

Modelovanje kombinovanog postrojenja sa gasno-parnim ciklusom za potrebe optimizacije

Miloš Anđelković, Petar Pavlović, Rastko Kostić, Ana Anđelković
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
milos.andjelkovic@ieent.org

Goran Lepović
Siemens PTI,
Beograd, Srbija

Sadržaj – U radu je prikazan model prenosno-industrijske mreže za separaciju nafte i gasa za koju je izvršena optimizacija u cilju minimizacije troškova goriva. U trenutnom stanju mreža se napaja samo pomoću gasnih turbina, a u radu je prikazano da se optimizacijom dispečinga aktivne snage postojećih turbina može ostvariti ušteda goriva, što za posledicu ima smanjene troškove proizvodnje. Kako se u bliskoj budućnosti planira priključenje parne turbine, koja će se napajati iz postojećih gasnih turbina, izvršena je i optimizacija mreže u radu sa kombinovano gasno-parnim turbinama (CCGT). Način modelovanja CCGT za potrebe optimizacije, kao i rezultati optimizacije su prikazani u daljem toku rada. Spomenute analize su vršene u programskom paketu PSS®E.

Ključne reči – prenosna mreža; optimizacija, kombinovano postrojenje sa gasno-parnim ciklusom (CCGT);

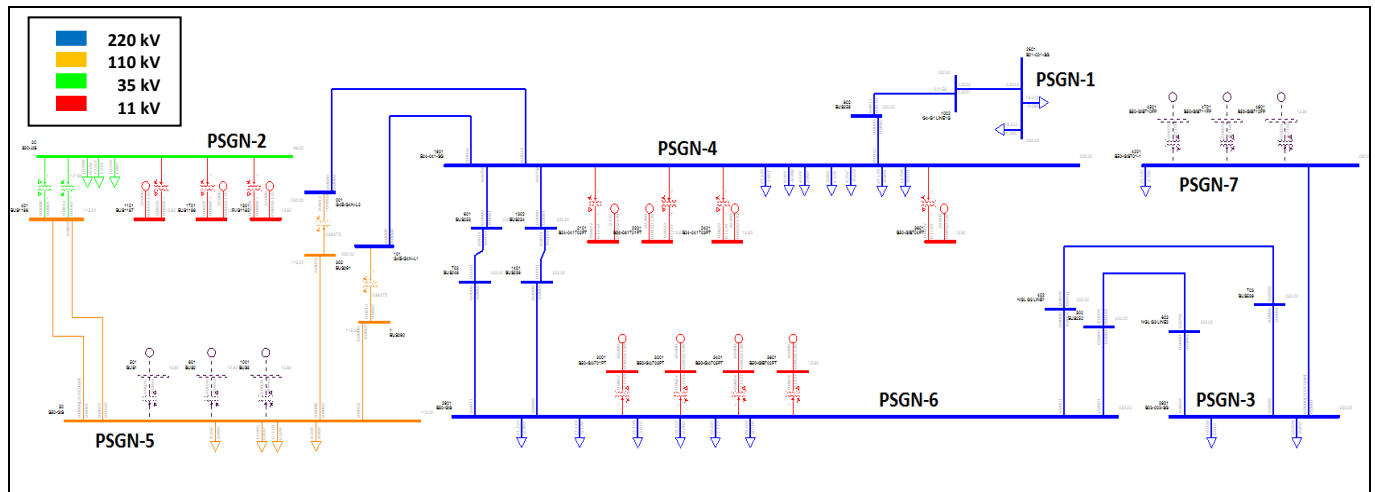
I. UVOD

Postojeći komercijalni programi u stanju su da reše većinu zadatah optimizacionih problema. Prilikom optimizacije potrebno je uvažiti i mnogobrojna operativna ograničenja elektroenergetskog sistema. Zadavanje osnovnih ograničenja moguće je u svim softverima ovog tipa, dok se u onim naprednijim mogu zadavati i komplikovanija ograničenja kao što su pogonske karte generatora, raspoložive tople rezerve generatora i njihova brzina reagovanja itd. Međutim, direktno zadavanje složenih ograničenja rada kombinovano gasno-parnog postrojenja ne poseduje ni jedan komercijalno dostupan optimizacioni softver. Da bi se ispoštovala sva ograničenja prilikom rada jednog takvog komplikovanog elektroenergetskog CCGT postrojenja potrebno ga je detaljno modelovati. Nije dovoljno modelovati samo generatore u sistemu, već i gasne i parne turbine koje pokreću generatore, vratila, parovode itd. Za izradu ovako detaljnog modela potrebno je dobro poznavanje funkcionisanja ovih sistema, raspoloživost ulaznih podataka i određeno vreme. Model se može generisati direktno u korišćenom softveru ili u nekom drugom programu (npr. Matlab-Simulink) kao u [1] pa ga je moguće povezati sa korišćenim softverskim alatom za rešavanje problema optimizacije. Razvijanje sopstvenog optimizacionog softvera, koji će pored osnovnih operativnih

