

Dušan Joksimović¹, Đorđe Stojić¹, Nemanja Milojčić¹, Zoran Ćirić¹,
Slavko Veinović¹, Luka Ivanović¹, Ilija Klasnić¹, Miroslav Pavićević²,
Dušan Trišić²



Struktura i dinamičke performanse redundantnih sistema pobude motor-generatora u RHE „Bajina Bašta”

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija*

² EPS AD, Ogranak Drinsko-Limske HE, HE Bajina Bašta, Srbija

Stručni rad

Ključne poruke

- Revitalizacija agregata u RHE „Bajina Bašta” ključna za stabilnost sistema i integraciju obnovljivih izvora
- Savremeni regulatori pobude omogućavaju potpunu kontrolu agregata u svim pogonskim stanjima uz visoku pouzdanost osiguranu redundantnom (1+1) arhitekturom tiristorskih mostova i regulatorskih jedinica
- Podržan rad agregata u sva četiri kvadranta pogonskog dijagrama uz sinhroni start i električno kočenje

Kratak sadržaj

Protočna hidroelektrana i reverzibilna hidroelektrana (RHE) „Bajina Bašta” u Perućcu predstavljaju najveće hidroenergetske objekte izgrađene na reci Drini. RHE „Bajina Bašta” ima veliki značaj za elektroenergetski sistem Srbije zbog mogućnosti rada u generatorskom i motornom režimu, čime povećava fleksibilnost sistema sa aspekta upravljanja proizvodnjom i potrošnjom. Takođe, zbog svoje mogućnosti da brzo startuje i brzo promeni režim rada iz generatorskog u motorni i obrnuto, ova elektrana može brzo da reaguje na poremećaje u sistemu i zameni bilo koji drugi agregat u sistemu „Elektroprivrede Srbije”. Samim tim, i revitalizacija RHE „Bajina Bašta”, koja treba da produži životni vek agregata za nekoliko decenija, ima veliki značaj za elektroenergetski sistem. Tokom 2024. revitalizovan je prvi agregat, dok je revitalizacija drugog agregata završena 2026. U okviru revitalizacije su zamenjeni i kompletni pobudni sistemi. U okviru energetskog dela sistema pobude ugrađene su kvalitetne komponente: pobudni transformatori, prekidači, tiristorski mostovi, oprema za demagnetizaciju itd. Osnovu upravljačkog dela sistema pobude čine sertifikovani digitalni regulatori pobude u okviru kojih su realizovani sekventni automati za sve režime rada agregata: generatorski režim, motorni režim, sinhroni start i električno kočenje. Regulatori omogućavaju različite režime regulacije: automatska regulacija napona statora, reaktivne snage ili faktora snage uz integrisane limiterske funkcije i stabilizator elektroenergetskog sistema. Pouzdanost sistema dodatno je osigurana redundantnom implementacijom tiristorskih mostova i regulatora pobude u konfiguraciji 1+1. Nakon završene montaže i povezivanja kompletne opreme, sprovedena su detaljna podešavanja i ispitivanja sistema pobude, koja su pokazala dobre performanse sistema. Ovo garantuje pouzdan i stabilan rad agregata u svim predviđenim režimima, uz automatsko ograničenje rada unutar definisanih granica pogonskog dijagrama.

Ključne reči

**Motor-generator, pouzdanost,
revitalizacija, sistem pobude**

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Sistemi pobude za motor-generatore u RHE 'Bajina Bašta'” (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-a1-8/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-A1 Obrtne električne mašine, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maja 2025.

Primljeno: 6. april 2026.

Recenzirano: 30. jun 2026.

Izmenjeno: 9. jul 2026.

Odobreno: 14. jul 2026.

* Korespondirajući autor: Dušan Joksimović, telefon: +381 64/82-59-741

Imejl: dusan.joksimovic@ieent.org

1. UVOD

Osnovni cilj ovog rada je prikaz načina tehničke realizacije sistema pobude na agregatima reverzibilne hidroelektrane (RHE), kao i analiza njegovih dinamičkih odziva u različitim režimima rada. Posebna pažnja posvećena je strukturi regulacionih petlji, ulozi limitera i njihovoj međusobnoj koordinaciji, kao i uticaju ovih elemenata na stabilnost rada agregata. Analiza je zasnovana na rezultatima ispitivanja i snimljenim odzivima, što omogućava uvid u stvarne dinamičke karakteristike sistema pobude.

RHE „Bajina Bašta” ima značajnu ulogu u elektroenergetskom sistemu Srbije zahvaljujući mogućnosti rada u generatorskom i motornom režimu, čime se povećava fleksibilnost sistema u upravljanju proizvodnjom i potrošnjom električne energije [1], [2]. Periodi manje potrošnje električne energije koriste se za punjenje gornjeg akumulacionog jezera radom elektrane u motornom režimu [3], [4]. Kada se u sistemu javi potreba za dodatnom energijom, agregati prelaze na generatorski režim, pri čemu se potencijalna energija vode koristi za proizvodnju električne energije [1], [5]. Zbog mogućnosti brzog starta i promene režima rada, ovo postrojenje može brzo da reaguje na poremećaje u sistemu i zameni druge agregate unutar sistema doprinoseći balansiranju snage [2], [6].

Reverzibilne elektrane imaju značajnu ulogu u integraciji obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem [7], [8]. Njihova uloga ogleda se u obezbeđivanju proizvodnih kapaciteta i skladištenju energije velikih razmera, što je od posebnog značaja za ublažavanje varijabilnosti snage dobijene iz vetra i sunčevog zračenja [7], [9]. RHE „Bajina Bašta”, puštena u pogon 1982. godine, raspolaže instalisanom snagom od 2 x 300 MW sa faktorom snage 0,95 u generatorskom i 2 x 310 MW u pumpnom režimu [10]. Ovaj vid skladištenja služi kao rezerva za nacionalnu mrežu, naročito u periodima vršne potrošnje ili sušnih intervala [8], [11], omogućava efikasno upravljanje, niže operativne troškove i doprinosi stabilnosti mreže u uslovima povećane zastupljenosti obnovljivih izvora [9], [12].

Upravljanje ovim agregatima zahteva pouzdan sistem pobude čija je osnovna funkcija obezbeđivanje magnetnog fluksa neophodnog za rad sinhronne mašine. Sistem pobude obezbeđuje napajanje pobudnog namotaja rotora regulisanom jednosmernom strujom, čime se kontrolišu napon statora i razmena aktivne i reaktivne snage sa elektroenergetskom mrežom [1], [13]. Takođe, sistem pobude pruža podršku tranzijentnoj stabilnosti brzim odzivom i forsiranjem pobudne struje tokom poremećaja [1], [14].

Proces revitalizacije sistema pobude je obuhvatio implementaciju tehničkih rešenja koja u poređenju sa ranijim sistemom pobude donose nedvosmislene prednosti u pogledu pouzdanosti, energetske efikasnosti i integracije u pogon elektrane. Značajna arhitektonska prednost novog rešenja u odnosu na staro jeste primena potpune 1+1 redundancije, koja obuhvata kako upravljački tako i energetski deo sistema pobude. Ovakva konfiguracija direktno podiže nivo raspoloživosti

agregata, jer omogućava kontinuitet rada i automatski prelazak na rezervne komponente u slučaju unutrašnjih neispravnosti, što kod prethodne pogonske konfiguracije nije bilo izvedeno na ovom nivou. U energetskom smislu, prelazak na novu topologiju uspešno rešava izazove povezane sa raspodelom struja unutar statičkih pretvarača. Konkretno, celokupnu struju pobude u svim režimima rada, uključujući i režim forsiranja pobude, obezbeđuje samo jedan tiristorski most. Ovim pristupom je ostvarena velika prednost u odnosu na stari sistem jer je u potpunosti eliminisana pojava nesimetričnog opterećenja paralelnih tiristora, čime se smanjuju lokalna termička naprezanja, ujednačava degradacija komponenti i produžava radni vek energetskih poluprovodnika. Pored prednosti u primarnim kolima, novi sistem pobude donosi i naprednu informaciono-upravljačku arhitekturu koja predstavlja veliko unapređenje u poređenju sa prethodnim stanjem. Ugrađen je namenski akvizicioni sistem projektovan za kontinualni monitoring, detekciju i analizu pogonskih događaja kako samog sistema pobude tako i celog agregata. Ključna prednost ovog podsistema u odnosu na rešenja iz starog sistema jeste njegova potpuna funkcionalna nezavisnost od rada glavnog regulatora pobude, čime se osigurava da procesi obrade podataka ni na koji način ne ugrožavaju stabilnost primarnih upravljačkih petlji mašine. Sa visokom učestanošću odabiranja, od 5 kHz po kanalu za analogne veličine, ovaj sistem u poređenju sa tehnološkim mogućnostima starog sistema omogućava znatno preciznije registrovanje i vernu rekonstrukciju brzih prelaznih procesa. To olakšava kasniju dijagnostiku kvarova, identifikaciju uzroka poremećaja i detaljnu analizu dinamičkog ponašanja sistema, što je sa prethodnom analognom ili starijom digitalnom opremom bilo izuzetno teško ili neizvodljivo. Konačno, povezivanje novog sistema pobude sa SCADA sistemom elektrane izvedeno je kroz savremeni komunikacioni interfejs koji nudi superiorne mogućnosti povezivanja u odnosu na ranije rešenje. Sa jedne strane, zadržan je određeni broj fizičkih žičanih veza za prenos kontaktnih signala i komandi, čime se obezbeđuje brza i galvanski izolovana razmena vremenski kritičnih informacija. S druge strane, za prenos kompleksnih skupova podataka implementirana je serijska komunikacija zasnovana na standardizovanom protokolu IEC 60870-5-104.

Standardizacija oblasti sistema pobude obuhvaćena je serijama standarda IEEE 421.1 do 6 [14]–[18] i IEC 60034-16.1 do 3 [19], koji definišu terminologiju, metode ispitivanja, zahteve za performanse, pripremu tehničkih specifikacija i modele za analizu sistema.

Visoka pouzdanost sistema pobude na agregatima u Peruću postignuta je ugradnjom visokokvalitetne opreme uz precizno dimenzionisanje i doslednu primenu redundancije u energetskom i upravljačkom delu. Upravljačka struktura se oslanja na digitalne regulatore koji putem kompleksnih sekventnih automata upravljaju specifičnim režimima rada agregata, uključujući sinhroni start i električno kočenje. Kompleksni algoritmi upravljanja i regulacije, uz optimalan izbor parametara, omogućavaju stabilan rad motor-generatora (M-G) u svim dozvoljenim režimima, što potvrđuju dinamički odzivi

snimljeni tokom prijemnih ispitivanja nakon revitalizacije [10].

Prilikom projektovanja sistema primenjene su standardne inženjerske metode i poznate strukture regulacije. Kao dopuna standardnim regulacionim funkcijama, uspešno je implementiran i pušten u rad limiter maksimalne reaktivne snage, koji obezbeđuje siguran rad u okviru dozvoljenih dijagrama opterećenja mašine. Najveći inženjerski izazov predstavljala je realizacija kompleksnih sekventnih stanja za različite režime rada reverzibilnog postrojenja, pri čemu je u sekventni algoritam uspešno integrisan motorni režim rada sa sinhronim startom, što je prikazano u 5. poglavlju. Posebno je zahtevna bila pouzdana implementacija procesa prelaska sa jednog na drugo napajanje na kraju procesa sinhronog starta. Značajan izazov činilo je i uklapanje novog sistema u zahteve SCADA sistema. S obzirom na to da se od nadređenog sistema primaju isključivo pojednostavljeni nalozi (Start, Stop i Električno kočenje), celokupna kompleksna logika sekvencijalnog upravljanja, praćenje stanja i stroga provera uslova za bezbedno izvršenje svake komande morala je biti autonomno i robusno implementirana unutar samih digitalnih regulatora pobude.

