



R A1 07

ALGORITAM UPRAVLJANJA ELEKTRIČNIM KOČENJEM AGREGATA U „VLASINSKIM HIDROELEKTRANAMA“

**JASNA DRAGOSAVAC*,
ILIJA STEVANOVIĆ, MLADEN OSTOJIĆ, DUŠAN ARNAUTOVIĆ
ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT “NIKOLA TESLA”**

BEOGRAD

SRBIJA

Kratak sadržaj — U radu je dat detaljan algoritam upravljanja električnim kočenjem agregata u „Vlasinskim HE“. Opisana je osnovna konfiguracija sistema za električno kočenje agregata.

Najveća pažnja je posvećena detaljnom opisu algoritma upravljanja rasklopnom opremom, vremenskim intervalima u algoritmu i zaštitnim mehanizmima koji obezbeđuju postizanje sigurnog uklopnog stanja i eliminisanje neregularnih situacija (vremenske kontrole postizanja stanja rasklopne opreme i veličine struje u pojedinim vremenskim intervalima). Takođe, su date osnovne karakteristike hardverske i softverske baze uređaja na kojoj je algoritam realizovan.

Ključne reči – Hidrogenerator - Električno kočenje - Algoritam upravljanja

1 UVOD

Standardna sekvenca zaustavljanja agregata obuhvata proces od zadavanja naloga za zaustavljanje agregata do potpunog zaustavljanja rotora generatora i turbine i detektovanja nulte brzine. Ova sekvenca obuhvata: rasterećenje agregata po aktivnoj i reaktivnoj snazi delovanjem na referentne vrednosti napona i aktivne snage generatora. Kada vrednosti aktivne i reaktivne snage padnu ispod postavljene vrednosti (obično nešto veće od nula da bi se izbeglo dejstvo zaštite od povratne snage) isključuje se generatorski prekidač. Zatim se razbuđivanjem ukida pobudna struja i daje nalog na zaustavljanje turbine. Sistem za turbinsku regulaciju zatvara sprovodno kolo/usmerni aparat/iglu mlaznika i onemogućava dovod vode u turbinu. Brzina generatora/turbine polako opada pod dejstvom sila kočenja turbine koja nastavlja da se okreće u vodi, trenja u ležajevima i ventilacionih gubitaka agregata do potpunog zaustavljanja agregata [1].

U ovom radu dat je pregled osnovnih tipova sistema za kočenje agregata, njihovih prednosti i nedostataka. U nastavku su navedene osnovne karakteristike električnog kočenja i prikazan detaljan

*Jasna Dragosavac, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, jdragos@ieent.org

opis algoritma kočenja sa osvrtom na izabrane vremenske konstante i implementirane zaštitne funkcije kojima se obezbeđuje postizanje sigurnog uklopnog stanja.

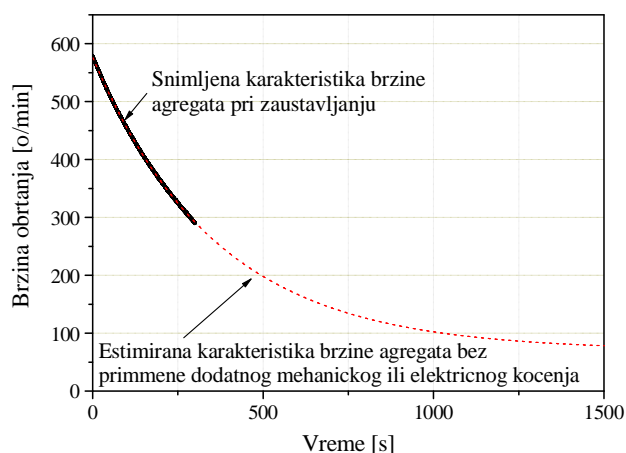
U „Vlasinskim hidroelektranama“ u okviru projekta zamene sistema za regulaciju pobude realizovan je i sistem za električno kočenje. Električno kočenje je realizovano bez uključenja dodatnog otpornika u električno kolo statora generatora što je rezultat kompromisa između cene celokupnog projekta i postignute efikasnosti električnog kočenja.

