

DOI: [10.46793/CIGRE37.A1.06](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A1.06)

A1.06

**PRAĆENJE STANJA NAPONA VRATILA U REVITALIZOVANIM GENERATORIMA U
HE "ĐERDAP 1"****MONITORING THE STATE OF SHAFT VOLTAGE IN REVITALIZED GENERATORS
AT THE DJERDAP 1 HPP****Milan Mišić, Dragan Nikolić, Miloš Gicić, Dragan Gluvačević, Žarko Nestorović,
Dragan Belonić, Petar Nikolić***

Kratak sadržaj: Šest hidroagregata u HE "Đerdap 1" je nakon završene revitalizacije započelo novi radni vek. Revitalizovani agregati su opremljeni savremenim uređajima za praćenje pogonskog stanja sa ciljem da se umanju rizik od ispada iz pogona, smanje troškovi održavanja i produži radni vek opreme. Pored toga osoblje elektrane periodično sprovodi dodatna merenja i analize na pojedinim sklopovima i delovima opreme u cilju blagovremenog otkrivanja odstupanja određenih parametara od vrednosti koje su uobičajene za pogon. Jedan od parametara koji se periodično meri je indukovani napon na vratilu hidroagregata. U ovom radu su predstavljeni rezultati merenja potencijala vratila u prethodnom periodu. Izvedeni zaključci i merenja prikazana u ovom radu mogu pomoći u razumevanju pojava ležajnih struja i potrebnim merama za smanjenje negativnih uticaja na ležajeve kao i drugih nepravilnosti u radu hidroagregata.

Ključne reči: *sinhroni generator, indukovani napon vratila, struje ležajeva*

Abstract: Six hydropower units at the Đerdap 1 HPP have begun a new operating life after the revitalization. The revitalized units are equipped with modern devices for monitoring the operating condition in order to reduce the risk of outages, reduce maintenance costs and extend the service life of the equipment. In addition, the power plant staff periodically conducts additional measurements and analyses on individual assemblies and parts of the equipment in order to promptly detect deviations of certain parameters from the values that are common for the plant. One of the parameters that is periodically measured is the induced voltage on the shaft of the hydropower unit. This paper presents the results of shaft potential measurements in the previous period. The conclusions and measurements presented in this paper can help in understanding the occurrence of bearing currents and the necessary measures to reduce negative impacts on bearings as well as other irregularities in the operation of the hydropower unit.

Key words: *synchronous generator, induced shaft voltage, bearing currents*

*Milan Mišić, EPS AD Beograd Ogranak Đerdap Kladovo, milan.misic@eps.rs
Dragan Nikolić, EPS AD Beograd Ogranak Đerdap Kladovo, dragan.dj.nikolic@eps.rs
Miloš Gicić, EPS AD Beograd Ogranak Đerdap Kladovo, milos.gicic@eps.rs
Dragan Gluvačević, EPS AD Beograd Ogranak Đerdap Kladovo, dragan.gluvicevic@eps.rs
Žarko Nestorović, EPS AD Beograd Ogranak HE Đerdap, HE "Đerdap 1", zarko.nestorovic@eps.rs
Dragan Belonić, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", d.belonic73@gmail.com
Petar Nikolić, EPS AD Beograd Ogranak Đerdap Kladovo, petar.m.nikolic@eps.rs

1 UVOD

Fenomen pojave indukovanog napona na vratilu i ležajnih struja kod obrtnih električnih mašina poznat je preko sto godina [1]. Ustanovljeno je da ukoliko se pojavi razlika potencijala između vratila i uzemljenih delova mašine, pod određenim uslovima, može da dođe do električnog pražnjenja tj. proticanja struje kroz ležajeve ili kroz druge zaptivne elemente mašina. U praksi su zabeleženi slučajevi oštećenja i kvarova na ležajevima obrtnih mašina, kao posledica proticanja ležajnih struja od vratila ka uzemljenim delovima ležaja, najčešće preko parazitnih kapaciteta u uspostavljenom strujnom krugu [2]. Kada su u pitanju veliki agregati koji se koriste za proizvodnju električne energije, mehanizmi nastanka indukovnog napona vratila i ležajnih struja imaju određene razlike. Te razlike zavise od toga da li se radi o turboagregatu ili hidroagregatu, uglavnom zbog konstrukcijskih i operativnih specifičnosti ovih mašina. Takođe, tip i konstrukcija ležaja značajno utiču na pojavu ležajnih struja, pri čemu je ova pojava manje izražena kod ležajeva sa izolovanim segmentima u poređenju sa ležajevima čiji su klizni segmenti izrađeni od provodnog materijala. Iako se problemi sa indukovanim naponom na vratilu i strujama u ležajevima izučavaju decenijama to je još uvek vrlo značajna tema zbog složenih mehanizama koji dovode do ove pojave a koje je teško detektovati i kontrolisati [3].

