

Novo postrojenje sa tiristorskim ispravljačima i razvodom jednosmerne struje za napajanje hidroelektrane

Vladimir Vukić¹, Rajko Prole¹, Darko Jevtić¹

¹Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd
vladimir.vukic@ieent.org

Kratak sadržaj: Ispravljači serije DRI-PTD sa karticom analogne elektronike „DIGISP 09” i rednim diodama prema potrošačima predstavljaju dodatno unapređenje postojećih tiristorskih ispravljača zasnovanih na programabilnom logičkom kontroleru (PLC). Zajedno sa pratećim razvodom predstavljaju redundantni sistem za napajanje potrošača jednosmerne struje u hidroelektrani. Uvedene su funkcije kompenzacije izlaznog napona u zavisnosti od temperature baterije i pada napona na kablovima baterije, aktivnog deljenja struje potrošača pri paralelnom radu dva ispravljača, ručne provere prisustva baterije, automatske i ručne provere stanja baterije (periodično automatsko pražnjenje zadatog kapaciteta baterije u podesivom trenutku), ograničenog vremena rada u režimu forsiranog punjenja. Maksimalna vrednost ripla struje baterije je svedena na 5% nominalne vrednosti korišćenjem dvostrukog LC filtera u energetskom kolu. Digitalni regulatori su napravljeni u formi podesivih PID regulatora sa linearnim adaptivnim dejstvom. Pored osnovnih digitalnih regulatora, upravljačka elektronika poseduje i analogni PI regulator kojim se obezbeđuje nesmetani rad ispravljača u režimu dopunjavanja u slučaju kvara PLC-a. Prikazani su rezultati ispitivanja faktora snage, ukupnog harmonijskog izobličenja struje i stepena korisnog dejstva ispravljača. Izmerene su visoke vrednosti stepena korisnog dejstva za nominalno opterećene tiristorske ispravljače od oko 95,5%.

Ključne reči: tiristorski ispravljač, PID regulator, PLC, monitoring baterije, stepen korisnog dejstva, faktor snage, ukupno harmonijsko izobličenje struje

1. Uvod

U okviru rekonstrukcije hidroelektrane „Đerdap 1” izvršena je zamena

starih ispravljača i razvoda jednosmerne struje novim postrojenjem razvijenim i proizvedenim u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”. Postrojenje je sastavljeno od dva ispravljača DRI 220-160PTD (nominalni izlazni parametri 220V, 160A) i četiri ormara razvoda jednosmerne struje stepena zaštite IP21, sa izvodima za potrošače nominalnih struja od 25A do 200A. Ovaj sistem je namenjen za napajanje svih potrošača jednosmerne struje u hidroelektrani „Đerdap 1”, uključujući i sisteme početne pobude svih šest generatora.

Ispravljači serije DRI-PTD sa karticom analogne elektronike „DIGISP 09” i rednim diodama prema potrošačima predstavljaju dodatno unapređenje postojećih tiristorskih ispravljača Instituta „Nikola Tesla” zasnovanih na programabilnom logičkom kontroleru "Omron" [1],[2]. Uvedene su funkcije kompenzacije izlaznog napona u zavisnosti od temperature baterije i pada napona na kablovima baterije, aktivnog deljenja struje potrošača pri paralelnom radu dva ispravljača, podesivog ograničenja vremena rada u režimu forsiranog punjenja. Značajno su povećane mogućnosti nadzora i ciklusiranja baterije. Talasnost struje prema bateriji je svedena na 5% nominalne vrednosti. Ugradnjom 14 rednih dioda prema klemama potrošača i mogućnošću njihovog kratkog spajanja kontaktorom omogućen je rad ispravljača sa potrošačima u režimima punjenja i dopunjavanja sa 105 ćelija baterije.

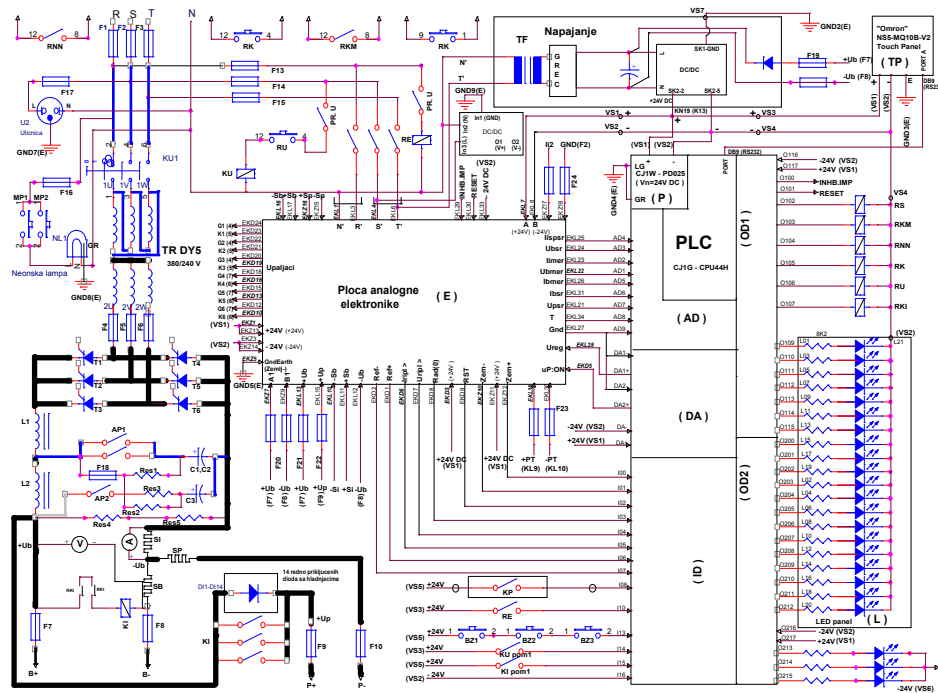
U radu su dati detaljni opisi funkcija koje su prvi put uvedene na ispravljačima serije DRI-PT. Opisane su i osnovne karakteristike razvoda jednosmerne struje. Na kraju rada su prikazane statičke karakteristike ispravljača dobijene ispitivanjem uređaja od praznog hoda do nominalnog opterećenja.

