

STUDIJSKI ODBOR A1 – PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE I ELEKTROMEHANIČKA PRETVORBA ENERGIJE

Predsjednik: IVICA MARUŠIĆ, dipl. ing.
Tajnik: Doc. dr. sc. STJEPAN TVORIĆ

Stručni izvijestitelji: Prof. dr. sc. DAMIR ŽARKO
Prof. dr. sc. DRAGAN PUSTAIĆ
Prof. dr. sc. MARIO VRAŽIĆ
TOMISLAV PINTARIĆ, dipl. ing.

IZVJEŠĆE STRUČNIH IZVJESTITELJA

1. UVOD

Studijski odbor A1 je za 17. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 9. – 12. studenoga 2025., usvojio pet preferencijalnih tema:

- 1. PREFERENCIJALNA TEMA: Postignuća u razvoju, dizajniranju, proizvodnji i instaliranju novih rotacijskih električnih strojeva za elektroenergetski sustav, usklađivanje sa zahtjevima zaštite okoliša**
- 2. PREFERENCIJALNA TEMA: Revitalizacije i zamjene zastarjelih generatora, motora i uzбудnih sustava, s naglaskom na pouzdanost, ekonomske parametre, mrežna pravila i zaštitu okoliša**
- 3. PREFERENCIJALNA TEMA: Monitoring, dijagnostika i analiza stanja rotacijskih električnih strojeva u pogonskim uvjetima hidroelektrana, termoelektrana i vjetroelektrana**
- 4. PREFERENCIJALNA TEMA: Primjena novih znanja, materijala i tehnologija u dizajnu, proizvodnji i eksploataciji električnih strojeva i elektroničkih pretvarača za sustave distribuiranih izvora električne energije**
- 5. PREFERENCIJALNA TEMA: Uzбудni sustavi sinkronih strojeva**

U traženom roku prijavljeno je i prihvaćeno 14 sažetaka referata, od kojih je 10 referata u konačnom obliku napisano i poslano na recenziranje.

Nakon izvršenih recenzija prihvaćeno je svih 10 referata za prezentaciju na savjetovanju. U procesu recenziranja sudjelovalo je 12 recenzenata (u pravilu eksperti za pojedinu preferencijalnu temu) koji su izradili 16 recenzija u skladu s formom zadanom u konferencijskom programskom paketu EasyChair. Recenzenti su stručnjaci iz industrije i elektroprivrede, te s fakulteta, veleučilišta i instituta.

U referatima su navedena imena 37 autora/suautora pri čemu jedan rad ima dva autora, dva su rada s tri autora, pet radova je s četiri autora, te po jedan rad sa šest i sedam autora. Brojevi autora po referatu sugeriraju da se radi o timskom radu i suradnji industrije (Končar-elektroindustrija d.d.), akademske zajednice, HEP-a, elektrotehničkih instituta, te manjih trgovačkih društava.

Recenzenti su za raspravu predložili ukupno 30 pitanja s maksimalno četiri pitanja po referatu. Stručni izvjestitelji su uskladili broj i sadržaj pojedinih pitanja na 19, tj. na maksimalno dva pitanja po referatu, vodeći računa o ograničenom vremenu za raspravu, složenosti i zanimljivosti pitanja za širi auditorij, ostavljajući pri tome vrlo uska specijalistička ili znanstvena pitanja za izravni dijalog između autora i zainteresiranog pojedinca, izvan vremena planiranog za prezentacije referata.

Stručni izvjestitelji su u skladu s usvojenim preferencijalnim temama, prijedlozima autora i suautora, kao i prijedlozima recenzenata za poboljšanje završne strukture prihvaćenih referata, razvrstali 10 referata po temama kako slijedi:

- 1. PREFERENCIJALNA TEMA: 2 referata označena šiframa A1-01 i A1-02**
- 2. PREFERENCIJALNA TEMA: 0 referata**
- 3. PREFERENCIJALNA TEMA: 6 referata označenih šiframa od A1-03 do A1-08**
- 4. PREFERENCIJALNA TEMA: 1 referat označen šifrom A1-09**
- 5. PREFERENCIJALNA TEMA: 1 referat označen šifrom A1-10**

2. SAŽETO STRUČNO IZVJEŠĆE I PITANJA ZA RASPRAVU

1. PREFERENCIJALNA TEMA: Postignuća u razvoju, dizajniranju, proizvodnji i instaliranju novih rotacijskih električnih strojeva za elektroenergetski sustav, usklađivanje sa zahtjevima zaštite okoliša

Prihvaćena su dva referata označena šiframa A1-01 i A1-02.