Najčešći uzroci indukovanja napona na vratilu hidroagregata [4] su:

- Magnetne nesimetrije izazvane ekscentričnošću rotora i vazдушnim zazorom između rotora i statora,
- Aksijalni magnetni fluks koji je posledica remanentnog magnetizma, ekscentričnosti rotora, zasićenja i nesimetrije rotorskog namotaja i
- Napon na namotaju rotora sa statičkog sistema pobude generatora, nesimetrija izolacije rotorskog namotaja.

Na vratilu hidroagregata indukuje se napon koji se sastoji od niskofrekventnih i visokofrekventnih komponenti. Niskofrekventne komponente posledica su magnetne nesimetrije i aksijalnog magnetnog fluksa i manjih su amplituda. Visokofrekventne komponente najčešća su posledica napona na namotaju rotora od strane statičkog sistema pobude i većih su amplituda. Visokofrekventne komponente superponiraju se na niskofrekventne.

Najčešće tehnike koje proizvođači obrtnih mašina primenjuju za smanjenje štetnih uticaja pojave indukovnog napona na vratilu i ležajnih struja su: uzemljenje vratila primenom RC filtera za smanjenje amplitude visokofrekventne komponente na strani kontaktnih prstenova, upotreba ležajeva sa izolacionim segmentima. Takođe, osim redovnog pregleda i praćenja stanja ležajeva, preporučuje se i periodično merenje napona i struje vratila u pogonu. U standardu IEEE Std 112-2004 [5] date su smernice za merenje napona na vratilu dok je mašina u radu, pri nazivnom naponu i pri nominalnoj brzini okretanja. Za merenje napona se preporučuje upotreba osciloskopa velike ulazne impedanse jer su signali sa vratila "bogatiji" harmonicima osnovne učestanosti. Alternativno se može koristiti i TRMS multimetar uz određenu aproksimaciju vršnih vrednosti indukovnog napona.

Hidroelektrana Đerdap 1 nalazi se na Dunavu (943 km od ušća Dunava u Crno More) između Srbije i Rumunije i karakteristična je po tome što se potencijalna energija reke deli ravnopravno između dve susedne zemlje. Izgrađena je šezdesetih godina dvadesetog veka i šest hidroagregata u HE Đerdap 1 je ušlo u pogon između 06. avgusta 1970. i 16. maja 1972. godine.

Posle višedecenijske uspešne eksploatacije izvršena je revitalizacija svih šest agregata sa povećanjem snage svakog agregata sa 190 MVA na 211,11 MVA, u periodu između 2011. i 2023. godine.

Hidroagregati u HE Đerdap 1 imaju dva vodeća i jedan noseći ležaj. Karakteristično je da su prilikom revitalizacije agregata na svim ležajevima ugrađeni segmenti sa teflonskom prevlakom za razliku od originalnih mašina čiji su segmenti bili presvučeni babbitom. Vratilo je uzemljeno preko turbine koja je neprekidno potopljena u vodi i drugih uzemljenih tačaka na vratilu nema.

Pored savremenih uređaja za on-line monitoring rada generatora, kao što su monitoring vibracija i vazdušnih zazora i monitoring parcijalnih pražnjenja, za praćenje stanja revitalizovanih agregata u HE Đerdap 1 uvedeno je i ispitivanje indukovanog napona na vratilu u radu agregata. Osnovna svrha periodičnog snimanja napona vratila je da se rano uoči eventualno odstupanje izmerenih vrednosti u odnosu na rezultate početnih i svih kasnijih merenja, što može da ukaže na pogoršanje performansi izolacije ležaja, probleme sa magnetnim debalansom, probleme sa pobudom i dr. [6].

U ovom radu prikazani su rezultati merenja napona vratila pri maksimalnim snagama hidroagregata i izvršeno je poređenje izmerenih napona sa tri merna mesta za sve hidroagregate od A1 do A6. U radu su prikazani snimljeni talasni oblici u vremenskom i frekventnom domenu samo za hidroagregate A2 i A6.

2 METODOLOGIJA

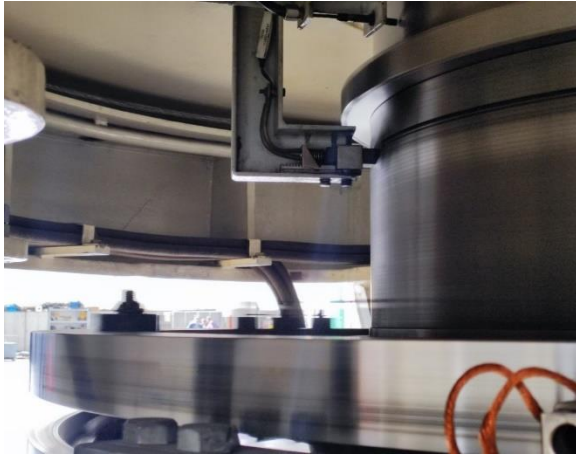
2.1 Merenje indukovanog napona na vratilu

Merenje indukovanog napona vratila vršeno je pomoću osciloskopa Fluke tipa 199B. Za analizu izmerenih napona u računaru korišćen je softverski paket FlukeView. Usporedna analiza napona vratila hidroagregata vršena je na osnovu merenja tri napona:

- Mereni napon M1 - napon vratila između četkice na vratilu u zoni uljne glave i mase u ormanu pobude,
- Mereni napon M2 - napon vratila između četkice na vratilu u zoni uljne glave i tačke na vratilu u zoni turbine, i
- Mereni napon M3 - napon vratila između tačke na vratilu u zoni turbine i mase u ormanu pobude.

