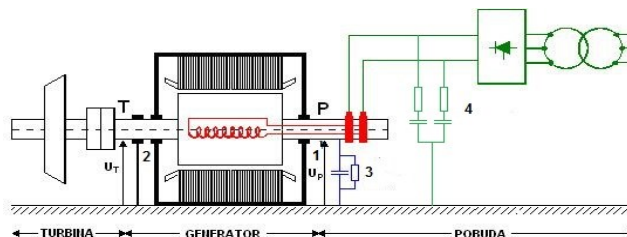
Na osnovu ove zamenske šeme potencijal vratila se može izraziti na sledeći način:

$$V_v = \frac{C_t C_w}{C_t C_w + C_t C_s + C_s C_w} V_c \quad (3)$$

Na osnovu ove relacije vidi se da je potencijal vratila direktno srazmeran veličini napona  $V_c$  koji zavisi od faznog napona sekundara pobudnog transformatora. Takođe, jasno je da potencijal vratila zavisi od kapaciteta vratila prema masi koji je definisan kvalitetom izolacije ležajeva. [3], [5]

#### 4. Preventivne mere za smanjenje ležajnih struja i opasnih potencijala vratila

Na slici 7 prikazana je još jednom podužna dispozicija turboagregata i na njoj obeležene sve potrebne mere za smanjenje ležajnih struja i opasnih potencijala vratila.



Slika 7. Podužna dispozicija turboagregata sa preventivnim merama za smanjenje ležajnih struja i opasnih potencijala vratila

Postavljanjem izolacionog materijala između kućišta ležaja i uzemljene podloge na strani pobude mogu se smanjiti veličine struje koje potiču od induktivnih izvora. Ova preventivna mera je obeležena brojem 1 na slici 7.

Sledeća preventivna mera obeležena je brojem 2 i predstavlja dovođenje vratila generatora na potencijal zemlje pomoću posebnih četkica za uzemljenje vratila postavljenih između generatora i turbine niskog pritiska. Međutim ovaj način uzemljenja često nije dovoljno pouzdan jer zbog velike periferijske brzine na obodu vratila četkice ne naležu dobro na njega. Dodatno, često se dešava da se ove četkice zaprljaju uljem čime se smanjuje električni kontakt između vratila i četkica. Bolje naleganje četkica se može ostvariti na delu vratila kod turbine visokog pritiska zbog manje periferijske brzine na vratilu. U praksi se pokazalo da se mnogo bolji električni kontakt može ostvariti pomoću bakarne pletenice na čijem dnu se nalazi mali teg zbog mnogo veće dodirne površine sa vratilom od četkica (slika 8).

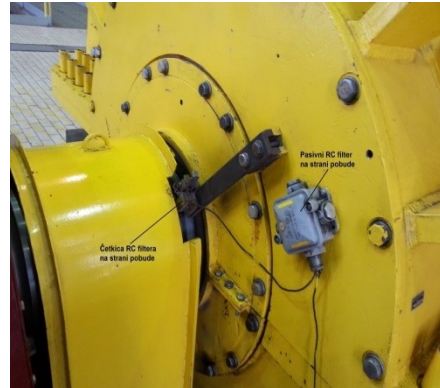
Još jedna preventivna mera koja se koristi je pasivni RC filter koji se postavlja na delu vratila prema pobudi. RC filter je na slici 7 obeležen brojem 3 i služi za smanjenje visokofrekventne komponente napona koja potiče od statičkog sistema pobude (slika 9).

Osim ovog filtera neophodno je ugraditi i simetrični filter na jednosmernoj strani sistema pobude koji je obeležen brojem 4 na slici 7. [3], [5]

Poželjno je i eliminisati nesimetriju u kolu pobude i minimizirati sve parazitske kapacitivnosti.