Regulatori pobude omogućavaju različite režime regulacije, kao što su regulacija napona statora, reaktivne snage i faktora snage. U režimima regulacije reaktivne snage i faktora snage spoljašnje regulacione petlje zadaju referentnu vrednost unutrašnjoj petlji regulacije napona, koja obezbeđuje brz odziv sistema [1], [14]. Podešavanje PID regulatora ima poseban značaj i vrši se primenom klasičnih i savremenih metoda optimizacije [20], [21].

Pored regulacionih funkcija, sistem sadrži limitere koji sprečavaju rad agregata van dozvoljenih granica pogonskog dijagrama [22]. Limiteri maksimalne pobude i reaktivne snage sprečavaju termičko preopterećenje namotaja rotora i statora, dok V/Hz limiter štiti magnetno kolo motor-generatora i blok-transformatora od prezasićenja [13], [23]. S druge strane, limiter minimalne pobude ograničava rad u potpobuđenoj oblasti pogonskog dijagrama koja bi mogla ugroziti statičku stabilnost [24]. Pri radu ovog limitera naročito je važno razmotriti njegov uticaj na elektromehaničke oscilacije i koordinaciju sa stabilizatorom kako bi se izbegla pojava negativnog prigušenja [25]. Važan aspekt pouzdanog rada je koordinacija limitera sa zaštitnim uređajima. Karakteristike limitera treba da budu precizno podešene tako da reaguju pre delovanja odgovarajućih zaštita, čime se sprečavaju nepotrebni ispadi agregata sa mreže tokom prelaznih pojava i poremećaja u sistemu.

Elektromehaničke oscilacije su prirodne, niskofrekventne oscilacije koje se javljaju u međusobno povezanim elektroenergetskim sistemima zbog dinamičke interakcije između električnih i mehaničkih komponenti. Ove oscilacije utiču na fluktuacije brzine obrtanja rotora sinhronih generatora, protoka električne energije, napona i struja. Tipično imaju frekvenciju od 0,1 do 3 Hz [1], [14]. Nedovoljno prigušenje ovih oscilacija ograničava kapacitet sistema za prenos energije i sposobnost sistema da se oporavi od poremećaja i vrati u stabilno stanje. Slaboprigušene oscilacije u sistemu mogu rasti po amplitudi i na kraju dovesti do kaskadnih ispada, što u

ekstremnim slučajevima može rezultirati široko rasprostranjenim nestankom električne energije. Takođe, dugotrajne slaboprigušene oscilacije mogu prekomerno opteretiti generatore, vodove i drugu opremu, što može dovesti do ubrzanog starenja i povećati rizik od otkaza opreme [14]. Stabilizator elektroenergetskog sistema treba da deluje na prigušenje ovih oscilacija, a njegovi parametri se određuju na osnovu detaljne analize stabilnosti pri malim poremećajima [26]. Adekvatno fazno kompenzovanje unutar stabilizatora osigurava stabilnost u širokom opsegu radnih tačaka i različitih mrežnih konfiguracija [27].

Savremeni elektroenergetski sistemi prolaze kroz strukturnu tranziciju obeleženu povećanjem udela obnovljivih izvora energije, prvenstveno vetroelektrana i fotonaponskih postrojenja. Ova promena u proizvodnom miksu postavlja kompleksne zahteve pred održavanje stabilnosti sistema, naročito u pogledu prigušenja sistemskih oscilacija. Karakteristika ovih izvora je varijabilnost primarnog resursa koja zavisi od trenutnih meteoroloških uslova, što unosi stohastičnost u bilans proizvodnje i potrošnje električne energije i uzrokuje fluktuacije parametara mreže, kao i povećano prisustvo slaboprigušenih elektromehaničkih oscilacija. Za razliku od konvencionalnih sinhronih agregata, obnovljivi izvori se na mrežu povezuju posredstvom energetskih pretvarača i ne poseduju inherentnu rotacionu inerciju. Sa porastom učešća ovakvih izvora, ukupna ekvivalentna inercija elektroenergetskog sistema se smanjuje, što mrežu čini osetljivijom na poremećaje. U ovakvim okolnostima, fiksna podešavanja upravljačkih petlji prethodnog sistema pobude pokazuju jasna tehnička ograničenja, pa spremnost novog sistema za promenu parametara u realnom vremenu i adaptivno upravljanje predstavljaju ključnu funkcionalnu prednost u odnosu na stari sistem. Primenjeno rešenje omogućava stabilno povezivanje sa nadređenim sistemima upravljanja posredstvom zahtevanih komunikacionih protokola, što obezbeđuje dugoročnu operativnu prilagodljivost agregata promenljivim uslovima u mreži, što sa prethodnim sistemom pobude nije bilo izvodljivo.

Pouzdanost i performanse sistema evaluiraju se kroz specifične testove definisane međunarodnim standardima za ispitivanje i specifikaciju pobudnih sistema [15]. Analiza eksperimentalno dobijenih dinamičkih odziva u zatvorenoj petlji pruža uvid u dinamičke performanse i robusnost regulacije [28], dok se usaglašenost sa mrežnim pravilima proverava kroz rigorozne protokole merenja i modelovanja [11], [29].

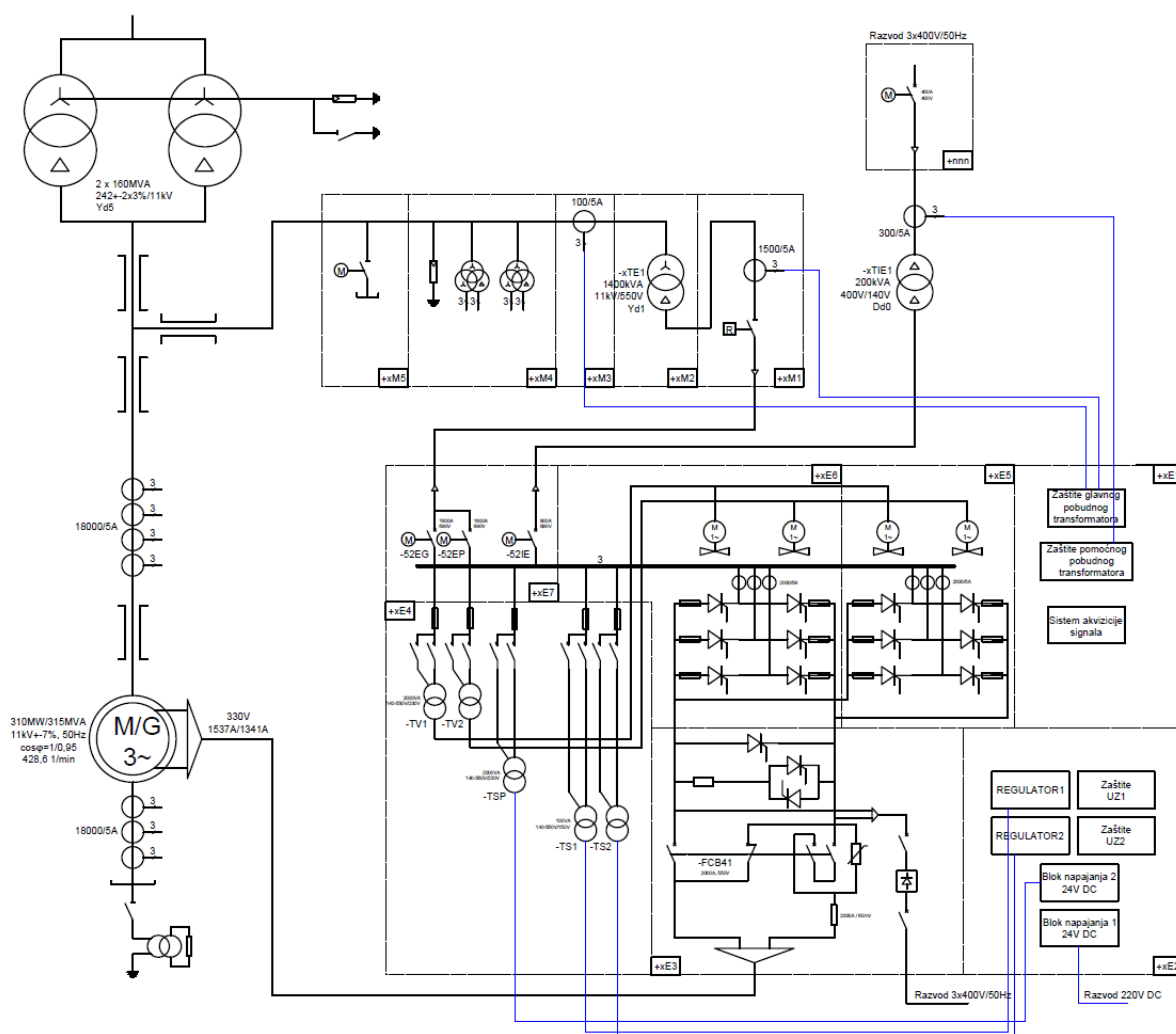
U nastavku rada prikazana je struktura sistema pobude, principi njegove tehničke realizacije i rezultati analize dinamičkih odziva u karakterističnim režimima rada, sa ciljem da se ukaže na uticaj pojedinih elemenata sistema na stabilnost i pouzdanost rada agregata.

2. STRUKTURA SISTEMA POBUDE

Sistemi pobude realizovani su prema strukturnoj šemi na Slici 1 i sastoje se iz energetske i upravljačke sekcije, pri čemu su obe sekcije izvedene redundantno. Osnovu energetske sekcije čine dva punoupravljljiva tiristorska mosta koji vrše regulisano pretvaranje trofaznog naizmeničnog napona u jednosmerni. Redundantnost je ostvarena u konfiguraciji 1+1 ugradnjom dva identična tiristorska mosta koji predstavljaju potpunu rezervu jedan drugom. U ovoj postavci aktivan je jedan tiristorski most preko kog se napaja pobudni namotaj, dok eventualni kvar na njemu inicira automatski prelazak na rezervni most koji preuzima napajanje bez vidljivog uticaja na rad agregata. Takođe, operateru je omogućen prelazak sa mosta na most na osnovu zahteva. Tiristorski mostovi se sa naizmenične strane napajaju sa statorskih izvoda generatora preko glavnog pobudnog transformatora 1TE1/2TE1 (11 kV / 550 V) i prekidača 52EG pri radu agregata u generatorskom režimu, odnosno prekidača 52EP nakon zaletanja pri radu u motornom režimu. Tokom sinhronog starta u motornom režimu i tokom električnog kočenja, tiristorski mostovi se napajaju iz postrojenja sopstvene potrošnje napona 0,4 kV preko transformatora početne pobude TIE1 (380 V / 140 V) i prekidača 52IE. Jednosmerna strana tiristorskih mostova

povezana je na pobudni namotaj generatora preko prekidača FCB41 sa tri radna i jednim mirnim kontaktom, koji uz nelinearni otpornik omogućava brzu demagnetizaciju generatora u havarijskim režimima. Pored navedenog, energetska sekcija obuhvata prenaponsku zaštitu generatora sa antiparalelnim tiristorima i otpornikom, sklop za početno pobuđivanje u generatorskom režimu i RC filtere.