2 PRIRODNO ZAUSTAVLJANJE AGREGATA

Na slici 1 je prikazano neforsirano (prirodno) zaustavljanje agregata snimljeno na stvarnom hidrogeneratoru. Slika prikazuje promenu brzine obrtanja agregata u toku zaustavljanja. Pošto je posmatrani agregat opremljen sistemom za kočenje koje se aktivira kada brzina padne ispod 50% nominalne brzine obrtanja, što je u konkretnom slučaju iznosilo 300 obrtaja u minuti, promena brzine na nižim obrtajima je estimirana (crveni trag na slici 1).

Brzina agregata opada po eksponencijalnoj funkciji prvog reda. Ova kriva se ne može koristiti za ceo period kočenja jer se pri malim brzinama uslovi menjaju. U svakom slučaju period zaustavljanja agregata zavisi od mnogo činioca i može biti duži od pola sata. U toku procedure zaustavljanja agregata nije moguće ponovo pokrenuti posmatrani agregat i isti mora biti pod stalnim nadzorom posade elektrane. Proces zaustavljanja agregata je završen kada se detektuje da je brzina obrtanja jednaka nuli. Ovako dugačak period u kome agregat mora da bude pod nadzorom posade elektrane i nije raspoloživ za ponovni start može da predstavlja problem, posebno u slučaju pumpno-akumulacionih i vršnih elektrana koje startuju nekoliko puta u toku dana.

Zbog toga su generatori najčešće opremljeni mehaničkim sistemom kočnica koje se aktiviraju pri manjim brzinama i koče agregat do mirovanja. Razvijeni su, takođe, i sistemi električnog kočenja zasnovani na nadogradnji i proširenju sistema za regulaciju pobude [2].



Slika 1. Neforsirano (prirodno) zaustavljanje hidrogeneratora – promena brzine obrtanja agregata u toku zaustavljanja (do približno 300 o/min) i estimacija funkcije brzine pri manjim brzinama

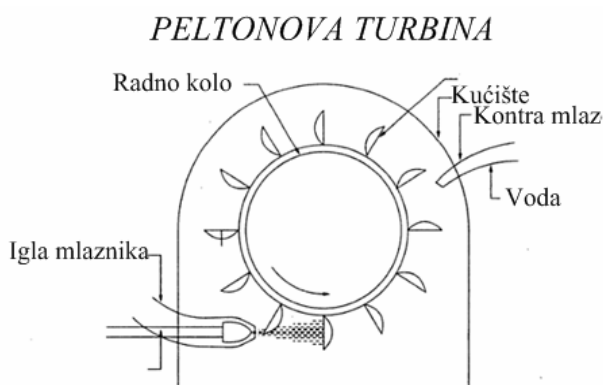
3 MEHANIČKO KOČENJE

Mehaničko kočenje zasnovano je na principu mehaničkog trenja ferodnih kočnica i kočionih prstenova koji se nalaze na rotoru generatora. Kočioni mehanizam i ferode smešteni su na kućištu statora i vratilu rotora. Mehaničko kočenje aktivira se pri nižim brzinama (30% i niže) jer se pri većim brzinama obrtanja agregata javlja preveliko mehaničko naprezanje i zagrevanje kočionog sistema (zbog pretvaranja mehaničke energije agregata u toplotnu). U opsegu brzina od 30% do 10% sinhronne brzine kočenje se obavlja intermitentno, a posle toga su kočnice uključene trajno. Sa druge strane, male brzine obrtanja agregata (nekoliko procenata nominalne brzine) su i najopasnije sa aspekta nastanka oštećenja na opremi pa je veoma bitno brzo proći kroz te režime i u potpunosti zaustaviti agregat. Oštećenja pri malim brzinama obrtanja nastaju na ležajevima agregata zbog slabog samopodmazivanja. Na mnogim agregatima su instalirane visokopritisne uljne pumpe koje obezbeđuju dodatno forsirano podmazivanje ležajeva pri niskim brzinama. Nedostaci ove vrste kočenja su što, kao kod svih