Dve merne tačke koje se nalaze na samom vratilu prikazane su na slici 1. Grafitna četkica koja dodiruje vratilo na slici 1a) nije uzemljena već je namenjena za rad sistema električnih zaštita agregata.

Merenja su vršena sukcesivno jer je korišćen samo jedan pribor za sva merenja. Izmerene vrednosti napona vratila se u softverskom paketu FlukeView registruju u vidu opsega tako da za svaki trenutak postoje po dva podatka koji predstavljaju maksimalnu i minimalnu vrednost napona u datom trenutku. Softverski paket FlukeView nema mogućnost izvoza svih podataka koji su prikazani na dijagramu samog uređaja, već je kvalitet ograničen na 600 podataka (po 300 podataka za minimalnu i 300 podataka za maksimalnu vrednost napona u jednom trenutku). Iz tog razloga redukovani skup podataka eksportovanih iz osciloskopa, koji su korišćeni za dalju analizu, može da dovede do različitih rezultata u odnosu na analizu koja bi bila primenjena na kompletnom skupu snimljenih podataka.



a) Četkica na vratilu u zoni uljne glave

b) Tačka na vratilu u zoni turbine

Slika 1: Merne tačke na vratilu

2.2 Predstavljanje podataka matematičkim funkcijama

Podaci koji su eksportovani iz osciloskopa upotrebljeni su za dobijanje matematičkih funkcija u cilju pronalaženje analitičke metode za upoređivanje podataka. Metoda za poređenje podataka o indukovanim naponima za različite agregate zasniva se na određivanju parametara koji opisuju sinusoide dobijenih rezultata. Parametri se određuju po metodi najmanjih kvadrata kao i standardne devijacije parametara. Na osnovu dobijenih rezultata vrši se statistička analiza odnosno testiraju se hipoteze o jednakosti karakteristika sinusoidnih funkcija za sve agregate i utvrđuje se njihova jednakost. Polazni matematički model glasi:

$$V(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

gde je:

- $V(t)$ – izmerena vrednost napona u trenutku t ,
- A – amplituda,
- ω – ugaona frekvencija i
- φ – fazni stav.

Razvojem jednačine (1) dobija se:

$$V(t) = A \sin(\omega t) \cos(\varphi) + A \cos(\omega t) \sin(\varphi) \quad (2)$$

Daljom smenom dobijamo:

$$V(t) = \alpha \sin(\omega t) + \beta \cos(\omega t) \quad (3)$$

pri čemu je:

$$\alpha = A \cos(\varphi), \quad \beta = A \sin(\varphi)$$

Konačan oblik funkcije veza između pojedinih merenja i nepoznatih parametara glasi:

$$V_i = \alpha \sin(\omega t_i) + \beta \cos(\omega t_i) \quad (4)$$

Rešenje sistema linearnih jednačina

$$\mathbf{v} = \mathbf{C} \quad (5)$$

gde je:

- $\mathbf{v}$ – vektor merenih napona,
- $\mathbf{C}$ – matrica koeficijenata uz nepoznate i
- $\mathbf{x}$ – vektor nepoznatih.

dobija se po metodi najmanjih kvadrata:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{v} \quad (6)$$

Razvijeni oblik vektora i matrica glasi:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(\omega t_n) & \cos(\omega t_n) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}^T \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \sin^2(\omega t_i) & \sum_{i=1}^n \sin(\omega t_i) \cos(\omega t_i) \\ \sum_{i=1}^n \sin(\omega t_i) \cos(\omega t_i) & \sum_{i=1}^n \cos^2(\omega t_i) \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} = \mathbf{Q} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \cos^2(\omega t_i) & -\sum_{i=1}^n \sin(\omega t_i) \cos(\omega t_i) \\ -\sum_{i=1}^n \sin(\omega t_i) \cos(\omega t_i) & \sum_{i=1}^n \sin^2(\omega t_i) \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \sin^2(\omega t_i) \sum_{i=1}^n \cos^2(\omega t_i) - \left[\sum_{i=1}^n \sin(\omega t_i) \cos(\omega t_i) \right]^2$$

Kada se izračunaju koeficijenti na osnovu njih se dobija amplituda A i fazni stav φ po sledećim formulama:

$$A = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \sqrt{[A \cos(\varphi)]^2 + [A \sin(\varphi)]^2} \quad (7)$$

$$\varphi = \arctg \left[\frac{\beta}{\alpha} \right] = \arctg \left[\frac{A \sin(\varphi)}{A \cos(\varphi)} \right] \quad (8)$$