Osnovu upravljačke sekcije čine dva digitalna automatska regulatora pobude zasnovana na savremenoj tehnologiji sa visokim performansama regulacije. Regulatori su identični i međusobno nezavisni, čime je obezbeđena potpuna rezerva u konfiguraciji 1+1. Eventualni kvar na aktivnom regulatoru uzrokuje automatski prelazak na rezervni regulator koji preuzima sve funkcije bez uticaja na rad agregata. Takođe, na nalog operatera omogućen je prelazak sa jednog regulatora na drugi regulator. U okviru upravljačke sekcije realizovane su regulacione funkcije, limiteri, zaštite, redundantnost, upravljanje, merenja, nadzor i komunikacija sa drugim sistemima i uređajima u elektrani. Regulatori upravljaju tiristorskim mostovima pomoću fazne regulacije impulsa za paljenje tiristora, gde ugao paljenja direktno određuje vrednost napona pobude. Jedan regulator može upravljati sa oba tiristorska mosta, pri čemu kombinacija jednog tiristorskog mosta i jednog regulatora obezbeđuje sve



Slika 1. Strukturna šema sistema pobude

predviđene režime rada. Lokalno upravljanje i nadzor vrše se pomoću 17-inčnog ekrana osetljivog na dodir, uz daljinsko upravljanje sa SCADA sistema. Napajanje upravljačke sekcije je redundantno, sa dovodima iz 220 VDC razvoda i invertora elektrane.

Ova sekcija obuhvata i akvizicioni sistem za monitoring pobude, kao i detekciju i analizu poremećaja u radu sistema i čitavog agregata. Akvizicioni sistem nezavisno od regulatora visokom učestanošću prikuplja analogne i digitalne signale. Analogni signali se odabiraju učestanošću od 5 kHz, dok se digitalni skeniraju na svakih 10 ms. U ovaj sistem su uvedeni i interni signali regulatora. Sistem omogućava prikaz trenutnih vrednosti i grafički prikaz vremenske promene svih veličina, uključujući napone i struje statora, napon i struju pobude, snage, brzinu agregata, kao i stanja zaštita i rasklopne opreme. Pri ispunjenju definisanih kriterijuma, sistem automatski snima vremenske promene signala u fajl u određenom trajanju pre i nakon nastanka događaja. Takođe, akvizicioni sistem beleži promene digitalnih signala i formira hronološku listu događaja.

3. OSNOVNI TEHNIČKI PODACI I KARAKTERISTIKE

Sistem pobude ima sledeće osnovne tehničke podatke:

- tip sistema pobude: **statički samopobudni**;
- broj regulatora pobude: **dva redundantna u konfiguraciji 1+1**;
- broj tiristorskih mostova: **dva redundantna u konfiguraciji 1+1**;
- tip tiristorskih mostova: **trofazni punoupravljivi**;
- hlađenje tiristorskih mostova: **redundantno prinudno vazdušno**;
- prenosni odnos glavnog pobudnog transformatora: **11 kV / 550 V**;
- prenosni odnos transformatora početne pobude: **380 V / 140 V**;
- nominalna frekvencija napajanja tiristorskih mostova: **50 Hz**;
- nominalna struja pobude: **1537 A (generator) / 1341 A (motor)**;
- nominalni napon pobude: **330 V**;
- trajno dozvoljena struja pobude: **1691 A**;
- napon pobude pri trajno dozvoljenoj struji pobude: **363 V**;
- plafonska struja pobude: **3074 A**;
- koeficijent forsiranja po struji pobude: **2**;
- dozvoljeno vreme trajanja plafonske struje pobude: **10 s**;
- pozitivan plafonski napon pobude pri nominalnom naponu napajanja: **670 V**;
- negativan plafonski napon pobude pri nominalnom naponu napajanja: **-520 V**;
- koeficijent forsiranja po naponu pobude: **2,03**;
- naponska klasa tiristora: **1800 V**;
- opseg regulacije napona statora: **80-110 %**;
- opseg podešenja kompenzacije pada napona po reaktivnom opterećenju: **±10 %**;
- tačnost regulacije: **±0,5 %**;

- greška regulacije pri promeni temperature ambijenta u opsegu 5-50 °C: **±0,5 %**
- greška regulacije pri promeni frekvencije u opsegu 45 Hz-100 Hz: **±1 %**;
- vreme odziva pobudnog sistema: **20 ms**;
- maksimalno vreme brzog razbuđivanja: **2 s**;
- maksimalni porast napona statora pri naglom rasterećenju pri nominalnoj aktivnoj snazi i $\cos \varphi = 0,95$ uz porast brzine do 155 %: **20 %**.

4. FUNKCIJE SISTEMA POBUDE

Sistemi pobude projektovani su sa funkcionalnostima opisanim u nastavku.

4.1 Energetska i upravljačka redundancija

- Redundantno dvokanalno napajanje pobudnog namotaja motor-generatora pomoću tiristorskih mostova u konfiguraciji 1+1, obezbeđujući potrebnu struju pobude u svim dozvoljenim stacionarnim i prelaznim režimima rada;
- redundantna dvokanalna regulacija pobude realizovana u konfiguraciji 1+1;
- redundantno hlađenje tiristorskih mostova izvedeno u konfiguraciji 1+1;
- automatski prelazak sa jednog na drugi tiristorski most pri kvaru aktivnog mosta ili ručni prelazak na nalog operatera bez značajnijeg uticaja na rad agregata;
- automatski prelazak sa jednog na drugi regulator pri kvaru aktivnog regulatora ili ručni prelazak na nalog operatera bez značajnijeg uticaja na rad agregata;
- automatski prelazak sa jednog na drugi ventilator tiristorskog mosta pri kvaru aktivnog ventilatora ili ručni prelazak na nalog operatera;
- prelazak sa jednog na drugi režim regulacije bez značajnijeg uticaja na rad agregata.

4.2 Režimi regulacije i upravljanja pobudom

- Automatska regulacija napona – regulacija napona statora prema zadatoj referentnoj vrednosti, uz kompenzaciju pada napona na blok-transformatoru po reaktivnoj snazi M-G;
- ručna regulacija – regulacija struje pobude prema zadatoj referentnoj vrednosti;
- automatska regulacija reaktivne snage – regulacija reaktivne snage prema zadatoj referentnoj vrednosti;
- automatska regulacija faktora snage – regulacija faktora snage prema zadatoj referentnoj vrednosti;
- režim direktnog zadavanja ugla paljenja tiristora – mogućnost zadavanja ugla paljenja tiristora kada je aktivan „test” način rada agregata;
- pobuđivanje M-G u automatskoj i ručnoj regulaciji na zadatu vrednost napona praznog hoda u generatorskom režimu rada;
- pobuđivanje M-G tokom sinhronog starta primenom statičkog frekventnog pretvarača ili tokom „Back-to-Back” starta u motornom režimu rada.

4.3 Limiteri i zaštite

- Automatsko ograničenje rada M-G u oblasti dozvoljenih termičkih naprezanja statora i rotora, a u skladu sa pogonskom kartom M-G; ovo je realizovano preko limitera minimalne pobude, limitera maksimalne struje rotora, limitera maksimalne struje statora i limitera maksimalne reaktivne snage;
- vremenski ograničeno forsiranje pobude primenom kombinovane trenutne i inverzne strujno-vremenske karakteristike, aktivno pri velikim poremećajima u elektroenergetskom sistemu;
- sprečavanje magnetskog preopterećenja M-G i blok-transformatora, realizovano preko V/Hz limitera;
- prigušenje elektromehaničkih oscilacija rotora, realizovano preko stabilizatora elektroenergetskog sistema tipa PSS2B.

4.4 Postupci zaustavljanja i havarijsko isključenje

- Razbuđivanje M-G invertovanjem tiristora pri normalnom zaustavljanju;
- gašenje polja M-G u havarijskim režimima pomoću prekidača i otpornika za demagnetizaciju;
- električno kočenje primenljivo pri zaustavljanju agregata;
- zaštita od pojave prenapona u pobudnom kolu, koji mogu nastati usled asinhronog rada M-G na mreži ili pri prekidu strujnog kola pobude.

4.5 Sistem internih zaštita sistema pobude

- Zaštita od otkaza regulacionog kanala;
- kratkospojna zaštita na jednosmernoj strani sistema pobude;
- zemljospojna zaštita pobudnog kola;
- prekostrujna zaštita transformatora;
- kratkospojna zaštita transformatora;
- diferencijalna zaštita transformatora;
- zaštita od preopterećenja rotora sa strujno zavisnom vremenskom karakteristikom;
- zaštita od fazne nesimetrije tiristorskog mosta;
- zaštita od nestanka signala sinhronizacije paljenja tiristora;
- zaštita od nestanka merenja statorskog napona;
- zaštita od nestanka merenja struja pobude;
- zaštita od neuspelog pobuđivanja;
- zaštita od neuspelog razbuđivanja;
- samonadzor upravljačke elektronike.

4.6 Akvizicija podataka, nadzor i komunikacija

- Formiranje hronološke liste događaja;
- snimanje u fajlove signala sa rezolucijom do 5 kHz; snimanje se pokreće pri ispunjenju uslova za trigger, obuhvatajući definisano trajanje pre i nakon nastanka triggera, kao i na direktan nalog operatera;
- lokalno upravljanje i nadzor ostvareni putem ekrana dijagonale 17" osetljivog na dodir, kao i sa prednjih panela regulatora opremljenih displejem, LED diodama i tasterima;

- daljinska komunikacija sa drugim uređajima i sistemima u elektrani, uključujući upravljanje i nadzor posredstvom SCADA sistema.

5. REŽIMI RADA AGREGATA I SEKVENTNA STANJA REGULATORA

Rad regulatora pobude organizovan je kroz sekventna stanja koja predstavljaju delove programskog koda koji postaju aktivni u zavisnosti od režima rada M-G, naloga operatera, signala iz sistema za nadzor i upravljanje, delovanja zaštita i ostalih sistemskih uslova. Svaki tehnološki režim poseduje specifičnu strukturu stanja prikazanu na odgovarajućim dijagramima.

5.1 Generatorski režim

Proces rada sistema pobude kada je agregat u generatorskom režimu obuhvata nekoliko sekventnih stanja opisanih u nastavku:

- **početna faza i priprema:** u početnom stanju impulsi za tiristorske mostove su blokirani; nakon zaletanja agregata do nominalne brzine zadavanjem naloga za start ukoliko su ispunjeni svi uslovi vrši se priprema uključenjem prekidača 52EG i prekidača polja FCB41;
- **pobuđivanje i prazan hod:** kada se ispune uslovi za pobuđivanje, deblokiraju se impulsi; budući da glavni pobudni transformator 1TE1/2TE1 pri razbuđenom stanju M-G nije pod naponom, postupak pobuđivanja počinje uključenjem sklopa početne pobude; tokom postepenog porasta napona statora, napajanje sistema preuzima motor-generator, a regulator održava napon u režimu automatske regulacije;
- **rad na mreži:** nakon sinhronizacije i povezivanja na mrežu, omogućen je izbor između automatske regulacije napona statora, regulacije reaktivne snage ili faktora snage;
- **razbuđivanje i isključenje:** po nalogu za zaustavljanje ili delovanju zaštite se vrši invertovanje tiristorskog mosta radi brzog razbuđivanja; proces se završava isključenjem prekidača 52EG i FCB41.

