

Душан Јоксимовић¹, Ђорђе Стојић¹, Немања Милојчић¹, Зоран Ћирић¹,
Славко Веиновић¹, Лука Ивановић¹, Илија Класнић¹, Мирослав Павићевић²,
Душан Тришић²



Структура и динамичке перформансе редундантних система побуде мотор-генератора у РХЕ „Бајина Башта”

¹ Електротехнички институт Никола Тесла, Београд, Србија*

² ЕПС АД, Огранак Дринско-Лимске ХЕ, ХЕ Бајина Башта, Србија

<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.1>

Стручни рад

Кључне поруке

- Ревитализација агрегата у РХЕ „Бајина Башта” кључна за стабилност система и интеграцију обновљивих извора
- Савремени регулатори побуде омогућавају потпуну контролу агрегата у свим погонским стањима уз високу поузданост осигурану редундантном (1+1) архитектуром тиристорских мостова и регулаторских јединица
- Подржан рад агрегата у сва четири квадранта погонског дијаграма уз синхрони старт и електрично кочење

Кратак садржај

Проточна хидроелектрана и реверзибилна хидроелектрана (РХЕ) „Бајина Башта” у Перућцу представљају највеће хидроенергетске објекте изграђене на реци Дрини. РХЕ „Бајина Башта” има велики значај за електроенергетски систем Србије због могућности рада у генераторском и моторном режиму, чиме повећава флексибилност система са аспекта управљања производњом и потрошњом. Такође, због своје могућности да брзо стартује и брзо промени режим рада из генераторског у моторни и обрнуто, ова електрана може брзо да реагује на поремећаје у систему и замени било који други агрегат у систему „Електропривреде Србије”. Самим тим, и ревитализација РХЕ „Бајина Башта”, која треба да продужи животног века агрегата за неколико деценија, има велики значај за електроенергетски систем. Током 2024. ревитализован је први агрегат, док је ревитализација другог агрегата завршена 2026. У оквиру ревитализације су замењени и комплетни побудни системи. У оквиру енергетског дела система побуде уграђене су квалитетне компоненте: побудни трансформатори, прекидачи, тиристорски мостови, опрема за демагнетизацију итд. Основу управљачког дела система побуде чине сертификовани дигитални регулатори побуде у оквиру којих су реализовани секвентни аутомати за све режиме рада агрегата: генераторски режим, моторни режим, синхрони старт и електрично кочење. Регулатори омогућавају различите режиме регулације: аутоматска регулација напона статора, реактивне снаге или фактора снаге уз интегрисане лимитерске функције и стабилизатор електроенергетског система. Поузданост система додатно је осигурана редундантном имплементацијом тиристорских мостова и регулатора побуде у конфигурацији 1+1. Након завршене монтаже и повезивања комплетне опреме, спроведена су детаљна подешавања и испитивања система побуде, која су показала добре перформансе система. Ово гарантује поуздан и стабилан рад агрегата у свим предвиђеним режимима, уз аутоматско ограничење рада унутар дефинисаних граница погонског дијаграма.

Кључне речи

**Мотор-генератор, поузданост,
ревитализација, систем побуде**

Примљено: 6. април 2026.

Рецензирано: 30. јун 2026.

Измењено: 9. јул 2026.

Одобрено: 14. јул 2026.

* Кореспондирајући аутор: Душан Јоксимовић, телефон: +381 64/82-59-741
Имејл: dusan.joksimovic@ieent.org

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Системи побуде за мотор-генераторе у РХЕ „Бајина Башта”” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.1>), награђеног у Студијском комитету СТК-А1 Обртне електричне машине, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

1. УВОД

Основни циљ овог рада је приказ начина техничке реализације система побуде на агрегатима резервизбилне хидроелектране (РХЕ), као и анализа његових динамичких одзива у различитим режимима рада. Посебна пажња посвећена је структури регулационих петљи, улози лимитера и њиховој међусобној координацији, као и утицају ових елемената на стабилност рада агрегата. Анализа је заснована на резултатима испитивања и снимљеним одзивима, што омогућава увид у стварне динамичке карактеристике система побуде.

РХЕ „Бајина Башта” има значајну улогу у електроенергетском систему Србије захваљујући могућности рада у генераторском и моторном режиму, чиме се повећава флексибилност система у управљању производњом и потрошњом електричне енергије [1], [2]. Периоди мање потрошње електричне енергије користе се за пуњење горњег акумулационог језера радом електране у моторном режиму [3], [4]. Када се у систему јави потреба за додатном енергијом, агрегати прелазе на генераторски режим, при чему се потенцијална енергија воде користи за производњу електричне енергије [1], [5]. Због могућности брзог старта и промене режима рада, ово постројење може брзо да реагује на поремећаје у систему и замени друге агрегате унутар система доприносећи балансирању снаге [2], [6].

Резервизбилне електране имају значајну улогу у интеграцији обновљивих извора енергије у електроенергетски систем [7], [8]. Њихова улога огледа се у обезбеђивању производних капацитета и складиштењу енергије великих размера, што је од посебног значаја за ублажавање варијабилности снаге добијене из ветра и сунчевог зрачења [7], [9]. РХЕ „Бајина Башта”, пуштена у погон 1982. године, располаже инсталисаном снагом од 2 x 300 MW са фактором снаге 0,95 у генераторском и 2 x 310 MW у пумпном режиму [10]. Овај вид складиштења служи као резерва за националну мрежу, нарочито у периодима вршне потрошње или сушних интервала [8], [11], омогућава ефикасно управљање, ниже оперативне трошкове и доприноси стабилности мреже у условима повећане заступљености обновљивих извора [9], [12].

Управљање овим агрегатима захтева поуздан систем побуде чија је основна функција обезбеђивање магнетног флукса неопходног за рад синхроне машине. Систем побуде обезбеђује напајање побудног намотаја ротора регулисаном једносмерном струјом, чиме се контролишу напон статора и размена активне и реактивне снаге са електроенергетском мрежом [1], [13]. Такође, систем побуде пружа подршку транзијентној стабилности брзим одзивом и форсирањем побудне струје током поремећаја [1], [14].

Процес ревитализације система побуде је обухватио имплементацију техничких решења која у поређењу са ранијим системом побуде доносе недвосмислене предности у погледу поузданости, енергетске ефикасности и интеграције у погон

електране. Значајна архитектонска предност новог решења у односу на старо јесте примена потпуне 1+1 редунданције, која обухвата како управљачки тако и енергетски део система побуде. Оваква конфигурација директно подиже ниво расположивости агрегата, јер омогућава континуитет рада и аутоматски прелазак на резервне компоненте у случају унутрашњих неисправности, што код претходне погонске конфигурације није било изведено на овом нивоу. У енергетском смислу, прелазак на нову топологију успешно решава изазове повезане са расподелом струја унутар статичких претварача. Конкретно, целокупну струју побуде у свим режимима рада, укључујући и режим форсирања побуде, обезбеђује само један тиристорски мост. Овим приступом је остварена велика предност у односу на стари систем јер је у потпуности елиминисана појава несиметричног оптерећења паралелних тиристора, чиме се смањују локална термичка напрезања, уједначава деградација компоненти и продужава радни век енергетских полупроводника. Поред предности у примарним колима, нови систем побуде доноси и напредну информационо-управљачку архитектуру која представља велико унапређење у поређењу са претходним стањем. Уграђен је наменски аквизициони систем пројектован за континуални мониторинг, детекцију и анализу погонских догађаја како самог система побуде тако и целог агрегата. Кључна предност овог подсистема у односу на решења из старог система јесте његова потпуна функционална независност од рада главног регулатора побуде, чиме се осигурава да процеси обраде података ни на који начин не угрожавају стабилност примарних управљачких петљи машине. Са високом учестаношћу одабирања, од 5 kHz по каналу за аналогне величине, овај систем у поређењу са технолошким могућностима старог система омогућава знатно прецизније регистровање и верну реконструкцију брзих прелазних процеса. То олакшава каснију дијагностику кварова, идентификацију узрока поремећаја и детаљну анализу динамичког понашања система, што је са претходном аналогном или старијом дигиталном опремом било изузетно тешко или неизводљиво. Коначно, повезивање новог система побуде са SCADA системом електране изведено је кроз савремени комуникациони интерфејс који нуди супериорне могућности повезивања у односу на раније решење. Са једне стране, задржан је одређени број физичких жичаних веза за пренос контактних сигнала и команди, чиме се обезбеђује брза и галвански изолована размена временски критичних информација. С друге стране, за пренос комплексних скупова података имплементирана је серијска комуникација заснована на стандардизованом протоколу IEC 60870-5-104.

Стандардизација области система побуде обухваћена је серијама стандарда IEEE 421.1 до 6 [14]–[18] и IEC 60034-16.1 до 3 [19], који дефинишу терминологију, методе испитивања, захтеве за

перформансе, припрему техничких спецификација и моделе за анализу система.

Висока поузданост система побуде на агрегатима у Перућцу постигнута је уградњом висококвалитетне опреме уз прецизно димензионисање и доследну примену редунданције у енергетском и управљачком делу. Управљачка структура се ослања на дигиталне регулаторе који путем комплексних секвентних аутомата управљају специфичним режимима рада агрегата, укључујући синхрони старт и електрично кочење. Комплексни алгоритми управљања и регулације, уз оптималан избор параметара, омогућавају стабилан рад мотор-генератора (М-Г) у свим дозвољеним режимима, што потврђују динамички одзиви снимљени током пријемних испитивања након ревитализације [10].

Приликом пројектовања система примењене су стандардне инжењерске методе и познате структуре регулације. Као допуна стандардним регулационим функцијама, успешно је имплементиран и пуштен у рад лимитер максималне реактивне снаге, који обезбеђује сигуран рад у оквиру дозвољених дијаграма оптерећења машине. Највећи инжењерски изазов представљала је реализација комплексних секвентних стања за различите режиме рада реверзибилног постројења, при чему је у секвентни алгоритам успешно интегрисан моторни режим рада са синхроним стартом, што је приказано у 5. поглављу. Посебно је захтевна била поуздана имплементација процеса преласка са једног на друго напајање на крају процеса синхроног старта. Значајан изазов чинило је и уклапање новог система у захтеве SCADA система. С обзиром на то да се од надређеног система примају искључиво поједностављени налози (Старт, Стоп и Електрично кочење), целокупна комплексна логика секвенцијалног управљања, праћење стања и строга провера услова за безбедно извршење сваке команде морала је бити аутономно и робусно имплементирана унутар самих дигиталних регулатора побуде.

Регулатори побуде омогућавају различите режиме регулације, као што су регулација напона статора, реактивне снаге и фактора снаге. У режимима регулације реактивне снаге и фактора снаге спољашње регулационе петље задају референтну вредност унутрашњој петљи регулације напона, која обезбеђује брз одзив система [1], [14]. Подешавање PID регулатора има посебан значај и врши се применом класичних и савремених метода оптимизације [20], [21].