Srednje greške koeficijenata α i β dobijaju se po sledećoj formuli:

$$m_{\alpha,\beta} = m_0 \sqrt{q_{\alpha\alpha}, q_{\beta\beta}} \quad (9)$$

gde je:

$$m_0 = \sqrt{\frac{[\delta\delta]}{n-u}} \quad (10)$$

pri čemu su u formuli (10) korišćene sledeće oznake:

- δ – razlika merene vrednosti i vrednosti dobijene na osnovu modela za svako merenje,
- $[\]$ – oznaka za sumu,
- n – broj merenja,
- $q_{\alpha\alpha}, q_{\beta\beta}$ su članovi matrice $\mathbf{Q}$ na glavnoj dijagonali i
- u – broj nepoznatih (u ovom slučaju $u = 2$ odnosno nepoznati su koeficijenti α i β).

Prethodno opisani matematički model primenjen je na svaku grupu podataka i dobijeni podaci su statistički analizirani. Statistička analiza sprovodi se po postupku za testiranje jednakosti srednjih vrednosti i uz primenu studentovog t testa. Kako je broj stepeni slobode veliki ($f=298$) za testiranje statističkih hipoteza je korišćen test za normalnu raspodelu i nivo značajnosti $\alpha=0,05$ odnosno primenjen je test za verovatnoću 95% što je dovelo do strožeg zaključivanja o saglasnosti izmerenih podataka sa nultom hipotezom o jednakosti signala za dva agregata. Korišćena je metodologija iz literature o metodi najmanjih kvadrata [7]. Dobijeni podaci korigovani su za srednju vrednost dok testiranje na grube greške u metodi najmanjih kvadrata nije vršeno. Statistički test za testiranje jednakosti dve sinusoide glasi:

$$z = \frac{d}{m_d} \sim \mathcal{N}(0,1) \Rightarrow (p = 0.95) \Rightarrow \left(z = \frac{d}{m_d} < 1.96 \right) \Rightarrow \text{ne odbacujemo } H_0 \quad (11)$$

H_0 u ovom slučaju glasi da je $d = 0$ i znači da su posmatrani koeficijenti u jednačini (4) za dva agregata jednaki.

Ukoliko se testira značajnost pojedinih koeficijenata onda test statistika ima oblik:

$$z = \frac{\alpha; \beta}{m_{\alpha}; m_{\beta}} \sim \mathcal{N}(0,1) \Rightarrow (p = 0.95) \Rightarrow \left(z = \frac{\alpha; \beta}{m_{\alpha}; m_{\beta}} < 1.96 \right) \Rightarrow \text{ne odbacujemo } H_0 \quad (12)$$

H_0 u ovom slučaju znači da je $\alpha; \beta = 0$ odnosno da su posmatrani koeficijenti u jednačini (4) jednaki nuli. Jednostrano zaključivanje bez dodatnih analiza koeficijenata može dovesti do određenih paradoksa. Iz tog razloga je neophodno pažljivo primeniti statističku analizu i tumačenje rezultata za svaki slučaj posebno.

Testiranje jednakosti amplituda i faznih pomaka vrši se na sledeći način:

$$z_A = \frac{A_i - A_j}{m_{A_i - A_j}} \sim \mathcal{N}(0,1) \Rightarrow (p = 0.95) \Rightarrow \left(z = \frac{A_i - A_j}{m_{A_i - A_j}} < 1.96 \right) \Rightarrow \text{ne odbacujemo } H_0 \quad (13)$$

$$z_{\varphi} = \frac{\varphi_i - \varphi_j}{m_{\varphi_i - \varphi_j}} \sim \mathcal{N}(0,1) \Rightarrow (p = 0.95) \Rightarrow \left(z = \frac{\varphi_i - \varphi_j}{m_{\varphi_i - \varphi_j}} < 1.96 \right) \Rightarrow \text{ne odbacujemo } H_0 \quad (14)$$

pri čemu važi:

$$m_{A_i} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \sqrt{\alpha_i^2 * m_{\alpha_i}^2 + \beta_i^2 * m_{\beta_i}^2} \quad (15)$$

$$m_{\varphi_i} = \sqrt{\left(-\frac{\beta_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2}\right)^2 * m_{\alpha_i}^2 + \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2}\right)^2 * m_{\beta_i}^2}$$

$$m_{A_i-A_j} = \sqrt{m_{A_i}^2 + m_{A_j}^2} \quad (16)$$

Opisani matematički i statistički modeli koriste se za donošenje zaključaka o obrađenim podacima i karakteristikama agregata određenih na osnovu izmerenih podataka kako je to prikazano u daljem tekstu.

