

## ISTRAŽIVANJA I RAD U OBLASTI AUTOMATIKE I REGULACIJE

Dr Dušan Arnautović, mr Slobodan Bogdanović

Osnovna oblast istraživanja i rada Centra za automatiku i regulaciju jeste upravljanje i regulacija procesa koji se odvijaju pri pretvaranju, prenošenju i upotrebi električne energije. Daleke 1952. godine započeo je rad u ovoj oblasti u Institutu kada je osnovano odeljenje za automatsku regulaciju. Cilj osnivanja ovog odeljenja u okviru Instituta bio je rad i doprinos u rešavanju aktuelnih tekućih problema i pitanja razvoja tadašnje elektroprivrede. U tom periodu saradnici odeljenja za automatsku regulaciju radili su na poslovima vezanim za sisteme turbinske regulacije u hidroelektranama, za regulaciju aktivne snage i učestanosti u elektroenergetskom sistemu, zatim na konstruisanju fizičkog modela za modelovanje visokonaponskih mreža, na konstruisanju uređaja za simulaciju prelaznih pojava (diferencijalni analizator) i na usavršavanju drugih uređaja. U drugoj polovini pedesetih godina prošlog veka saradnici Odeljenja za automatsku regulaciju uvrstili su u svoje zadatke i rešavanje pitanja u vezi sa stabilnim napajanjem specijalnih potrošača i u vezi sa pretvaranjem učestanosti pri upotrebi električne energije. Rad saradnika Centra u ovoj oblasti, veliko interesovanje za probleme i rezultati rada saradnika Instituta u ovoj oblasti, zatim pojava upravljivih poluprovodnika velike snage i snažno izražene potrebe za rezultatima rada saradnika Centra doveli su do nastajanja i razvoja energetske elektronike kao nove oblasti.

U okviru izmene organizacije Instituta koja je izvršena 1961. godine određeno je da Grupa za automatsku regulaciju bude u sastavu Odeljenja za merenje i regulaciju. Osnovne oblasti rada Grupe za automatsku regulaciju bile su automatska regulacija i pretvaranje električne energije i na samom početku rada ova grupa imala je samo dva saradnika. Rad i razvoj ove grupe dovodi do formiranja samostalnog Odeljenja za automatiku i regulaciju koje prihvata rad u još jednoj novoj oblasti - elektrotermiji. Odeljenje postaje samostalna ekonomska jedinica, a nešto kasnije i Osnovna organizacija udruženog rada. Danas posluje pod imenom Centar za automatiku i regulaciju u okviru Instituta kao naučnoistraživačke organizacije i u njemu radi preko trideset saradnika. Većina saradnika Centra su diplomirani inženjeri, a među njima polovina su doktori i magistri tehničkih nauka.

U proteklih više od pedeset godina saradnici današnjeg Centra za automatiku i regulaciju najveći doprinos dali su u oblasti energetske elektronike, regulacije i upravljanja procesa u elektroenergetskim objektima, automatskog upravljanja i regulacije u elektroenergetskom sistemu, a po zahtevima korisnika vršili su i specijalizovane usluge u oblastima blisko povezanim sa ovim osnovnim oblastima delovanja. U pojedinim intervalima vremena veće grupe saradnika bile su više angažovane u nekoj od ovih oblasti u odnosu na ostale oblasti, što je bilo posledica potreba korisnika, ali je održan kontinuitet delovanja u navedenim oblastima.

## 1. ENERGETSKA ELEKTRONIKA

U drugoj polovini pedesetih godina prošlog veka počela je da se razvija izrada uređaja na bazi magnetnih pojačavača, a na početku šezdesetih godina taj razvoj je dodatno ubrzan. U odelenju je u tom periodu razvijen niz izvora za stabilno napajanje potrošača naizmeničnim naponom, zatim niz automatskih regulisanih ispravljača za punjenje akumulatorskih baterija i za sigurnosno napajanje potrošača jednosmernom strujom. Na bazi magnetnih pojačavača izrađena su napajanja motora za jednosmernu struju u elektromotornim pogonima, zatim regulatori položaja elektroda elektrolučnih peći i drugi uređaji.

U prvoj polovini šezdesetih godina prošlog veka u Institut su doneti prvi upravljivi poluprovodnički elementi za velike struje i napone, doneti su prvi tiristori. Za oko godinu dana razvijen je i izrađen elektromotorni pogon sa regulisanom brzinom u širokim granicama, izrađena je podsinhrona kaskada kod koje se u kolu rotora asinhronog motora nalazio tiristorski inverter. Realizacija ovog pionirskog poduhvata označava početak primene rezultata istraživanja i rada u oblasti energetske elektronike u Institutu i u zemlji. Saradnici odelenja su u tom periodu koristeći poluprovodničke elemente i upravljive poluprovodničke elemente razvili i izradili veliki broj tipova ispravljača, invertora, statičkih prekidača, sistema za besprekidno napajanje, čopera, pretvarača učestanosti, uređaja za regulisano napajanje potrošača, pretvarača posebne namene. Godine 1973 Institut je pokrenuo održavanje nacionalnih stručnih skupova na kojima su saradnici Instituta i istraživačkih i industrijskih organizacija iz Jugoslavije izlagali naučne i stručne radove iz oblasti energetske elektronike. Održavanje stručno-naučnih skupova pod nazivom Savetovanje o energetske elektronici prihvatile su podržale i druge istraživačke i industrijske organizacije u državi i takva savetovanja se i danas održavaju svake druge godine kao međunarodna savetovanja iz oblasti energetske elektronike.