2. Tiristorski ispravljač DRI 220-160PTD

Ispravljači DRI 220-160PTD su uređaji sa punoupravljivim trofaznim tiristorskim mostom i upravljačkom elektronikom sastavljenom od tri jedinice: PLC-a "Omron" serije CJ1-H, operatorskog panela "Omron" NS5-MQ10B-V2 i kartice analogne elektronike „DIGISP 09”.

Modularna upravljačka elektronika namenjena je za upravljanje punoupravljivim tiristorskim mostom. Sistem je zasnovan na programabilnom logičkom kontroleru "Omron" CJ1G-CPU44H. Pomoću procesorske jedinice je programski realizovan veliki broj funkcija ispravljača. Ispravljači imaju funkcije provere prisustva baterije, automatskog trostrukog uključivanja u slučaju trajnog kvara, mekog starta, kontrole prisustva mrežnog napona, detekcije visokog i niskog napona baterije, pregrevanja hladnjaka tiristorskog mosta, kratkog spoja, gubitka upaljačkih impulsa, paralelnog rada ispravljača, otkaza tiristora i ispada izlaznih filterskih elektrolitskih kondenzatora, detekcije režima regulacije struje (regulacija struje ispravljača ili struje baterije), kao i signalizacije kvara i ispada uređaja beznaponskim kontaktima, zvučnom i

svetlosnom signalizacijom. Pored navedenih funkcija, svi uređaji mogu da se prebace u servisni režim rada, u kome se ispituje ispravnost signalizacije i opseg promene izlaznog napona. Režim punjenja baterije (dopunjavanje, punjenje, forsirano punjenje) može da se podesi ručno, a moguće je i zadavanje automatskog režima punjenja baterije prema IUU karakteristici.



Slika 1. Šema električnih veza ispravljača DRI 220-160PTD

2.1. Glavni razvod jednosmerne struje

Glavni razvod jednosmerne struje naponskog nivoa 220V sastoji se od dva dovodna polja (DP-220) i dva izvodna polja (IP-220). Služi za napajanje komandnih tabli agregata, komandnih tabli bloka, kao i ostalih potrošača bitnih za bezbedan i pouzdan rad elektrane.

Razvodno postrojenje jednosmerne struje poseduje dva sistema glavnih sabirnica. Na prednjim vratima ormara nalazi se slepa šema razvoda jednosmerne struje sa ugrađenim LED diodama za indicaciju uklopnog stanja kompaktnih prekidača u dovodnim poljima i indicacijom ispada komandno-zaštitnih elemenata u izvodnim poljima.

Dovodna polja su opremljena kompaktnim sklopkama koje služe za uključenje akumulatorskih baterija i ispravljača na prvi ili drugi sistem sabirnica, kao i za međusobno spajanje sabirnica. Signalizacija stanja kompaktnih sklopki je izvedena kako lokalno, LED diodama na slepoj šemi, tako i daljinski, za potrebe centralne komande elektrane. Merenje napona na sabirnicama izvedeno je analognim instrumentima na vratima ormara i

mernim prevaračima za potrebe daljinske signalizacije.