Slika 8. Bakarna pletenica za uzemljenje vratila na strani turbine



Slika 9. RC filter na strani pobude

## 5. Eksperimentalna merenja potencijala vratila

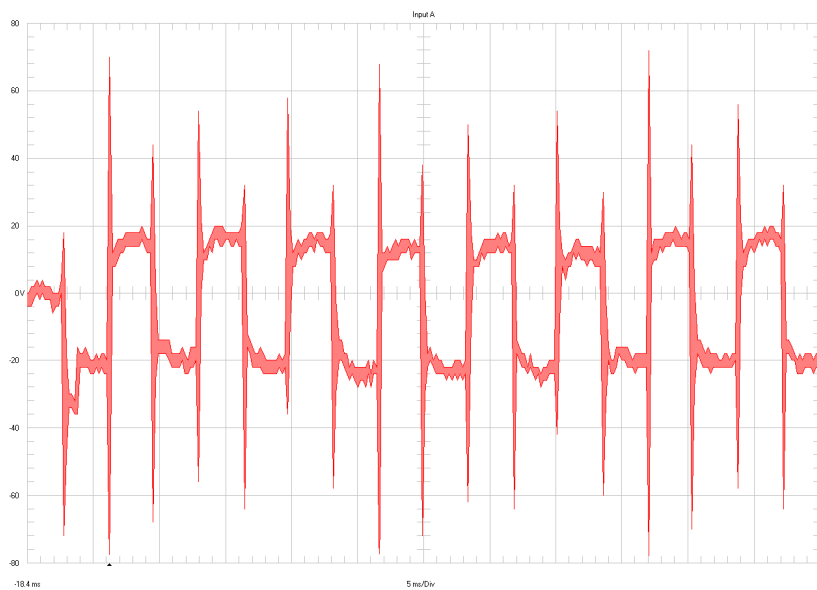
Kao što je već napomenuto potencijal vratila se sastoji od niskofrekventne komponente na koju je superponirana visokofrekventna komponenta koja je prouzrokovana komutacijama tiristora statičkog pobudnog sistema. Zbog toga je prilikom određivanja veličine potencijala vratila potrebno snimiti osciloskopom njegov talasni oblik i sa snimka očitati vrednosti visokofrekventnih pikova. Potrebno je snimiti sledeće talasne oblike:

- Između dela vratila kod pobude i uzemljene podloge (tačka P na slici 7)
- Između dela vratila kod turbine niskog pritiska i uzemljene podloge (tačka T na slici 7)
- Između dela vratila kod pobude i dela vratila kod turbine (između tačaka P i T na slici 7)

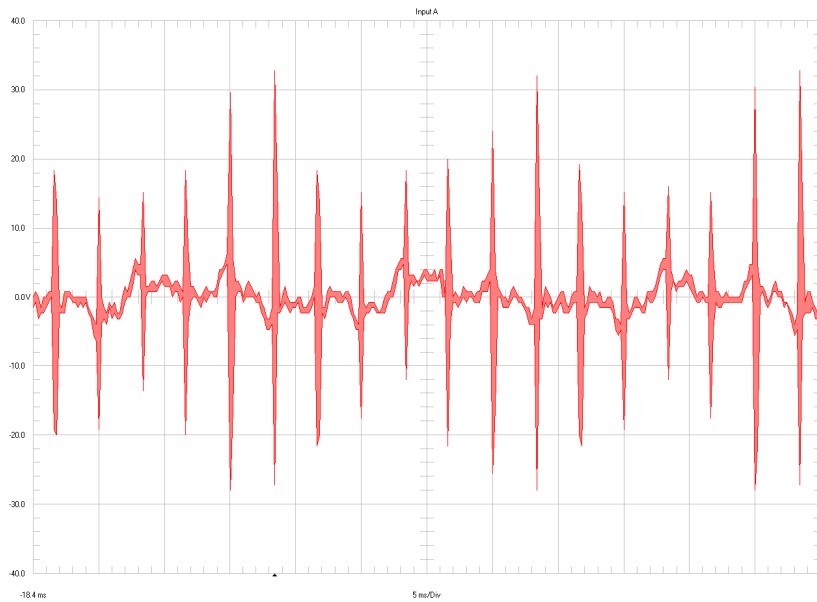
Za merenje potencijala vratila koriste se bakarni kablovi većeg preseka u obliku štapa sa skinutom izolacijom i raspredeni na jednom kraju i digitalni osciloskop. Na osnovu ranijih merenja nisu uočene veće razlike vrednosti potencijala vratila pri promeni reaktivne snage generatora pa se merenja obavljaju samo sa zatečenim radnim režimom, pri radu generatora na mreži sa  $P=345\text{MW}$  i  $Q=59\text{MVAR}$ . U nastavku su dati snimci merenja potencijala vratila na jednom turbogeneratoru u okviru Elektroprivrede Srbije.