A1-01 Josip Polak, Josip Treger, Ivica Marušić

UTJECAJ GUSTOĆE IZOLACIJE I SASTAVA IZOLACIJE NA KVALITETU VPI IZOLACIJSKOG SUSTAVA VISOKONAPONSKIH SINKRONIH GENERATORA

U referatu je obrađena tematika VPI izolacijskog sustava visokonaponskih sinkronih generatora u čijoj izradi se primjenjuje postupak vakuumsko-tlačne impregnacije (engl. VPI – *vacuum pressure impregnation*). U referatu su opisane metode za određivanje sastava izolacije koje se koriste te je dan pregled provedenih ispitivanja za sinkrone generatore u HE Zakućac. Na osnovu dugogodišnjih istraživanja i ispitivanja autori zaključuju da gustoća izolacije i njen sastav bitno utječu na kvalitetu VPI izolacijskih sustava visokonaponskih sinkronih generatora.

Pitanja za raspravu

1. Kada su provedena ispitivanja na spomenutim hidrogenatorima u HE Zakućac te je li bilo novijih ispitivanja štapova poslije 2017. godine?
2. Je li u tvornici bilo novijih opsežnih ispitivanja štapova kao za spomenute generatore u HE Zakućac?

A1-02 Damir Žarko, Ana Hanić, Zlatko Hanić

TOPLINSKI MODEL ZRAKOM HLAĐENOG KAVEZNOG ASINKRONOG MOTORA U KUĆIŠTU S RASHLADNIM REBRIMA

U radu je na primjeru jednog 4-polnog asinkronog kaveznog motora prikazana metodologija izrade toplinskog modela za stacionarno stanje koja se temelji na primjeni ekvivalentne toplinske mreže. Toplinski model izrađen je u programskom okruženju Matlab Simscape Thermal i sastoji se od promjenjivih izvora toplinskog toka koji odgovaraju iznosima gubitaka u namotima i željezu te toplinskih otpora vođenja, konvekcije i zračenja čije vrijednosti su izračunate na temelju geometrijskih dimenzija motora, toplinskih svojstava materijala te raznih korelacijskih faktora. Rezultati izračuna dobivenim modelom uspoređeni su s rezultatima mjerenja.

Pitanja za raspravu

1. Autori su pri izradi modela pretpostavili da u jezgrama statora i rotora nema promjene temperature u aksijalnom smjeru. Zašto je takva pretpostavka opravdana?
2. Prema shemi toplinskog modela prikazanoj na slici 7. pretpostavljeno je također da nema izmjene topline između glava namota i namota u utoru statora. Čime autori argumentiraju tu pretpostavku?

2. PREFERENCIJALNA TEMA: Revitalizacije i zamjene zastarjelih generatora, motora i uzбудnih sustava, s naglaskom na pouzdanost, ekonomske parametre, mrežna pravila i zaštitu okoliša

U ovoj preferencijalnoj temi nije bilo prihvaćenih referata.

3. PREFERENCIJALNA TEMA: Monitoring, dijagnostika i analiza stanja rotacijskih električnih strojeva u pogonskim uvjetima hidroelektrana, termoelektrana i vjetroelektrana

Prihvaćeno je šest referata označenih šiframa od A1-03 do A1-08.

A1-03 Ozren Husnjak, Emil Haček

DIJAGNOSTIKA POVIŠENIH AKSIJALNIH VIBRACIJA TURBO-AGREGATA

U referatu je opisan primjer dijagnostičkih ispitivanja u svrhu detekcije uzroka povišenih aksijalnih vibracija na generatorskim ležajevima turboagregata pogonjenog parnom turbinom. Prikazani su rezultati ispitivanja agregata izvan pogona u svrhu ispitivanja vlastitih frekvencija generatorskih ležajeva i rezultati mjerenja vibracija agregata u pogonu (pokretanje, uključenje uzbude, djelomični teret, zaustavljanje). Svi izmjereni rezultati upućuju na to da su generatorski ležajevi u rezonanciji i predložen je način rješavanja problema povišenih vibracija.