Поред регулационих функција, систем садржи лимитере који спречавају рад агрегата ван дозвољених граница погонског дијаграма [22]. Лимитери максималне побуде и реактивне снаге спречавају термичко преоптерећење намотаја ротора и статора, док V/Hz лимитер штити магнетно коло мотор-генератора и блок-трансформатора од презасићења [13], [23]. С друге стране, лимитер минималне побуде ограничава рад у потпобуђеној области погонског дијаграма која би могла угрозити статичку стабилност [24]. При раду овог лимитера нарочито је важно размотрити његов утицај на

електромеханичке осцилације и координацију са стабилизатором како би се избегла појава негативног пригушења [25]. Важан аспект поузданог рада је координација лимитера са заштитним уређајима. Карактеристике лимитера треба да буду прецизно подешене тако да реагују пре деловања одговарајућих заштита, чиме се спречавају непотребни испади агрегата са мреже током прелазних појава и поремећаја у систему.

Електромеханичке осцилације су природне, нискофреквентне осцилације које се јављају у међусобно повезаним електроенергетским системима због динамичке интеракције између електричних и механичких компоненти. Ове осцилације утичу на флукуације брзине обртања ротора синхроних генератора, протока електричне енергије, напона и струја. Типично имају фреквенцију од 0,1 до 3 Hz [1], [14]. Недовољно пригушење ових осцилација ограничава капацитет система за пренос енергије и способност система да се опорави од поремећаја и врати у стабилно стање. Слабопригушене осцилације у систему могу расти по амплитуди и на крају довести до каскадних испада, што у екстремним случајевима може резултирати широко распрострањеним нестанком електричне енергије. Такође, дуготрајне слабопригушене осцилације могу прекомерно оптеретити генераторе, водове и другу опрему, што може довести до убрзаног старења и повећати ризик од отказа опреме [14]. Стабилизатор електроенергетског система треба да делује на пригушење ових осцилација, а његови параметри се одређују на основу детаљне анализе стабилности при малим поремећајима [26]. Адекватно фазно компензовање унутар стабилизатора осигурава стабилност у широком опсегу радних тачака и различитих мрежних конфигурација [27].

Савремени електроенергетски системи пролазе кроз структурну транзицију обележену повећањем удела обновљивих извора енергије, првенствено ветроелектрана и фотонапонских постројења. Ова промена у производном миксу поставља комплексне захтеве пред одржавање стабилности система, нарочито у погледу пригушења системских осцилација. Карактеристика ових извора је варијабилност примарног ресурса која зависи од тренутних метеоролошких услова, што уноси стохастичност у биланс производње и потрошње електричне енергије и узрокује флукуације параметара мреже, као и повећано присуство слабопригушених електромеханичких осцилација. За разлику од конвенционалних синхроних агрегата, обновљиви извори се на мрежу повезују посредством енергетских претвараача и не поседују инхерентну ротациону инерцију. Са порастом учешћа оваквих извора, укупна еквивалентна инерција електроенергетског система се смањује, што мрежу чини осетљивијом на поремећаје. У оваквим околностима, фиксна подешавања управљачких петљи претходног система побуде показују јасна

техничка ограничења, па спремност новог система за промену параметара у реалном времену и адаптивно управљање представљају кључну функционалну предност у односу на стари систем. Примењено решење омогућава стабилно повезивање са надређеним системима управљања посредством захтеваних комуникационих протокола, што обезбеђује дугорочну оперативну прилагодљивост агрегата променљивим условима у мрежи, што са претходним системом побуде није било изводљиво.

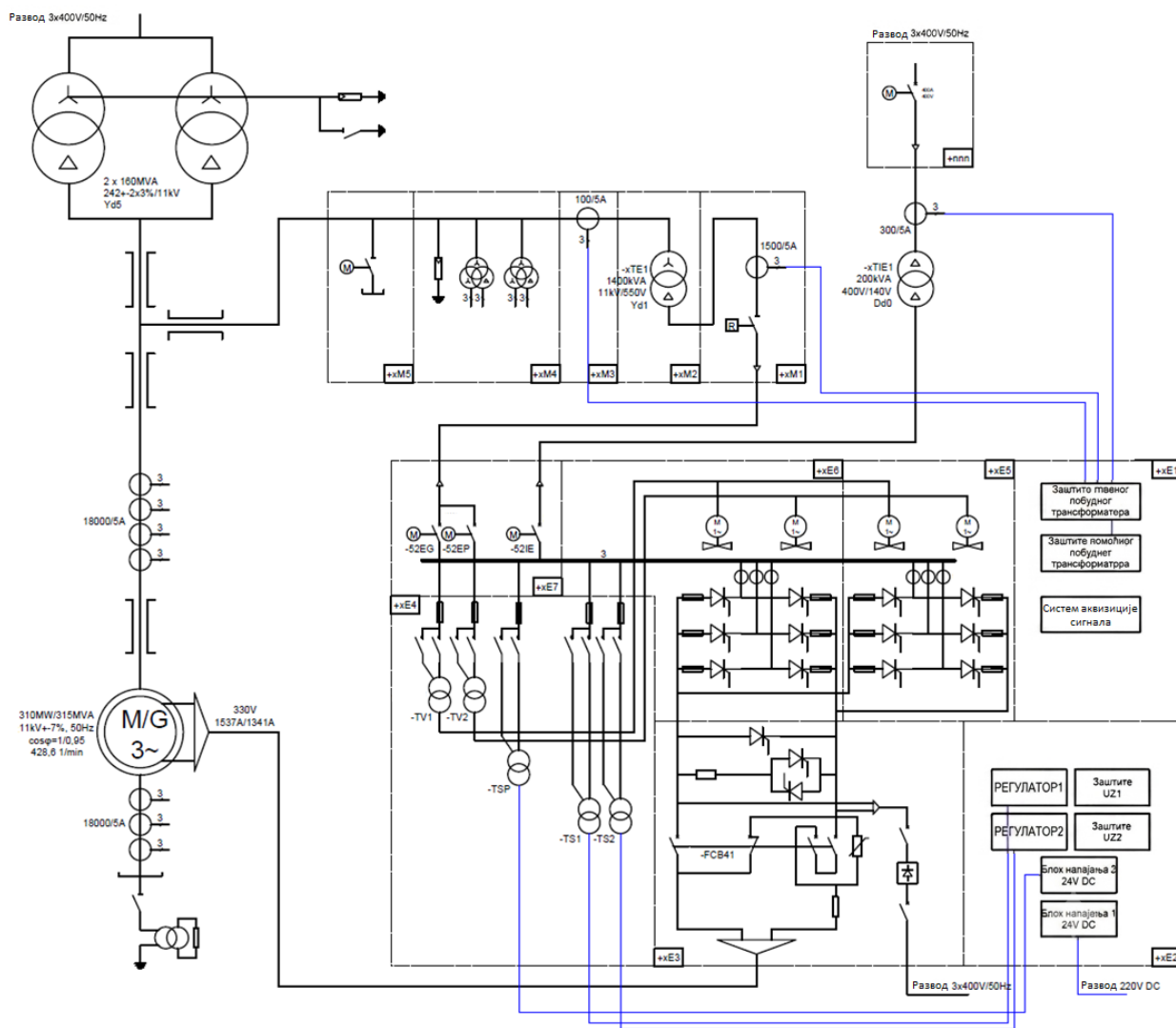
Поузданост и перформансе система евалуирају се кроз специфичне тестове дефинисане међународним стандардима за испитивање и спецификацију побудних система [15]. Анализа експериментално добијених динамичких одзива у затвореној петљи пружа увид у динамичке перформансе и робустност регулације [28], док се усаглашеност са мрежним правилима проверава кроз ригорозне протоколе мерења и моделовања [11], [29].

У наставку рада приказана је структура система побуде, принципи његове техничке реализације и резултати анализе динамичких одзива у

карактеристичним режимима рада, са циљем да се укаже на утицај појединих елемената система на стабилност и поузданост рада агрегата.

2. СТРУКТУРА СИСТЕМА ПОБУДЕ

Системи побуде реализовани су према структурној шеми на Слици 1 и састоје се из енергетске и управљачке секције, при чему су обе секције изведене редувантно. Основу енергетске секције чине два пуноуправљива тиристорска моста који врше регулисано претварање трофазног наизменичног напона у једносмерни. Редувантност је остварена у конфигурацији 1+1 уградњом два идентична тиристорска моста који представљају потпуну резерву један другом. У овој поставци активан је један тиристорски мост преко ког се напаја побудни намотај, док евентуални квар на њему иницира аутоматски прелазак на резервни мост који преузима напајање без видљивог утицаја на рад агрегата. Такође, оператеру је омогућен прелазак са моста на мост на основу захтева. Тиристорски мостови се са наизменичне стране напајају са



Слика 1. Структурна шема система побуде

статорских извода генератора преко главног побудног трансформатора 1TE1/2TE1 (11 kV / 550 V) и прекидача 52EG при раду агрегата у генераторском режиму, односно прекидача 52EP након залетања при раду у моторном режиму. Током синхроног старта у моторном режиму и током електричног кочења, тиристорски мостови се напајају из постројења сопствене потрошње напона 0,4 kV преко трансформатора почетне побуде TIE1 (380 V / 140 V) и прекидача 52IE. Једносмерна страна тиристорских мостова повезана је на побудни намотај генератора преко прекидача FCB41 са три радна и једним мирним контактом, који уз нелинеарни отпорник омогућава брзу демагнетизацију генератора у хаваријским режимима. Поред наведеног, енергетска секција обухвата пренапонску заштиту генератора са антипаралелним тиристорима и отпорником, склоп за почетно побуђивање у генераторском режиму и RC филтере.

Основу управљачке секције чине два дигитална аутоматска регулатора побуде заснована на савременој технологији са високим перформансама регулације. Регулатори су идентични и међусобно независни, чиме је обезбеђена потпуна резерва у конфигурацији 1+1. Евентуални квар на активном регулатору узрокује аутоматски прелазак на резервни регулатор који преузима све функције без утицаја на рад агрегата. Такође, на налог оператера омогућен је прелазак са једног регулатора на други регулатор. У оквиру управљачке секције реализоване су регулационе функције, лимитери, заштите, редундантност, управљање, мерења, надзор и комуникација са другим системима и уређајима у електрани. Регулатори управљају тиристорским мостовима помоћу фазне регулације импулса за паљење тиристора, где угао паљења директно одређује вредност напона побуде. Један регулатор може управљати са оба тиристорска моста, при чему комбинација једног тиристорског моста и једног регулатора обезбеђује све предвиђене режиме рада. Локално управљање и надзор врше се помоћу 17-инчног екрана осетљивог на додир, уз даљинско управљање са SCADA система. Напајање управљачке секције је редундантно, са доводима из 220 VDC развода и инвертора електране.