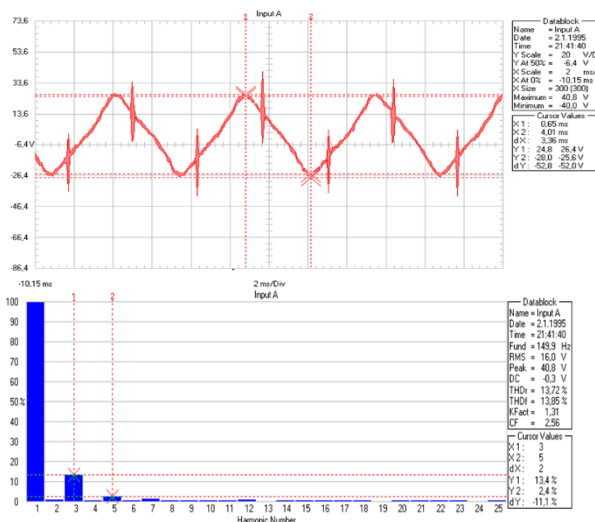
3 REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Analiza snimljenih napona vratila u vremenskom i frekventnom domenu

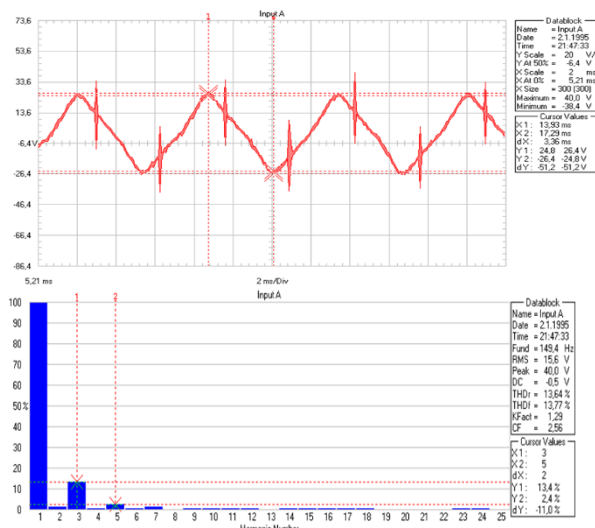
Snimljeni naponi vratila agregata sastoje se od niskofrekventnih i visokofrekventnih komponenti. Dominantna je niskofrekventna komponenta na trostrukoj mrežnoj učestanosti od 150 Hz, dok se visokofrekventne komponente identifikuju u obliku impulsa sa učestanošću reda veličine 200 kHz. Programski paket FlukeView omogućava prelaz iz vremenskog u frekventni domen korišćenjem Furijeove transformacije. U frekventnom domenu može se videti prisustvo viših harmonika niskofrekventne komponente napona vratila. Kod snimljenih indukovanih napona vratila M1 i M2 u najvećoj meri prisutni su 3. i 5. harmonik niskofrekventne komponente učestanosti 150 Hz.

Analizom snimljenih talasnih oblika napona vratila može se uočiti sličnost za hidroagregate A1, A2, A3, A4 i A5 dok se agregat A6 razlikuje po nekim parametrima. Na hidroagregatima A1, A2, A3, A4 i A5 oscilografski zapisi napona vratila imaju trougaoni karakter pri čemu se amplitude niskofrekventnih komponenti kreću u rasponu od 40 V do 52 V za režim rada agregata sa nazivnom snagom. Amplitude visokofrekventnih komponenti kreću se u granicama od 20 V do 50 V. Totalna harmonijska distorzija kreće se u granicama od 10 % do 13 %. Merni napon M3 na ovim hidroagregatima gubi niskofrekventnu komponentu i kod njega su prisutne samo visokofrekventne komponente. Na slikama 2a i 2b prikazani su talasni oblici mernih napona M1 i M2 agregata A2 u vremenskom i frekventnom domenu.

Na hidroagregatu A6 niskofrekventna komponenta snimljenih napona M1 i M2 ima izraženiji karakter sinusnog oblika pri čemu je amplituda niža u odnosu na ostale hidroagregate tj. kreće se u rasponu od 20 V do 26 V. Amplitude visokofrekventnih komponenti kreću se u granicama od 30 V do 50 V. Totalna harmonijska distorzija kreće se u granicama od 5 % do 6 %. Može se uočiti da su uticaj 3. i 5. harmonika značajno manji u odnosu na ostalih pet hidroagregata. Na slikama 3a i 3b prikazani su talasni oblici mernih napona M1 i M2 agregata A6 u vremenskom i frekventnom domenu.