Zbog kreativnog i uspešnog rada saradnika Instituta u oblasti energetske elektronike, velikog broja objavljenih stručnih i naučnih radova, dugogodišnjeg rada na razvoju i realizaciji velikog broja uređaja na bazi energetske elektronike, niza sasvim originalnih ostvarenja i pokretanja i održavanja stručnih skupova Institut je priznat u zemlji kao vodeća istraživačka organizacija u oblasti energetske elektronike. Saradnici Instituta prednjačili su u uvođenju novih rešenja u energetske elektronici, doprinosili stručno i naučno u njihovom usavršavanju i u praktičnim realizacijama uz neprekidno praćenje razvoja oblasti energetske elektronike u svetu.

Dalji razvoj snažnih upravljivih poluprovodničkih elemenata je bitno izmenio uređaje u pogonima za pretvaranje i regulaciju mehaničke i električne energije. A usavršavanje tranzistora, pojava analognih i digitalnih integrisanih kola pa zatim i primena mikroprocesora je iz osnova izmenilo upravljački deo uređaja za pretvaranje i regulaciju energije. Rad saradnika Instituta je obuhvatao razvoj ili kreaciju rešenja određenog problema, dakle utvrđivanja principa rada, razvoj šeme, razvoj algoritma rada, zatim izradu projekta, izradu prototipa, izvođenje eksperimenata na prototipu ili simulacije rada na računaru, izradu u radionici konačne verzije uređaja i na kraju ispitivanja posle

montaže, podešavanje i puštanje u rad. Ovakav način izrade uređaja bio je u prvom periodu razvoja energetske elektronike uslovljen i uslovima na tržištu pošto je novčana vrednost kreacije i znanja veća kada se ugrade u uređaj koji se neposredno predaje korisniku. U kasnijem periodu rada u oblasti energetske elektronike i sa formiranjem potreba na tržištu za izradom velikog broja pojedinih tipova uređaja koji su razvijeni u Institutu obezbeđeno je da se saradnici Instituta usredsrede na najkreativniji deo rada, na usavršavanje postojećih uređaja, na razvoj ideje, razvoj novog rešenja ili uređaja uz dokazivanje ostvarljivosti i na poboljšavanja na eksperimentalnom fizičkom modelu ili pomoću simulacije na računaru.

Saradnici Centra izradili su u proteklom periodu na stotine ispravljača, invertora, ultrabrzih statičkih prekidača i kompletnih sistema za besprekidno napajanje jediničnih snaga do više stotina kilovoltampera. Automatski regulisani ispravljači za punjenje i održavanje akumulatorskih baterija i napajanje potrošača rađeni su najpre sa transduktorima (magnetnim pojačavačima), beskontaktnim regulacionim elementima i selenskim usmeračima kao diodama, a kasnije sa tiristorima. Od tog vremena počinje izrada i usavršavanje raznih ispravljačkih uređaja za elektromotorne pogone, za punjenje i pražnjenje akumulatorskih baterija, za napajanje invertora, za magnetizaciju i demagnetizaciju feromagnetnih delova i drugo. Pošto ispravljači za održavanje akumulatorskih baterija u transformatorskim stanicama i razvodnim postrojenjima nisu imali dovoljno automatizovan rad, počela je zamena ovakvih ispravljača automatskim regulisanim ispravljačima tipa ARI, koji radi po IUU karakteristici. Naporedo sa razvojem novih komponenata u elektronici, menjale su se i usavršavale i šeme regulatora. Tako su sredinom devedesetih godina projektovani i pušteni u pogon ispravljači koji jednosmerni napon dobijaju ispravljanjem napona invertorskog transformatora frekvencije oko 10 kHz. Dalji razvoj ispravljača je išao u dva pravca, i to: ispravljači sa visokofrekventnim međukolom tipa VFI i ispravljači za velike struje i posebne zahteve u vezi upravljanja, nadzora i komunikacije tipa DRI. (bazirano na šesnaestobitnom mikrokontroleru ili PLC automatu).

U Centru su razvijeni i izrađeni mnogi uređaji za posebne namene. Kao primeri navode se automatski regulisani ispravljači sa strujama od nekoliko hiljada ampera namenjenih za napajanje opreme pri elektrolizi, regulisani ispravljači za punjenje baterija na podmornicama, programabilni punjači za ispitivanje ili formiranje olovnih i čeličnih akumulatora u fabrikama za izradu akumulatora. Zatim pretvarači učestanosti za potrošače nestandardnih učestanosti koji se primenjuju na aerodromima ili u specijalnim vojnim uređajima, dinamički kompenzator reaktivne snage od nekoliko desetina megavata za metalurški kombinat, kompenzatorsko-filtersko postrojenje koje urađeno za štampariju i niz drugih uređaja za posebne namene.

Primena komponenata energetske elektronike je za kratko vreme iz osnova izmenila način realizacije opreme za upravljanje i regulaciju elektromotornih pogona. Saradnici Centra su u istraživanjima, razvoju i izradi uređaja za regulaciju elektromotornih pogona ostvarili niz praktičnih rešenja. Neka od tih rešenja su ostvarenja koja su imala u svoje vreme značaj na svetskom nivou. To se odnosi na podsinhronu kaskadu za regulaciju brzine

asinhronog motora sa tiristorskim inverterom u kolu rotora motora. Kaskada je razvijena i usavršavana u Institutu i izrađeno je više tiristorskih kaskada za regulaciju asinhronog motora snaga od nekoliko stotina kilovata. Najčešća primena ovih kaskada je bila regulacija protoka u crpnim postrojenjima u vodovodu i u toplanama. Drugo značajno ostvarenje su uređaji za regulaciju asinhronog motora preko invertora promenljive učestanosti. Saradnici instituta koji nosi ime Nikole Tesle među prvima u svetu su doprineli da Teslin asinhroni motor, koji je po svojoj prirodi krut, postane elastičan. Saradnici Centra razvili su i izradili nekoliko prototipova mikrokompjuterski upravljanih invertora sa širinsko-pulsnom modulacijom i IGBT – tranzistorima za napajanje elektromotornih pogona sa asinhronim motorima. Među njima je polovinom osamdesetih godina razvijen i inverter sa šesnaestobitnim mikrokontrolerom i algoritmom vektorske regulacije za regulaciju asinhronog motora u elektromotornom pogonu sa najvišim zahtevima u pogledu dinamičkih karakteristika pogona.