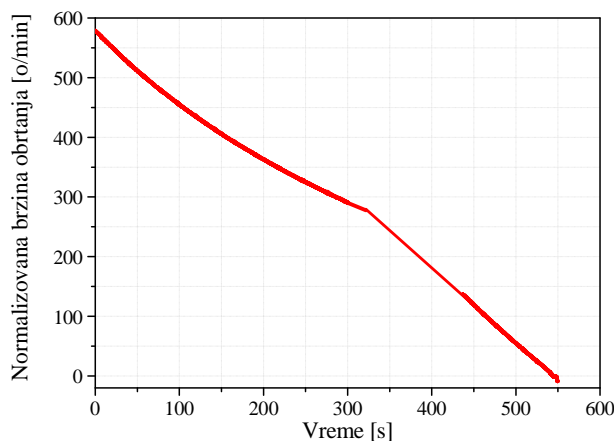
frikcioni kočnica, dolazi do trošenja kočnica i nastaje fina prašina koja prlja kućište generatora, a istrošene ferođe se moraju menjati.

Drugi tip mehaničkog kočenja je kočenje kontra mlazom i primenjuje se kod Peltonove turbine. Kada se igla mlaznika potpuno zatvori zbog inercije rotacionih masa, agregat nastavlja da se vrti. Da bi se skratilo vreme zaustavljanja, turbina je opremljena malom pomoćnom iglom koja usmerava vodu u turbinu sa zadnje strane lopatice, kao što je prikazano na slici 2. Nedostatak ove vrste kočenja je veliko mehaničko naprezanje rotora turbine koje se javlja pri dejstvu kontra mlaza i veliki pritisak vode u instalaciji kontramlaznice zbog čega može da dođe do njenog pucanja.

Kočenje kontra mlazom je realizovano u HE "Vrla 1". Snimak promene brzine u toku kočenja kontra mlazom prikazan je na slici 3. Prvi deo do 300s predstavlja početnu promenu brzine pri neforsiranom (prirodnom) zaustavljanju agregata od 100% do 50% sinhronne brzine. Kočenje kontra mlazom je primenjeno pri manjim brzinama od 50% sinhronne brzine. Ono traje oko 225s. Nagib odziva brzine se povećao i očigledno je da se zahvaljujući tome smanjila dužina trajanja zaustavljanja agregata pri malim brzinama.



Slika 2. Kočenje kontra mlazom



Slika 3. Promena brzine obrtanja agregata u toku zaustavljanja agregata sa mehaničkim kočenjem od 300 o/min do nulte brzine

4 ELEKTRIČNO KOČENJE

Električno kočenje se realizuje u toku zaustavljanja agregata, pobuđivanjem generatora pri kratkospojenom statorskom namotaju. Struje koje se javljaju u statoru i rotoru imaju za posledicu pojavu elektromagnetnog kočionog momenta koji dodatno usporava generator. Elektromagnetni momenat zavisi od brzine obrtanja. Maksimum kočionog momenta se javlja pri niskim brzinama što je od suštinskog značaja jer se tada, zbog lošeg samopodmazivanja, mogu javiti oštećenja. Ukoliko se želi dodatno smanjiti vreme kočenja, u kolo statora se može dodati otpornost koja pomera maksimum karakteristike kočionog momenta u zonu većih brzina agregata [3], [4] i [5].

Osnovne prednost primene električnog kočenja su: smanjenje ukupnog vremena trajanja kočenja; životni vek ležajeva se produžava jer je električno kočenje najefikasnije u periodu kada ležajevi, zbog

4.1 Praktična realizacija električnog kočenja

Zbog potreba kočenja, ugrađen je transformator kočenja koji obezbeđuje napajanje sistema pobude pri električnom kočenju sa sabirnica sopstvene potrošnje. Transformator kočenja je dimenzionisan tako da se pobudni sistem može napajati sa nezavisnih sabirnica nominalnom strujom pobude bez forsiranja. Na taj način je ostvarena potpuna redundansa u napajanju sistema pobude, samopobuda ili nezavisna pobuda. Cena dobijenog nezavisnog napajanja je razlika u ceni transformatora kočenja dimenzionisanog prema nominalnoj struji pobude i struji pobude pri električnom kočenju.