ograničenja sadržati i ograničenja rada CCGT postrojenja, je još jedan od načina za rešavanje optimizacionih problema u mrežama sa kombinovanim postrojenjima. Ovakvi optimizacioni problemi mogu se rešiti korišćenjem dinamičkog programiranja [2] ili fuzzy logike [3]. U oba slučaja potrebno je dobro poznavanje električnih kao i termičkih ograničenja rada postrojenja kako bi se izvršilo njihovo pravilno povezivanje i modelovanje. Ovakve metode su precizne, ali ujedno zahtevaju raspoloživost ulaznih podataka i dosta vremena za izradu. U ovom radu je prikazan jedan uprošćeni način za modelovanje rada CCGT postrojenja za potrebe optimizacije radi smanjenja potrošnje goriva u mreži. Korišćen je komercijalno raspoloživ softver PSS®E i samo pomoću njegovih funkcionalnosti izvršeno je modelovanje rada CCGT postrojenja, na nivou generatorskih jedinica, a zatim i optimizacija u sistemu. Mana ovog rešenja je što se može koristiti samo za analize tokova snaga, kratkih spojeva i optimizacije, dok se za druge analize, npr. dinamičke, mora izvršiti preciznije modelovanje. Takođe za konkretan problem bilo je moguće sa visokim nivoom tačnosti izvršiti linearizaciju krive zavisnosti rada parne turbine od snage gasnih turbina, pa na taj način sa dovoljnom preciznošću modelovati CCGT postrojenje.

II. OPIS MREŽE I OPERATIVNA OGRANIČENJA

Model analizirane prenosne mreže u programskom alatu PSS®E prikazan je na Sl. 1. Mreža se sastoji od sedam postrojenja za separaciju gasa i nafte (PSGN) međusobno povezanih prenosnim vodovima i transformatorima. Prvo i treće postrojenje (PSGN-1 i PSGN-3) su čisto potrošačkog karaktera dok ostalih pet postrojenja, pored potrošnje, sadrže i generatorske jedinice koje se napajaju pomoću gasnih turbina. U mreži su instalirane dva tipa gasnih turbina. Prvi tip gasnih turbina instaliran je u postrojenjima PSGN-2 i PSGN-5 dok se drugi tip turbina nalazi u postrojenjima PSGN-4, PSGN-6 i PSGN-7. Zavisnost potrošnje toplotne energije od aktivne snage turbine, za ova dva tipa, dobijen je od proizvođača i prikazan na Sl. 2. Maksimalna snaga, za oba tipa turbine, iznosi 100 MW a za cenu goriva je usvojena vrednost od 0.9 \$/MBtu. Postrojenje PSGN-2 sadrži tri funkcionalna bloka: gasna turbina-generator-transformator (u daljem tekstu: GT-G-TR). U



Slika 1. Model prenosne mreže

ovom postrojenju sve tri jedinice moraju uvek biti u funkciji sa minimalno 60 MW aktivnog generisanja ponaosob (zbog procesa proizvodnje). Postrojenje PSGN-4 u trenutnom stanju sadrži četiri bloka GT-G-TR. U ovom postrojenju će naknadno biti priključen još jedan blok koji će sadržati parnu turbinu, generator i transformator (u daljem tekstu: PT-G-TR). Parna turbina će se preko parovoda napajati pomoću gasnih turbina lociranih u ovom postrojenju. U postrojenju PSGN-5 su instalirana tri bloka GT-G-TR. Postrojenje PSGN-6 je opremljeno sa četiri blokova GT-G-TR. Zbog prirode procesa separacije nafte i gase, u ovom postrojenju tri jedinice moraju uvek biti u funkciji sa minimalno 80 MW aktivnog generisanja ponaosob. Gasne turbine u postrojenju PSGN-7 su van funkcije i ne ulaze u proces optimizacije mreže, tako da se ovo postrojenje svodi na čisto potrošačko.