Pitanja za raspravu

1. Predložen je način sanacije problema povišenih aksijalnih vibracija generatorskih ležajeva. Da li bi prije sanacije trebalo izvršiti dodatna mjerenja vibracija u planiranim režimima tereta koji nisu mogli biti postignuti kod opisanog ispitivanja čime bi se omogućila potpunija usporedba stanja prije i poslije sanacije?
2. Kako objašnjavate nesklad između izmjerene vlastite frekvencije od 40 Hz u BUMP testu i radne frekvencije od 50 Hz? Zašto nije provedena dodatna analiza za precizno određivanje vlastite frekvencije u uvjetima rada s uljnim filmom?

A1-04 Emil Haček, Ozren Husnjak, Damijan Cerinski, Ozren Orešković

USPOREDBA VIBRODINAMIČKOG STANJA VIŠE HIDRO-AGREGATA IDENTIČNE KONSTRUKCIJE

Autori su opisali primjer korištenja različitih dijagnostičkih metoda mjerenja u svrhu usporedbe vibrodinamičkog stanja pet velikih hidroagregata identične konstrukcije. Agregati se sastoje od tri ležaja: dva radijalna (gornji vodeći i turbinski) te aksijalni – noseći ležaj i pogonjeni su Francis turbinama. Agregati se nalaze u jednoj elektrani i cilj mjerenja je odrediti kojim redoslijedom će se mijenjati agregati u budućoj revitalizaciji. Pokazano je da nije dovoljno standardno mjerenje vibracija prema ISO 2816-5 i da je vrlo korisno analizirati geometriju statora i rotora unutar zračnog rasporeda. Prikazani su rezultati dijagnostičkih mjerenja za agregat br. 5 koji je procijenjen kao najlošiji, tj. prvi za zamjenu.

Pitanja za raspravu

1. Koje bi dodatne dijagnostičke metode doprinijele još pouzdanijoj procjeni stanja agregata, posebno u fazi prije pojave pukotina?
2. Može li se postojećim monitoringom na postojećim agregatima pravovremeno prepoznati trend pogoršanja prije kritičnog stanja?

A1-05 Hossein Foroozan, Božidar Filipović-Grčić, Ozren Husnjak, Ozren Orešković, Ivan Krnić, Ivan Kolić, Nikola Mijalić

MACHINE LEARNING-BASED MONITORING AND EARLY FAULT DETECTION IN HPP DUBROVNIK

U referatu je opisana primjena modela strojnog učenja uz konvencionalni monitoring dodajući algoritme za ranu detekciju promjena u ponašanju agregata te detekciju grešaka. Algoritam je treniran na povijesnim podacima koji uključuju vibracije agregata te procesne veličine, kao što su radna i jalova snaga, temperature statora, protok i sl. Algoritam uključuje uvođenje indikatora operabilnosti (engl KPI - *Key Performance Indicator*) koji kvantificira nivo promjene od očekivanog stanja te je u stanju identificirati izvor promjene u ranoj fazi njenog nastanka, uz usporedbu s očekivanim (normalnim) ponašanjem agregata. Sustav je instaliran u HE Dubrovnik.

Pitanja za raspravu

1. Treba li skup podataka za strojno učenje obuhvaćati veći broj različitih generatora (iz više elektrana) ili se radi specifično na podacima za jednu elektranu (jedan tip generatora)?
2. Može li se algoritam unaprijediti tako da u budućnosti neće trebati ekspertna domenska znanja za razlučivanje normalnih od abnormalnih podataka?

A1-06 Nino Rozić, Krešimir Vrdoljak, Petar Bašić and Elis Sutlović

KONCEPT PRIMJENE OPTIČKOG MJERENJA VIBRACIJA HIDRO GENERATORA KROZ SCADA SUSTAV

Predstavljen je dio razvojnih istraživanja novog senzora baziranog na optičkoj interferometriji za nadzor vibracija i optimiziranje rada agregata te je prikazana mogućnost uvođenja signala optičkog senzora u aplikacijske i izvještajne sustave na Centru proizvodnje Dalmacija. Predložena je integracija izmjerenih i izračunatih podataka s aplikacijama SCADA i Vozni red. Uvođenjem signala optičkog senzora u SCADA sustav dobiva se mogućnost praćenja vibracija strojeva na koje je spojen senzor, iz čije analize se dobiju podaci koji se mogu koristiti kao dodatni kriterij u procesu optimizacije rada agregata.