Na osnovu analize snimaka utvrđeno je da četkica RC filtera i četkice za uzemljenje na strani turbine nemaju dobar kontakt sa vratilom generatora. Zbog toga su vršena merenja sa i bez pritiskanja ovih četkica. U tabeli 2 date su vrednosti potencijala vratila za ova dva slučaja – maksimalne apsolutne vrednosti niskofrekventne i visokofrekventne komponente potencijala vratila. Dobijeni rezultati pokazuju da izmerene vrednosti NF i VF komponente

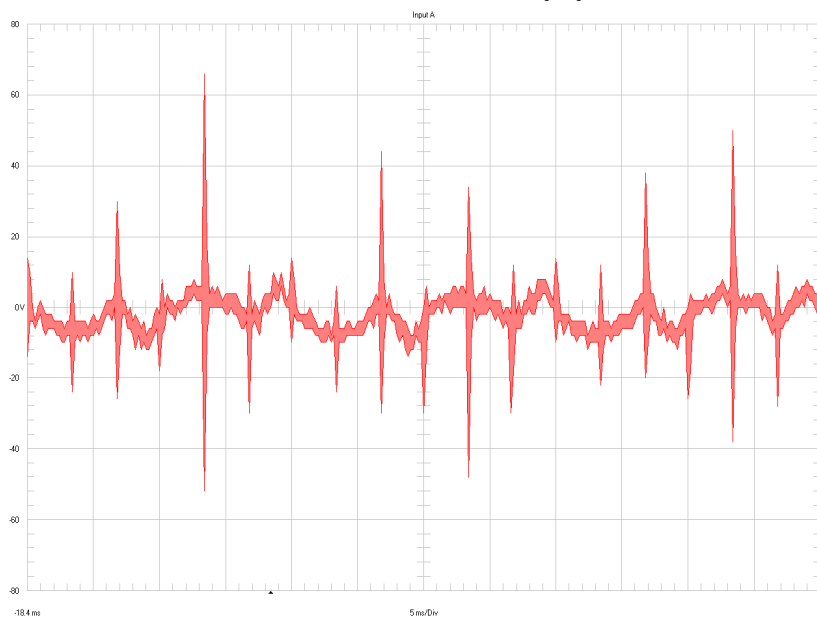
potencijala vratila bez pritisnutih četkica RC filtera i četkica za uzemljenje vratila imaju vrednosti koje odstupaju od vrednosti koje se uzimaju kao zadovoljavajuće (10V za NF komponentu i 30V za VF komponentu). Ovo su vrednosti pri kojima se neće pojaviti elektroerozija i oštećenje ležajeva [5]. Poređenjem snimaka bez i sa pritiskanjem četkice RC filtera i četkica za uzemljenje ustanovljeno je da pritiskanjem četkica dolazi do značajnijeg smanjenja potencijala vratila i u tom slučaju izmerene vrednosti NF i VF komponente imaju vrednosti koje se uzimaju kao zadovoljavajuće.



Slika 10. Talasni oblik potencijala vratila u tački P prema uzemljenju bez pritiskanja četkice RC filtera i četkica za uzemljenje vratila