Ова секција обухвата и аквизициони систем за мониторинг побуде, као и детекцију и анализу поремећаја у раду система и читавог агрегата. Аквизициони систем независно од регулатора високом учестаношћу прикупља аналогне и дигиталне сигнале. Аналогни сигнали се одабирају учестаношћу од 5 kHz, док се дигитални скенирају на сваких 10 ms. У овај систем су уведени и интерни сигнали регулатора. Систем омогућава приказ тренутних вредности и графички приказ временске промене свих величина, укључујући напоне и струје статора, напон и струју побуде, снаге, брзину агрегата, као и стања заштита и расклопне опреме. При испуњењу дефинисаних критеријума, систем аутоматски снима временске промене сигнала у фајл у одређеном трајању пре и након настанка догађаја. Такође,

аквизициони систем бележи промене дигиталних сигнала и формира хронолошку листу догађаја.

3. ОСНОВНИ ТЕХНИЧКИ ПОДАЦИ И КАРАКТЕРИСТИКЕ

Систем побуде има следеће основне техничке податке:

- тип система побуде: **статички самопобудни**;
- број регулатора побуде: **два редундантна у конфигурацији 1+1**;
- број тиристорских мостова: **два редундантна у конфигурацији 1+1**;
- тип тиристорских мостова: **трофазни пуноуправљиви**;
- хлађење тиристорских мостова: **редундантно принудно ваздушно**;
- преносни однос главног побудног трансформатора: **11 kV / 550 V**;
- преносни однос трансформатора почетне побуде: **380 V / 140 V**;
- номинална фреквенција напајања тиристорских мостова: **50 Hz**;
- номинална струја побуде: **1537 A (генератор) / 1341 A (мотор)**;
- номинални напон побуде: **330 V**;
- трајно дозвољена струја побуде: **1691 A**;
- напон побуде при трајно дозвољеној струји побуде: **363 V**;
- плафонска струја побуде: **3074 A**;
- коефицијент форсирања по струји побуде: **2**;
- дозвољено време трајања плафонске струје побуде: **10 s**;
- позитиван плафонски напон побуде при номиналном напону напајања: **670 V**;
- негативан плафонски напон побуде при номиналном напону напајања: **-520 V**;
- коефицијент форсирања по напону побуде: **2,03**;
- напонска класа тиристора: **1800 V**;
- опсег регулације напона статора: **80-110 %**;
- опсег подешења компензације пада напона по реактивном оптерећењу: **±10 %**;
- тачност регулације: **±0,5 %**;
- грешка регулације при промени температуре амбијента у опсегу 5-50 °C: **±0,5 %**;
- грешка регулације при промени фреквенције у опсегу 45 Hz-100 Hz: **±1 %**;
- време одзива побудног система: **20 ms**;
- максимално време брзог разбуђивања: **2 s**;
- максимални пораст напона статора при наглом растерећењу при номиналној активној снази и $\cos \varphi = 0,95$ уз пораст брзине до 155 %: **20 %**.

4. ФУНКЦИЈЕ СИСТЕМА ПОБУДЕ

Системи побуде пројектовани су са функционалностима описаним у наставку.

4.1 Енергетска и управљачка редунданција

- Редундантно двоканално напајање побудног намотаја мотор-генератора помоћу тиристорских мостова у конфигурацији 1+1, обезбеђујући потребну струју побуде у свим дозвољеним стационарним и прелазним режимима рада;
- редундантна двоканална регулација побуде реализована у конфигурацији 1+1;
- редундантно хлађење тиристорских мостова изведено у конфигурацији 1+1;
- аутоматски прелазак са једног на други тиристорски мост при квару активног моста или ручни прелазак на налог оператера без значајнијег утицаја на рад агрегата;
- аутоматски прелазак са једног на други регулатор при квару активног регулатора или ручни прелазак на налог оператера без значајнијег утицаја на рад агрегата;
- аутоматски прелазак са једног на други вентилатор тиристорског моста при квару активног вентилатора или ручни прелазак на налог оператера;
- прелазак са једног на други режим регулације без значајнијег утицаја на рад агрегата.

4.2 Режији регулације и управљања побудом

- Аутоматска регулација напона – регулација напона статора према задатој референтној вредности, уз компензацију пада напона на блок-трансформатору по реактивној снази М-Г;
- ручна регулација – регулација струје побуде према задатој референтној вредности;
- аутоматска регулација реактивне снаге – регулација реактивне снаге према задатој референтној вредности;
- аутоматска регулација фактора снаге – регулација фактора снаге према задатој референтној вредности;
- режим директног задавања угла паљења тиристора – могућност задавања угла паљења тиристора када је активан „тест” начин рада агрегата;
- побуђивање М-Г у аутоматској и ручној регулацији на задату вредност напона празног хода у генераторском режиму рада;
- побуђивање М-Г током синхроног старта применом статичког фреквентног претварача или током „Back-to-Back” старта у моторном режиму рада.

4.3 Лимитери и заштите

- Аутоматско ограничење рада М-Г у области дозвољених термичких напрезања статора и ротора, а у складу са погонском картом М-Г; ово је реализовано преко лимитера минималне побуде, лимитера максималне струје ротора, лимитера максималне струје статора и лимитера максималне реактивне снаге;
- временски ограничено форсирање побуде применом комбиноване тренутне и инверзне

струјно-временске карактеристике, активно при великим поремећајима у електроенергетском систему;

- спречавање магнетског преоптерећења М-Г и блок-трансформатора, реализовано преко V/Hz лимитера;
- пригушење електромеханичких осцилација ротора, реализовано преко стабилизатора електроенергетског система типа PSS2B.

4.4 Поступци заустављања и хаваријско искључење

- Разбуђивање М-Г инвертовањем тиристора при нормалном заустављању;
- гашење поља М-Г у хаваријским режимима помоћу прекидача и отпорника за демагнетизацију;
- електрично кочење применљиво при заустављању агрегата;
- заштита од појаве пренапона у побудном колу, који могу настати услед асинхроног рада М-Г на мрежи или при прекиду струјног кола побуде.

4.5 Систем интерних заштита система побуде

- Заштита од отказа регулационог канала;
- краткоспојна заштита на једносмерној страни система побуде;
- земљоспојна заштита побудног кола;
- прекострујна заштита трансформатора;
- краткоспојна заштита трансформатора;
- диференцијална заштита трансформатора;
- заштита од преоптерећења ротора са струјно зависном временском карактеристиком;
- заштита од фазне несиметрије тиристорског моста;
- заштита од нестанка сигнала синхронизације паљења тиристора;
- заштита од нестанка мерења статорског напона;
- заштита од нестанка мерења струја побуде;
- заштита од неуспелог побуђивања;
- заштита од неуспелог разбуђивања;
- самонадзор управљачке електронике.

4.6 Аквизиција података, надзор и комуникација

- Формирање хронолошке листе догађаја;
- снимање у фајлове сигнала са резолуцијом до 5 kHz; снимање се покреће при испуњењу услова за тригер, обухватајући дефинисано трајање пре и након настанка тригера, као и на директан налог оператера;
- локално управљање и надзор остварени путем екрана дијагонале 17" осетљивог на додир, као и са предњих панела регулатора опремљених дисплејем, LED диодама и тастерима;
- даљинска комуникација са другим уређајима и системима у електрани, укључујући управљање и надзор посредством SCADA система.

5. РЕЖИМИ РАДА АГРЕГАТА И СЕКВЕНТНА СТАЊА РЕГУЛАТОРА

Рад регулатора побуде организован је кроз секвентна стања која представљају делове програмског кода који постају активни у зависности од режима рада М-Г, налога оператера, сигнала из система за надзор и управљање, деловања заштита и осталих системских услова. Сваки технолошки режим поседује специфичну структуру стања приказану на одговарајућим дијаграмима.

5.1 Генераторски режим

Процес рада система побуде када је агрегат у генераторском режиму обухвата неколико секвентних стања описаних у наставку:

- **почетна фаза и припрема:** у почетном стању импулси за тиристорске мостове су блокирани; након залетања агрегата до номиналне брзине задавањем налога за старт уколико су испуњени сви услови врши се припрема укључењем прекидача 52EG и прекидача поља FCB41;
- **побуђивање и празан ход:** када се испуне услови за побуђивање, деблокирају се импулси; будући да главни побудни трансформатор 1TE1/2TE1 при разбуђеном стању М-Г није под напоном, поступак побуђивања почиње укључењем склопа почетне побуде; током постепеног пораста напона статора, напајање система преузима мотор-генератор, а регулатор одржава напон у режиму аутоматске регулације;
- **рад на мрежи:** након синхронизације и повезивања на мрежу, омогућен је избор између аутоматске регулације напона статора, регулације реактивне снаге или фактора снаге;
- **разбуђивање и искључење:** по налогу за заустављање или деловању заштите се врши инвертовање тиристорског моста ради брзог разбуђивања; процес се завршава искључењем прекидача 52EG и FCB41.

5.2 Синхрони старт

Током процеса синхроног старта М-Г агрегат се залеће од мировања до номиналне брзине. Статор М-Г се напаја са стартног агрегата у ХЕ током „Back-to-Back” синхроног старта, односно са фреквентног претварача у процесу SFP синхроног старта, док се ротор напаја константном струјом побуде. Процес рада система побуде током синхроног старта обухвата секвентна стања описана како следи:

- **припрема и почетак залетања:** из почетног стања у ком су блокирани импулси, задавањем налога за старт уколико су испуњени сви услови за синхрони старт, прелази се у стање припреме; у овом стању се укључују прекидач 52IE и прекидач поља FCB41, чиме се успоставља напајање из развода сопствене потрошње електране преко трансформатора TIE1;
- **побуђивање:** када се испуне услови за побуђивање, деблокирају се импулси, агрегат се побуђује и регулатор одржава константну струју

побуде током целог процеса залетања; у овом стању активна је заштита од неуспелог синхроног старта;

- **успешан старт и прелазак:** када се детектују успешан синхрони старт и залетање, врши се укључење тиристора за прелаз који преспаја ротор и омогућава безбедну промену напајања система побуде; искључењем прекидача 52IE и укључењем прекидача 52EP прелази се на напајање система побуде са извода генератора у моторном режиму рада;
- **разбуђивање при прекиду залетања:** ако дође до неуспелог залетања или налога за прекид, улази се у стање у коме се врши инвертовање моста или брзо разбуђивање; процес се завршава искључењем прекидача 52IE и FCB41.

5.3 Моторни режим

Након успешног синхроног старта, агрегат прелази у моторни режим који обухвата фазе описане у наставку:

- **успостављање самопобуде:** агрегат је на номиналној брзини у празном ходу, побуђен је са статорских извода, при чему је активна аутоматска регулација напона;
- **рад мотора на мрежи:** након синхронизације са мрежом у моторном режиму, прелази се у стање у ком су уз аутоматску регулацију напона статора и ручну регулацију омогућене и аутоматска регулација реактивне снаге и аутоматска регулација фактора снаге;
- **искључење из моторног режима:** по налогу за разбуђивање у моторном режиму, врши се инвертовање тиристорског моста или брзо разбуђивање; процес се финализује искључењем прекидача 52EP и FCB41.