Slika 2. Izgled ispravljača DRI 220-160PTD i razvoda jednosmerne struje

Oba dovodna polja opremljena su uređajima za detekciju i indikaciju zemljospoja na sabirnicama XM200 „Merlin Gerin”, sa mogućnošću povezivanja sa sistemom upravljanja u elektrani i prosleđivanja zbirnog signala o postojanju zemljospoja u razvodu jednosmerne struje. Uređaj za detekciju i indikaciju zemljospoja prati vrednost otpornosti izolacije neuzemljenog sistema jednosmerne struje naponskog nivoa 220V (IT sistem) injektiranjem niskofrekventne naizmenične struje frekvencije 2,5 Hz između instalacije i uzemljivača. Uređaj XM200 poseduje dva nivoa reagovanja zaštite: pad nivoa otpornosti izolacije ispod praga prevencije i ispod donjeg praga alarma. Pored otpornosti izolacije, vrši se i merenje kapacitivnosti prema zemlji. Zemljospojno rele ima i mogućnost detektovanja prolaznih zemljospojeva, odnosno zemljospojeva koji se javljaju povremeno i gube se pre poništavanja signala prolaznog (intermitentnog ili privremenog) kvara. Vrednost otpornosti izolacije pri poslednjem prolaznom kvaru ostaje upamćena u memoriji relea XM200 i može se pročitati. Tada kao indikacija arhiviranog prolaznog kvara svetli odgovarajuća LED dioda. Uređaj XM200, u kombinaciji sa mobilnim instrumentom XRM i strujnim kleštima XP50, pruža mogućnost određivanja tačne lokacije mesta kvara u slučaju pojave potrošača sa smanjenim otporom izolacije.

Izvodna polja razvoda jednosmerne struje imaju po 16 izvoda sa svakog sistema sabirnica. Svaki izvod je zaštićen automatskim prekidačima ili rastavnim sklopkama nominalnih struja od 25A do 200A. Za potrebe nadzora uklopnog stanja na centralnoj komandi elektrane izvedena je daljinska signalizacija uklopnog stanja svakog pojedinačnog izvoda. Lokalno, na slepoj šemi na vratima ormara, izvedena je svetlosna signalizacija ispada zaštitnog elementa na svakom izvodu pomoću LED dioda.

3. Opis rada ispravljača DRI 220-160PTD

U prethodnim radovima je detaljno opisan način rada pojedinih sklopova kartica upravljačke analogne elektronike tipa „DIGISP 06” [1] i „DIGISP 068” [2]. Kartica analogne elektronike tipa „DIGISP 09” ispravljača DRI 220-160PTD predstavlja dalje usavršavanje starijih verzija kartica, pa svi podaci navedeni u literaturi [1], [2] važe i za novu upravljačku elektroniku. Nova kartica analogne elektronike ima mogućnosti galvanski izolovanog merenja vrednosti temperature dobijene sa senzora VTS posredstvom strujne petlje 4-20 mA, usklađenog rada analognog PI regulatora (sa kolom "mekog starta") sa postojećim digitalnim regulatorom, kao i galvanski odvojenog praćenja signala struje drugog ispravljača i formiranje logičkih signala za kompenzaciju izlaznog napona ispravljača.

Takođe, upravljački program prethodne varijante ispravljača serije DRI-PT je poslužio kao osnova za dalji razvoj softvera ispravljača. U ovom poglavlju biće navedena nova rešenja i razlike u odnosu na prethodne projekte.

3.1. Postupak provere stanja baterije

Potpuno nova funkcija primenjena kod ispravljača serije DRI-PT je uvođenje provere stanja baterije. Provera stanja baterije podrazumeva automatsko ili ručno prekidanje procesa punjenja baterije i pražnjenje zadatog procenta nominalnog kapaciteta baterije. Uvođenjem postupka provere stanja baterije, odnosno većih periodičnih pražnjenja baterije, očekuje se značajno poboljšanje stanja i kapaciteta baterije tokom njenog životnog veka [3].

U režimu provere stanja baterije referentna vrednost izlaznog napona se spušta na 1,8 V/čel. Ukoliko ispravljač radi bez baterije, napon na izlazu brzo pada na novu referentnu vrednost, a procesor prekida postupak provere stanja baterije. Ukoliko je baterija priključena na izlazne kontakte ispravljača, napon ostaje iznad referentne vrednosti, a na posebnim ekranima operatorskog panela osetljivog na dodir mogu da se prate parametri baterije (ispražnjeni amper-časovi, predviđeni kapacitet pražnjenja, struja pražnjenja baterije, napon baterije, temperatura baterije, vreme početka pražnjenja, trajanje pražnjenja baterije...). Kada se završi pražnjenje zadatog kapaciteta baterije, ispravljač se automatski vraća u režim rada u kome je bio pre

početka provere stanja baterije, a na ekranu operatorskog panela ostaju arhivirani podaci o poslednjoj proveru (napon, struja i temperatura baterije na kraju pražnjenja, vreme početka i kraja pražnjenja, trajanje pražnjenja...). Ukoliko napon baterije padne na vrednost od 1,83 V/°C, pre pražnjenja zadatog kapaciteta, proces provere stanja baterije prestaje, ispravljač se automatski vraća u režim rada u kome je bio pre početka provere i aktivira se signalizacija lošeg stanja baterije.

Proces provere stanja baterije može da se pokrene ručno, pritiskom na virtuelni taster, a moguća je i automatska provera stanja, u definisanom trenutku. Moguće je zadavanje provere stanja baterije određenog dana u mesecu ili u nedelji, u željeno vreme. Automatska provera stanja može da se vrši u intervalima između nedeljne i mesečne probe. Prilikom automatske provere stanja može da se zada kapacitet pražnjenja baterije u opsegu 0,1-25 %, dok prilikom ručne provere može da se zada kapacitet pražnjenja 0,1-100 % nominalnog kapaciteta baterije.