Prvi inverter veće snage napravljen je 1969. godine za napajanje velikog računara snage 60 kVA. Besprekidno napajanje još ne postoji te sistem još nema akumulatorsku bateriju. Prvi sistem besprekidnog napajanja bio je snage 40 kVA, a akumulatorska baterija je mogla da obezbedi 1 čas rada kada nestane napajanje iz gradske mreže. Narednih godina je projektovano više sistema besprekidnog napajanja veće snage. Razvoj invertora kao nezavisnih uređaja ide svojim tokom i 1978. godine je definisan tip SARS (statički automatski pretvarač). Do tada je trofazni sistem invertora dobijan povezivanjem tri monofazna invertora. Kasnije, konstruisan je trofazni inverter sa slaganjem izlaznih napona radi eliminacije 5. i 7. harmonika. Zahvaljujući razvoju tehnologije izrade tranzistora omogućena je zamena tiristora u kolima invertora tranzistorima snage, što dovodi do razvoja serije novih tranzistorskih monofaznih invertora tipa HARS. Sledeći korak u osvajanju tipa uređaja i nove tehnologije jesu trofazni tranzistorski invertori, koji su koristili tehniku slaganja izlaznih napona dva invertora, a potom je razvijen i prvi trofazni tranzistorski inverter sa IGBT tranzistorima, frekvencije izlaznog napona 400Hz. Sledi sistem za besprekidno napajanje, snage 2 x 10 kVA za RHE Bajina Bašta, sistem za besprekidno napajanje na bloku B2 u TE Nikola Tesla B snage 2 x 50 kVA (2003), sistem za besprekidno napajanje na bloku B1 TE Nikola Tesla B snage 2 x 50 kVA (2005) i sistem za besprekidno napajanje na bloku B1 TE Kostolac B snage 2 x 60 kVA (2008). No, razvoj novih topologija invertora za potrebe besprekidnog napajanja u Centru nikada nije stajao. Dok je jedna ekipa inženjera realizovala uređaje za besprekidno napajanje najvećih snaga po našim termo i hidroelektranama, druga grupa je razvila novu familiju trofaznih invertora snage 20 kVA koji su zajedno sa statičkim preklopkama ugrađeni na blokove A1, A2, A4 i A6 u TE Nikola Tesla A.

## 2. AUTOMATIKA I REGULACIJA

Oblast upravljanja i regulacije procesa jeste osnovna naučna oblast Centra. Usmerenost saradnika Centra prema energetici dovela je da se rezultati teorije automatske regulacije primenjuju u Centru najvećim delom pri razvoju i realizaciji uređaja iz oblasti energetske elektronike. Rad na teoriji sistema automatske regulacije i upravljanja je bio u osnovi svake od praktičnih realizacija uređaja, ali se osim toga odvijao i nezavisno od razvoja i

izrade uređaja energetske elektronike. U toku pedesetih godina prošlog veka saradnici Instituta su vršili istraživanja u oblasti stabilnosti sistema sa povratnom vezom i u oblasti dinamičkog ponašanja i kvaliteta dinamičkog ponašanja sistema sa povratnom vezom. U tom periodu u Institutu je izrađen diferencijalni analizator za simulaciju odvijanja prelaznih procesa u sistemima sa povratnom spregom. Razvoj digitalnih računskih mašina stvorio je nove mogućnosti za teorijski i studijski rad. Saradnici Centra ostvarili su važne rezultate u matematičkom modelovanju delova elektroenergetskog sistema, razvili su računarske programe za simulaciju dinamičkog ponašanja podsistema elektroenergetskog sistema, određivanje parametara regulacionih organa i ispitivanje stabilnosti rada objekata elektroenergetskog sistema. Posebni rezultati postignuti su u razvoju programa za simulaciju rada hidroenergetskih postrojenja, kojima su obuhvaćeni procesi pri proizvodnji energije u hidroelektranama od procesa u hidrauličkom delu postrojenja, preko procesa pretvaranja mehaničke energije u električnu u hidroagregatu zajedno sa njegovim regulatorima, zatim u matematičkom modelovanju procesa u parnim kotlovima, razvoju računarskih programa za simulaciju dinamičkog ponašanja termoagregata i sintezu regulatora parnog kotla. U centru je razvijena originalna metoda za sintezu regulatora napona u elektroenergetskom sistemu sa velikim brojem elektrana.

Realizacija regulatora u tehnološkom pogledu odvijala se i menjala onako kako se razvijala tehnologija u kojoj su izrađivane tehničke komponente u svetu. U proteklom periodu saradnici Centra prošli su put od primene najpre elektronskih i tiritronskih cevi, zatim magnetnih pojačavača, pa preko primene tranzistora, analognih integrisanih operacionih pojačavača, digitalnih integrisanih kola, sve do današnjih digitalnih regulatora. Na prelasku iz pedesetih u šezdesete godine prošlog veka releji u industrijskim i drugim postrojenjima zamenjivani su beskontaktnim elementima na bazi zasitljivih magnetnih prstenova, a nešto kasnije i jedne i druge zamenjivali su beskontaktni elementi na bazi poluprovodnika. Sa daljim razvojem tehnike poluprovodnika u kasnijem periodu menjao se i način realizacije uređaja za upravljanje i regulaciju. Saradnici Instituta učestvovali su u tom razvoju, prolazili kroz sve te etape u razvoju tehnologije i davali svoj doprinos ne samo uvođenjem novih tehnologija u našu privredu nego čineći i određene teorijske doprinose.