[illegible]

Slika 4. Jednopolna šema sistema pobude sa električnim kočenjem u „Vlasinskim HE”

4.2 Algoritam upravljanja električnim kočenjem

- agregat se rastereti i isključi sa mreže isključenjem generatorskog prekidača,

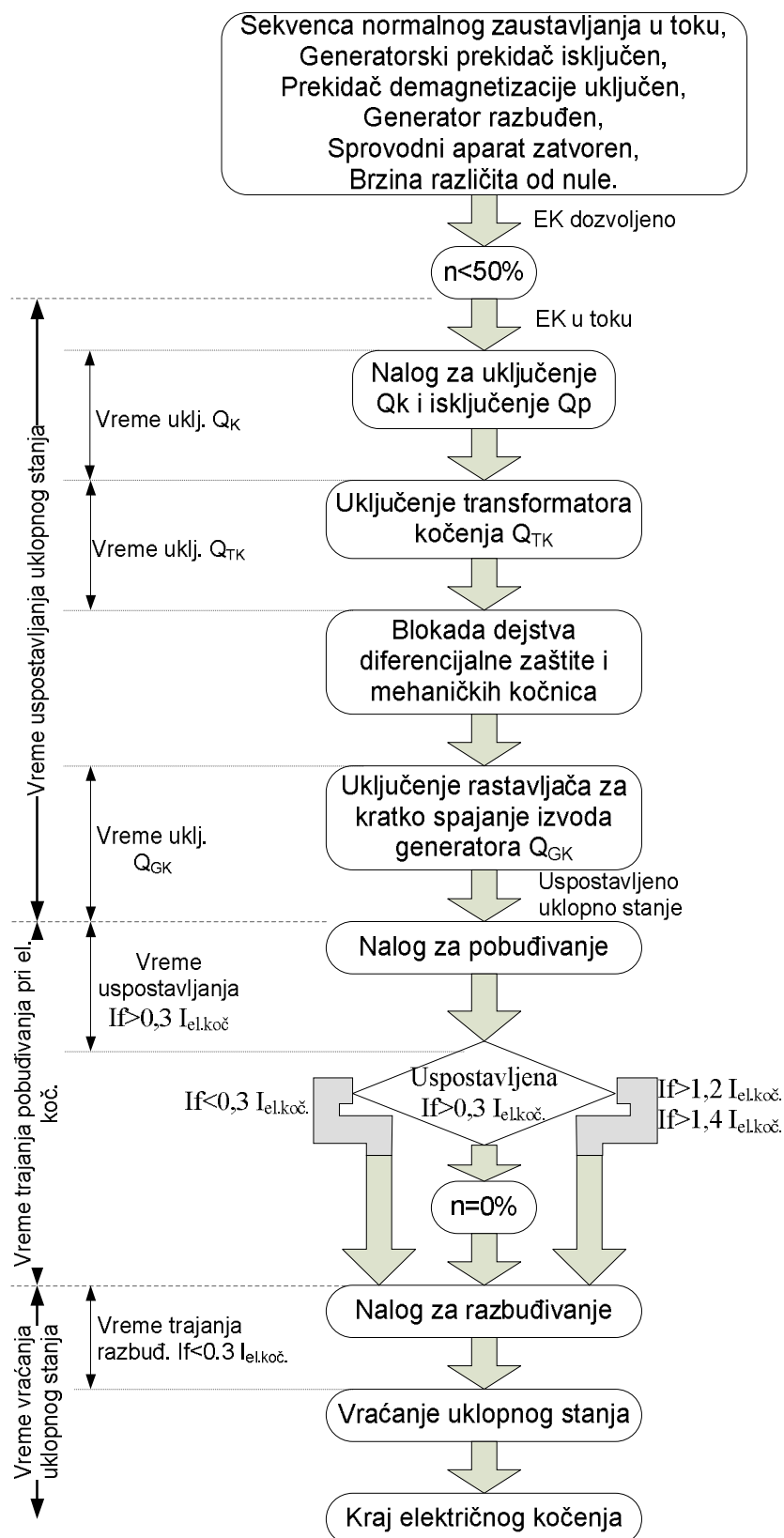
- prekine se dovod vode na turbinu,
- generator se razbudi invertovanjem tiristorskog pretvarača, pri čemu prekidač za demagnetizaciju Q_d u sistemu pobude ostaje uključen (ovaj prekidač se isključuje samo kod delovanja generatorskih zaštita koje ne dozvoljavaju električno kočenje),
- na osnovu informacije da je prekinut dovod vode na turbinu, da je brzina manja od 50%, da je generatorski prekidač isključen i prekidač demagnetizacije uključen, pokreće se postupak električnog kočenja,
- postavlja se bit da je "električno kočenje u toku" i startuje se mehanizam vremenske kontrole kočenja (tabela I),
- transformator pobude se isključuje isključenjem prekidača Q_p ,
- uključuje se prekidač Q_k ,
- transformator kočenja je već bio uključen preko prekidača Q_{TK} ,
- blokira se dejstvo diferencijalne zaštite, zaštite od nesimetrije struja statora i dejstvo mehaničkih kočnica,
- uključuje se rastavljač za kratko spajanje namotaja statora Q_{GK} čime je završeno uspostavljanje uklopnog stanja potrebnog za kočenje,
- pobuđuje se generator pobudnom strujom $I_{el.koč}$ čija se vrednost nalazi u opsegu od jedne trećine do jedne polovine nominalne pobudne struje (struja pobude približno je jednaka struji kratkog spoja generatora),
- aktiviraju se zaštitni mehanizmi za nadzor veličine struje statora u toku kočenja (tabela I),
- za vreme kočenja pobudna struja se održava konstantnom pa je i struja u statorskom namotaju konstantna,
- kada se detektuje da je brzina obrtanja agregata jednaka nuli, generator se razbuđuje invertovanjem tiristorskih mostova.