5.2 Sinhroni start

Tokom procesa sinhronog starta M-G agregat se zaleće od mirovanja do nominalne brzine. Stator M-G se napaja sa startnog agregata u HE tokom „Back-to-Back” sinhronog starta, odnosno sa frekventnog pretvarača u procesu SFP sinhronog starta, dok se rotor napaja konstantnom strujom pobude. Proces rada sistema pobude tokom sinhronog starta obuhvata sekventna stanja opisana kako sledi:

- **priprema i početak zaletanja:** iz početnog stanja u kom su blokirani impulsi, zadavanjem naloga za start ukoliko su ispunjeni svi uslovi za sinhroni start, prelazi se u stanje pripreme; u ovom stanju se uključuju prekidač 52IE i prekidač polja FCB41, čime se uspostavlja napajanje iz razvoda sopstvene potrošnje elektrane preko transformatora TIE1;
- **pobuđivanje:** kada se ispune uslovi za pobuđivanje, deblokiraju se impulsi, agregat se pobuđuje i regulator

održava konstantnu struju pobude tokom celog procesa zaletanja; u ovom stanju aktivna je zaštita od neuspelog sinhronog starta;

- **uspešan start i prelazak:** kada se detektuju uspešan sinhroni start i zaletanje, vrši se uključanje tiristora za prelaz koji prespaja rotor i omogućava bezbednu promenu napajanja sistema pobude; isključenjem prekidača 52IE i uključenjem prekidača 52EP prelazi se na napajanje sistema pobude sa izvoda generatora u motornom režimu rada;
- **razbuđivanje pri prekidu zaletanja:** ako dođe do neuspelog zaletanja ili naloga za prekid, ulazi se u stanje u kome se vrši invertovanje mosta ili brzo razbuđivanje; proces se završava isključenjem prekidača 52IE i FCB41.

5.3 Motorni režim

Nakon uspešnog sinhronog starta, agregat prelazi u motorni režim koji obuhvata faze opisane u nastavku:

- **uspostavljanje samopobude:** agregat je na nominalnoj brzini u praznom hodu, pobuđen je sa statorskih izvoda, pri čemu je aktivna automatska regulacija napona;
- **rad motora na mreži:** nakon sinhronizacije sa mrežom u motornom režimu, prelazi se u stanje u kom su uz automatsku regulaciju napona statora i ručnu regulaciju omogućene i automatska regulacija reaktivne snage i automatska regulacija faktora snage;
- **isključenje iz motornog režima:** po nalogu za razbuđivanje u motornom režimu, vrši se invertovanje tiristorskog mosta ili brzo razbuđivanje; proces se finalizuje isključenjem prekidača 52EP i FCB41.

5.4 Električno kočenje

Sa ciljem efikasnijeg i vremenski kraćeg zaustavljanja, kao i smanjenog intenziteta habanja mehaničkih kočnica, agregati RHE „Bajina Bašta” zaustavljaju se procesom električnog kočenja. Na taj način se produžava vek trajanja mehaničkih kočnica, olakšava njihovo održavanje i izbegava zagađenje usled disipacije materijala kontaktnih obloga mehaničkih kočnica u generatorskom prostoru. Tokom električnog kočenja rotor se napaja konstantnom strujom pobude, dok je namotaj statora u trolnom kratkom spoju koji se formira uključenjem rastavljača za električno kočenje kada brzina agregata padne ispod 50% nominalne vrednosti. Nakon pobuđivanja agregata struje, u namotajima statora stvaraju kočioni moment koji zaustavlja agregat bez upotrebe mehaničkih kočnica.

- **priprema za kočenje:** sekvenca se aktivira kada je agregat u praznom hodu i kada brzina rotora padne ispod 50% nominalne vrednosti; u ovom stanju se vrši zatvaranje rastavljača za električno kočenje, čime se namotaj statora dovodi u trolni kratki spoj, uključuju se prekidač 52IE i prekidač polja FCB41, čime se uspostavlja napajanje iz razvoda sopstvene potrošnje elektrane preko transformatora TIE1;
- **pobuđivanje:** kada se ispune uslovi za pobuđivanje, deblokiraju se impulsi, agregat se pobuđuje i regulator

održava konstantnu struju pobude tokom celog procesa kočenja. U ovom stanju su aktivne zaštite specifične za električno kočenje;

- **završetak kočenja i razbuđivanje:** kada agregat dostigne stanje mirovanja ili vrlo malu brzinu, regulator prelazi u fazu invertovanja tiristorskog mosta radi brzog razbuđivanja; po završetku razbuđivanja, isključuju se prekidač 52IE i prekidač polja FCB41, čime se sistem vraća u početno stanje.

6. REGULACIJA POBUDE

6.1 Automatska regulacija napona statora

Automatska regulacija napona predstavlja osnovni režim regulatora pobude u kom se napon statora održava na referentnoj vrednosti. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude kada je aktivna automatska regulacija je prikazana na Slici 2. Automatska regulacija je zasnovana na PI regulatoru (proporcionalno i integralno dejstvo) i ima negativnu povratnu spregu po naponu statora. U cilju kompenzovanja pada napona na blok-transformatoru u regulaciju je uveden statizam po reaktivnoj snazi. Pozitivna vrednost statizma uzrokuje blagi porast napona generatora sa porastom generisane reaktivne snage, čime se obezbeđuje ravnomerna raspodela reaktivne snage između agregata. Limiteri pobude koji imaju za cilj da spreče da se generator nađe van dozvoljene oblasti rada pogonskog dijagrama (slike 3 i 4) deluju preko sumatora automatske regulacije, kao i stabilizator elektroenergetskog sistema koji deluje na prigušenje elektromehaničkih oscilacija agregata.

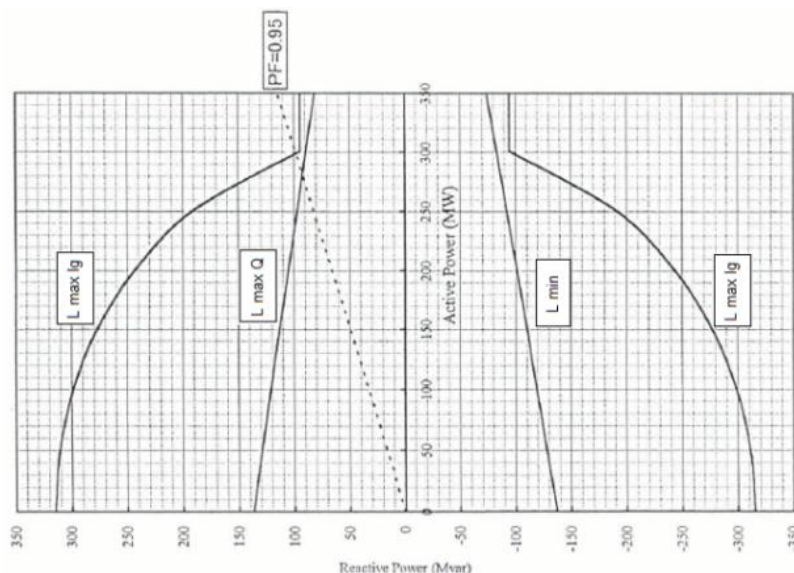
Konačni izlazni signal ARN petlje direktno određuje ugao faznog pomeraja α za paljenje tiristora, čime se precizno kontroliše izlazni napon tiristorskog mosta (napon pobude).

Ovaj režim regulacije se automatski blokira kada je aktivna zaštita od nestanka merenja napona statora i tokom električnog kočenja. Važno je napomenuti da je ARN petlja aktivna i u režimima regulacije reaktivne snage AQR i regulacije faktora snage $\cos \varphi$. U tim slučajevima, ovi režimi deluju kao nadređene regulacije koje automatski menjaju referentnu vrednost ARN regulatora kako bi postigle referentnu vrednost reaktivne snage ili faktora snage zadatu od strane operatera u opsegu definisanom pogonskim dijagramom.

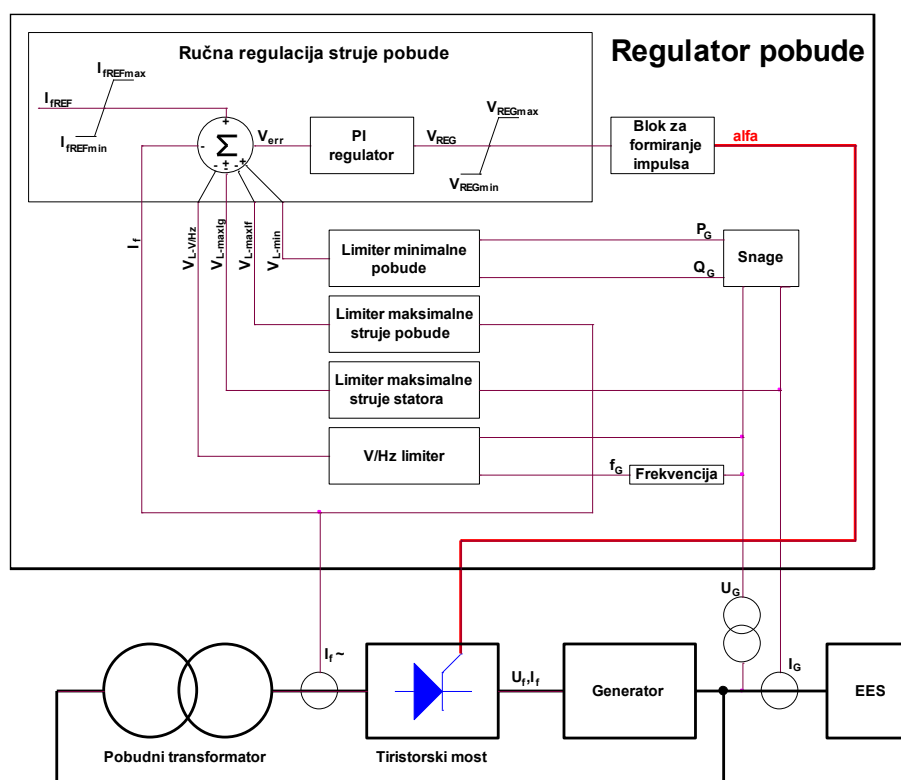
Kada je aktivna ručna regulacija, signal reference stalno prati rad ručne regulacije, čime se obezbeđuje prelaz sa ručne na automatsku regulaciju bez promene u struji pobude i naponu generatora.

6.2 Ručna regulacija struje pobude

Ručna regulacija struje pobude predstavlja rezervni režim rada regulatora pobude pri kojem se struja pobude održava na referentnoj vrednosti. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude kada je aktivna ručna regulacija prikazana je na Slici 5.



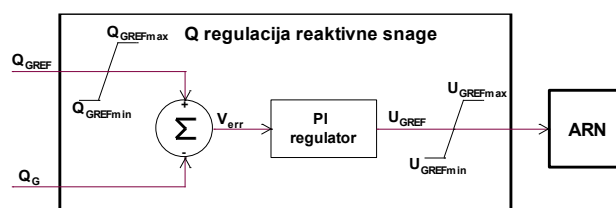
Slika 4. Limiteri pobude



Slika 5. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude kada je aktivna ručna regulacija

napona statora, tako da u AQR režimu automatska regulacija napona ostaje i dalje aktivna, ali joj je PI regulator AQR režima nadređen, odnosno zadaje referentnu vrednost. Limiteri pobude i stabilizator elektroenergetskog sistema koji deluju preko sumatora automatske regulacije ostaju aktivni.

Blokada AQR režima je aktivna kada agregat nije na mreži, kada su aktivni limiteri ili kada se napon statora nađe van dozvoljenog opsega.