Prilikom provere stanja baterije može da se zada i maksimalna vrednost struje pražnjenja. Ukoliko struja pražnjenja pređe zadata vrednost, aktivira se regulator struje baterije, pa ispravljač zajedno sa baterijom napaja potrošač tako da struja pražnjenja baterije ne pređe zadata vrednost. Ukoliko je struja potrošača prilikom pražnjenja baterije prevelika, aktivira se regulator struje ispravljača, kojim se ograničava maksimalna struja ispravljača u režimu provere stanja baterije, bez obzira na struju pražnjenja baterije.

Pomenutim postupkom regulacije struje i napona ispravljača u režimu provere stanja baterije sprečava se bilo kakav neželjeni efekat koji bi mogao da nastane na bateriji ili potrošačima izazvan jednostavnim isključivanjem ispravljača u vremenskom periodu određenom za pražnjenje baterije.

Pokretanjem postupka provere stanja baterije aktivira se i provera prisustva baterije, pa ne može da dođe do pokretanja procesa pražnjenja baterije kada ona nije priključena na izlaz ispravljača.

3.2. Kompenzacija izlaznog napona ispravljača

Na ispravljaču DRI 220-160PTD uvedene su opcije kompenzacije izlaznog napona ispravljača. U zavisnosti od temperature baterije ili pada napona na kablovima baterije menja se referentna vrednost izlaznog napona ispravljača da bi se postigli optimalni radni naponi. Takođe, i aktivno deljenje struje potrošača je ostvareno promenom izlaznog napona ispravljača u zavisnosti od debalansa struja potrošača dva paralelno priključena ispravljača. Na operatorskom panelu se prikazuju osnovne i kompenzovane vrednosti svih referentnih napona, kao i pojedinačni doprinos temperature kompenzacije, kompenzacije pada napona na kablovima baterije i aktivnog deljenja struje potrošača na smanjivanje ili povećanje reference napona. Svaka vrsta kompenzacije napona može da se isključi ili ponovo aktivira odgovarajućim virtuelnim tasterima.

Temperaturna kompenzacija napona ostvarena je merenjem temperature

u sali akumulatorske baterije specijalizovanim uređajem "Electronic Design" tipa VTS sa PT100 sondom. Iskorišćen je modifikovani uređaj VTS, sa 24-bitnim A/D konvertorima, kojim se isti podatak o temperaturi dobijen sa jedne PT100 sonde u opsegu $-10^{\circ}\text{C} : 60^{\circ}\text{C}$ šalje preko dva merna kanala 4-20 mA na dva ispravljača u razvodu. Ulazi za merenje temperature na karticama „DIGISP 09” su galvanski odvojeni izolacionim pojačavačima od dela kartice povezanog sa logičkim kontrolerom, pa je na ovaj način obezbeđeno simetrično priključivanje senzora VTS na oba ispravljača, bez opasnosti od galvanskog povezivanja različitih potencijala na ispravljačima ili u senzoru VTS. Referentna temperatura baterije za proračun kompenzovane vrednosti napona je 25°C , a napon po jednoj ćeliji baterije treba da se menja srazmerno zavisnosti $-4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ [4].

U zavisnosti od struje baterije, dužine, preseka i vrste kablova (bakarni ili aluminijumski) vrši se automatska kompenzacija pada napona na kablovima. Svi potrebni podaci o kablovima mogu da se unesu preko operatorskog panela.

Aktivno deljenje struje u režimu paralelnog rada ispravljača nije bilo moguće izvesti direktnim galvanski izolovanim merenjem struje potrošača sa šanta drugog ispravljača, prvenstveno zbog nedostatka slobodnih A/D konvertora na PLC-u (u postojećoj konfiguraciji ispravljača DRI 220-160PTD je bilo iskorišćeno svih osam mernih kanala). Zbog toga je primenjen drugi postupak za ostvarivanje paralelnog rada. Praćenjem razlike struje na šantovima potrošača dva ispravljača, na oba uređaja su dobijana po dva logička signala („više” i „niže”), na osnovu kojih je vršeno podizanje ili smanjivanje referentne vrednosti napona ispravljača. Podizanje referentne vrednosti napona u jednom ispravljaču je praćeno smanjivanjem reference u drugom uređaju, čime se vrši uravnotežavanje struja potrošača. Dodavanje ovakvog integralnog dejstva postojećim digitalnim PID regulatorima je bilo moguće zbog razlike u vremenskim konstantama integralnog dejstva za više od jednog reda veličine, budući da nije bila zahtevana velika brzina odziva regulatora po struji potrošača drugog ispravljača. Zbog toga može da se prihvatiti da su dejstva po izlaznom naponu i struji potrošača međusobno nezavisna. Ovakvim postupkom je dobijeno odstupanje struja potrošača dva ispravljača u opsegu od $\pm 10\%$ od nominalne vrednosti struje (do $\pm 16\text{A}$) u režimu dopunjavanja. U režimima punjenja i forsiranog punjenja su dobijeni mnogo bolji rezultati, budući da u ovim režimima rada struja potrošača prolazi kroz 14 redno priključenih dioda, pa diode prirodno ujednačavaju struje prema potrošačima.