Slikovit primer su uređaji za automatsko upravljanje crpnim stanicama i reni bunarima bez posade. Ti uređaji su u Centru na početku razvijani na bazi relejne tehnike, zatim sa germanijumskim tranzistorima, pa sa silicijumskim tranzistorima, sa digitalnim integrisanim kolima i na kraju sa mikroprocesorima. U Centru se danas izrađuje modularni mikroprocesorski sistem za izvršavanje raznih funkcija upravljanja koji je proveren kao automat za upravljanje u trafostanicama bez posade i kao automat za automatsko pokretanje i zaustavljanje hidroagregata. Sličan put u pogledu načina realizacije prošli su i uređaji za zaštitu elektroenergetskih postrojenja. Saradnici Centra realizovali su nekoliko savremenih uređaja za zaštitu kao što su zaštitni sekventni automat, kontroler za zaštitu agregata, kontroler uključenja prekidača u visokonaponskim mrežama i drugi slični zaštitni automati.

### **3. AUTOMATSKA REGULACIJA ELEKTROENERGETSKIH OBJEKATA**

Automatska regulacija elektroenergetskih objekata predstavlja vrlo važnu naučnu oblast Centra za automatiku i regulaciju. Saradnici Centra duže od četrdeset godina istražuju u oblasti primene metoda i postupaka automatske regulacije u razvoju i izradi automatskih regulatora pojedinih podsistema u elektroenergetskim objektima. U tom periodu saradnici Centra objavili su veliki broj radova iz ove oblasti, razvili, izradili, ispitali i pustili u rad niz različitih tipova regulatora za regulaciju elektroenergetskih objekata, odnosno pojedinih njihovih elemenata. U objavljenim radovima prikazani su i neki sasvim originalni teorijski doprinosi, a izrađeni regulatori pouzdano, robustno i tehnički kvalitetno izvršavaju dugi niz godina svoje funkcije u elektroenergetskim objektima širom zemlje. Najznačajniji uređaji su sistemi za regulaciju pobude sinhronih generatora i velikih sinhronih motora, grupni regulatori napona i reaktivne snage, grupni regulatori aktivne snage i sistemi za regulaciju elektrofiltera u termoelektranama.

Teorijski rad nalazi se u osnovi rada saradnika Centra i u ovoj oblasti. A pri razvoju i izradi regulatora objekata elektroenergetskog sistema saradnici Centra prošli su u tehnološkom pogledu kompletan put kojim se razvijala izrada komponenata regulatora u svetu i danas se u Institutu izrađuju digitalni regulatori na bazi mikroprocesora i mikrokontrolera. Saradnici Centra neprekidno su u toku tog razvoja, koristeći uvek prednosti nove informacione tehnike i razvijajući savremene regulatore i druge uređaje koji neposredno upravljaju tehnološkim procesima. Karakteristika rada na razvoju u ovoj oblasti je rad u svim fazama, počev od studije sa izborom rešenja, kreacijom rešenja (principa rada, šeme, algoritma i sl.), pa preko projekta, izrade prototipa sa eksperimentima ili računarskom simulacijom, sve do konačne izrade u sopstvenoj radionici ili kod kooperanata, zatim ispitivanja i puštanje u rad na mestu korišćenja.

U poslednjih petnaest godina najveći broj saradnika Centra deluje u oblasti automatske regulacije elektroenergetskih objekata. Zahvaljujući mnogobrojnim realizovanim uređajima, objavljenim radovima, uvođenju novih metoda i novih komponenata u izradi regulatora Institut je postao priznat u zemlji kao vodeća snaga i u oblasti automatske regulacije elektroenergetskih objekata i pionir u uvođenju sve novijih rešenja, neposredno prateći razvoj ove oblasti u svetu.

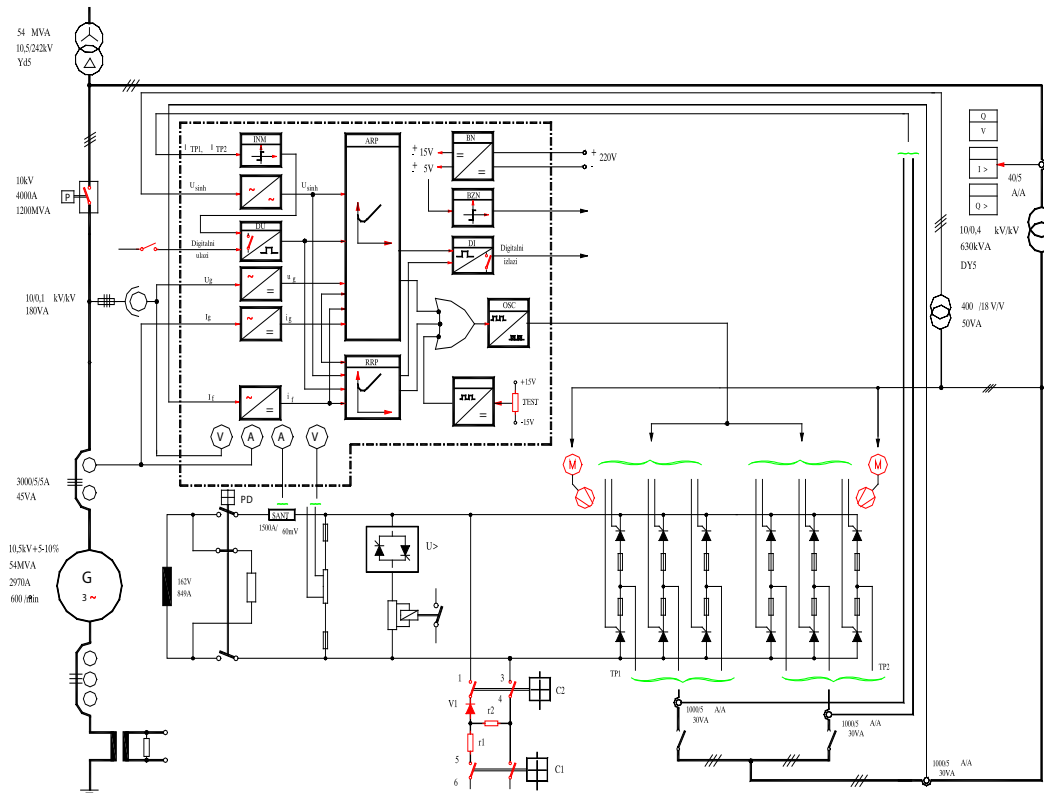
#### **3.1. Sistemi regulacije pobude sinhronih generatora**