Slika 6. Blok-šema Q regulacije reaktivne snage

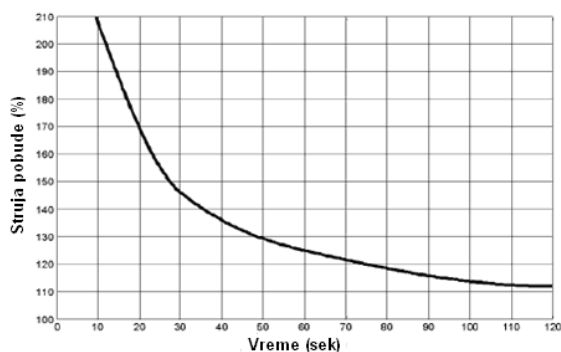
I_{fmax2} predstavlja plafonsku struju pobude. Za pobudnu struju čija je vrednost između I_{fmax1} i I_{fmax2} odrada limitera ima inverznu vremensku karakteristiku koja se podešava parametrima A , B i C , dok za pobudnu struju čija je vrednost veća od I_{fmax2} limiter odrađuje trenutno. Izlazni signal limitera deluje preko sumatora automatske ili ručne regulacije i učestvuje u formiranju signala greške. Dozvoljeno vreme trajanja preopterećenja rotora u zavisnosti od struje pobude je u standardu [18] definisano funkcijom:

$$time = A / (I_f^B - C) \quad (1)$$

pri čemu su: I_f – struja pobude u relativnim jedinicama (engl. *per unit*, p. u.); A , B i C – koeficijenti. Najčešće se dozvoljeno preopterećenje rotora modeluje kvadratnom funkcijom ($B = 2$). Primer ove karakteristike je prikazan na grafiku na Slici 10.

6.8 Limiter maksimalne struje statora

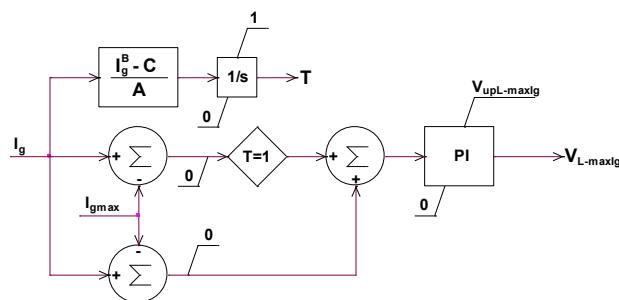
Funkcija limitera maksimalne struje statora je da održi struju statora u granicama dozvoljenog opterećenja, kako bi se sprečila odrada prekostrujne zaštite generatora. Pri pojavi preopterećenja limiter najpre detektuje preopterećenje, dozvoljava trajanje preopterećenja tokom definisanog vremenskog perioda i ukoliko preopterećenje postoji i nakon tog perioda, limiter deluje na smanjenje struje na granicu prorade limitera. Limiter ima inverznu vremensku karakteristiku prorade. Blok-šema limitera je prikazana na Slici 11.



Slika 10. Karakteristika dozvoljenog preopterećenja rotora

Ulazni signal limitera maksimalne struje statora je signal I_g proporcionalan struji statora generatora. Limiter je zasnovan na PI regulatoru. Vrednost prorade I_{gmax} predstavlja trajno dozvoljenu struju statora. Odrada limitera ima inverznu vremensku karakteristiku. Izlazni signal limitera deluje preko sumatora automatske ili ručne regulacije i učestvuje u formiranju signala greške.

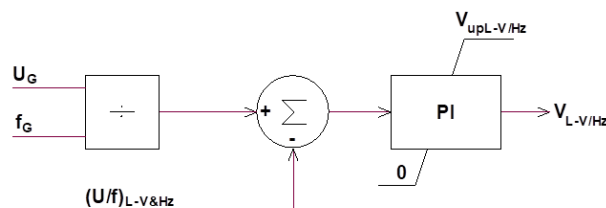
Dozvoljeno vreme trajanja preopterećenja statora u zavisnosti od struje statora može se iskazati sličnom funkcijom kao i kod rotora (Slika 10).



Slika 11. Blok-dijagram limitera maksimalne struje statora

6.9 Limiter V/Hz

Limiter V/Hz služi da zaštiti generator i blok-transformator od prekomernog magnetnog fluksa pri niskoj frekvenciji ili prevelikom naponu. Prekomeran fluks dovodi do pregrevanja i može izazvati oštećenje gvozdenog jezgra blok-transformatora i generatora. Limiter V/Hz uobičajeno se koristi za zaštitu generatora ili blok-transformatora kada je brzina generatora, a samim tim i frekvencija, snižena pri pobuđenoj mašini, na primer pri startu ili zaustavljanju agregata. Blok-šema limitera je prikazana na Slici 12.



Slika 12. Blok-dijagram limitera V/Hz

Odnos napona i frekvencije u relativnim jedinicama, naznačen kao odnos V/Hz, merljiva je veličina proporcionalna magnetnom fluksu, zbog čega se kao ulazni signali koriste merenja napona statora i frekvencije. Odnos $(U/f)_{L-V/Hz}$ predstavlja odnos napona i frekvencije pri kom limiter proraduje. Limiter deluje preko sumatora automatske ili ručne regulacije i učestvuje u formiranju signala greške.

6.10 Stabilizator elektroenergetskog sistema

Elektromehaničke oscilacije u elektroenergetskom sistemu predstavljaju pojavu međusobnog oscilovanja rotora sinhronih mašina jednih u odnosu na druge koristeći prenosne vodove za razmenu energije i primetne su u karakterističnim varijablama stanja sinhronih mašina: brzini rotora, frekvenciji, aktivnoj i reaktivnoj snazi, naponu, struji, uglu snage itd. Osnovna funkcija stabilizatora elektroenergetskog sistema je prigušenje elektromehaničkih oscilacija generisanjem pozitivnog prigušnog momenta na vratilu koji je u fazi sa varijacijama brzine. To se postiže delovanjem na pobudni fluks preko dodatnog ulaza u automatsku regulaciju napona statora. Stabilizator treba da deluje samo na oscilacije koje su u opsegu učestanosti od interesa (tipično od 0,2 do 2,5 Hz).

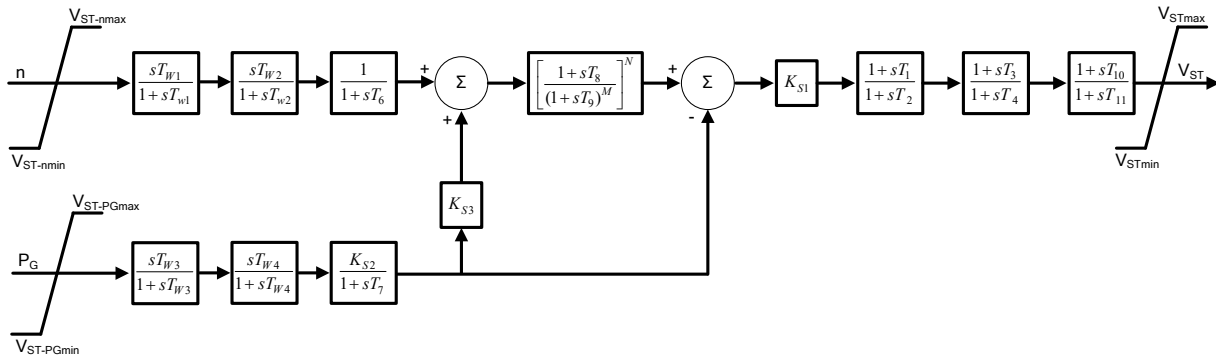
Stabilizator deluje raspirujuće na torzione oscilacije agregata koje predstavljaju oscilacije između rotacionih elemenata agregata: rotori turbinskih sekcija, rotor generatora i rotori budilica (ukoliko postoje) i učestanosti su iznad 2,5 Hz. Zbog toga u okviru stabilizatora mora biti primenjen torzioni filter propusnik niskih učestanosti koji sprečava delovanje stabilizatora na ovaj tip elektromehaničkih oscilacija [15].

Blok-dijagram stabilizatora elektroenergetskog sistema je prikazan na Slici 13 [18]. Princip rada

stabilizatora se može opisati polazeći od jednačine kretanja rotora:

$$\Delta\omega = \frac{1}{2H} \int (\Delta P_m - \Delta P_e) dt = \frac{1}{2H} \int \Delta P_a dt \quad (2)$$

gde su: $\Delta\omega$ – promena kružne učestanosti, H – konstanta inercije agregata, ΔP_m – promena mehaničke snage, ΔP_e – promena električne snage i ΔP_a – promena snage ubrzanja. Mehanička snaga se ne meri direktno, već se integral njene promene računa preko električne snage i brzine na osnovu jednačine:



Slika 13. Blok-dijagram stabilizatora elektroenergetskog sistema

$$\int \Delta P_m dt = 2H \cdot \Delta\omega + \int \Delta P_e dt \quad (3)$$

Glavna prednost ovog stabilizatora je što nema potrebe za torzionim filterom u glavnom delu stabilizatora (pojačanje stabilizatora i uskladnici za faznu kompenzaciju), tako da torzioni filter ne utiče na signal ΔP_e . S obzirom na to da integral promene mehaničke snage sadrži u sebi i torzione oscilacije i s obzirom na to da su promene mehaničke snage veoma spore, filter propusnik niskih učestanosti se može primeniti na ovaj signal u cilju prigušenja torzionih učestanosti.

Ekvivalentna brzina koja se koristi kao stabilizacioni signal i na koju treba primeniti faznu kompenzaciju dobija se kao integral snage ubrzanja i ne sadrži torzione oscilacije:

$$\omega_e = \int \frac{\Delta P_a}{2H} dt = -\frac{\Delta P_e(s)}{2Hs} + G(s) \left[\frac{\Delta P_e(s)}{2Hs} + \Delta\omega \right] \quad (4)$$

Ulazni signali stabilizatora su merenje električne aktivne snage P_G i merenje brzine agregata n . Za merenje brzine se koristi filtrirano PLL merenje kompenzovane frekvencije koja je približna brzini agregata. Kompenzovana frekvencija se dobija računanjem frekvencije signala elektromotorne sile

$$\underline{E} = \underline{U}_G + jX_q \underline{I}_G \quad (5)$$

gde je X_q sinhrona reaktansa generatora u q-osi.

Stabilizator najpre eliminiše jednosmerne komponente ulaznih signala pomoću filtera jednosmerne komponente (*washout filter*) sa vremenskim konstantama T_{w1} , T_{w2} , T_{w3} i T_{w4} . Ovi filteri isključuju delovanje stabilizatora u ustaljenom stanju i pri promeni mehaničke snage turbine. Parametri T_6 i T_7 predstavljaju vremenske konstante mernih pretvarača. Za dobijanje integrala

mehaničke snage parametar K_{S3} treba da ima vrednost 1, a parametar K_{S2} vrednost $T_7/2H$. Parametri T_8 i T_9 predstavljaju parametre torzionog filterapropusnika niskih učestanosti (*ramp-tracking filter*) koji treba da spreči delovanje stabilizatora na torzione oscilacije. Parametri T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_{10} i T_{11} predstavljaju parametre diferencijalnih i integralnih uskladnika (*lead-lag compensator*) pomoću kojih se vrši fazna kompenzacija frekventne karakteristike regulacije pobude kako bi stabilizator generisao pozitivan prigušni moment, koji je u fazi sa varijacijama brzine, u opsegu učestanosti od interesa. Pojačanje stabilizatora od koga zavisi faktor prigušenja elektromehaničkih oscilacija je određeno parametrom K_{S1} . Pri podešavanju vrednost pojačanja treba podesiti na trećinu vrednosti pojačanja pri kom dolazi do nestabilnosti regulacije pobude.