Osim gore već spomenutih ograničenja, radi nesmetanog rada prenosnog sistema potrebno je ispuniti još neke zahteve. Napon u svim čvorovima mreže u normalnom režimu, kao i u slučaju ispada jednog elementa, mora biti između 97 i 103%. Takođe, opterećenje svih generatora, transformatora i vodova ne sme biti iznad 100%. Generatori moraju raditi unutar granica svojih pogonskih karti (P-Q pogonske krive). Sistem mora ostati stabilan i nastaviti nesmetano snabdevanje svih svojih potrošača električnom energijom prilikom ispada jednog elementa mreže („N-1“ princip sigurnosti). Budući da je mreža

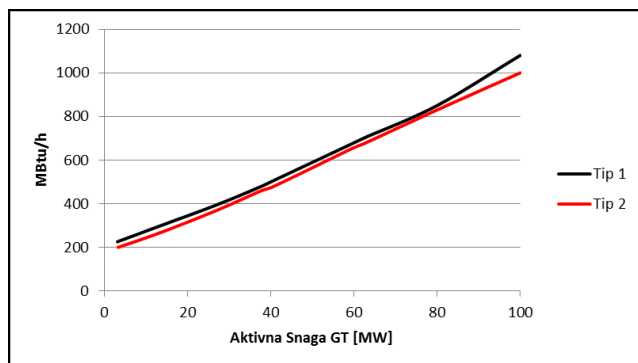
u najvećoj meri dobro upetljena i postoji i više nego dovoljan broj proizvodnih jedinica ovaj zahtev ne predstavlja veliki problem osim u slučaju postrojenja PSGN-1 koje je sa ostatkom sistema povezano samo jednom granom. Gasne turbine (oba tipa) poseduju sposobnost brze promene aktivne snage u iznosu od 20 MW (brza rezerva) koja je potpuno raspoloživa u roku od nekoliko sekundi. Brza rezerva može iznositi maksimalno 20 MW u slučaju kada je razlika maksimalne i angažovane snage generatora veća od 20 MW. Ako je ova razlika manja od 20 MW, maksimalna vrednost brze rezerve biće jednaka razlici maksimalne i trenutne snage turbine. Prilikom optimizacije moralo se voditi računa i da sistem poseduje dovoljno obrtne rezerve kako bi se u potpunosti nadomestio ispad neke od gasnih turbina, parne turbine ili nekog drugog elementa. Zbog dinamičke stabilnosti gasnih turbina postavljeno je još jedno ograničenje, i to da gasne turbine ne smeju raditi u opsegu između 40 i 60 MW (zabranjena zona).

Sva ova ograničenja moraju biti ispoštovana prilikom procesa optimizacije radi minimizacije potrošnje goriva.

III. OPTIMIZACIJA – MINIMIZACIJA TROŠKOVA GORIVA

Postojeći komercijalni optimizacioni (Optimal Power Flow - OPF) programi su u stanju da reše velike i složene probleme optimizacije energetskih sistema u relativno kratkom vremenskom intervalu. Jedan od takvih programa je i PSS[®]E korišćen u ovom radu. U procesu optimizacije (OPF) potrebno je pronaći vrednosti pojedinih ili svih kontrolnih varijabli tako da se optimizuje (minimizira ili maksimizira) unapred definisana ciljna funkcija [4]. Najčešći cilj optimizacije je minimizacija ukupnih troškova (goriva) kao u ovom slučaju, ali treba napomenuti da cilj optimizacije može biti i smanjenje aktivnih ili reaktivnih gubitka u mreži, minimizacija transfera energije u druge sisteme, minimizacija odstupanja od reda vožnje agregata, itd.