Pitanja za raspravu

1. Ako se koristi optički senzor kao trajni nadzor vibracija, kako riješiti probleme prljavštine, vlage i uljnih para koji su najveća mana ovakvih davača?
2. Je li komercijalni aspekt mogućeg finalnog proizvoda uzet u obzir u odnosu na klasične senzore vibracija koji se koriste za monitoring sustave?

A1-07 Vladimir Poljančić, Ivan Poljak, Filip Hleb, Nikola Ivan Hudin

DIJAGNOSTIKA I RJEŠENJE PROBLEMA POJAVE LEŽAJNIH STRUJA NA AGREGATU TERMOELEKTRANE

U referatu je prikazan sustav za mjerenje napona vratila turbogeneratora ostvaren ugradnjom izoliranih nosača i posebnih namjenskih četkica kako bi se minimizirao utjecaj klizne površine. Predstavljena je shema agregata s ugrađenim elementima za mjerenje. Prikazani su rezultati mjerenja valnih oblika napona vratila i struja kroz vratilo te kroz četkice za uzemljenje na turbogeneratoru snage 164 MVA. Obavljena je harmonička analiza dobivenih rezultata koji su zatim prikazani u tabličnom obliku i u obliku slika izravno iz mjernog uređaja.

Pitanja za raspravu

1. Upadaju u oči vrlo velike vrijednosti struje kroz uljne cijevi. Kasnije se u radu navodi sljedeće: „...nakon što je napravljena zamjena mjernog elementa, prvotno obuhvatnog transformatora (CM), za Rogowski svitak (RC), vrijednosti su se svele na razinu šuma, čime je ustanovljeno da se u stvari radilo o pogrešnom očitavanju radi vanjskih smetnji i polja, a ne o stvarnim izmjerenim strujama kroz navedene cijevi.“ Kolika je točnost mjerenja ugrađene opreme i kako se može točno utvrditi da se radi o smetnji, a ne o stvarnoj pojavi?
2. Kako je mjeren napon vratila prikazan u tablici 1, zadnji red? Kako objašnjavate pojavu 9. harmonika? Kako je nul točka generatora izvedena? Utječe li uzemljenje nul-točke generatora na iznos 3. i 9. harmonika?

A1-08 Neven Bulić, Ivica Marušić, Nikola Turk, Dominik Cikač

MJERENJE KUTA OPTEREĆENJA SINKRONOG GENERATORA BAZIRANO NA GOERTZELOVOM ALGORITMU

U referatu je opisana i obrazložena važnost tematike i problematike mjerenja kuta opterećenja kod sinkronih generatora. Dan je teorijski opis predložene metode mjerenja kuta opterećenja temeljene na Goertzelovom algoritmu izvedenom iz diskretne Fourierove transformacije koji je prikladan za implementaciju u digitalnim sustavima te pruža računalno učinkovit način za određivanje kuta opterećenja. Predložena metoda je eksperimentalno validirana na stvarnom sinkronom generatoru snage 160 MVA.

Pitanja za raspravu

1. Koliko je navedeni algoritam realno primjenjiv za komercijalnu upotrebu u uređajima za mjerenje kuta opterećenja i je li testiran na još kojem sinkronom generatoru osim onog spomenutog u referatu?
2. Je li algoritam detaljno analiziran u referatu primjenjiv u smislu hardverskih resursa za on-line sustave monitoringa koji znaju imati i po 40-ak različitih mjerenja na procesnoj jedinici i akvizicijskim modulima?

4. PREFERENCIJALNA TEMA: Primjena novih znanja, materijala i tehnologija u dizajnu, proizvodnji i eksploataciji električnih strojeva i elektroničkih pretvarača za sustave distribuiranih izvora električne energije

Prihvaćen je jedan referat označen šifrom **A1-09**.

A1-09 Patrik Tulek, Dario Sente, Stjepan Tvorić, Manuel Lonić

VEKTORSKO UPRAVLJANJE ASINKRONIM ELEKTROMOTOROM

U sklopu referata prikazana je izrada simulacijskog modela trofaznog asinkronog motora u softverskom paketu Simulink. Provedena su testiranja vanjskih i unutarnjih karakteristika stroja u različitim pogonskim stanjima, pri čemu su analizirani utjecaji vektorskog upravljanja na radne parametre stroja. Na temelju dobivenih rezultata provedena je evaluacija uspješnosti implementirane metode te su izneseni zaključci o prednostima i mogućnostima daljnje optimizacije upravljanja asinkronim motorima.