7. DINAMIČKI ODZIVI

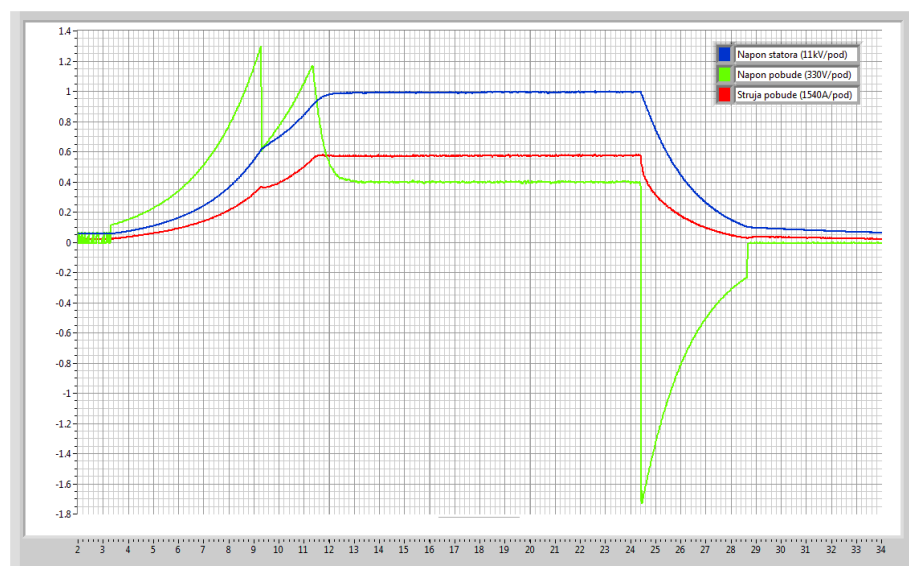
U okviru prijemnih ispitivanja agregata, sprovedena je opsežna analiza rada sistema za regulaciju pobude. U nastavku su prikazani dinamički odzivi snimljeni tokom ovih testiranja, koji su poslužili kao osnova za detaljnu evaluaciju i verifikaciju pokazatelja dinamičkih performansi sistema. Ispitivanja su obuhvatila sledeće radne režime i tranzijentne pojave:

- pobuđivanje i razbuđivanje (Slika 14);
- odziv na odskočnu promene reference automatske regulacije napona (Slika 15);
- električno kočenje (Slika 16);
- sinhroni start (Slika 17);
- odziv na odskočnu promene reference automatske regulacije napona na mreži sa uključenim stabilizatorom (Slika 18);
- odziv na odskočnu promene reference regulacije reaktivne snage (Slika 19);
- aktivacija i odzivi limitera (Slika 20);

- zbacivanje snage agregata (Slika 21).

Detaljnijom analizom eksperimentalnih rezultata potvrđeno je da se pokazatelji kvaliteta dinamičkih odziva nalaze unutar granica propisanih međunarodnim standardima i projektnim zahtevima, uz napomenu da su odzivi na mreži sporiji u odnosu na prazan hod usled znatno manjeg pojačanja ekvivalentne prenosne funkcije motor-generatora i mreže zbog reakcije indukta.

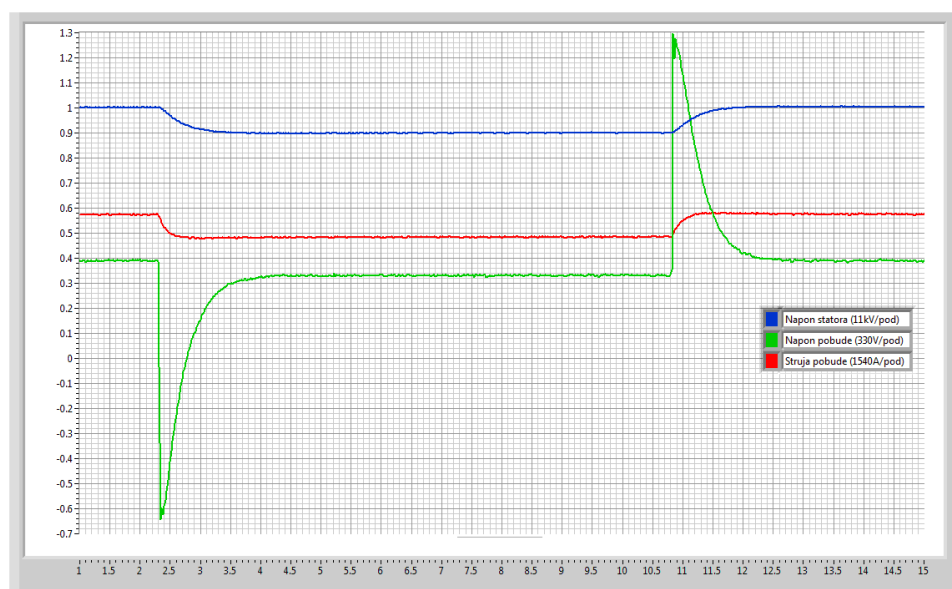
Prihvatljivi opsezi pokazatelja odziva na odskočne promene reference automatske regulacije napona (ARN) definisani su standardom [15], dok su za ostale odzive navedene iskustvene vrednosti iz pogonske prakse. Parametri regulatora su podešeni tako da odzivi budu dovoljno brzi uz efikasnu kompenzaciju fluktuacija u sistemu, a da se pri tome ni na koji način ne ugrozi stabilnost rada.



Slika 14. Pobuđivanje i razbuhivanje u automatskoj regulaciji napona

Tabela I Pokazatelji dinamičkog odziva automatske regulacije napona pri pobuđivanju i razbuhivanju

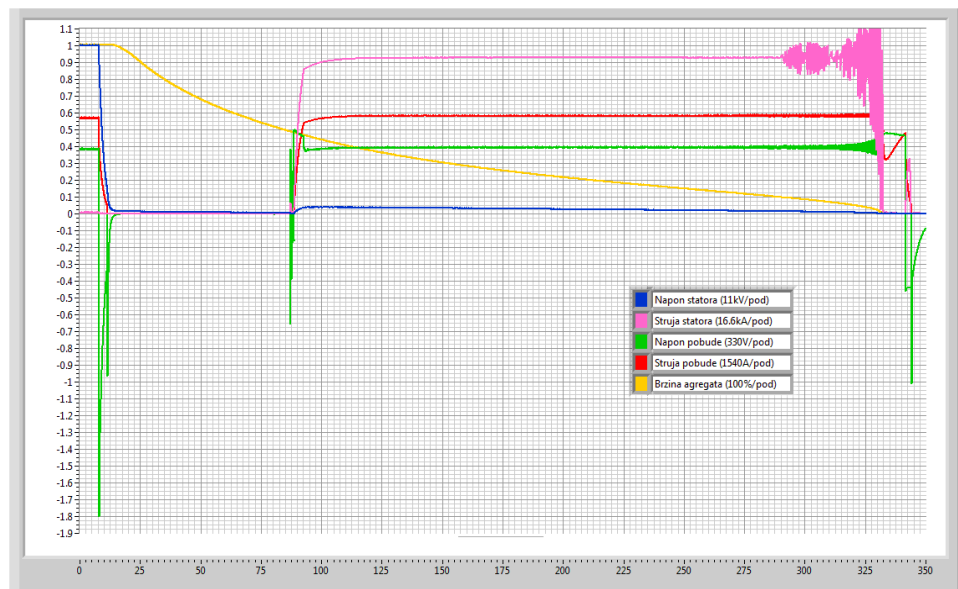
Naziv	Izmereno	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva pri pobuđivanju (s)	6,39	5–10
Vreme smirenja pri pobuđivanju (s)	8,48	8–15
Preskok pri pobuđivanju (%)	0	0–15
Vreme odziva pri razbuhivanju (s)	3,91	2–10
Vreme smirenja pri razbuhivanju (s)	8,38	5–15



Slika 15. Odziv na odskočnu promenu reference od $\pm 10\%$ u praznom hodu – automatska regulacija

Tabela II Pokazatelji dinamičkog odziva automatske regulacije napona na odskočnu promenu reference

Naziv	Izmereno	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	0,62	0,025–2,5
Vreme smirenja (s)	0,92	0,2–10
Preskok (%)	0	0–15



Slika 16. Električno kočenje agregata

Tabela III Pokazatelji električnog kočenja agregata

Brzina agregata na kojoj startuje električno kočenje (p. u.)	0,50
Struja statora u procesu električnog kočenja (p. u. / kA)	0,93/15,44
Struja pobude u procesu električnog kočenja (p. u. / A)	0,59/908
Brzina agregata pri kojoj se isključuje električno kočenje (p. u. / A)	≈ 0
Vreme trajanja električnog kočenja (s)	249



Slika 17. Sinhroni start agregata sa SFP-om

Tabela IV Poređenje pokazatelja dva načina sinhronog starta agregata

	SFP	Back-to-Back
Struja pobude u procesu sinhronog starta (p. u. / A)	0,55 / 840	0,55/840
Vrednost brzine za aktiviranje signala <i>Sinhroni start uspešan</i> (p. u.)	0,9	0,9
Vrednost napona statora za aktiviranje signala <i>Sinhroni start uspešan</i> (p. u.)	0,9	0,9
Vreme trajanja sinhronog starta (s)	295	210

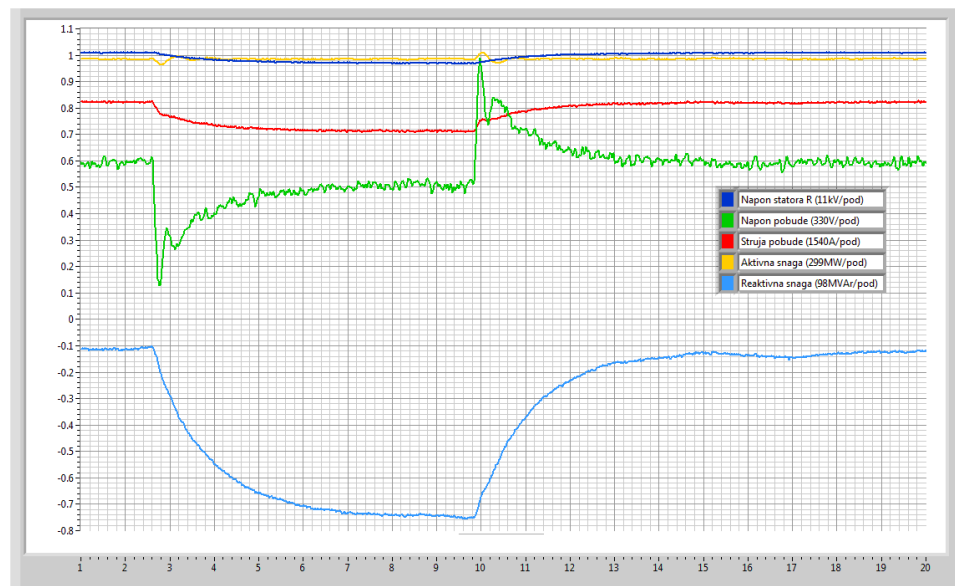
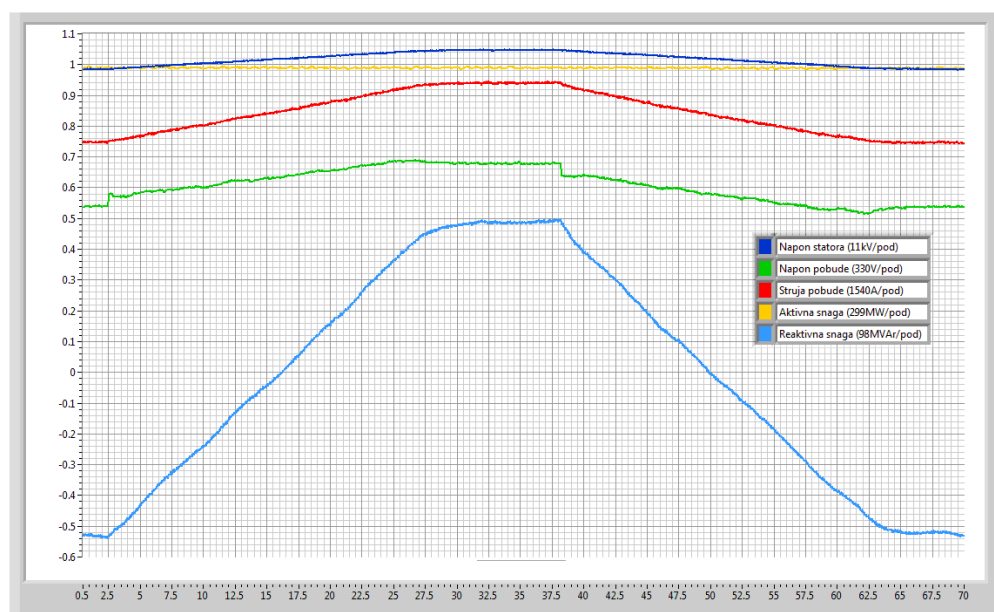
Slika 18. Odziv na odskočnu promenu reference ARN-a od $\pm 4\%$ sa uključenim stabilizatorom