Rasklopna oprema se vraća u stanje spremnosti za novo pokretanje obrnutim redosledom u odnosu na redosled kojim je uključivana. Time se postupak električnog kočenja završava i agregat je spreman za ponovno pokretanje.

Za vreme električnog kočenja ispravnost rada se kontroliše električnim zaštitama i vremenskom kontrolom odvijanja procesa kočenja. U slučaju neispravnosti isključuje se električno kočenje, a uključuju se ferodne kočnice ili kontra mlaz.

Implementiranjem vremenske kontrole celokupnog procesa kočenja i svih koraka kočenja obezbeđuje se sigurno i pouzdano upravljanje rasklopnom opremom (sl. 5). Vremenskom kontrolom trajanja komandi ka svakom elementu obezbeđuje se potrebna dužina komandnog impulsa prema specifikaciji proizvođača i redosled upravljanja opremom koji garantuje sigurno uključivanje/isključivanje. Dužina komandnog impulsa za upravljanje rasklopnom opremom određena je minimalnom dužinom potrebnom da dođe do promene uklopnog stanja i maksimalnom dužinom pri kojoj komandni kalem neće biti oštećen. Minimalna dužina trajanja komandnog impulsa zavisi od fizičke realizacije rastavljača.

Da bi se sprečila pogrešna manipulacija opremom, npr. da Q_p i Q_k budu istovremeno uključeni, što dovodi do odrade zaštita generatora i nepotrebnog naprezanja opreme, zaštita od pogrešnog uklapanja je urađena međusobnom fizičkom (mehaničkom) blokadom ova dva prekidača. PLC šalje jedan signal ka oba elementa. Međutim, signal se prosleđuje preko pomoćnog mirnog kontakta drugog prekidača. Na taj način je uvek prvo aktivna putanja prekidača koji je već uključen i prvo se vrši njegovo isključivanje. Kada posmatrani prekidač promeni stanje, njegov pomoćni mirni kontakt uspostavlja putanju za uključivanje drugog prekidača. Sam algoritam takođe omogućava izdavanje sledeće komande tek po prijemu informacije da je prethodni korak izvršen. U svakom koraku se proverava da li i dalje postoji potrebno uklopno stanje. Ukoliko se prethodni korak ne izvrši u predviđenom periodu ili ukoliko dođe do signalizacije pogrešnog stanja opreme za kočenje ili početnih uslova, sistem generiše grešku. Električno kočenje se završava, vraća se, ukoliko je moguće, početno uklopno stanje i aktivira mehaničko kočenje. U isto vreme se signalizira greška u električnom kočenju.