5.4 Електрично кочење

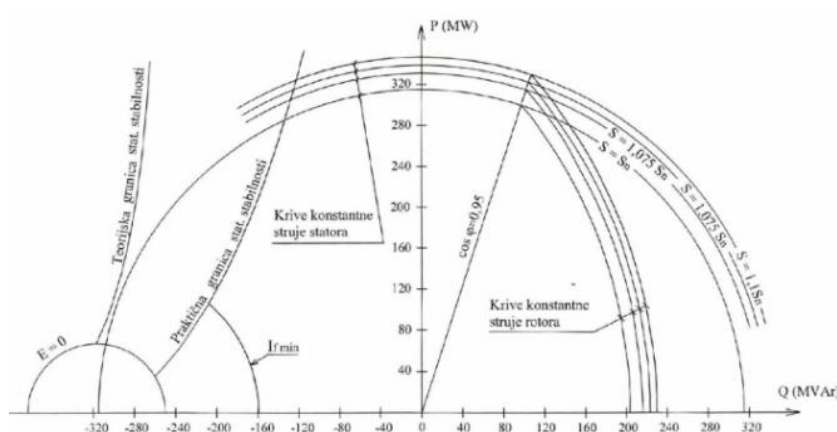
Са циљем ефикаснијег и временски краћег заустављања, као и смањеног интензитета хабања механичких кочница, агрегати РХЕ „Бајина Башта” заустављају се процесом електричног кочења. На тај начин се продужава век трајања механичких кочница, олакшава њихово одржавање и избегава загађење услед дисипације материјала контактних облога механичких кочница у генераторском простору. Током електричног кочења ротор се напаја константном струјом побуде, док је намотај статора у трополном кратком споју који се формира укључењем растављача за електрично кочење када брзина агрегата падне испод 50% номиналне вредности. Након побуђивања агрегата струје, у намотајима статора стварају кочиони момент који зауставља агрегат без употребе механичких кочница.

- **припрема за кочење:** секвенца се активира када је агрегат у празном ходу и када брзина ротора падне испод 50% номиналне вредности; у овом стању се врши затварање растављача за електрично кочење, чиме се намотај статора доводи у трополни кратки спој, укључују се прекидач 52IE и прекидач поља FCB41, чиме се успоставља напајање из развода

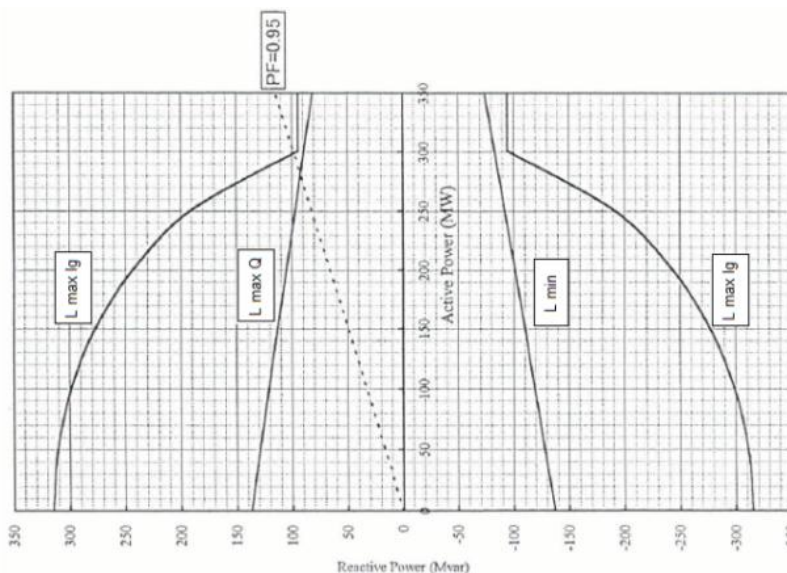
фактора снаге задату од стране оператора у опсегу дефинисаном погонским дијаграмом.

Када је активна ручна регулација, сигнал референце стално прати рад ручне регулације, чиме се

обезбеђује прелаз са ручне на аутоматску регулацију без промене у струји побуде и напону генератора.



Слика 3. Погонски дијаграм агрегата



Слика 4. Лимитери побуде

6.2 Ручна регулација струје побуде

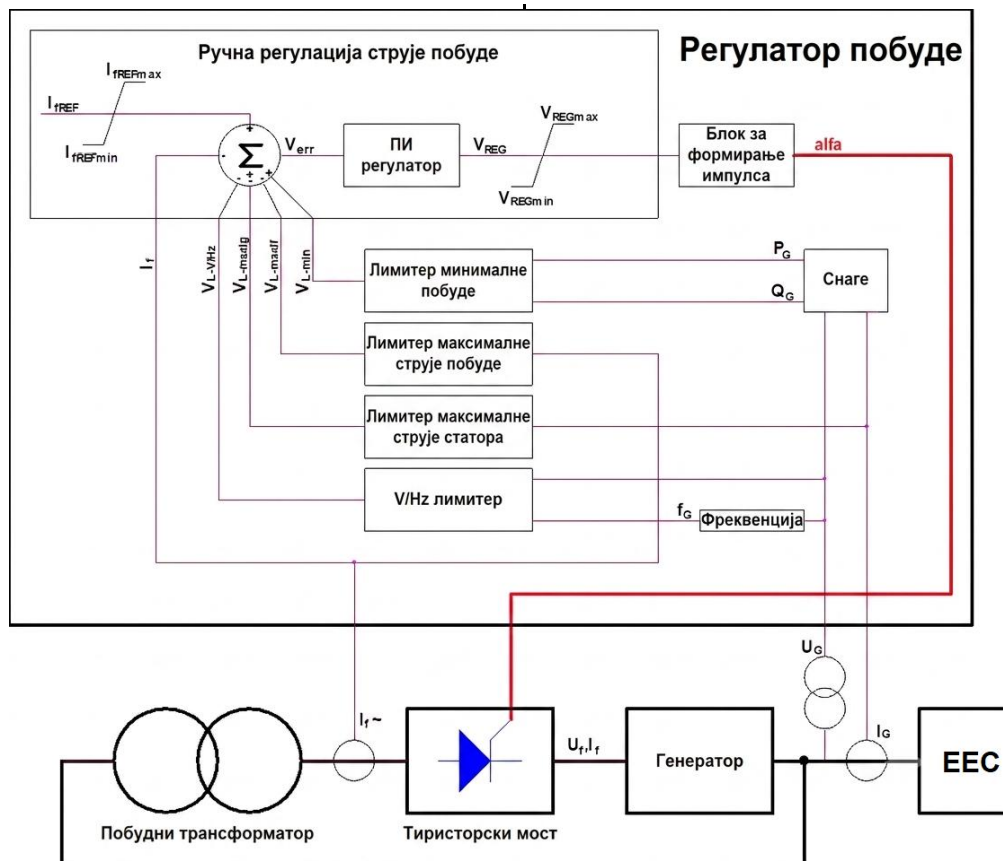
Ручна регулација струје побуде представља резервни режим рада регулатора побуде при којем се струја побуде одржава на референтној вредности. Структурна шема система за регулацију побуде када је активна ручна регулација приказана је на Слици 5.

Ручна регулација је заснована на ПИ регулатору (пропорционално и интегрално дејство) и има негативну повратну спрегу по струји побуде. Лимитери побуде који имају за циљ да спрече да се генератор нађе ван дозвољене области рада погонског дијаграма делују преко суматора ручне регулације. Коначни излазни сигнал РР петље директно одређује угао фазног помераја α за паљење тиристора, чиме се прецизно контролише излазни напон тиристорског моста (напон побуде).

Заштита од нестанка мерења струје побуде блокира овај режим регулације. Из аутоматске регулације у ручну регулацију се прелази аутоматски при нестанку мерења напона статора, као и током електричног кочења и синхроног старта. Када је активна аутоматска регулација, сигнал референце резервне регулације прати рад аутоматске регулације, чиме се обезбеђује прелаз на ручну регулацију у сваком тренутку без значајније промене у струји побуде.

6.3 Аутоматска регулација реактивне снаге (AQR)

Аутоматска регулација реактивне снаге (AQR) представља режим у ком се реактивна снага одржава на референтној вредности. Блок-шема AQR регулације дата је на Слици 6. Регулација реактивне снаге је заснована на ПИ регулатору и има негативну повратну спрегу по реактивној снази. Излазни сигнал



Слика 5. Структурна шема система за регулацију побуде када је активна ручна регулација

представља референтну вредност напона статора, тако да у AQR режиму аутоматска регулација напона остаје и даље активна, али јој је ПИ регулатор AQR режима надређен, односно задаје референтну вредност. Лимитери побуде и стабилизатор електроенергетског система који делују преко суматора аутоматске регулације остају активни.

Блокада AQR режима је активна када агрегат није на мрежи, када су активни лимитери или када се напон статора нађе ван дозвољеног опсега.



Слика 6. Блок-шема Q регулације реактивне снаге

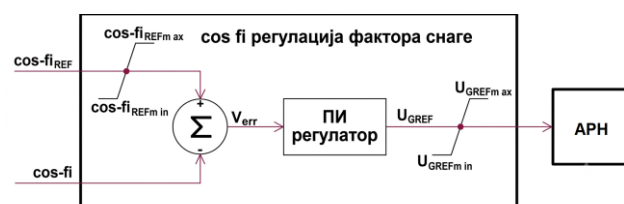
Када је изабран неки од осталих режима рада регулатора, сигнал референце AQR регулације прати мерење реактивне снаге, чиме је постигнуто да прелазак на AQR регулацију буде без утицаја на рад агрегата.

6.4 Аутоматска регулација фактора снаге ($\cos \phi$)

Аутоматска регулација фактора снаге ($\cos \phi$) представља режим у ком се фактор снаге одржава на референтној вредности. Блок-шема $\cos \phi$ регулације

дата је на Слици 7. Регулација је заснована на ПИ регулатору и има негативну повратну спрегу по фактору снаге. Излазни сигнал представља референтну вредност напона статора, тако да у режиму регулације фактора снаге аутоматска регулација напона остаје и даље активна, али јој је ПИ регулатор регулације фактора снаге надређен, односно задаје референтну вредност напона статора. Лимитери побуде и стабилизатор електроенергетског система који делују преко суматора аутоматске регулације остају активни. Блокада $\cos \phi$ регулације је активна када агрегат није на мрежи, када су активни лимитери или када се напон статора нађе ван дозвољеног опсега.

Када је изабран неки од осталих режима рада регулатора, сигнал референце $\cos \phi$ регулације прати мерење фактора снаге, чиме је постигнуто да прелазак на $\cos \phi$ регулацију буде без утицаја на рад агрегата.