Razvoj sistema za regulaciju pobude sinhronih mašina je najznačajnija oblast delatnosti Centra u poslednjih petnaest godina, i to razvoj kako sistema za regulaciju pobude sinhronih generatora, tako i sistema za regulaciju pobude velikih sinhronih motora.

Sistemi za regulaciju pobude sinhronih generatora čine najznačajniju grupu regulacionih uređaja iz oblasti automatske regulacije elektroenergetskih objekata. U Centru je razvijeno više tipova sistema pobude sinhronih generatora, tako da je pokriven ceo raspon snaga sinhronih generatora od nekoliko desetina kilovata pa do više stotina megavata. Rekonstruisan je ili zamenjen sa novim niz sistema regulacije pobude i

regulatora napona u postojećim elektranama na agregatima male, srednje i velike snage (HE "Zvornik", HE "Medvode", HE "Moste", HE "Dravograd" HE "Raška", TE "Kosovo A", TE-TO "Lučani", HE "Ovčar Banja, HE "Međuvršje", "Vlasinske HE", HE "Bistrica", HE "Potpeć", HE "Pod Gradom", TE-TO "Novi Sad", TE "Nikola Tesla A4, A5 i A2", HE "Kokin Brod", TE "Kostolac B1") uvodeći novu, pouzdaniju i ekonomičniju tiristorsku tehniku, uključujući i ugradnju potpuno novih savremenih analognih i digitalnih regulatora pobude.

Istaknuto mesto u ovoj oblasti zauzima razvoj, izrada i puštanje u rad novih statičkih sistema pobude sa digitalnim regulatorom napona i opcijom električnog kočenja za dva hidrogeneratora snage po 54 MVA u HE "Bistrica". Stari elekromašinski pobudni sistemi sa budilicom i magnetnim regulatorom napona ABMn-1 zamenjeni su statičkim sistemima pobude. Jednopolna šema statičkog sistema pobude sa digitalnim regulatorom i električnim kočenjem prikazana je na slici 1. Energetsko kolo sistema pobude realizovano je pomoću dva tiristorska pretvarača, koji rade paralelno jedan drugom, a sva oprema je dimenzionisana da može da ostvari faktor forsiranja dva po naponu i po struji. U novom sistemu pobude ugrađen je prvi domaći digitalni automatski regulator pobude, koji je razvijen i proizveden u Institutu "Nikola Tesla". Mikroprocesorski regulator je realizovan tako, da pored obavljanja svih regulacionih funkcija, vrši faznu regulaciju i upravljanje tiristorskim mostovima. Naknadno je u sistemu pobude dograđen prvi domaći sistem za električno kočenje agregata, koji je realizovan bez dodatnog otpornika, a za napajanje sistema pobude za vreme električnog kočenja iskorišćen je postojeći pobudni transformator. Upravljački algoritam ostvaren je proširenjam postojeće hardverske i softverske platforme digitalnog regulatora pobude.

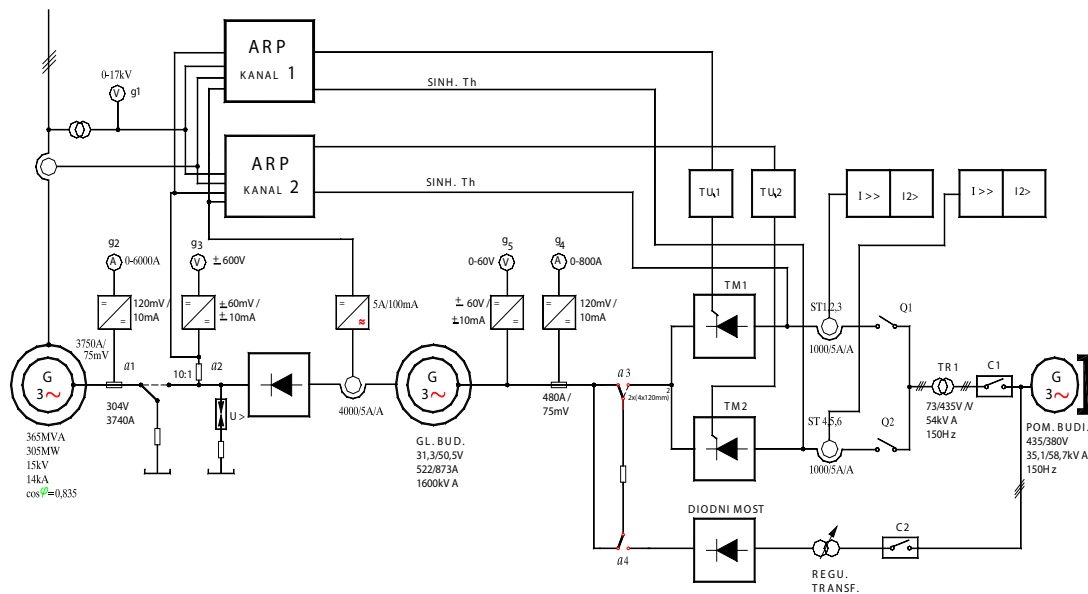


Sl. 1. Jednopolna šema statičkog sistema pobude sa digitalnim regulatorom i električnim kočenjem u HE "Bistrica"