Tabela V Poređenje pokazatelja dinamičkog odziva sa uključenim i isključenim stabilizatorom

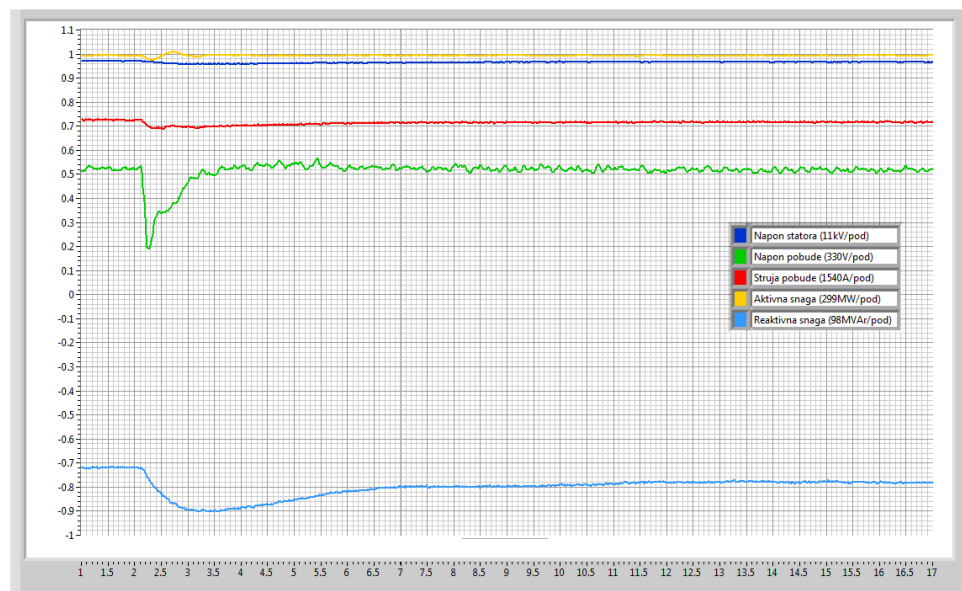
Naziv	Stab. isklj.	Stab. uklj.	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	1,84	1,85	0,025–2,5
Vreme smirenja (s)	2,76	2,78	0,2–10
Preskok (%)	0	0	0–15
Faktor prigušenja elektromehaničkih oscilacija (%)	10,9	29,4	5–100



Slika 19. Odziv na odskočnu promenu reference AQR-a

Tabela VI Pokazatelji dinamičkog odziva automatske regulacije reaktivne snage na odskočnu promenu reference

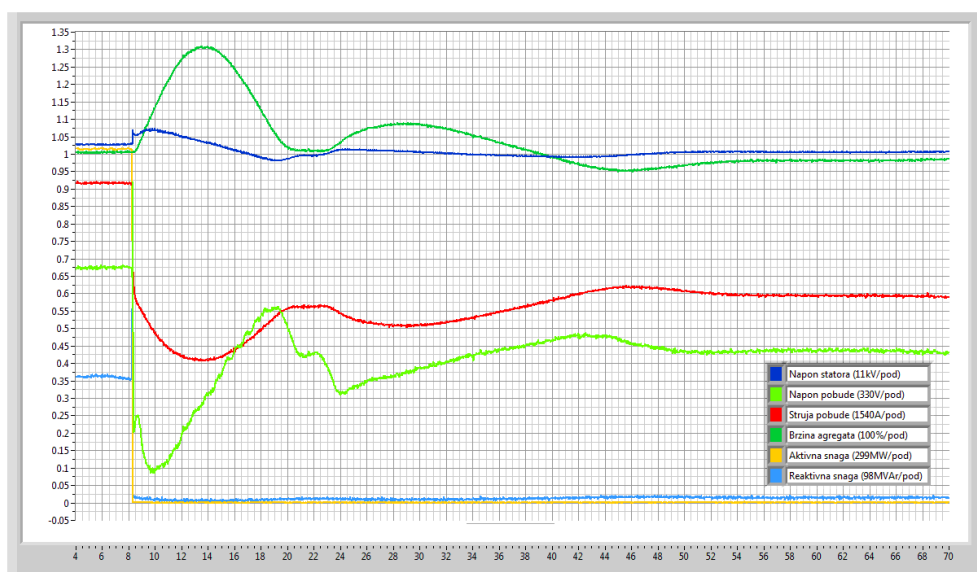
Naziv	Vrednost	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	21	10–50
Vreme smirenja (s)	27	12–100
Preskok (%)	0	0–15



Slika 20. Odziv limitera minimalne pobude na odskočnu promenu reference ARN-a od -3% sa uključenim stabilizatorom

Tabela VII Pokazatelji dinamičkog odziva limitera minimalne pobude

Naziv	Stab. isklj.	Stab. uklj.	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	3,75	3,71	2–6
Vreme smirenja (s)	4,41	4,34	2,5–10
Preskok (%)	0	0	0–15
Faktor prigušenja elektromehaničkih oscilacija (%)	9,7	23,1	5–100



Slika 21. Odziv pri zbacivanju 100% nominalne snage

Tabela VII Porasti napona statora pri zbacivanju snage

Naziv	75% Pn	100% Pn	Prihvatljiva vrednost
Maksimalna vrednost napona statora (r. j.)	1,05	1,07	1,15

8. ZAKLJUČAK

Revitalizacija agregata predstavlja ključan inženjerski poduhvat za produženje životnog veka ove reverzibilne hidroelektrane narednih nekoliko decenija. Zamena kompletnog sistema pobude omogućava visok nivo fleksibilnosti u upravljanju proizvodnjom i potrošnjom energije, brzo reagovanje na poremećaje u mreži i sigurnu podršku za integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem Srbije.

Ugradnjom kvalitetne opreme uz pravilno dimenzionisanje i primenu redundancije i u energetskom i u upravljačkom delu sistema postignuta je visoka pouzdanost sistema pobude. Kompleksni algoritmi upravljanja i regulacije uz optimalan izbor parametara omogućavaju stabilan rad motor-generatora u svim dozvoljenim stacionarnim i prelaznim režimima rada, što pokazuju eksperimentalno dobijeni dinamički odzivi sistema pobude snimljeni tokom prijemnih ispitivanja agregata. Nova topologija uspešno rešava problem nesimetričnog opterećenja poluprovodnika jer celokupnu struju pobude u svim režimima pokriva samo jedan tiristorski most, čime se smanjuju lokalna termička naprezanja i produžava radni vek opreme.

Unutar regulatora su uspešno i robusno implementirani kompleksni algoritmi koji omogućavaju kompletnu kontrolu i stabilan rad motor-generatora u sva četiri kvadranta pogonskog dijagrama. Sigurnost u radu unutar dozvoljenih termičkih granica garantovana je koordinisanim delovanjem limitera koji reaguju pre zaštitnih uređaja i sprečavaju nepotrebne ispade agregata sa mreže. Implementacija stabilizatora elektroenergetskog sistema tipa PSS2B, koji je zasnovan na integralu snage ubrzanja i opremljen torzionim filterom, omogućava efikasno prigušenje niskofrekventnih elektromehaničkih oscilacija u opsegu od 0,2 do 2,5 Hz.

LITERATURA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2008.
- [3] C.-J. Yang, X. Zhang, and H. Li, „Pumped Storage Hydropower: A Review,” *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 46, pp. 409–432, 2021.
- [4] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and M. M. Alam, „Pumped Hydro Energy Storage System: A Technological Review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 586–598, 2015.
- [5] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 2nd ed. IEEE Press, 2003.
- [6] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1998.
- [7] International Energy Agency (IEA), *Hydropower Special Market Report*, Paris, France, 2021.
- [8] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, Abu Dhabi, UAE, 2017.
- [9] H. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, „Energy Storage and Smart Energy Systems,” *Energy*, vol. 137, pp. 556–565, 2017.
- [10] D. Joksimović, Z. Čirić, N. Milojević, D. Arnautović, Đ. Stojić, M. Milinković, S. Veinović, and D. Petrović, „Parametri pobudnih sistema,” *Elektroprivreda*, vol. 64, no. 3, pp. 198–206, 2011.
- [11] ENTSO-E, *System Needs and Market Solutions Report*, Brussels, Belgium, 2022.
- [12] H. Zhao, L. Xu, and J. Wang, „Review of Frequency Stability in Power Systems with High Renewable Penetration,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 166654–166666, 2020.
- [13] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, „Definition and Classification of Power System Stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, 2004.
- [14] IEEE Std 421.1-2007, „IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines,” New York, NY, USA: IEEE, 2007.
- [15] IEEE Std 421.2-2014, „IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems,” New York, NY, USA: IEEE, 2014.
- [16] IEEE Std 421.3-1997, „IEEE Standard for High-Potential Test Requirements for Excitation Systems for Synchronous Machines,” New York, NY, USA: IEEE, 1997.
- [17] IEEE Std 421.4-2014, „IEEE Guide for Preparation of Excitation System Specifications,” New York, NY, USA: IEEE, 2014.
- [18] IEEE Std 421.5-2016, „IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” New York, NY, USA: IEEE, 2016.
- [19] IEC 60034-16, *Rotating Electrical Machines – Excitation Systems for Synchronous Machines*, Geneva, Switzerland: IEC.
- [20] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, „Optimum Settings for Automatic Controllers,” *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [21] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. ISA, 2006.
- [22] R. J. Koessler, „Techniques for Tuning Excitation System Limiters,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 3, pp. 585–591, 1994.
- [23] IEEE Power Engineering Society, *Excitation Systems Tutorial*, New York, NY, USA: IEEE, 1996.
- [24] C. A. Canizares, „Underexcitation Limiters and Their Impact on System Stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 483–489, 1995.