Слика 7. Блок-шема $\cos \phi$ регулације фактора снаге

6.5 Блок за формирање импулса за паљење тиристора

Блок за формирање импулса за паљење тиристора на основу излазног сигнала регулације и сигнала синхронизације на свом излазу формира импулсе за паљење тиристора тиристорског моста који је у раду. Сигнал синхронизације представља напон на наизменичној страни тиристорских мостова.

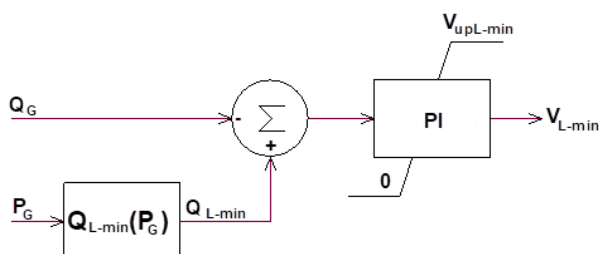
Применом функције $\arccos$ на излазни сигнал регулације добија се угао паљења тиристора α , који одређује фазни померај импулса у односу на напон напајања тиристорских мостова. Применом ове функције напон на излазу тиристорског моста постаје пропорционалан излазном сигналу регулације, чиме је линеаризована косинусна преносна функција тиристорског моста.

6.6 Лимитер минималне побуде

Лимитер минималне побуде делује на повећање побудне струје. Деловање лимитера минималне побуде има за циљ:

- спречавање радних режима који могу угрозити стабилност синхроне машине или могу довести до губитка синхронизма услед недовољне побуде;
- спречавање радних режима са екстремно ниском побудом који могу довести до прегревања чеоних пакета лимова статора;
- спречавање одраде заштите од губитка побуде у потпобуђеним режимима рада.

Блок-дијаграм лимитера минималне побуде је приказан на Слици 8.



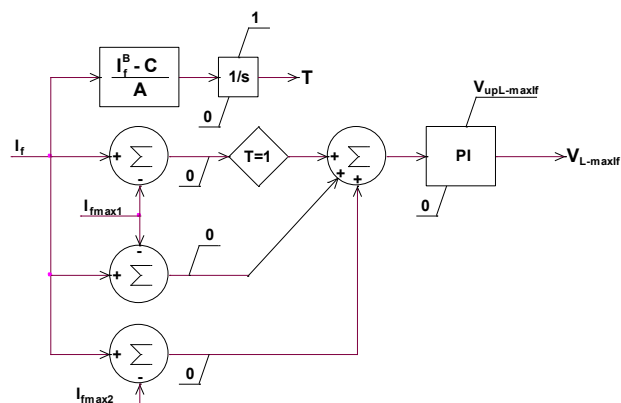
Слика 8. Блок-дијаграм лимитера минималне побуде

Лимитер је заснован на ПИ регулатору. Улазни сигнали лимитера минималне побуде су мерења активне и реактивне снаге. Реактивна снага при којој лимитер прорађује зависи од вредности активне снаге и напона статора и формира се на основу границе прораде лимитера $Q_{L-min}(P_G)$ (Слика 4). Излазни сигнал лимитера минималне побуде делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке.

6.7 Лимитер максималне струје побуде

Функција лимитера максималне струје побуде је да одржи струју ротора у границама дозвољеног оптерећења, како би се спречило прегревање ротора услед превелике струје побуде и одрада прекострујне заштите ротора. Истовремено лимитер треба да омогући временски ограничено форсирање побуде у

циљу побољшања стабилности система. При појави преоптерећења лимитер најпре детектује преоптерећење, дозвољава трајање преоптерећења током дефинисаног временског периода и уколико преоптерећење постоји и након тог периода, лимитер делује на смањење побудне струје на границу прораде лимитера. Лимитер има две вредности прораде и комбиновану тренутну и инверзну временску карактеристику. Блок-шема лимитера је приказана на Слици 9.



Слика 9. Блок-дијаграм лимитера максималне струје побуде

Улазни сигнал лимитера максималне струје побуде је мерење струје побуде. Лимитер је заснован на ПИ регулатору. Прва вредност прораде I_{fmax1} представља трајно дозвољену струју побуде, док друга вредност прораде I_{fmax2} представља плафонску струју побуде. За побудну струју чија је вредност између I_{fmax1} и I_{fmax2} одрада лимитера има инверзну временску карактеристику која се подешава параметрима A , B и C , док за побудну струју чија је вредност већа од I_{fmax2} лимитер одрађује тренутно. Излазни сигнал лимитера делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке. Дозвољено време трајања преоптерећења ротора у зависности од струје побуде је у стандарду [18] дефинисано функцијом:

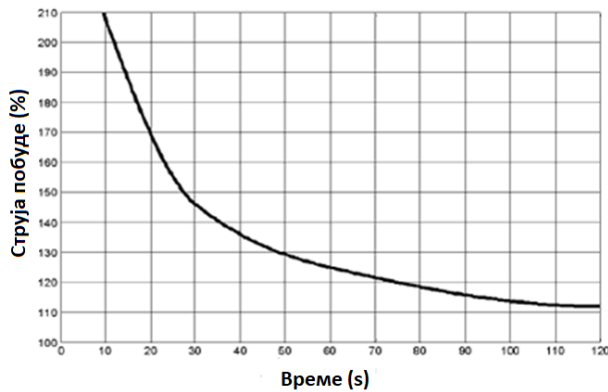
$$time = A / (I_f^B - C) \quad (1)$$

при чему су: I_f – струја побуде у релативним јединицама (енгл. *per unit*, р. u.); A , B и C – коефицијенти. Најчешће се дозвољено преоптерећење ротора моделује квадратном функцијом ($B = 2$). Пример ове карактеристике је приказан на графику на Слици 10.

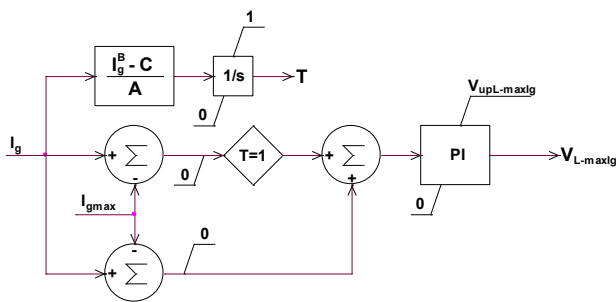
6.8 Лимитер максималне струје статора

Функција лимитера максималне струје статора је да одржи струју статора у границама дозвољеног оптерећења, како би се спречила одрада прекострујне заштите генератора. При појави преоптерећења лимитер најпре детектује преоптерећење, дозвољава трајање преоптерећења током дефинисаног временског периода и уколико преоптерећење постоји и након тог периода, лимитер делује на смањење

струје на границу прораде лимитера. Лимитер има инверзну временску карактеристику прораде. Блок-шема лимитера је приказана на Сlici 11.



Слика 10. Карактеристика дозвољеног преоптерећења ротора



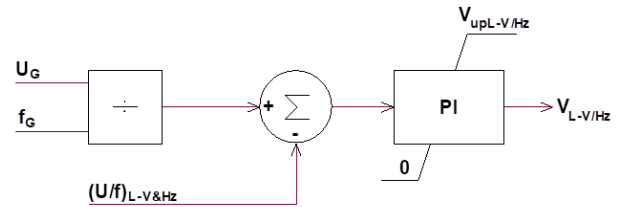
Слика 11. Блок-дијаграм лимитера максималне струје статора

Улазни сигнал лимитера максималне струје статора је сигнал I_g пропорционалан струји статора генератора. Лимитер је заснован на ПИ регулатору. Вредност прораде I_{gmax} представља трајно дозвољену струју статора. Одрада лимитера има инверзну временску карактеристику. Излазни сигнал лимитера делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке.

Дозвољено време трајања преоптерећења статора у зависности од струје статора може се исказати сличном функцијом као и код ротора (Слика 10).

6.9 Лимитер V/Hz

Лимитер V/Hz служи да заштити генератор и блок-трансформатор од прекомерног магнетног флуksа при ниској фреквенцији или превеликом напону. Прекомеран флуks доводи до прегревања и може изазвати оштећење гвозденог језгра блок-трансформатора и генератора. Лимитер V/Hz убичајено се користи за заштиту генератора или блок-трансформатора када је брзина генератора, а самим тим и фреквенција, снижена при побуђеној машини, на пример при старту или заустављању агрегата. Блок-шема лимитера је приказана на Сlici 12.



Слика 12. Блок-дијаграм лимитера V/Hz

Однос напона и фреквенције у релативним јединицама, назначен као однос V/Hz, мерљива је величина пропорционална магнетном флуksу, због чега се као улазни сигнали користе мерења напона статора и фреквенције. Однос $(U/f)_{L-V/Hz}$ представља однос напона и фреквенције при ком лимитер прорађује. Лимитер делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке.

6.10 Стабилизатор електроенергетског система

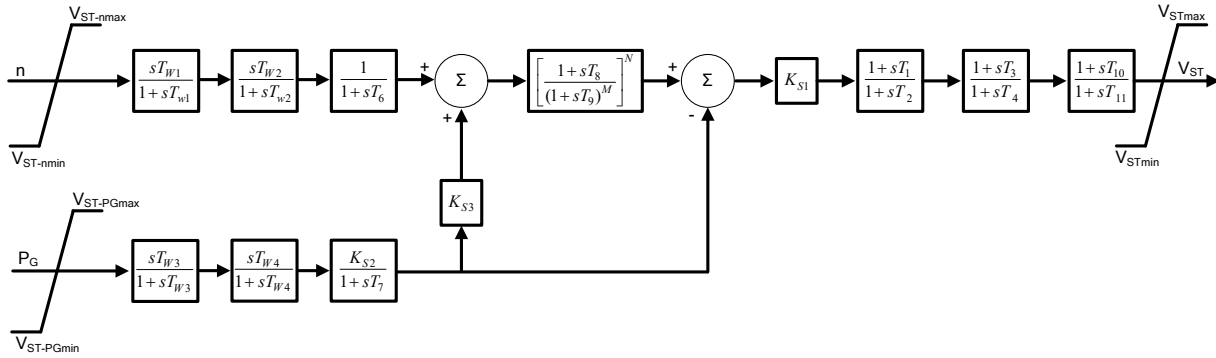
Електромеханичке осцилације у електроенергетском систему представљају појаву међусобног осциловања ротора синхроних машина једних у односу на друге користећи преносне водове за размену енергије и приметне су у карактеристичним варијаблама стања синхроне машине: брзини ротора, фреквенцији, активној и реактивној снази, напону, струји, углу снаге итд. Основна функција стабилизатора електроенергетског система је пригушење електромеханичких осцилација генерисањем позитивног пригушног момента на вратилу који је у фази са варијацијама брзине. То се постиже деловањем на побудни флуks преко додатног улаза у аутоматску регулацију напона статора. Стабилизатор треба да делује само на осцилације које су у опсегу учестаности од интереса (типично од 0,2 до 2,5 Hz).