U okviru rekonstrukcije turboagregata A5, snage 365MVA, termoelektrane "Nikola Tesla A", izvršena je i rekonstrukcija sistema pobude. Prilikom rekonstrukcije sistema pobude, zamenjeni su tiristorski mostovi koji služe za pobudu glavne budilice (generator naizmenične struje) i regulator pobude, a zadržani su glavna i pomoćna budilica, diodni mostovi za ispravljanje struje glavne budilice, prekidači i otpornici za demagnetizaciju generatora i glavne budilice i rezervni-ručni sistem pobude glavne budilice. Rekonstruisani pobudni sistem prikazan je na slici 2.

Novi rekonstruisani deo sistema pobude obuhvata dve celine: blok upravljanja i blok energetskog pretvarača. Obe celine realizovane su kao podsistemi sa dvostrukom rezervom; upravljački deo i deo energetskog pretvarača poseduju potpunu redundansu, koja se automatski aktivira tokom rada uređaja. Blok energetskih pretvarača realizovan je kao nezavisna celina koja, pored funkcije pobuđivanja glavne budilice, objedinjava i sve zaštitne funkcije potrebne za realizaciju pretvarača snage. Upravljački deo je realizovan kao autonomna celina, fizički i funkcionalno izdvojena od energetskog pretvarača. Osnovu upravljačkog dela čini digitalni regulator pobude, koji sadrži automatski regulator napona, rezervni strujni regulator, limitere, test režim, upravljanje tiristorima, zaštitu, merenje i signalizaciju.

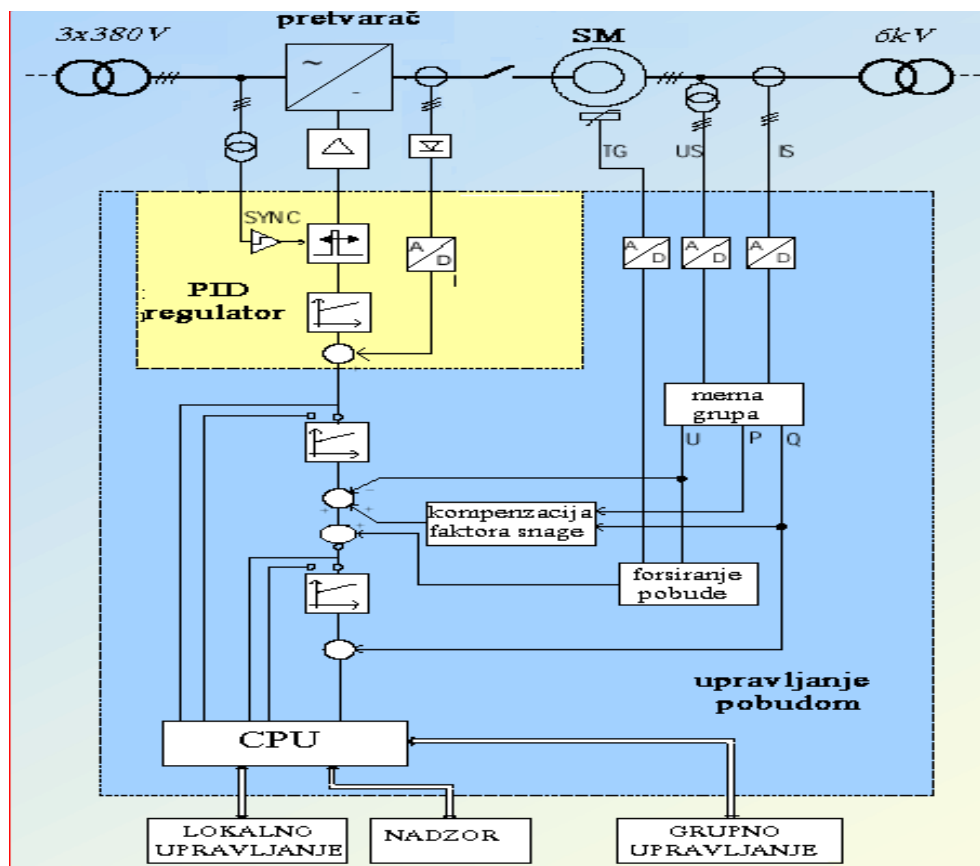
Sl. 2. Rekonstruisani sistem pobude na agregatu A5 u TE "Nikola Tesla A".





### 3.2. Sistemi regulacije pobude sinhronih motora

Istaknuto mesto u ovoj oblasti zauzima i razvoj i izrada tiristorskih sistema pobude univerzalnog tipa za sinhronu motora velike snage. Prvi od ovakvih sistema nalazi se u pogonu u železari »Skopje«, gde je upravljanje realizovano preko analogne elektronike. Najnoviji sistemi, realizovani u pogonima Merošina i Smederevo MESSER Tehnogasa, bazirani su na programabilnom logičkom kontroleru. U pogonu u Smederevu izvršena je rekonstrukcija pobudnog sistema za sinhroni motor snage 3 MW, koji pokreće turbokompresor, vođen pomoću programabilnog logičkog kontrolera. Specifičnosti koje izdvajaju ovu realizaciju rekonstrukcije od sličnih rešenja su fleksibilnost sistema i primena standardnog hardvera i softvera – konfekcijskog tipa. Takođe, upotreba PLC-a omogućava lako povezivanje sa procesnim upravljanjem fabričkog postrojenja i implementaciju različitih optimizacionih algoritama, a sve to uz nižu cenu. PID regulator struje pobude realizovan je u mikrokontroleru uz mogućnost regulacije i faktora snage.. Takođe, omogućen je i režim forsiranja pobude, nadpobuđivanjem u slučaju pada napona mreže ispod definisane granice radi zadržavanja sinhronog motora u sinhronizmu. Pošto PLC poseduje realizovane matematičke funkcije višeg nivoa, otvaraju se vrata i primeni savremenijih metoda regulacije kao što su on-line estimacija parametara mašine na osnovu rezultata merenja u krakom spoju i praznom hodu, snimanje Mordejeve krive blagim nadpobuđivanjem i potpobuđivanjem mašine u željenoj radnoj tački, kao i projektovanje optimalnih i prediktivnih regulatora.