Slika 5. Uprošćeni blok dijagram algoritma električnog kočenja hidrogeneratora u „Vlasinskim HE“

Vremenska kontrola je podeljena u tri celine: vreme uspostavljanja potrebnog uklopnog stanja, trajanje pobuđivanja i vreme vraćanja početnog uklopnog stanja tako da agregat bude spreman za ponovni start. Kontrola kočenja po fazama omogućava lako detektovanje neodazivanja nekog dela opreme zbog postojanja greške ili kvara na pojedinim delovima opreme i ograničava dužinu trajanja

pobuđivanja u toku koga dolazi do zagrevanja opreme. Vremenska kontrola upravljanja pojedinim delovima opreme sprečava oštećenja na rasklopnoj opremi i štiti od pogrešnih manipulacija.

Kontrola procesa pobuđivanja generatora realizovana je nadgledanjem veličine pobudne struje sa nezavisnom zaštitnom opremom i redundantno unutar PLC-a, čime se povećava pouzdanost sistema i otklanja mogućnost oštećenja na opremi zbog prevelike pobudne struje. Vremenski se kontroliše uspostavljanje pobudne struje veće od $0,3I_{el.koč.nom.}$ kada se smatra da je kočenje aktivno. Ukoliko pobudna struja ne poraste dovoljno brzo u toku pobuđivanja pri kočenju i/ili ako njena vrednost padne ispod ove granice u toku kočenja, smatra se da je došlo do greške u električnom kočenju i ono se obustavlja. Ukoliko struja poraste preko $1,2I_{el.koč.nom.}$ i $1,4I_{el.koč.nom.}$ može doći do značajnog zagrevanja generatora i električno kočenje se, takođe, prekida. Veličina pobudne struje $0,3I_{el.koč.nom.} < I_{el.koč} < 1,2I_{el.koč.nom.}$ detektuje se programski u PLC-u, a $0,3I_{el.koč.nom.} < I_{el.koč} < 1,4I_{el.koč.nom.}$ hardverski u nezavisnom zaštitnom uređaju. Na ovaj način je obezbeđena potpuna redundansa u zaštitnim funkcijama električnog kočenja.

TABELA I PREGLED VREMENSKIH KONSTANTI IMPLEMENTIRANIH U MEHANIZMU VREMENSKE KONTROLE ELEKTRIČNOG KOČENJA I PRIMENJENE ZAŠTITNE FUNKCIJE