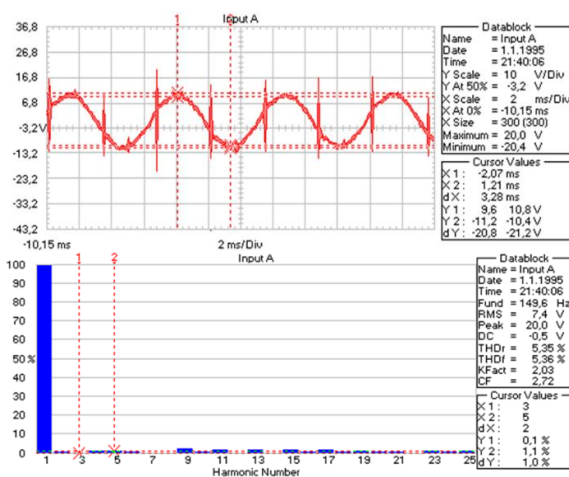


a) Agregat A2 - Merni napon M1

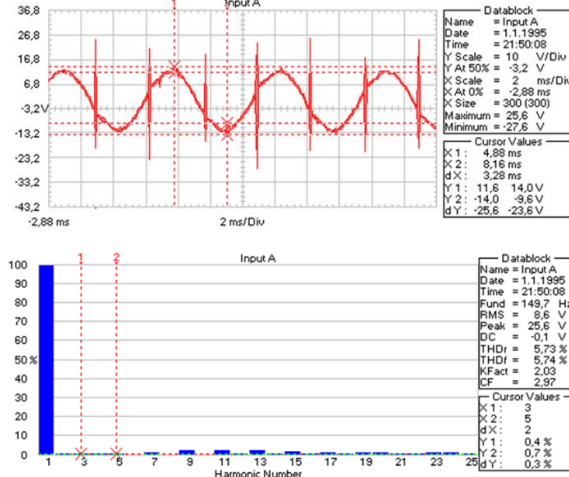


b) Agregat A2 - Merni napon M2

Slika 2: Uporedni prikaz mernih napona M1 i M2 agregata A2



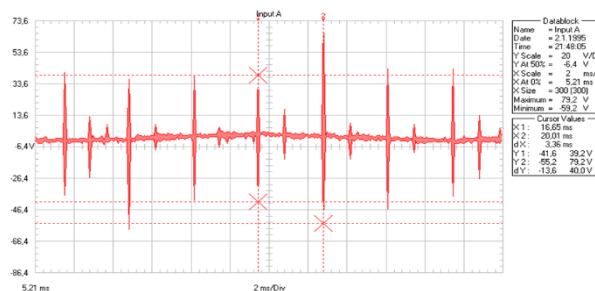
a) Agregat A6 - Merni napon M1



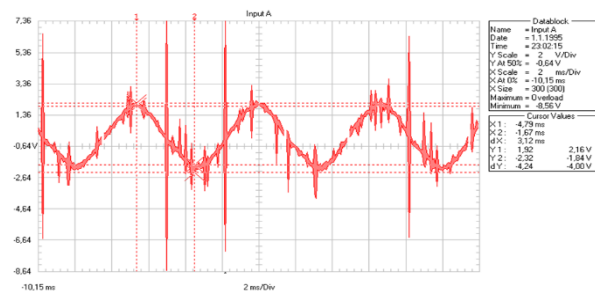
b) Agregat A6 - Merni napon M2

Slika 3: Uporedni prikaz mernih napona M1 i M2 agregata A6

Merni napon M3 na agregatu A6 sadrži sinusnu niskofrekventnu komponentu učestanosti 150 Hz, za razliku od ostalih hidroagregata kod kojih merni napon M3 ne sadrži niskofrekventnu komponentu. Amplituda mernog napona M3 na agregatu A6 iznosi do 5 V u režima rada sa nazivnom snagom. Na slikama 4a i 4b uporedno su prikazani talasni oblici mernog napona M3 u vremenskom domenu na agregatima A2 i A6.