Sl. 3. Dijagram regulacije struje pobude

### **3.3. Grupni regulatori pobude i aktivne snage**

Jedno od najznačajnijih ostvarenja u oblasti regulacije elektrana su grupni regulatori pobude (GRP), odnosno napona i reaktivnih snaga, i grupni regulatori aktivnih snaga (GRAS) u višeagregatnim elektranama. Razvijen je i ugrađen veliki broj ovih regulatora u prvenstveno hidroelektrane širom Jugoslavije (HE "Bajina Bašta", HE "Đerdap I", HE "Ožbalt", HE "Piva", HE "Trebinje", HE "Dubrovnik", HE "Zvornik", HE "Jablanica", HE "Doblar", HE "Formin", HE "Vrutok", HE "Raven", HE "Perućica", HE "Đerdap II", TE "Nikola Tesla A"), i to u različitim tehnologijama: sa magnetnim pojačavačima, sa integrisanim kolima i sa mikroprocesorima. Grupni regulator pobude i aktivne snage (GRASP) predstavlja objedinjeni sistem kojim se vrši automatsko upravljanje reaktivnim i aktivnim režimom elektrane i raspodela aktivnog i reaktivnog opterećenja među generatorima paralelno spregnutim i uključenim u grupni rad. Najnovije rešenje za termoelektanu „Nikola Tesla A“, kao elektranu sa 4+2 agregata, grupni regulator pobude i aktivne snage objedinjuje u celinu u pogledu upravljanja ukupnom aktivnom snagom elektrane. S obzirom na postojanje dva sabirnička naponska nivoa, grupni regulator pobude realizovan je preko dva grupna regulatora pobude, po jedan za svaki naponski nivo. Prema tome, u pogledu upravljanja naponsko-reaktivnim režimom, elektranu posmatramo kao dve raspregnute celine. Funkcija grupne regulacije aktivne i reaktivne snage ostvaruje se delovanjem na reference regulatora pobude i turbinskih regulatora u primarnim konturama upravljanja svakog agregata elektrane.

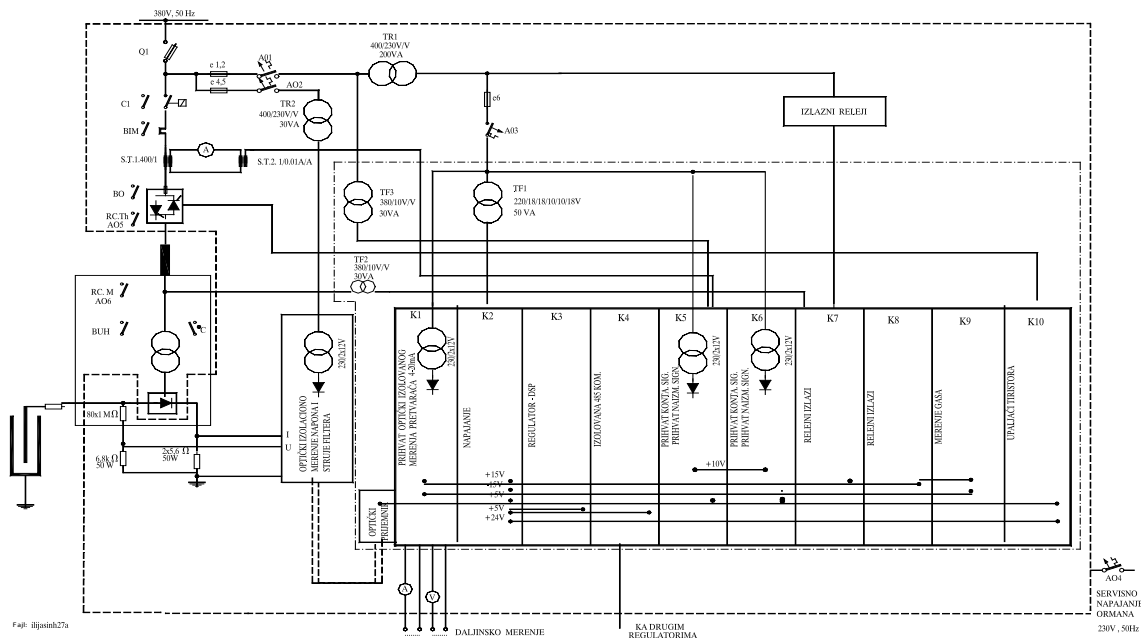
### **3.4. Sistemi za napajanje i regulaciju elektrostatičkih filtera**

Uređaji koji se standardno koriste za izdvajanje letećeg pepela iz dimnih gasova su elektrostatički izdvajači, popularnije zvani elektrofilteri. Oni mogu izdvojiti iz vazduha preko 99,9% letećeg pepela ne izazivajući pritom promene pritiska u komori uređaja. Tipični pogoni u kojima se primenjuju elektrofilteri su termoelektrane, termoelektrane-toplane, industrija cementa, metalurgija itd.