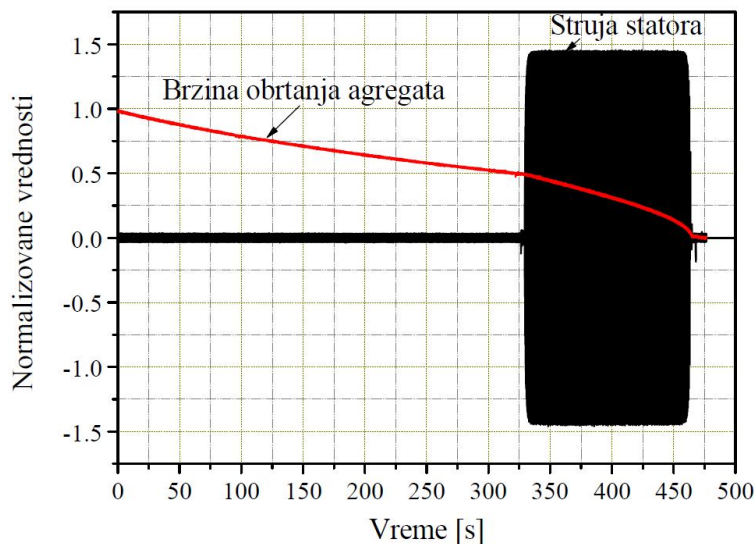
	Naziv	Tip signala	Funkcija	Vremen.z adrška
1	Vreme uspostavljanja pobudne struje	Vremen. zadržka	Dozvoljeno vreme potrebno da struja pobude postane veća od $0,3I_{FEK}$	10s
2	Trajanje signala EK završeno	Vremen. zadržka	Vremensko ograničenje trajanja signala EK završeno	2s
3	Vreme kočenja predugo	Signal.	Signalizacija -aktivira se pri odradi bilo koje vremenske zaštite u sistemu električnog kočenja	
4	Vreme uspostavljanja uklopnog stanja predugo	Vremen. zadržka	Maksimalno vreme potrebno da se uspostavi uklopno stanje	10s
5	Vreme pobuđivanja pri EK predugo	Vremen. zadržka	Dozvoljeno vreme trajanja pobuđivanja u toku električnog kočenja	120s
6	Vreme vraćanja početnog uklopnog stanja predugo	Vremen. zadržka	Maksimalno vreme potrebno da se uspostavi početno uklopno stanje	10s
7	Vreme trajanja razbuđivanja	Vremen. zadržka	Vremenski period u toku razbuđivanja u kome je potrebno da struja pobude padne ispod $0,3I_{FEK}$	2s
8	Vremenska zadržka za isključenje nakon pada brzine ispod 1%	Vremen. zadržka	Dozvoljeno trajanje kočenja nakon detekcije signala pada brzine ispod 1%	3s
9	Trajanje naloga za isključenje Qgk - provera isključenja	Vremen. zadržka	Maksimalno vreme potrebno da se isključi Qgk	5s
10	If manje od $0,3I_{FEK}$	Zaštita	Struja pobude manja od 0.3 nominalne struje kočenja	
11	If veće od $0,3I_{FEK}$	Zaštita	Struja pobude veća od 0.3 nominalne struje kočenja	
12	If veće od $1,2I_{FEK_comm}$	Zaštita	Struja pobude veća od 1.2 nominalne struje kočenja	
13	Greška uklopnog stanja	Zaštita	Greška uklopnog stanja	
14	If veće od $1,4I_{FEK_comm}$	Zaštita	Struja pobude veća od 1.4 nominalne struje kočenja	

4.3 Rezultati praktične realizacije

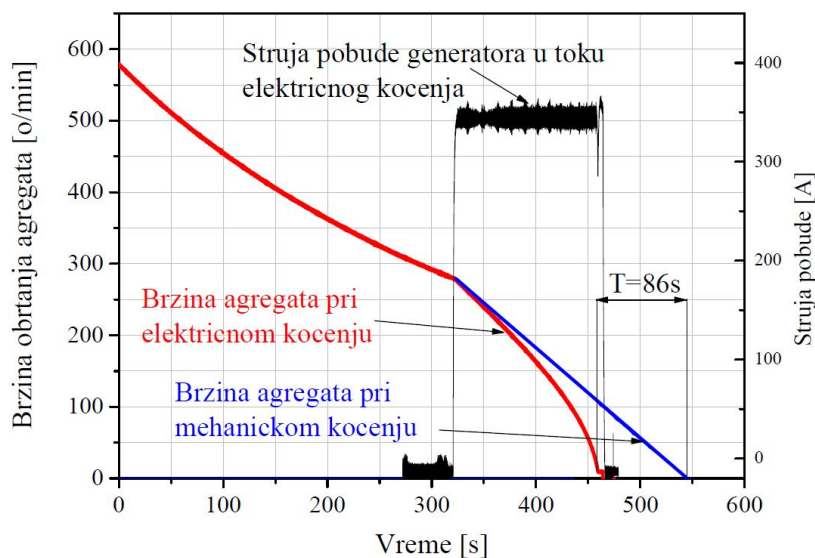
Na slici 6 je prikazana promena brzine agregata i uspostavljena pobudna struja u toku električnog kočenja. Električno kočenje je aktivirano na 50% brzine i ukupna dužina trajanja pobuđivanja do zaustavljanja je 140s.

Na slici 7 su poređena trajanja zaustavljanja agregata pri kočenju kontra mlazom i električnom kočenju od 50% sinhronne brzine. Trajanje mehaničkog kočenja je 86s duže nego električnog. Ovo ukazuje na činjenicu da električno kočenje bitno smanjuje dužinu trajanja kočenja pri malim brzinama agregata.