Važno je još jednom naglasiti da se pri paralelnom radu ispravljača vrši aktivno deljenje struja potrošača, a ne ukupnih struja ispravljača. Ovakvom koncepcijom se postiže uravnotežno napajanje potrošača bez obzira na napunjenost pojedinih baterija, budući da može da dođe do pojave situacije da je jedna baterija ispražnjena, a druga puna, ali i pojave rada dva ispravljača u različitim režimima punjenja baterije (i u slučaju kada oba ispravljača rade u automatskom radu, jedan može da se nađe u režimu punjenja, a drugi u režimu dopunjavanja). Čak i u ovakvim slučajevima

postojeća koncepcija aktivnog deljenja opterećenja daje mogućnost ujednačavanja struja potrošača.

3.3. Regulacija napona i struja ispravljača

Na ispravljačima DRI 220-160PTD su prvi put primenjeni $\beta\gamma$ PID regulatori sa linearnim adaptivnim dejstvom. Podešavanje parametara PID regulatora ispravljača DRI 220-160PTD vršeno je postupkom „kritičnog eksperimenta” u zatvorenoj povratnoj sprezi, prema Zigler - Nikolsovom kriterijumu [5]. Upotreba složenijih regulatora je bila potrebna zbog zahteva korisnika za dobrom dinamikom regulatora napona, kao i malim riplom struje baterije (do 5% nominalne vrednosti; 16% kod standardnih tiristorских ispravljača kompanije "Gutor Electronic" [6]), zbog čega je u energetskom kolu morao da bude primenjen dvostruki LC filter. Prednost smanjivanja naizmenične komponente struje baterije ogleda se u manjem zagrevanju ćelije baterije usled disipiranja manje naizmenične komponente struje [4]. Takođe, zahtevano je i omogućavanje rada ispravljača bez priključene baterije, što je nametnulo potrebu za efikasnim upravljanjem sistemom 2. reda u veoma širokom opsegu radnih uglova faznog pomerača. Pored osnovnih 19 digitalnih PID regulatora, na kartici „DIGISP 09” se nalazi i analogni PI regulator kojim se obezbeđuje nesmetani rad ispravljača u režimu dopunjavanja u slučaju kvara PLC-a.

U računarskom algoritmu je primenjena forma digitalnog PID regulatora sa modifikovanom Tustinovom aproksimacijom člana diferencijalnog dejstva [7]. Primenjenom formom PID regulatora omogućeno je zadavanje konstanti integralnog i diferencijalnog dejstva u opsegu 0,1 ms - 300 ms. Za merenje struja i napona su korišćeni 12-bitni A/D konvertori. Postignuta je tačnost regulacije napona 0,5%, dok je tačnost regulacije struje bila do 2%. U osnovnim režimima rada (dopunjavanje, punjenje, forsirano punjenje) smenjivali su se regulatori napona, struje baterije i ukupne struje ispravljača. U verziji programa za ispravljač DRI 220-160PTD napravljeni su programski upiti kojima je omogućeno smenjivanje regulatora napona i struje i u funkciji srednje vrednosti, i u funkciji trenutne vrednosti struje baterije ili ispravljača, uz usavršavanje postojećeg programskog histerezisa kojim se onemogućava višestruko uzastopno smenjivanje regulatora napona i struje.

4. Rezultati ispitivanja i diskusija

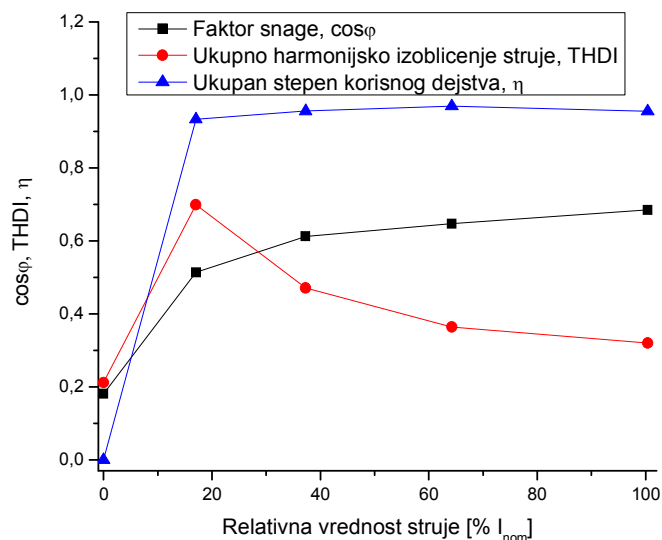
Prilikom tehničkog prijema uređaja izvršeno je snimanje statičkih i dinamičkih karakteristika ispravljača DRI 220-160PTD. Snimanje statičkih karakteristika, prvenstveno aktivnih snaga, faktora snage nesinusoidalne struje i ukupnog harmonijskog izobličenja struje vršeno je analizatorom snage "Chauvin Arnoux" CA 8334B (propusni opseg 10 - 70 Hz, merenje napona do 600V i struja do 3000A; merna nesigurnost za snage, napone i struje je 0,5%). Step en korisnog dejstva je naknadno određivan kao količnik aktivne