U Centru je razvijen i ugrađen veliki broj ovih uređaja sa kontinualnim napajanjem i analognim regulatorom (Energana u fabrici sode u Lukavcu, Energana u fabrici Zastava, TE "Kostolac" A2 i A3 i TE "Kostolac" B), kao i uređaja sa intermitentnim napajanjem i digitalnim regulatorom ("TE Nikola Tesla" A1 i A4 i TE "Kolubara" A5). U okviru rekonstrukcije elektrofiltera u TE "Nikola Tesla A1", staro elektrofiltersko postrojenje zamenjeno je sa četiri nova sistema sa intermitentnim napajanjem i digitalnim regulatorom. Blok šema novog sistema sa intermitentnim napajanjem i digitalnim regulatorom prikazana je na slici 4. Uređaj automatike elektrofiltera obuhvata opremu za regulaciju, upravljanje, merenje i signalizaciju elektrofilterskog postrojenja. Regulator napona realizovan je u digitalnoj mikrokontrolerskoj tehnologiji i ima mogućnost izbora kontinualne i intermitentne regulacije.

#### 4. POGONSKA ISPITIVANJA

Ispitivanje opreme u složenim postrojenjima, kao što su elektrane, elektromotorni pogoni u industrijskim postrojenjima, energetske mreže za napajanje potrošača u železarama i na površinskim kopovima uglja je jedna od tradicionalnih delatnosti Instituta. Cilj ispitivanja je provera da li je ispitivana oprema podesna za način i uslove eksploatacije koje je propisao proizvođač ili da se utvrde i otklone nepravilnosti u radu opreme. U elektranama, na primer, vrši se veliki broj različitih ispitivanja generatora sa ciljem da se utvrde ili provere karakteristike i veličine raznih parametara generatora, ispita termičko stanje generatora, izmere gubici u generatoru i odredi njegov stepen korisnosti, ispita stanje sistema izolacije generatora, izmere mehaničke karakteristike opreme generatora i utvrde veličine vibracija delova generatora. Kriterijumi za ocenu podesnosti ispitivane opreme zasnivaju se na ocenama o zadovoljavanju niza tehničkih zahteva utvrđenim u tehničkim dokumentima kojima se određuju projektovanje, izrada i eksploatacija opreme. Takvi tehnički dokumenti su standardi i tehnički uslovi. Tehničke uslove sastavlja po pravilu proizvođač opreme uz učešće, ako je potrebno, i predstavnika naručioca.



Sl. 4. Blok šema napajanja i regulacije elektrofilterskog postrojenja.

Na samom početku bavljenja ovim ispitivanjima, pre više od pedeset godina, saradnici Instituta zajedno sa stručnjacima tadašnjeg Hidroenergetskog zavoda (današnji Institut "Jaroslav Černi") razvijali su postupke i aparature za merenja pre svega stepena korisnosti agregata (generatora i hidraulične turbine) u hidroelektranama. Prva merenja gubitaka i određivanja stepena korisnosti realizovana su u hidroelektrani "Vrla 1", hidroelektrani "Kokin Brod", hidroelektrani "Bistrica" početkom šezdesetih godina prošlog veka. U periodu izrade opreme za agregate u hidroelektrani "Đerdap 1", a nešto kasnije i za hidroelektrani "Đerdap 2" saradnici Instituta vršili su ispitivanja na ispitnim poljima i u laboratorijama proizvođača opreme, a posle toga i ispitivanja u elektrani pri

puštanju u rad generatora, sistema pobude i sistema turbinske regulacije. A negde pred istek perioda garancije opreme u hidroelektrani "Đerdap 2" saradnici Centra izvršili su garancijska ispitivanja generatora, sistema pobude i sistema turbinske regulacije. I za opremu hidroelektrane "Piroć" saradnici Instituta izvršili su ispitivanja opreme na ispitnim poljima proizvođača opreme, pri puštanju opreme u rad, a zatim i garancijska ispitivanja opreme. U periodu zastoja u izgradnji novih agregata u elektroprivredi Srbije pojavila se potreba za ispitivanjima mogućnosti povećanja snage postojećih agregata. Saradnici Centra obavljali su ispitivanja sa ciljem da se proverí mogućnost povećavanja snage agregata u više elektran kao u hidroelektrani "Đerdap 2", hidroelektrani "Bajina Bašta", hidroelektrani "Bistrica" i hidroelektrani "Zvornik".

U velikom broju industrijskih postrojenja, kao na primer u Železari Smederevo, Železari Skopje, Jeklarni Jesenice, na površinskom kopu Ćirikovac, u Rafineriji nafte Pančevo, u rudnicima uglja Resava, saradnici Centra izvršili su ispitivanja kvaliteta električne energije po naponu i sačinioću snage. Na osnovu rezultata ispitivanja saradnici Centra definisali su tehničke karakteristike kompenzatora i filtera i dali svoj praktičan doprinos na planu racionalnijeg i efikasnijeg korišćenja električne energije.

Pre više od dvadeset godina u Centru je kompletirana moderna oprema za akviziciju do šesnaest merenih veličina jednovremeno pomoću brzog računara. Saradnici Centra razvili su metode i računarske programe za potpuno automatizovano merenje i obradu rezultata merenja. Ova oprema za akviziciju merenih veličina primenjena je najpre pri izvođenju kompleksnih i garancijskih ispitivanja u hidroelektrani "Đerdap 2" polovinom osamdesetih godina. Tada su iskorišćene prednosti primene računarskog akvizicionog sistema pri složenim i obimnim ispitivanjima, a pre svega jednostavnost korišćenja i posebno nov kvalitet brzina obrade rezultata ispitivanja neposredno po izvođenju merenja, efikasnost u organizaciji i prikazivanju podataka sa merenja uključujući prikazivanje dijagrama i tabela. Kasnije je oprema za merenje i akviziciju dopunjavana modernijom i savremenijom računarskom opremom i korišćena pri ispitivanjima u mnogim elektranama i industrijskim postrojenjima.