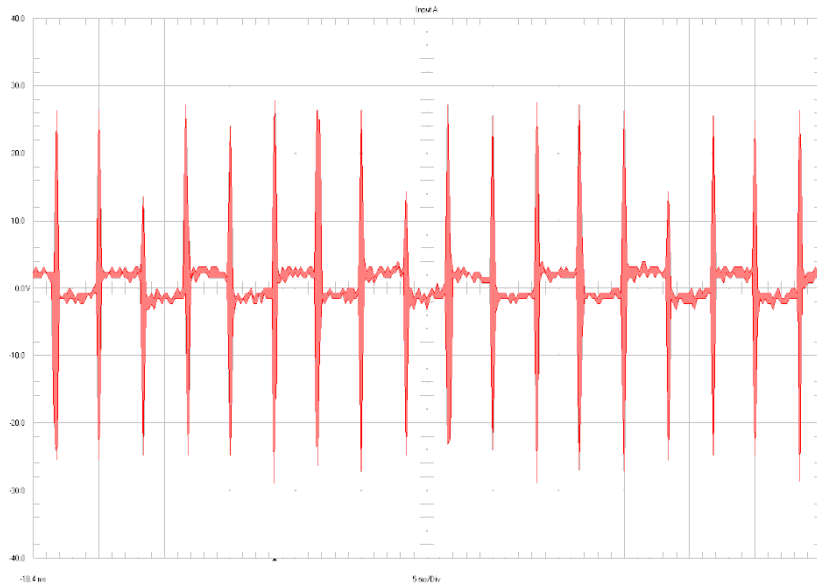


**Slika 11. Talasni oblik potencijala vratila u tački T prema uzemljenju bez pritiskanja četkice RC filtera i četkica za uzemljenje vratila**

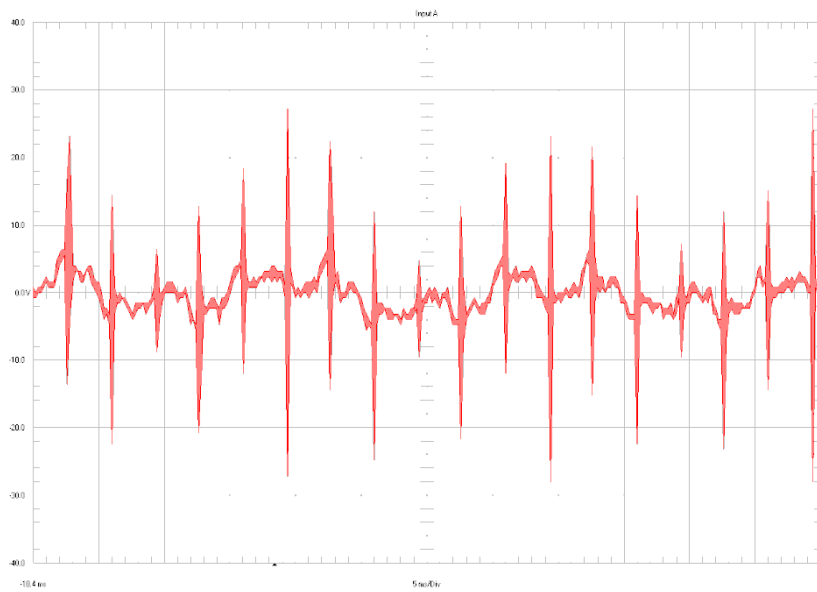


**Slika 12. Talasni oblik potencijala vratila između tačaka P i T bez pritiskanja četkice RC filtera i četkica za uzemljenje vratila**

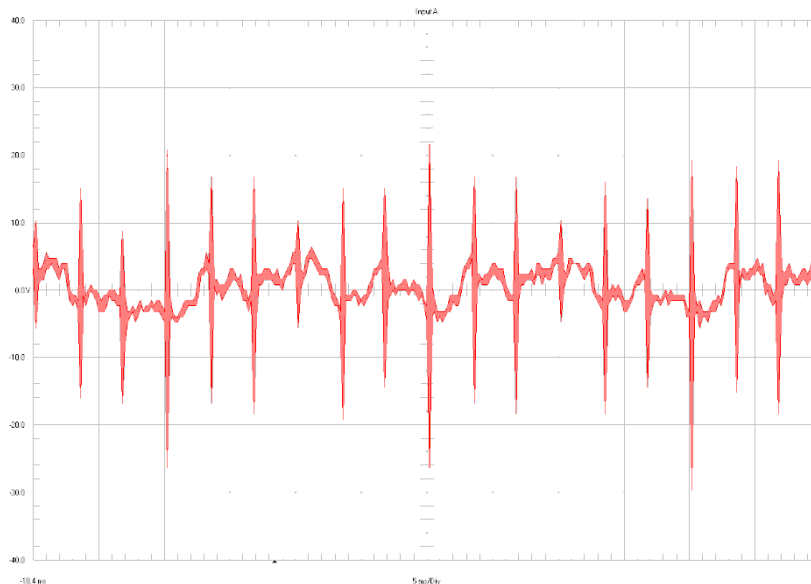




*Slika 13. Talasni oblik potencijala vratila u tački P prema uzemljenju sa pritiskanjem četkice RC filtera i četkica za uzemljenje vratila*