Pitanja za raspravu

1. Na temelju rezultata simulacije, koje biste dodatne optimizacije predložili za vektorski upravljeni pogon u realnim industrijskim primjenama (npr. smanjenje oscilacija, poboljšanje odziva pri promjenama tereta)?

2. Kako biste predložili da se ovakva multidisciplinarna tema podučava i prenosi za što bolje razumijevanje (npr. simulacije, ex cathedra, numerički zadaci...)?

5. PREFERENCIJALNA TEMA: **Uzbudni sustavi sinkronih strojeva**

Prihvaćen je jedan referat označen šifrom **A1-10**.

A1-10 Hrvoje Horvatek, Borna Jelačić, Stipe Vidić, Ivan Kelemen, Blaženka Brkljač, Jurica Puškarić

ZAMJENA REGULATORA NAPONA NA SUSTAVU UZBUDE SINKRONOG GENERATORA SA NOVIM TIPOM KONEX

Referat opisuje razloge zamjene postojećeg i glavne značajke novog digitalnog regulatora napona sinkronog generatora u hidroelektrani tipa KONEX 2000. Novi sustav uzbude objedinjuje niz naprednih funkcionalnosti kao što su automatski regulator napona s kompenzacijom po radnoj i jalovoj komponenti struje generatora, kao i više vrsta zaštitnih i ograničavajućih funkcija koje osiguravaju siguran rad sustava u svim režimima. Priloženi su također i oscilogrami snimljeni tijekom ispitivanja i puštanju u pogon regulatora napona iz kojih se vidi dobro podešenje i ispravno funkcioniranje.

Pitanja za raspravu:

1. Da li bi bilo bolje u regulacijskoj strukturi koristiti unutarnju regulacijsku petlju po struji uzbude?

3. ZAKLJUČAK

Broj napisanih, recenziranih i prihvaćenih radova za prezentaciju na 17. savjetovanju bitno je manji od broja radova na prethodnom 16. savjetovanju kojih je bilo 23. Takav trend vjerojatno je posljedica odluke autora da pošalju svoje radove na 1st International Colloquium Power Generation and Electromechanical Energy Conversion koji se po prvi puta održava u Hrvatskoj u organizaciji hrvatskog ogranka CIGRÉ i Tehničkog veleučilišta u Zagrebu uz potporu Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.

Na ovom savjetovanju najviše radova zastupljeno je u 3. preferencijalnoj temi *Monitoring, dijagnostika i analiza stanja rotacijskih električnih strojeva u pogonskim uvjetima hidroelektrana, termoelektrana i vjetroelektrana*.

Može se očekivati da će interes stručnjaka iz gospodarstva i akademske zajednice za pisanje i prezentiranje radova na sljedećem savjetovanju 2027. godine biti veći jer će autori imati više vremena za planiranje uzimajući u obzir održavanje redovitog 18. savjetovanja HRO CIGRÉ te očekivanog 2. međunarodnog kolokvija u istoj godini.

Interes se može dodatno potaknuti promišljanjem i definicijom novih preferencijalnih tema koje će osim postojećih elemenata uključivati:

- upravljanje životnim ciklusom radi produljenja vijeka trajanja postojećih strojeva ili davanja preporuka za njihovu zamjenu,
- opremu za proizvodnju energije koja se koristi u industrijskim procesnim postrojenjima i mikromrežama, npr. brodovi, zrakoplovi,
- dizajn i performanse sinkronih kompenzatora i strojeva s visokom inercijom za podršku mrežama za proizvodnju električne energije, uključujući pretvorbu postojećih generatora u sinkrone kompenzatore,
- analizu utjecaja povećanih zahtjeva na opremu za proizvodnju energije kako bi se podržale performanse i pouzdanost elektroenergetskih mreža s obzirom na sve veću integraciju obnovljivih izvora energije,
- utjecaj i učinak hibridnih shema proizvodnje i skladištenja energije na dizajn i radni vijek nove i postojeće opreme za proizvodnju energije, sinkronih kompenzatora, pripadajućih pomoćnih uređaja i motora koji se koriste u industrijskim primjenama.

Sve navedene dodatne teme također se pojavljuju u popisu glavnih područja kojima se bavi studijski odbor A1 međunarodne CIGRÉ.