- [25] D. Joksimović, Đ. Stojić, S. Veinović, and D. Marčetić, „Reactive Power Controller for Under-excitation Limiter with Regard to Electromechanical Oscillations,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45001–45015, 2024.
- [26] E. V. Larsen and D. A. Swann, „Applying Power System Stabilizers: Part I,” *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, vol. PAS-100, no. 6, pp. 3017–3024, 1981.
- [27] M. J. Gibbard and D. J. Vowles, *Small-Signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems*, Adelaide, Australia, 2015.
- [28] F. Milano, *Power System Modelling and Scripting*, Berlin, Germany: Springer, 2010.

BIOGRAFIJE



Dušan Joksimović je rođen 1982. godine. Diplomirao je 2005. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za elektroenergetske sisteme, gde je i magistrirao 2013. godine. Trenutno je student doktorskih studija na Fakultetu tehničkih nauka

Univerziteta u Novom Sadu, na Odseku za energetiku, elektroniku i telekomunikacije. U Centru za automatiku i regulaciju Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla” zaposlen je od 2006. godine, gde se trenutno nalazi na poziciji stručnog savetnika. Posедуje bogato iskustvo i ekspertizu u razvoju, projektovanju, proizvodnji i ispitivanju sistema pobude za sinhronu rotacione mašine. Pored toga, poseduje duboko poznavanje procesa razvoja, projektovanja i izrade sistema za akviziciju podataka. Takođe, ima bogato iskustvo u eksperimentalnom određivanju parametara i karakteristika sinhronih generatora.

ORCID: 0000-0001-8070-9412



Đorđe Stojić je rođen u Beogradu, Srbija, 1970. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1994. godine, gde je takođe magistrirao 1996. i doktorirao 2004. godine u oblasti industrijske elektronike. Od 1994. godine zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola

Tesla” u Beogradu. Njegova istraživačka interesovanja obuhvataju sisteme upravljanja, energetske pretvarače i pogone naizmjeničnih motora.

ORCID: 0000-0002-4716-0488



Nemanja Milojević je rođen 1982. godine u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju Prirodno-matematičkog smera završio je u Mladenovcu. Godine 2005. diplomirao je na energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Po

završetku studija radio je na poslovima razvoja i projektovanja uljnih i suvih energetskih transformatora u kompaniji „ABS – Minel trafo” u Mladenovcu. Od 2007. godine zaposlen na Elektrotehničkom institutu „Nikola

Tesla” u Beogradu u Centru za automatiku i regulaciju, gde se bavi problemima regulacije i upravljanja u elektroenergetskim sistemima, razvojem, projektovanjem i ispitivanjem pobudnih sistema sinhronih mašina, ispitivanjem električnih mašina, relejnom zaštitom, električnim merenjima i automatizacijom malih elektrana. Od 2024. godine radi na poziciji senior inženjera u Odeljenju istraživanja i razvoja aplikativnih funkcija zaštitnih releja u kompaniji „HITACHI Energy” Švedska.

ORCID: 0009-0005-2806-4641



Zoran Ćirić je diplomirani inženjer elektrotehnike iz Pirota. Rođen je 1950. godine. Završio je Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu. U

prethodnom periodu u Centru za automatiku i regulaciju u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” radio na projektima razvoja, projektovanja, izrade, ugradnje, ispitivanja i puštanja u rad sistema pobuda sinhronih generatora u termoelektranama i hidroelektranama. Kao istraživač je učestvovao na više projekata Ministarstva nauke Republike Srbije koji se u širem smislu tiču oblasti regulacije elektroenergetskih sistema, unapređenja energetske efikasnosti, primene uređaja i tehnologija energetske elektronike itd. U dosadašnjem radu se bavio i problematikom električnih zaštita generatora u termoelektranama i hidroelektranama, kao i problemima vezanim za proces sinhronizacije generatora na elektroenergetsku mrežu. Učestvovao je i bavio se projektima razvoja integrisanih sistema upravljanja radom malih hidroelektrana. Učestvovao je i bavi se ispitivanjima i određivanjem parametara sinhronih generatora. Bavi se projektovanjem i izradom uređaja za akviziciju signala i kontinualni monitoring različitih sistema i postrojenja u okviru energetskih objekata.

ORCID: 0009-0000-5904-8357



Slavko Veinović je rođen u Somboru, Srbija, 1983. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2008. godine, gde je i doktorirao 2025. godine. Zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”

u Beogradu od 2009. godine.

ORCID: 0000-0001-7064-976X



Luka Ivanović je rođen 1997. godine u Valjevu. Osnovne i master studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru Signali i sistemi, gde je stekao temeljna znanja iz oblasti obrade signala, mašinskog učenja, sistema upravljanja i ugrađenih sistema. Trenutno je na doktorskim studijama iz oblasti upravljanja sistemima i obrade signala. Profesionalnu karijeru započeo je praksom u kompaniji ENEL d. o. o, gde se bavio PLC programiranjem i razvojem modela za obuku. Od februara 2021. godine zaposlen je u Institutu „Nikola Tesla” u Beogradu kao *embedded software* inženjer. U okviru svog delokruga rada učestvuje u razvoju algoritama za sisteme pobuda sinhronih mašina, programiranju mikrokontrolera, industrijskoj komunikaciji i integraciji niskonaponske elektronike za procesnu kontrolu. Pored profesionalnog angažmana, aktivno se bavi naučnim radom, a njegovi istraživački interesi uključuju primenu mašinskog učenja u elektroenergetici, obradu signala i optimizaciju upravljanja elektroenergetskim sistemima. Autor je više naučnih radova, uključujući oblasti modelovanja sinhronih generatora i stabilnosti napona u mikromrežama sa priključenim vetroelektranama.

ORCID: 0000-0003-4345-4523



Ilija Klasnić je rođen 1989. godine. Završio je osnovne studije 2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, odsek Energetika, modul Energetski pretvarači i pogoni. Master studije je završio 2013. godine dok je doktorsku disertaciju pod naslovom „Estimacija i predikcija termičkog stanja rotora hidrogenatora i uticaj na granične vrednosti reaktivnih snaga” uspešno odbranio 29. 9. 2023. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Od februara 2013. godine zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Beogradu gde je angažovan na poslovima projektovanja, izrade i puštanja u rad sistema pobude sinhronih generatora, primopredajnim i garancijskim ispitivanjima obrtnih električnih mašina, ispitivanjima energetskih pretvarača, konsultantskim

uslugama u oblasti elektroenergetike, termičkom modelovanju sinhronih generatora. Autor je ili koautor nekoliko radova publikovanih u časopisima sa impakt faktorom i prezentovanih na skupovima nacionalnog i međunarodnog značaja. Dobitnik je nagrade za najbolji rad mladog istraživača na sekciji Elektroenergetika 58. konferencije ETRAN. Sekretar je studijskog komiteta STK A1 Obrtne električne mašine u okviru CIGRE Srbija, i redovan je član STK A1 Obrtne električne mašine u okviru međunarodne CIGRE.

ORCID: 0000-0002-7908-9110



Miroslav Pavićević je rođen 1980. godine u Užicu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Energetika, Odseku za elektroenergetske sisteme. Od januara 2006. zaposlen u EPS-u, HE „Bajina Bašta”, gde je prošao sve nivoe od pripravnika do glavnog inženjera. Od 2020. godine radi na poziciji rukovodioca Službe elektroodržavanja. Aktivno učestvovao u revitalizacijama HE i RHE „Bajina Bašta” kao stručni nadzor za sve energetske sekcije. Godine 2011. radio za „Siemens AG Österreich”, kao šef gradilišta i glavni elektroinženjer, na izgradnji RP „Zestafoni” 500 kV u Gruziji. Posедуje značajno iskustvo u projektovanju, ugradnji, ispitivanju i održavanju VN razvodnih postrojenja, sistema relejnih zaštita, pobudnih sistema i hidrogenatora.

ORCID: 0009-0007-8155-9285



Dušan Trišić je rođen 1963. godine. Diplomirao je 1988. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za Elektroenergetske sisteme. U EPS-u, HE „Bajina Bašta”, zaposlen je od 1994. godine, gde se trenutno nalazi na poziciji direktora za proizvodnju energije Ogranka „Drinsko-limske HE”. Poseduje bogato iskustvo u održavanju, ispitivanjima i rekonstrukcijama sistema pobude, sistema turbinske regulacije i sistema numeričkih zaštita za klasične i reverzibilne hidroagregate.

ORCID: 0009-0003-9337-7615

Dušan Joksimović¹, Đorđe Stojić¹, Nemanja Milojčić¹, Zoran Ćirić¹,
Slavko Veinović¹, Luka Ivanović¹, Ilija Klasnić¹, Miroslav Pavićević², Dušan Trišić²



Design and Dynamic Performance of Redundant Excitation Systems for Motor-Generators at Bajina Basta Pumped-Storage Hydro Power Plant

¹ Nikola Tesla Institute of Electrical Engineering JSC Belgrade, Serbia

² EPS JSC, Branch Drinsko-Limske HPPs, HPP Bajina Bašta, Serbia

Professional article

Highlights

- Revitalization of the units at PSHPP "Bajina Bašta" – crucial for system stability and the integration of renewable energy sources.
- Modern excitation regulators enable complete control of the units in all operating states, with high reliability ensured by a redundant (1+1) architecture of thyristor bridges and control units.
- Support for unit operation in all four quadrants of the capability diagram, including synchronous start and electrical breaking.

Abstract

The run-of-river and pumped-storage hydro power plants (PSHPP) "Bajina Bašta" in Perućac represent the largest hydroelectric facilities built on the Drina River. PSHPP "Bajina Bašta" is of immense importance to the Serbian power system due to its ability to operate in both generator and motor modes, which increases system flexibility in terms of production and consumption management. Additionally, due to its capability for rapid startup and quick transitions between generator and motor modes, this plant can react swiftly to system disturbances and replace any other unit within the "Elektroprivreda Srbije" system. Consequently, the revitalization of PSHPP "Bajina Bašta," aimed at extending the units' lifespan for several decades, is of great significance to the power system. During 2024, the first unit was revitalized, while the revitalization of the second unit was completed in 2026. As part of the revitalization, the entire excitation systems were replaced. High-performance components were installed within the power section of the excitation system: excitation transformers, circuit breakers, thyristor bridges, de-excitation equipment, etc. The core of the control section consists of certified digital excitation regulators, which feature integrated sequential automation for all operating modes: generator mode, motor mode, synchronous start, and electrical braking. The regulators enable various control modes: automatic stator voltage regulation, reactive power regulation, or power factor regulation, along with integrated limiter functions and a power system stabilizer. System reliability is further ensured by the redundant implementation of thyristor bridges and excitation regulators in a 1+1 configuration. Following the completion of installation and connection of all equipment, detailed tuning and testing of the excitation system were conducted, demonstrating high system performance. This guarantees reliable and stable operation of the units in all intended modes, with automatic operation limiting within the defined boundaries of the capability diagram.

Keywords

Excitation system, Motor-generator, Reliability, Revitalization

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Excitation Systems for Motor-Generators in the Bajina Bašta Pumped-Storage Hydropower Plant" (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-a1-8/>), awarded in the Expert Committee EC-A1 Electrical Machines, at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, 26-30 May 2025.

Received: April 6th, 2026

Reviewed: June 30th, 2026

Modified: July 9th, 2026

Accepted: July 14th, 2026

*Corresponding author: Dušan Joksimović, phone: +381 64/82-59-741

E - mail: dušan.joksimovic@icent.org