Стабилизатор делује распирујуће на торзионе осцилације агрегата које представљају осцилације између ротационих елемената агрегата: ротори турбинских секција, ротор генератора и ротори будилица (уколико постоје) и учестаности су изнад 2,5 Hz. Због тога у оквиру стабилизатора мора бити примењен торзиони филтер пропусник ниских учестаности који спречава деловање стабилизатора на овај тип електромеханичких осцилација [15].

Блок-дијаграм стабилизатора електроенергетског система је приказан на Сlici 13 [18]. Принцип рада стабилизатора се може описати полазећи од једначине кретања ротора:

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

где су: $\Delta\omega$ – промена кружне учестаности, H – константа инерције агрегата, ΔP_m – промена механичке снаге, ΔP_e – промена електричне снаге и ΔP_a – промена снаге убрзања. Механичка снага се не мери директно, већ се интеграл њене промене рачуна преко електричне снаге и брзине на основу једначине:



Слика 13. Блок-дијаграм стабилизатора електроенергетског система

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

Главна предност овог стабилизатора је што нема потребе за торзионим филтером у главном делу стабилизатора (појачање стабилизатора и ускладници за фазну компензацију), тако да торзиони филтер не утиче на сигнал ΔP_e . С обзиром на то да интеграл промене механичке снаге садржи у себи и торзионе осцилације и с обзиром на то да су промене механичке снаге веома споре, филтер пропусник ниских учестаности се може применити на овај сигнал у циљу пригушења торзионих учестаности.

Еквивалентна брзина која се користи као стабилизациони сигнал и на коју треба применити фазну компензацију добија се као интеграл снаге убрзања и не садржи торзионе осцилације:

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

Улазни сигнали стабилизатора су мерење електричне активне снаге P_G и мерење брзине агрегата n . За мерење брзине се користи филтрирано ПЛЛ мерење компензоване фреквенције која је приближна брзини агрегата. Компензована фреквенција се добија рачунањем фреквенције сигнала електромоторне силе

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

где је X_q синхрона реактанса генератора у q-оси.

Стабилизатор најпре елиминира једносмерне компоненте улазних сигнала помоћу филтера једносмерне компоненте (*washout filter*) са временским константама T_{w1} , T_{w2} , T_{w3} и T_{w4} . Ови филтери искључују деловање стабилизатора у устаљеном стању и при промени механичке снаге турбине. Параметри T_6 и T_7 представљају временске константе мерних претварача. За добијање интеграла механичке снаге параметар K_{S3} треба да има вредност 1, а параметар K_{S2} вредност $T_7/2H$. Параметри T_8 и T_9 представљају параметре торзионог филтера пропусника ниских учестаности (*ramp-tracking filter*) који треба да спречи деловање стабилизатора на торзионе осцилације. Параметри T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_{10} и T_{11} представљају параметре диференцијалних и интегралних ускладника (*lead-lag compensator*) помоћу којих се врши фазна компензација фреквентне

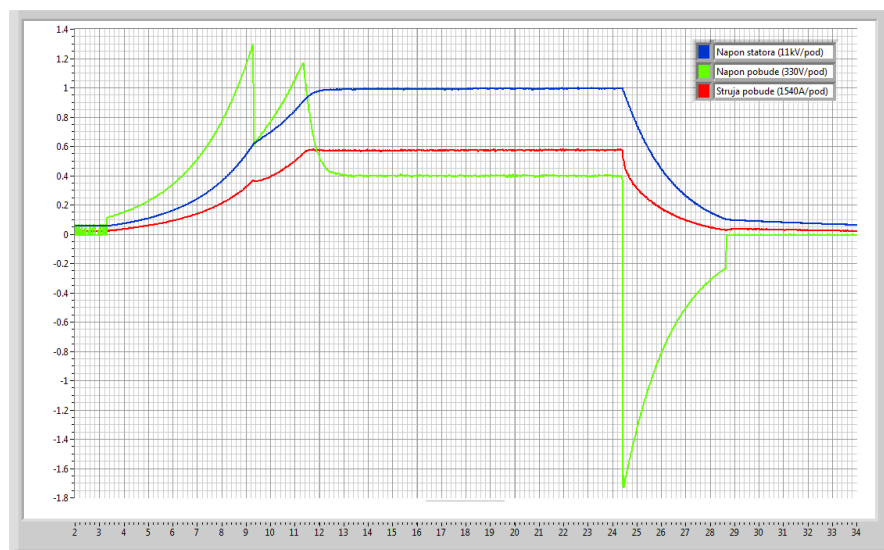
карактеристике регулације побуде како би стабилизатор генерисао позитиван пригушни момент, који је у фази са варијацијама брзине, у опсегу учестаности од интереса. Појачање стабилизатора од кога зависи фактор пригушења електромеханичких осцилација је одређено параметром K_{S1} . При подешавању вредности појачања треба подесити на трећину вредности појачања при ком долази до нестабилности регулације побуде.

7. ДИНАМИЧКИ ОДЗИВИ

У оквиру пријемних испитивања агрегата, спроведена је опсежна анализа рада система за регулацију побуде. У наставку су приказани динамички одзиви снимљени током ових тестирања, који су послужили као основа за детаљну евалуацију и верификацију показатеља динамичких перформанси система. Испитивања су обухватила следеће радне режиме и транзијентне појаве:

- побуђивање и разбуђивање (Слика 14);
- одзив на одскочну промену референце аутоматске регулације напона (Слика 15);
- електрично кочење (Слика 16);
- синхрони старт (Слика 17);
- одзив на одскочну промену референце аутоматске регулације напона на мрежи са укљученим стабилизатором (Слика 18);
- одзив на одскочну промену референце регулације реактивне снаге (Слика 19);
- активација и одзиви лимитера (Слика 20);
- збацивање снаге агрегата (Слика 21).

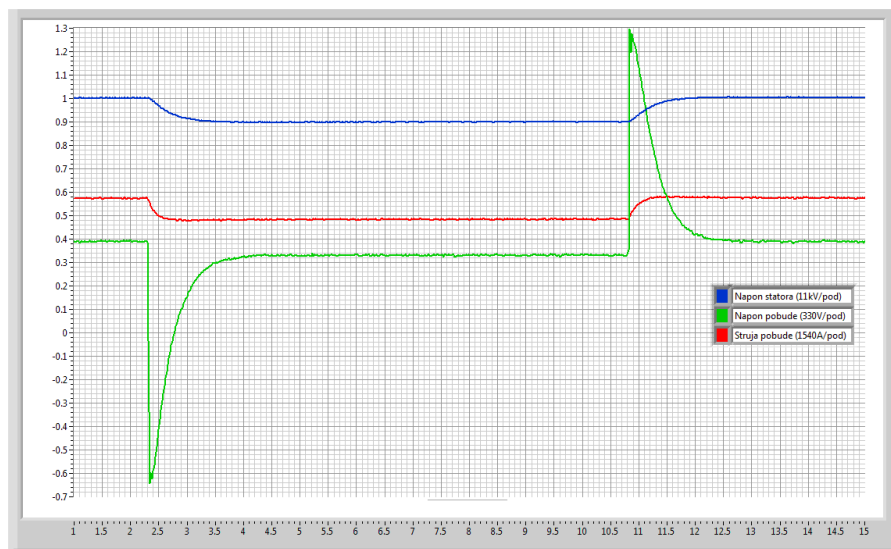
Детаљном анализом експерименталних резултата потврђено је да се показатељи квалитета динамичких одзива налазе унутар граница прописаних међународним стандардима и пројектним захтевима, уз напомену да су одзиви на мрежи спорији у односу на празан ход услед знатно мањег појачања еквивалентне преносне функције мотор-генератора и мреже због реакције индукта. Прихватљиви опсези показатеља одзива на одскочне промене референце аутоматске регулације напона (АРН) дефинисани су стандардом [15], док су за остале одзиве наведене искуствене вредности из погонске праксе. Параметри регулатора су подешени тако да одзиви буду довољно брзи уз ефикасну компензацију флукуација у систему, а да се при томе ни на који начин не угрози стабилност рада.



Слика 14. Побуђивање и разбуђивање у аутоматској регулацији напона

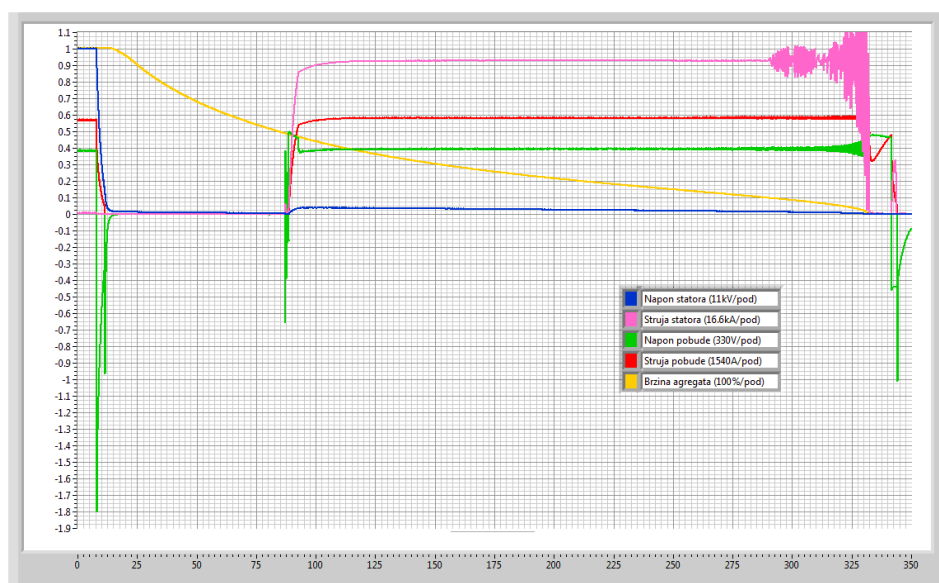
Табела I Показатељи динамичког одзива аутоматске регулације напона при побуђивању и разбуђивању

Назив	Измерено	Прихватљив опсег
Време одзива при побуђивању (s)	6,39	5–10
Време смирења при побуђивању (s)	8,48	8–15
Прескок при побуђивању (%)	0	0–15
Време одзива при разбуђивању (s)	3,91	2–10
Време смирења при разбуђивању (s)	8,38	5–15

Слика 15. Одзив на одскочну промену референце од $\pm 10\%$ у празном ходу – аутоматска регулација

Табела II Показатељи динамичког одзива аутоматске регулације напона на одскочну промену референце