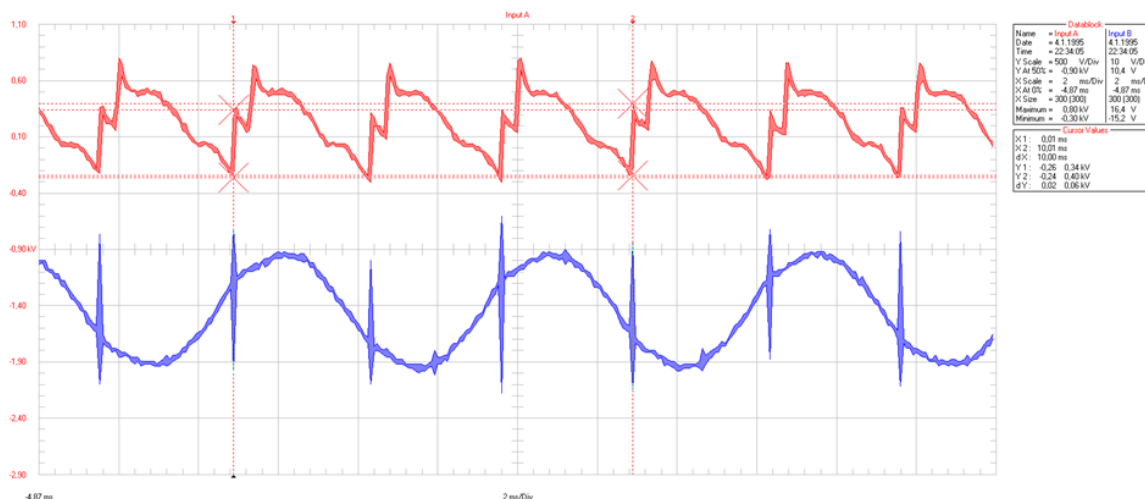
a) Agregat A2 - Merni napon M3



b) Agregat A6 - Merni napon M3

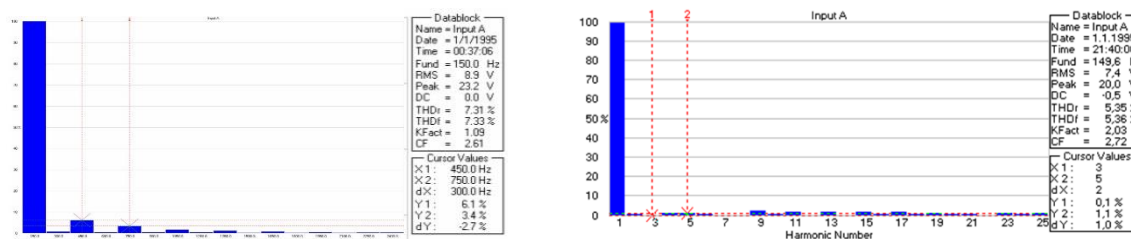
Slika 4: Uporedni prikaz mernih napona M3 agregata A2 i A6

Radi identifikovanja uzroka postojanja visokofrekventnih komponenti u talasnim oblicima napona vratila vršeno je istovremeno snimanje napona pobude glavnog generatora i napona vratila hidroagregata A6. Time je potvrđena tvrdnja da su visokofrekventne komponente napona vratila posledica komutacije tiristora u tiristorskoj statičkoj pobudi. Pobudni sistem glavnog generatora pretvara trofazni naizmenični napon sa statora pomoćnog generatora u jednosmerni napon za pobudu glavnog generatora. Trenuci komutacije tiristora pri prelazu na drugu fazu uzrokuju visokofrekventne komponente u indukovanom naponu vratila. Na slici 5 prikazani su napon pobude glavnog generatora (crvena kriva) i merni napon M1 (plava kriva).



Slika 5: Agregat A6 – Merni napon M1 (plava kriva) i napon pobude (crvena kriva)

Prilikom primopredajnih ispitivanja agregata A6 u junu 2011. godine izvršeno je snimanje talasnog oblika napona vratila u vremenskom i frekventnom domenu. Na slici 6a prikazan je napon vratila u frekventnom domenu nakon završetka revitalizacije 2011. godine, a na slici 6b merni napon M1 u frekventnom domenu prilikom merenja u martu 2025. godine. Smanjen je sadržaj ovih harmonika u odnosu na 2011. godinu.



a) Agregat A6 - Merni napon M1, jun 2011. b) Agregat A6 - Merni napon M1, mart 2025.

Slika 6: Uporedni prikaz mernih napona M1 u frekventnom domenu agregata A6

3.2 Analiza podataka dobijenih matematičkim modelovanjem

Dobijeni rezultati statističkih testova za jednakost amplituda po formulama (13), (15) i (16) prikazani su u tabeli 1. Rezultat „Ho“ označava da su amplitude statistički jednake (da je njihova razlika statistički jednaka nuli), dok oznaka „Ha“ znači da se amplitude značajno razlikuju u statističkom smislu.

Na osnovu dobijenih rezultata testiranja statističkih hipoteza neposredno sledi da se jednakost amplituda pojavljuje u vrlo malom broju slučajeva na mernim mestima M1, M2 i M3 dok se za merno mesto M2 pojavljuje statistički značajna razlika samo u slučaju agregata A6. Razlika amplituda na mernom mestu M2 nije velika u apsolutnom iznosu ali se njena statistička značajnost pojavljuje zbog malih srednjih grešaka sa kojima je određena.

Tabela 1. Rezultati statističkih testova za jednakost amplituda po agregatima i mernim mestima