snage na izlazu ispravljača i aktivne snage izmerene na ulaznim kontaktima ispravljača. Naizmenična struja je merena strujnim kleštima "Chauvin Arnoux", opsega 0-100 A, a jednosmerna struja je merena na šantu ispravljača (200 A, 60 mV) univerzalnim instrumentom "RishMulti 18S", merne nesigurnosti 0,03%.

Dobijene vrednosti ukupnog harmonijskog izobličenja struje (THDI) i faktora snage nesinusoidalne struje nalaze se u opsegu očekivanih vrednosti za punoupravljivi šestopulsni tiristorski ispravljač [8]. Prema podacima objavljenim o šestopulsnim tiristorskim ispravljačima kompanije "Schneider Electric" bez dodatnih ulaznih filtera, ukupno harmonijsko izobličenje struje se menja od 0,72 (25% opterećenja) do 0,32 (100% opterećenja) [9]. Na ispravljaču DRI 220-160PTD (serijski broj 201/10) u režimu dopunjavanja (nepovoljniji slučaj) izmerene su vrednosti THDI od 0,699 (17% opterećenja) do 0,32 (100,4% opterećenja).

Izmerene vrednosti faktora snage su niže od uobičajenih vrednosti (do 0,78 prema tehničkoj dokumentaciji za ispravljače nominalnog napona 220 V kompanije "AEG" [10]), prvenstveno zbog potrebe da se podigne prenosni odnos transformatora da bi mogao da se, prema zahtevu korisnika, obezbedi potreban napon ispravljača u režimu forsiranog punjenja i u slučajevima kada je napon mreže za 10% niži od nominalne vrednosti od 380V. Transformator mora da obezbedi i mogućnost podešavanja napona forsiranog punjenja na 105% nominalne vrednosti, što predstavlja napon od 286,7V. Nominalne vrednosti napona dopunjavanja i punjenja su 234,1V i 252V. Zbog toga je potrebno da tiristorski most u ovim režimima radi sa relativno velikim vrednostima ugla paljenja tiristora (α). Kako je faktor snage tiristorskog ispravljača direktno srazmeran $\cos\alpha$ [8], neminovan je rad sa nešto lošijim faktorom snage u uobičajenim režimima eksploatacije ispravljača.

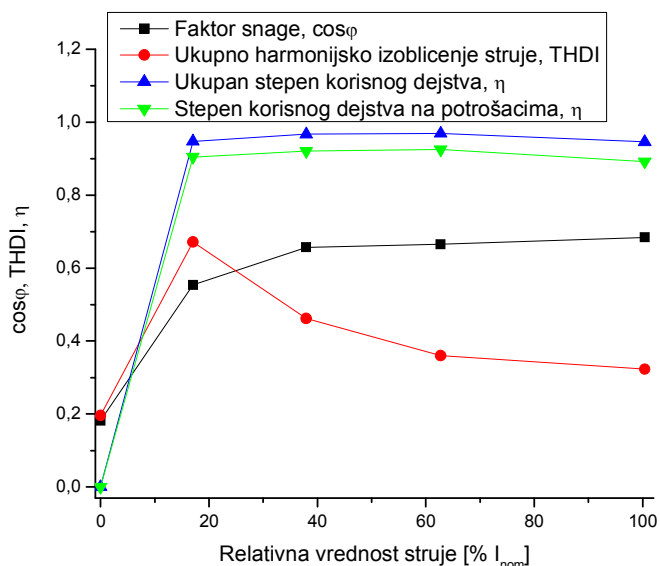
U režimu forsiranog punjenja nisu snimane kompletne statičke karakteristike ispravljača, već samo za struje ispravljača do 41% I_{nom} . Ovakav pristup ima opravdanje u činjenici da ispravljač u režimu forsiranog punjenja ne sme da radi sa potrošačima (zbog visokog izlaznog napona), a programski dozvoljeni limit struje baterije u ovom režimu je 30A (19% I_{nom}). Pri pomenutoj struji ispravljača od 41% I_{nom} (66 A) u režimu forsiranog punjenja (referentni napon 272 V) izmeren je faktor snage 0,739. Na osnovu analogije sa dobijenim rezultatima u režimima dopunjavanja i punjenja može se pretpostaviti da bi pri merenju faktora snage nesinusoidalne struje u režimu forsiranog napona, sa nominalnom strujom i referentnim naponom od 286,7V, svakako bila dostignuta vrednost faktora snage od 0,78.