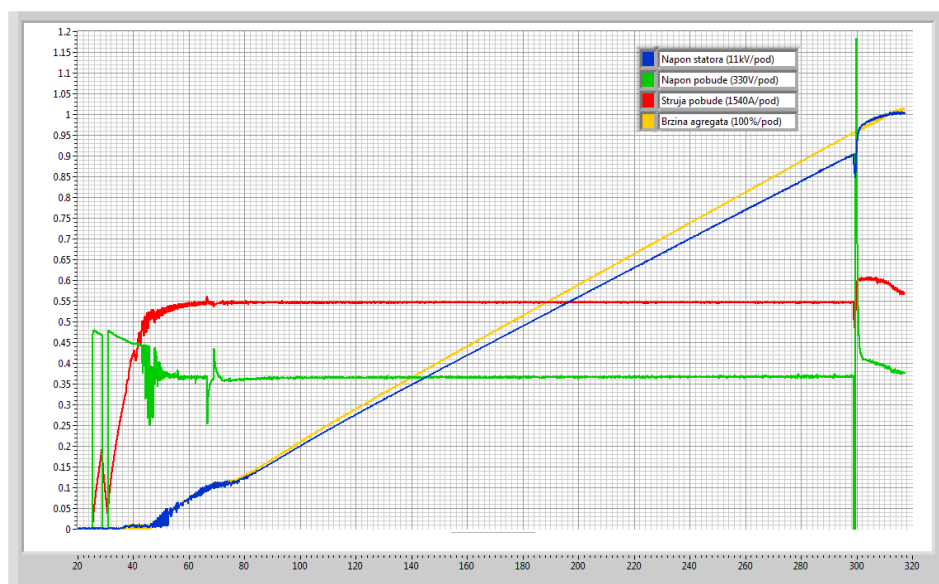
Назив	Измерено	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	0,62	0,025–2,5
Време смирења (s)	0,92	0,2–10
Прескок (%)	0	0–15



Слика 16. Електрично кочење агрегата

Табела III Показатељи електричног кочења агрегата

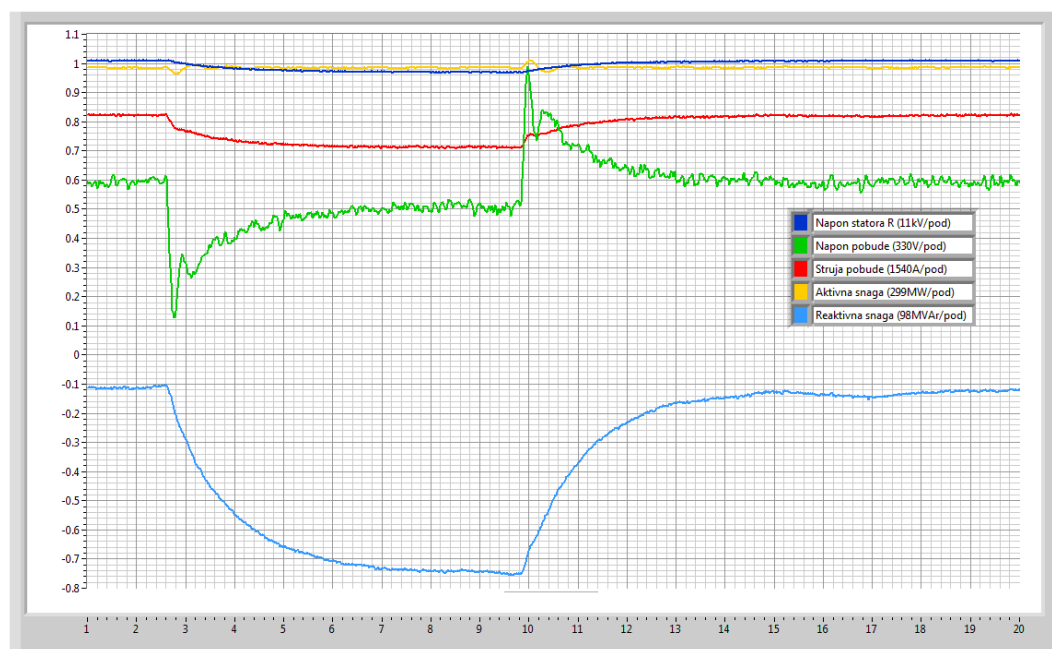
Брзина агрегата на којој стартује електрично кочење (р. у.)	0,50
Струја статора у процесу електричног кочења (р. у. / kA)	0,93/15,44
Струја побуде у процесу електричног кочења (р. у. / A)	0,59/908
Брзина агрегата при којој се искључује електрично кочење (р. у. / A)	≈ 0
Време трајања електричног кочења (s)	249



Слика 17. Синхрони старт агрегата са SFP-ом

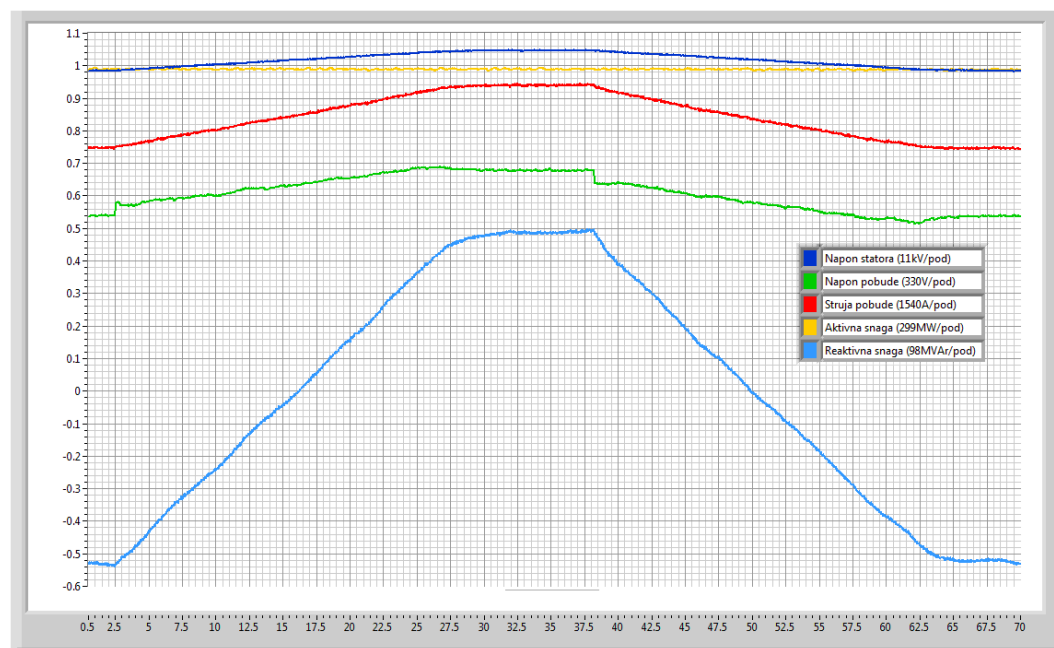
Табела IV Поређење показатеља два начина синхроног старта агрегата

	SFP	Back-to-Back
Струја побуде у процесу синхроног старта (р. у. / A)	0,55 / 840	0,55/840
Вредност брзине за активирање сигнала <i>Синхрони старт успешан</i> (р. у.)	0,9	0,9
Вредност напона статора за активирање сигнала <i>Синхрони старт успешан</i> (р. у.)	0,9	0,9
Време трајања синхроног старта (s)	295	210

Слика 18. Одзив на одскочну промену референце АРН-а од $\pm 4\%$ са укљученим стабилизатором

Табела V Поређење показатеља динамичког одзива са укљученим и искљученим стабилизатором

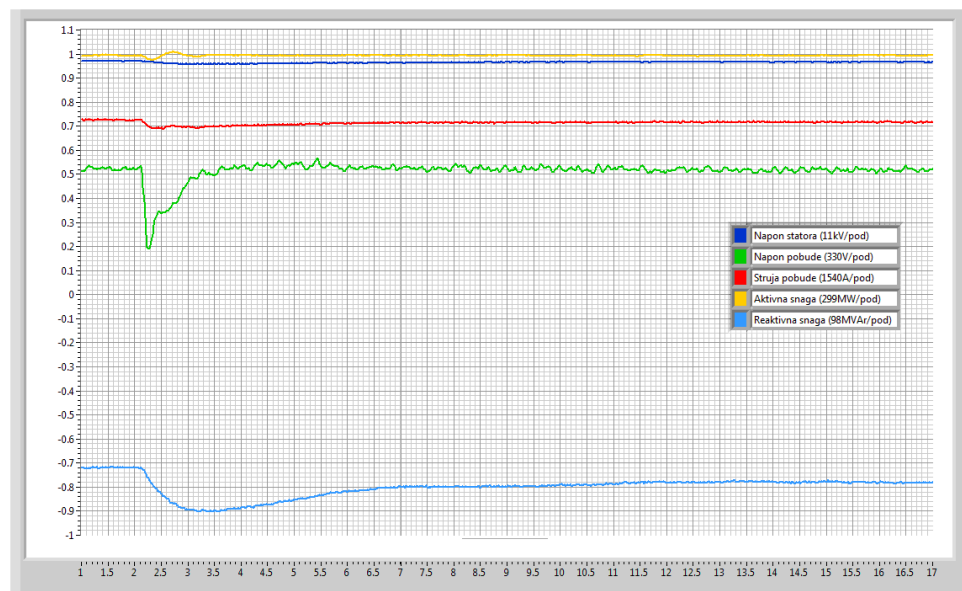
Назив	Стаб. искљ.	Стаб. укљ.	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	1,84	1,85	0,025–2,5
Време смирења (s)	2,76	2,78	0,2–10
Прескок (%)	0	0	0–15
Фактор пригушења електромеханичких осцилација (%)	10,9	29,4	5–100



Слика 19. Одзив на одскочну промену референце АQP-а

Табела VI Показатељи динамичког одзива аутоматске регулације реактивне снаге на одскочну промену референце

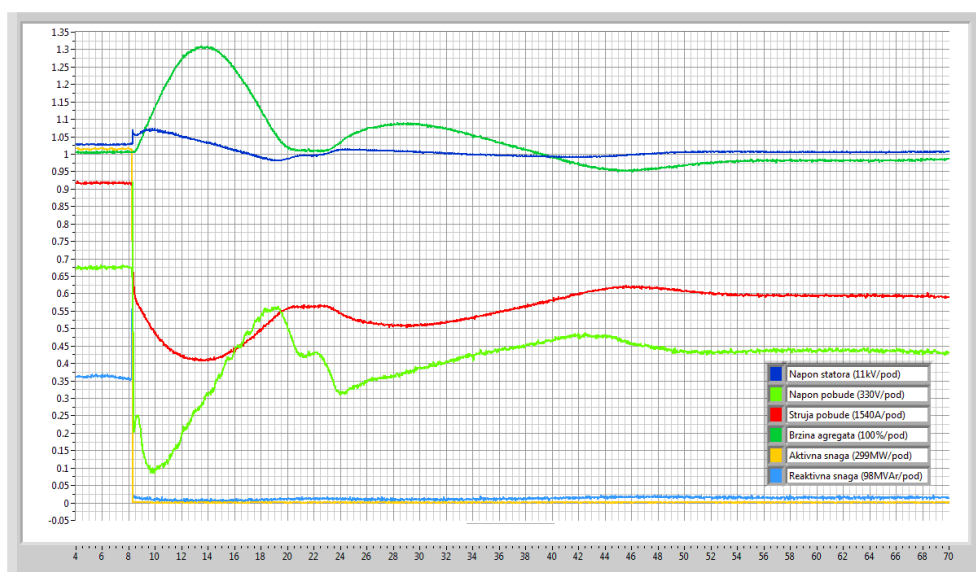
Назив	Вредност	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	21	10–50
Време смирења (s)	27	12–100
Прескок (%)	0	0–15