M1					M2					M3				
A_i	A_j	$A_i - A_j$	$m_{A_i - A_j}$	H_0	A_i	A_j	$A_i - A_j$	$m_{A_i - A_j}$	H_0	A_i	A_j	$A_i - A_j$	$m_{A_i - A_j}$	H_0
1	2	-3.96	0.428	Ha	1	2	-0.30	0.600	Ho	1	2	-3.33	0.416	Ha
1	3	-3.47	0.433	Ha	1	3	0.05	0.144	Ho	1	3	-3.11	0.384	Ha
1	4	1.36	0.315	Ha	1	4	0.01	0.144	Ho	1	4	1.42	0.323	Ha
1	5	0.95	0.356	Ha	1	5	0.07	0.141	Ho	1	5	1.02	0.334	Ha
1	6	7.92	0.328	Ha	1	6	-1.79	0.135	Ha	1	6	6.39	0.365	Ha
2	3	0.48	0.489	Ho	2	3	0.34	0.597	Ho	2	3	0.22	0.466	Ho
2	4	5.32	0.388	Ha	2	4	0.31	0.597	Ho	2	4	4.75	0.418	Ha
2	5	4.91	0.422	Ha	2	5	0.36	0.596	Ho	2	5	4.35	0.426	Ha
2	6	11.88	0.399	Ha	2	6	-1.50	0.595	Ha	2	6	9.72	0.451	Ha
3	4	4.84	0.394	Ha	3	4	-0.03	0.128	Ho	3	4	4.54	0.386	Ha
3	5	4.42	0.427	Ha	3	5	0.02	0.125	Ho	3	5	4.13	0.394	Ha
3	6	11.39	0.404	Ha	3	6	-1.84	0.118	Ha	3	6	9.51	0.421	Ha
4	5	-0.41	0.307	Ho	4	5	0.05	0.125	Ho	4	5	-0.41	0.336	Ho
4	6	6.56	0.274	Ha	4	6	-1.81	0.118	Ha	4	6	4.97	0.367	Ha
5	6	6.97	0.320	Ha	5	6	-1.86	0.114	Ha	5	6	5.38	0.376	Ha

Dalja istraživanja treba sprovoditi u dva pravca: istražiti rezultate primenom trigonometrijske regresije kada se koristi jedan ili više harmonika i uporediti dobijene rezultate sa metodom primenjenom u ovom istraživanju i proširiti analizu na razmatranje apsolutnih razlika amplituda i dobijenih primenom modela jer statistička analiza može da prikaže razlike statistički značajnim iako su one po apsolutnim vrednostima male.

U buduće je neophodno uspostaviti precizno definisani sistem periodičnog merenja napona vratila i obrade dobijenih rezultata, propisati i dosledno sprovoditi postupak. Ovakav pristup omogućio bi praćenje eventualnih promena napona po jedinstvenoj metodologiji što bi omogućilo pouzdanu analizu trendova bitnih elemenata kroz vreme (period eksploatacije) i donošenje zaključaka o stanju agregata. Ovakav pristup bi isključio subjektivnost u proceni stanja i trendova dok bi formiranje baze podataka o rezultatima merenja omogućilo proširenje metodologije i kontrolu istorijskih rezultata.

4 ZAKLJUČAK

Analizom snimljenih talasnih oblika napona vratila u vremenskom domenu mogu se uočiti jasne razlike između hidroagregata A6 i ostalih hidroagregata. Niskofrekventna komponenta napona vratila je kod agregata A6 približnija sinusnom signalu sa značajno manjom amplitudom u odnosu na druge hidroagregate. Bitna razlika se uočava i na mernom naponu M3. Prisutnost niskofrekventne komponente u mernom naponu M3 hidroagregata A6 indicira na eventualno postojanje problema u izolacionom sistemu vratila ovog hidroagregata.

Na osnovu raspoloživih podataka, njihove obrade po prikazanom modelu i statističke analize zaključujemo da postoje razlike indukovanih napona na vratilima šest agregata u HE Đerdap 1 i da je statistička jednakost ovih parametara identifikovana u malom broju slučajeva. U narednom periodu je potrebno izvršiti i analizu vrednosti razlika navedenih parametara jer statistička analiza može prikazati značajnost razlika i kada su one bez praktičnog značaja. Rezultati redovnih merenja mogu da ukažu i na promene navedenih parametara kroz vreme koji impliciraju potencijalne promene karakteristika posmatranih delova agregata.

Sistem periodičnog merenja sa dodatnom matematičkom obradom podataka omogućuje identifikovanje promena napona vratila na osnovu čega se pravovremenim delovanjem mogu preduprediti neželjeni efekti oštećenja ležajeva.

5 LITERATURA

- [1] P.L. Alger, H.W. Samson, Shaft currents in electric machines. Journal Am. Inst. Electr. Eng. 1923, 42, 1325–1334.
- [2] J. M. Gruber, E. F. Hansen, Electrostatic shaft voltage on steam-turbine rotors. Journal of Engineering for Power, (1959), 81(1), 97-106.
- [3] K.B. Tawfiq, M. Güleç, P. Sergeant, Bearing Current and Shaft Voltage in Electrical Machines: A Comprehensive Research Review. Machines 2023, 11, 550.
- [4] I. Klasnić, D. Joksimović, Z. Ćirić, Potencijal vratila kod turboagregata, Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Vol. 26 (2016), 129-139.
- [5] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Std 112™-2004.
- [6] IEEE Guide for Online Monitoring of Large Synchronous Generators (10 MVA and Above), IEEE Std 1129™-2014.
- [7] G. Perović, S. Ninković, H. Moritz, Least Squares: (monograph): with 87 figures and 90 tables. 2005.