Slika 3. Statičke karakteristike faktora snage nesinusoidalne struje, harmonijskog izobličenja struje i stepena korisnog dejstva ispravljača DR 220-160PTD u režimu dopunjavanja

Treba pomenuti da se dodavanjem aktivnih filtera tiristorskim ispravljačima može podići faktor snage na 0,95, a ukupno harmonijsko izobličenje struje smanjiti na 4% [9].

Prilikom merenja stepena korisnog dejstva ispravljača izmerene su veće vrednosti od očekivanih. U svim režimima rada, sa strujama ispravljača od 17% do 100%, izmeren je stepen korisnog dejstva od 93,3% (dopunjavanje, 17% nominalne struje) do 96,8% (režim forsiranog punjenja pri struji od 41% I_{nom} (66 A), bez priključene baterije; izmerena je efektivna vrednost ripla napona na izlazu ispravljača 1,06 V). U dokumentaciji ispravljača kompanije "AEG" navodi se stepen korisnog dejstva od oko 93% kod tiristorskih ispravljača nominalnog izlaznog napona 220 V [10], dok je za tiristorske ispravljače kompanije "Gutor Electronic" definisan stepen korisnog dejstva u opsegu 80-94 % [6]. Prema podacima kompanije "Benning", ispravljači serije "Thyrotronic" imaju stepen korisnog dejstva od 85% do 94% [11]. Kompanija "Schneider Electric" navodi kao značajan uspeh postizanje stepena korisnog dejstva integrisanog sistema besprekidnog napajanja "Galaxy 6000" (tiristorski ispravljač, tranzistorski inverter i statička preklopka snage 400 kVA) od 95% pri struji od 50% - 75% nominalnog opterećenja, odnosno 94,5 % pri nominalnom opterećenju [9].



Slika 4. Statičke karakteristike faktora snage nesinusoidalne struje, harmonijskog izobličenja struje, ukupnog stepena korisnog dejstva i stepena korisnog dejstva na potrošačima ispravljača DRI 220-160PTD u režimu punjenja

Razloge za postizanje visokog stepena korisnog dejstva ispravljača DRI 220-160PTD, snage 63 kVA, prvenstveno treba tražiti u projektovanju magnetnog kola i namotaja transformatora u skladu sa očekivanim uslovima eksploatacije u elektrani. U projektnom zahtevu je tražena i mogućnost neograničenog rada ispravljača sa 110% nominalnog opterećenja. Na isti način su dimenzionisane i dve prigušnice u energetskom kolu ispravljača. Sledeći činilac koji je uticao na povećanje stepena korisnog dejstva ispravljača je smanjivanje gubitaka energije u tiristorima (moduli sa dva tiristora "Semikron" SKKT 162/12E na hladnjacima termičkog otpora 0,36 K/W). Mali doprinos povećanju energetske efikasnosti ispravljača dala je i intenzivna primena laminarnih bakarnih šina za velike gustine struje, kao i bakarnih provodnika većeg preseka. Postignuti stepen korisnog dejstva postaje još značajniji kada se uzme u obzir i potrošnja veoma složene upravljačke elektronike, sa brojnomo svetlosnom i zvučnom signalizacijom (napajanje sa DC/DC pretvarača nominalne snage 80W), dodatna potrošnja osvetljenja ormara (10W), napajanje senzora temperature u sali baterije posebnim DC/DC pretvaračem iz ispravljača, kao i ugradnja izuzetno velikog broja niskonaponskih komponenata (kontaktori, osigurači, prekidači, rele...) u ormaru ispravljača.

Na slici 4 se uočavaju dve karakteristike stepena korisnog dejstva. Karakteristika stepena korisnog dejstva u režimu punjenja prema potrošačima ima znatno manje vrednosti zbog zahteva korisnika da se prema potrošačima

ugrade diode kojima bi se oborio napon na potrošačima na prihvatljivu vrednost od 220 V + 10%. U režimu punjenja, prilikom rada ispravljača DRI 220-160PTD (br. 206/10) u režimu regulacije nominalne izlazne struje (mereno 159,1 A) izmerena je disipirana snaga na 14 rednih dioda prema potrošačima od oko 1960W (ukupno $\eta = 90,2\%$), što prevazilazi izmerene gubitke u ispravljaču od oko 1800W ($\eta = 95,3\%$ bez uticaja rednih dioda). U katalogu kompanije "AEG" navode se gubici aktivne snage od 2900W u ispravljačima tipa D400G212/160 BWrug-Vp (nominalni parametri 220V, 160A) [10].

Povećanjem stepena korisnog dejstva tiristorskog ispravljača sa 94% na 96% u režimu dopunjavanja (referentni napon 234,1 V), pri radu ispravljača sa prosečnom vrednošću opterećenja od 50% nominalne struje, postiže se smanjenje gubitaka snage u ispravljaču za 420 W. Pri prosečnoj ceni kWh električne energije od 0,05 €, uz dnevne uštede energije od 10 kWh, postigla bi se ušteda od oko 7300 € tokom procenjene dvadesetogodišnje eksploatacije dva uređaja DRI 220-160PTD.