Слика 20. Одзив лимитера минималне побуде на одскочну промену референце АРН-а од -3% са укљученим стабилизатором

Табела VII Показатељи динамичког одзива лимитера минималне побуде

Назив	Стаб. искљ.	Стаб. укљ.	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	3,75	3,71	2–6
Време смирења (s)	4,41	4,34	2,5–10
Прескок (%)	0	0	0–15
Фактор пригушења електромеханичких осцилација (%)	9,7	23,1	5–100



Слика 21. Одзив при збацивању 100% номиналне снаге

Табела VII Пораста напона статора при збацивању снаге

Назив	75% P _n	100% P _n	Прихватљива вредност
Максимална вредност напона статора (p. j.)	1,05	1,07	1,15

8. ЗАКЉУЧАК

Ревитализација агрегата представља кључан инжењерски подухват за продужење животног века ове реверзибилне хидроелектране наредних неколико деценија. Замена комплетног система побуде омогућава висок ниво флексибилности у управљању производњом и потрошњом енергије, брзо реаговање на поремећаје у мрежи и сигурну подршку за интеграцију варијабилних обновљивих извора енергије у електроенергетски систем Србије.

Уградњом квалитетне опреме уз правилно димензионисање и примену редуванције и у енергетском и у управљачком делу система постигнута је висока поузданост система побуде. Комплексни алгоритми управљања и регулације уз оптималан избор параметара омогућавају стабилан рад мотор-генератора у свим дозвољеним стационарним и прелазним режимима рада, што показују експериментално добијени динамички одзиви система побуде снимљени током пријемних испитивања агрегата. Нова топологија успешно решава проблем несиметричног оптерећења полупроводника јер целокупну струју побуде у свим режимима покрива само један тиристорски мост, чиме се смањују локална термичка напрезања и продужава радни век опреме.

Унутар регулатора су успешно и робусно имплементирани комплексни алгоритми који омогућавају комплетну контролу и стабилан рад мотор-генератора у сва четири квадранта погонског дијаграма. Сигурност у раду унутар дозвољених термичких граница гарантована је координисаним деловањем лимитера који реагују пре заштитних уређаја и спречавају непотребне испаде агрегата са мреже. Имплементација стабилизатора електроенергетског система типа PSS2B, који је заснован на интегралу снаге убрзања и опремљен торзионим филтером, омогућава ефикасно пригушење нискофреквентних електроинергијских осцилација у опсегу од 0,2 до 2,5 Hz.

ЛИТЕРАТУРА

- [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. Ćirić, N. Milojević, D. Arnautović, D. Stojić, M. Milinković, S. Veinović, and D. Petrović, „Parametri pobudnih sistema,” *Elektroprivreda*, vol. 64, no. 3, pp. 198–206, 2011.
- [11] IESO-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 Underexcitation 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.

БИОГРАФИЈЕ



Душан Јоксимовић је рођен 1982. године. Дипломирао је 2005. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за електроенергетске системе, где је и магистрирао 2013. године.

Тренутно је студент докторских студија на Факултету техниких наука Универзитета у Новом Саду, на Одсеку за енергетику, електронику и телекомуникације. У Центру за аутоматiku и регулацију Електротехничког института „Никола Тесла” запослен је од 2006. године, где се тренутно налази на позицији стручног саветника. Поседује богато искуство и експертизу у развоју, пројектовању, производњи и испитивању система побуде за синхроне ротационе машине. Поред тога, поседује дубоко познавање процеса развоја, пројектовања и израде система за аквизицију података. Такође, има богато искуство у експерименталном одређивању параметара и карактеристика синхроних генератора.

ORCID: 0000-0001-8070-9412



Ђорђе Стојић је рођен у Београду, Србија, 1970. године. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 1994. године, где је такође магистрирао 1996. и докторирао 2004. године у области индустријске електронике. Од 1994. године запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду. Његова истраживачка интересовања обухватају системе управљања, енергетске претвараче и погоне наизменичних мотора.

ORCID: 0000-0002-4716-0488



Немања Милојчић је рођен 1982. године у Београду. Основну школу и гимназију Природно-математичког смера завршио је у Младеновцу. Године 2005. дипломирао је на енергетском одсеку Електротехничког факултета Универзитета у

Београду. По завршетку студија радио је на

пословима развоја и пројектовања уљних и сувих енергетских трансформатора у компанији „АБС – Минел трафо” у Младеновцу. Од 2007. године запослен на Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду у Центру за аутоматiku и регулацију, где се бави проблемима регулације и управљања у електроенергетским системима, развојем, пројектовањем и испитивањем побудних система синхроних машина, испитивањем електричних машина, релејном заштитом, електричним мерењима и аутоматизацијом малих електрана. Од 2024. године ради на позицији сениор инжењера у Одељењу истраживања и развоја апликативних функција заштитних релеја у компанији „HITACHI Energy” Шведска.

ORCID: 0009-0005-2806-4641



Зоран Ћирић је дипломирани инжењер електротехнике из Пирота. Рођен је 1950. године. Завршио је Електротехнички факултет Универзитета у Београду. У претходном периоду у Центру за аутоматiku и

регулацију у Електротехничком институту „Никола Тесла” радио на пројектима развоја, пројектовања, израде, уградње, испитивања и пуштања у рад система побуда синхроних генератора у термоелектранама и хидроелектранама. Као истраживач је учествовао на више пројеката Министарства науке Републике Србије који се у ширем смислу тичу области регулације електроенергетских система, унапређења енергетске ефикасности, примене уређаја и технологија енергетске електронике итд. У досадашњем раду се бавио и проблематиком електричних заштита генератора у термоелектранама и хидроелектранама, као и проблемима везаним за процес синхронизације генератора на електроенергетску мрежу. Учествовао је и бавио се пројектима развоја интегрисаних система управљања радом малих хидроелектрана. Учествовао је и бави се испитивањима и одређивањем параметара синхроних генератора. Бави се пројектовањем и израдом уређаја за аквизицију сигнала и континуални мониторинг различитих система и постројења у оквиру енергетских објеката.

ORCID: 0009-0000-5904-8357



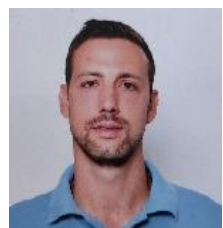
Славко Веиновић је рођен у Сомбору, Србија, 1983. године. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2008. године, где је и докторирао 2025. године. Запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду од 2009. године.

ORCID: 0000-0001-7064-976X



Лука Ивановић је рођен 1997. године у Ваљеву. Основне и мастер студије завршио је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Сигнали и системи, где је стекао темељна знања из области обраде сигнала, машинског учења, система управљања и уграђених система. Тренутно је на докторским студијама из области управљања системима и обраде сигнала. Професионалну каријеру започео је праксом у компанији ЕНЕЛ д. о. о, где се бавио ПЛЦ програмирањем и развојем модела за обуку. Од фебруара 2021. године запослен је у Институту „Никола Тесла” у Београду као *embedded software* инжењер. У оквиру свог делокруга рада учествује у развоју алгоритама за системе побуда синхроних машина, програмирању микроконтролера, индустријској комуникацији и интеграцији нисконапонске електронике за процесну контролу. Поред професионалног ангажмана, активно се бави научним радом, а његови истраживачки интереси укључују примену машинског учења у електроенергетици, обраду сигнала и оптимизацију управљања електроенергетским системима. Аутор је више научних радова, укључујући области моделовања синхроних генератора и стабилности напона у микромрежама са прикљученим ветроелектранама.

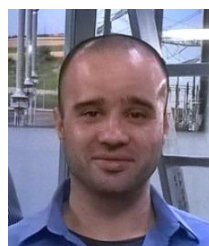
ORCID: 0000-0003-4345-4523



Илија Класнић је рођен 1989. године. Завршио је основне студије 2012. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, одсек Енергетика, модул Енергетски претварачи и погони. Мастер студије је завршио 2013. године док је докторску дисертацију под насловом „Естимација и предикција термичког стања ротора хидрогенератора и утицај на граничне вредности реактивних снага” успешно одбранио 29. 9. 2023. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Од фебруара 2013. године запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” у

Београду где је ангажован на пословима пројектовања, израде и пуштања у рад система побуде синхроних генератора, примопредајним и гаранцијским испитивањима обртних електричних машина, испитивањима енергетских претварача, консултантским услугама у области електроенергетике, термичком моделовању синхроних генератора. Аутор је или коаутор неколико радова публикованих у часописима са импакт фактором и презентованих на скуповима националног и међународног значаја. Добитник је награде за најбољи рад младог истраживача на секцији Електроенергетика 58, конференције ЕТРАН. Секретар је студијског комитета СТК А1 Обртне електричне машине у оквиру CIGRE Србија, и редован је члан СТК А1 Обртне електричне машине у оквиру међународне CIGRE.

ORCID: 0000-0002-7908-9110



Мирослав Павићевић је рођен 1980. године у Ужицу. Дипломирао је на Електротехничком факултету у Београду, смер Енергетика, Одсеку за електроенергетске системе. Од јануара 2006. запослен у ЕПС-у, ХЕ „Бајина Башта”, где је прошао све нивое од приправника до главног инжењера. Од 2020. године ради на позицији руководиоца Службе електроодржавања. Активно учествовао у ревитализацијама ХЕ и РХЕ „Бајина Башта” као стручни надзор за све енергетске секције. Године 2011. радио за „Siemens AG Österreich”, као шеф градилишта и главни електроинжењер, на изградњи РП „Зестафони” 500 kV у Грузији. Поседује значајно искуство у пројектовању, уградњи, испитивању и одржавању ВН разводних постројења, система релејних заштита, побудних система и хидрогенератора.

ORCID: 0009-0007-8155-9285



Душан Тришић је рођен 1963. године. Дипломирао је 1988. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за електроенергетске системе. У ЕПС-у, ХЕ „Бајина Башта”, запослен је од 1994. године, где се тренутно налази на позицији директора за производњу енергије Огранка „Дринско-лимске ХЕ”. Поседује богато искуство у одржавању, испитивањима и реконструкцијама система побуде, система турбинске регулације и система нумеричких заштита за класичне и реверзибилне хидроагрегате.

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