Nagib promene brzine kod električnog kočenja pri najmanjim brzinama (kada je naprezanje opreme agregata najveće i najveća verovatnoća nastanka oštećenja) je veći nego kod mehaničkog kočenja čime se smanjuje rizik od nastanka oštećenja. Sve ovo pokazuje na prednosti električnog kočenja i opravdava uložena sredstva potrebna za njegovu realizaciju.



Slika 6. Brzina agregata i struja statora u toku električnog kočenja



Slika 7. Brzina i pobudna struja u toku električnog kočenja i brzina u toku kočenja kontra mlazom

5 ZAKLJUČAK

U toku zamene sistema pobude u „Vlasinskim HE“ realizovan je sistem električnog kočenja. Zbog potreba kočenja ugrađen je transformator kočenja koji obezbeđuje napajanje sistema pobude sa sabirnicama sopstvene potrošnje. Transformator kočenja je dimenzionisan za nominalnu pobudnu struju generatora tako da se pobudni sistem može napajati sa nezavisnih sabirnica. Na taj način je ostvarena potpuna redundansa u napajanju sistema pobude.

Oprema električnog kočenja se sastoji od pouzdanih komponenti čije održavanje je jednostavno. Kompletna automatizacija i visoka efikasnost opreme električnog kočenja garantuje produženje životnog veka generatora i pomoćne opreme, skraćuje zastoje zbog kvara na opremi (tipično na ležajevima generatora) i time povećava raspoloživost hidroelektrane.

Implementiranjem vremenske kontrole celokupnog procesa kočenja i svih koraka kočenja obezbeđuje se sigurno i pouzdano upravljanje rasklopnom opremom, sprečava uspostavljanje pogrešnog uklopnog stanja i lako detektuje neodazivanje nekog dela opreme. Kontrola procesa pobuđivanja generatora, realizacijom nadgledanja veličine pobudne struje sa nezavisnom zaštitnom opremom i redundantno unutar PLC-a, povećava pouzdanost sistema i otklanja mogućnost oštećenja na opremi zbog prevelike pobudne struje.

Poređenjem odziva električnog kočenja i postojećeg kočenja kontra mlazom vidljivo je značajno skraćenje vremena kočenja pri malim brzinama (ispod 30% nominalne) kada je naprezanje opreme agregata najveće i najveća verovatnoća nastanka oštećenja.

7 ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta TR 33020, „Povećanje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem tehnologije i uređaja energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju”, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] I. Stevanović, Z. Ćirić, Đ. Stojić: Određivanje osnovnih pokazatelja kvaliteta elektrodinamičkog kočenja hidrogeneratora, 26. savetovanje YUCO CIGRE, Banja Vrućica - Teslić, 2003.
- [2] Z. Ćirić, M. Janković, I. Stevanović: Električno kočenje za generatore G1 i G2 u HE “Piroć”, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, Beograd, 2004.
- [3] Z. Čulig: Električko zaustavljanje hidrogeneratora, 10. savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, CIGRE, Dubrovnik, 1970, R11-12.
- [4] I. Šantek, D. Bačić: Primena električnog kočenja kod zaustavljanja sinhronih strojeva, 15. savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, CIGRE, Beograd, 1981, R11-11.
- [5] M. Ilić, G. Vrtikapa, N. Ilić Jančićević: Električno kočenje agregata u HE “Perućica”, 22. savetovanja YUCO CIGRE, Vrnjačka Banja, 1995, R11-05.

CONTROL ALGORITHM OF HYDROGENERATOR ELECTRICAL BREAKING SYSTEM IMPLEMENTED IN „VLASINA’S HPPs”

**JASNA DRAGOSAVAC,
ILIJA STEVANOVIC, MLADEN OSTOJIC, DUSAN ARNAUTOVIC
ELECTRICAL ENGINEERING INSTITUTE “NIKOLA TESLA”**

BELGRADE

SERBIA

Abstract — The paper presents the details of control algorithm of electrical breaking system of hydro generator in „Vlasina’s HPPs. The electrical breaking system design specification is also given. The paper focuses on detailed description of electrical breaking control of breaking equipment, major time intervals defined in algorithm and protective functions developed to ensure that proper electrical scheme is connected and preventions of the irregularities. The details of hardware and software practical realisation are presented, too.

Key words – Hydrogenerator- Electrical Breaking - Control Algorithm