5. Zaključak

Ispravljači serije DRI-PTD sa karticom analogne elektronike „DIGISP 09” predstavljaju dalje unapređenje digitalno regulisanih tiristorskih ispravljača sa programabilnim logičkim kontrolerom. Objedinjavanjem ispravljača i razvoda jednosmerne struje u jedinstveno postrojenje ostvareno je smanjivanje dimenzija i mase uređaja, uz poboljšanje njihovog hlađenja i zaštite ugrađene opreme od upada stranih tela. Primena digitalnih PID regulatora sa linearnim adaptivnim dejstvom i dvostrukog LC filtera na izlazu ispravljača uticala je na poboljšanje dinamike prelaznih procesa regulatora napona i struje, uz znatno smanjivanje talasnosti struje baterije i zagrevanja ćelija baterije.

Primenom novih postupaka projektovanja energetskih komponenata ispravljača, kao i upotrebom savremenih poluprovodnika i niskonaponske opreme, podignut je stepen korisnog dejstva nominalno opterećenog ispravljača DRI 220-160PTD na približno 95,5%.

Nova serija tiristorskih ispravljača sa rednim diodama na izlazu ima mogućnosti kompenzovanja izlaznog napona, aktivnog deljenja struje potrošača u paralelnom radu, kao i rada sa redundantnim regulatorima, što ih čini veoma podesnim u primenama kod kojih se zahteva visoka sigurnost napajanja potrošača na paralelnim sabirnicama. Potpuno automatizovan program kontrole baterije daje mogućnost pouzdanog nadzora baterije, kao i njenog ciklusiranja i optimalnog održavanja tokom godine sa minimalnim angažovanjem rukovalaca.

Literatura

- [1] V. Vukić, R. Prole, D. Džepčeski, „Digitalni regulisani tiristorski ispravljaj zasnovan na programabilnom logičkom kontroleru sa opcijom automatskog preuzimanja opterećenja”, *28. savetovanje JUKO CIGRE*, knjiga II, str. 205-212, Vrnjačka Banja, 30. septembar - 5. oktobar 2007.
- [2] V. Vukić, „Tiristorski ispravljaj upravljaj programabilnim logičkim kontrolerom sa modularnim čoperskim izlaznim stepenom”, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”*, Knjiga 19, str. 85-92, 2008.-2009.
- [3] R.C. Cope, Y. Podrazhansky, "The art of battery charging", *The 14th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, pp. 233-235, 1999.
- [4] "IEEE guide for the selection and sizing of batteries for uninterruptible power systems", IEEE Standard 1184-1994, December 1994.
- [5] M. Mataušek, „Regulacija” (predavanja), Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997.
- [6] "Technical Data Sheet: SDC Rectifier: Battery Charger 24-220 V/25-1200 A", Gutor Electronic LTD, 2003.
- [7] K.J.Åström, B. Wittenmark, "Computer-controlled systems - theory and design", Prentice Hall, 1997.
- [8] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons, Inc, New York, 1995.
- [9] "Galaxy 6000 - Three phase UPS from 250 kVA to 800 kVA" (brochure), MGE UPS Systems, Schneider Electric Co., November 2006.
- [10] "Profitec S: Battery-Charging Rectifier" (brochure), AEG Power Supply Systems, 2002.
- [11] "Rectifiers for stationary battery systems - Standard thyristor-controlled rectifiers THYROTRONIC Line" (brochure), Benning Power Electronics LTD., September 2006.

Abstract: Thyristor rectifiers from the series DRI-PT with analogue control electronics printed circuit board "DIGISP 09" and serial diodes towards the load represent an additional improvement of the existing rectifiers based on the programmable logic controller (PLC). Along with the concomitant direct current distribution board it represents the redundant system for the direct current supply of consumers in a hydro power plant. New implemented functions are the output voltage compensations depending on the battery temperature and the battery cables voltage drop, active sharing of the load current during the parallel

operation of two rectifiers, manual battery presence check, automatic and manual battery state check (periodical automatic discharging of the predefined battery capacity in the adjusted moment) and limited operation time in the equalize charging mode. Maximum battery current ripple was reduced to 5% of the nominal value utilizing the double LC filter in the power circuit. Digital controllers were implemented in the form of adjustable PID regulators with the linear adaptive gain scheduling. Beside the basic digital regulators, control electronics also possess an analogue PI regulator, enabling the reliable rectifier operation in the float charging mode even in the case of PLC fault. In the paper were presented results of the examinations of rectifier's power factor, total harmonic current distortion and the overall efficiency. High values of overall efficiency for nominally loaded thyristor rectifiers of approximately 95.5% were measured.

Key words: thyristor rectifier, PID regulator, programmable logic controller, battery monitoring, overall efficiency, power factor, total current harmonic distortion

A Novel Facility With Thyristor Rectifiers And Direct Current Distribution Board For A Hydro Power Plant Supply

Rad primljen u uredništvo 1.11.2010. godine
Rad prihvaćen 15.11.2010. godine