*Slika 14. Talasni oblik potencijala vratila u tački T prema uzemljenju sa pritiskanjem četkice RC filtera i četkica za uzemljenje vratila*



Slika 15. Talasni oblik potencijala vratila između tačaka P i T sa pritiskanjem četkice RC filtera i četkica za uzemljenje vratila

Tabela 2. Rezultati merenja potencijala vratila turbogenerators bez i sa pritiskanjem četkice RC filtera na strani pobude i četkica za uzemljenje vratila na strani turbine

Mesto merenja		abs $U_{NF}$ (V) max	abs $U_{VF}$ (V) max
P ↔ GND	bez pritiskanja četkica	24	79
	sa pritiskanjem četkica	4	29
T ↔ GND	bez pritiskanja četkica	4	32
	sa pritiskanjem četkica	3	28
P ↔ T	bez pritiskanja četkica	7	65
	sa pritiskanjem četkica	5	29

## 6. Zaključak

Na osnovu teorijskih razmatranja i eksperimentalnih rezultata je utvrđeno da su statički sistemi pobuda jedan od uzroka pojave opasnih potencijala vratila i ležajnih struja. Veličina potencijala vratila zavisi od: veličine faznog (linijskog) napona sekundara pobudnog transformatora, kvaliteta uzemljenja četkice između generatora i turbine niskog pritiska, kvaliteta izolacije ležajeva na strani pobude, pasivnog RC filtera na strani pobude. Posebnu pažnju treba obratiti na kvalitet uzemljenja vratila između generatora i turbine niskog pritiska. Veličina

visokofrekventne komponente koja potiče od statičkog sistema pobude ne bi trebala da prelazi vrednosti od 30V jer pri tim vrednostima neće doći do elektroerozije i oštećenja ležajeva.

## Literatura

- [1] A. Meyer, R. Joho, Z. Posedel, K. Reichert, and C. Ammann. "Shaft Voltages in Turbosets: Recent Development of a New Grounding Design to Improve The Reliability of the Bearings." In *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*. 1988.
- [2] J. E. Torlay, C. Corenwinder, A. Audoli, J. Herigault and A. Foggia, "Analysis of shaft voltages in large synchronous generators," *Electric Machines and Drives*, 1999. *International Conference IEMD '99*, Seattle, WA, 1999, pp. 607-609. doi: 10.1109/IEMDC.1999.769189
- [3] C. Ammann, K. Reichert, R. Joho and Z. Posedel, "Shaft voltages in generators with static excitation systems-problems and solution," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 2, pp. 409-419, Jun 1988. doi: 10.1109/60.4749
- [4] M. J. Costello, "Shaft voltages and rotating machinery," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 419-426, Mar/Apr 1993 doi: 10.1109/28.216553
- [5] Z. Ćirić, I. Stevanović, D. Petrović, "Eksperimentalna istraživanja, analiza nastanka i posledice potencijala vratila i ležajnih struja kod savremenih turboagregata", 24. *Savetovanje JUKO CIGRE*, Vrnjačka Banja, 17-20.10.1999.

**Abstract:** The paper presents an analyses of shaft voltage and bearing current phenomena in electrical machines. An overview of the causes of these voltages and currents and their possible consequences is also given. The influence of the thyristor excitation system on the level of shaft voltages is examined, followed by the proposal of a measuring method and the preventive measures for shaft voltage reduction. Finally the paper reports the experimental measurements of shaft voltages on a turbo set that is a part of the Electric Power Industry of Serbia.

**Keywords:** turboset, shaft voltages, static excitation system, bearing currents

## Turboset shaft voltage

Rad primljen u uredništvo: 19.10.2016. godine.

Rad prihvaćen: 05.12.2016. godine.