Minimizacija potrošnje goriva je prvenstveno problem operativnog planiranja. Takođe je korisna i prilikom planiranja EES-a. Cilj problema je pronaći aktivno generisanje (dispečing) raspoloživih jedinica, tako da se ukupna cena goriva svede na minimum, zadovoljavajući operativna



Slika 2. Zavisnost potrošnje toplotne energije od aktivne snage gasne turbine (krive troškova goriva)

ograničenja [5][6]. Minimizacija troškova goriva zahteva poznavanje kriva troškova goriva za svaku od proizvodnih jedinica. Tačan prikaz krive troškova goriva može se aproksimirati na nekoliko uobičajnih načina: linearnom krivom, izlomljenom linearno krivom (kao na Sl. 2), kvadratnom krivom, izlomljenom kvadratnom krivom, polinomijalnom krivom itd. Linearna aproksimacija se obično ne koristi, dok se izlomljeno linearna aproksimacija koristi u mnogim algoritmima na bazi linearnog programiranja. Kontrolne promenljive su najčešće nezavisne promenljive kao: aktivno generisanje, naponi generatorskih sabirnica, položaj regulatora na transformatorima, vrednost promenljivih kondenzatora i prigušnica. Pronalaženje optimalnih vrednosti ovih kontrolnih promenljivih treba da generiše najbolje (najjeftinije) rešenje. Uobičajna ograničenja u OPF-u su: zadovoljenost jednačina tokova snaga u svim čvorovima mreže, ograničenja svih nezavisnih i zavisnih promenljivih, termička ograničenja vodova i transformatora, itd. Konkretna ograničenja za posmatrani problem su navedena u prvom poglavlju i sva su integrisana u PSS®E model prilikom procesa minimizacije troškova goriva.

Matematička predstava funkcije minimizacije troškova goriva se predstavi sledećim modelom:

$$F(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} (\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2) \quad (1)$$

Gde su:

$F(P_g)$ - ukupna cena goriva, kao funkcija P_g ,

P_{gi} - aktivno generisanje i -te jedinice,

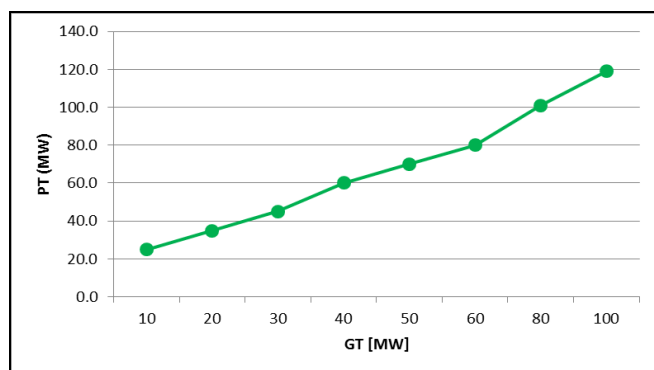
$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ - parametri troškova goriva i -te jedinice,

N_g - broj raspoloživih jedinica za optimizaciju.

Kao što je već napomenuto potrebno je minimizirati datu funkciju (izjednačiti prvi izvod sa nulom) i ujedno ostati unutar granica svih zadatih ograničenja.

IV. KOMBINOVANE GASNO-PARNE TURBINE I NAČIN MODELOVANJA ZA PRORAČUNE OPTIMIZACIJE

Elektrane sa kombinovanim gasno-parnim turbinama (Combined Cycle Gas Turbine - CCGT) koriste gasne i parne turbine kako bi sa istom količinom goriva proizvele i do 50 %



Slika 3. Zavisnost aktivne snage parne turbine (PT) od snaga gasnih turbina (GT)

više energije u odnosu na elektrane sa gasnim ciklusom. Otpadna toplota iz gasne turbine se obično usmerava do obližnje parne turbine, koja generiše dodatnu snagu. Unutar gasne turbine vrši se kompresija vazduha koji sa zatim meša sa gorivom zagrejanim na vrlo visoku temperaturu. Ova mešavina prolazi kroz lopatice gasne turbine i pokreće ih. Brzo rotirajuća turbina pokreće generator koji pretvara deo mehaničke energije u električnu energiju. Generator pare za vraćanje toplote (Heat Recovery Steam Generator - HRSG) hvata ispusnu toplotu iz gasne turbine, koja bi inače bila bačena tj. ispuštena kroz odvodne cevi u okolinu, i od nje generiše paru koja se zatim prenosi do parne turbine. Parna turbina prenosi svoju energiju na pogonskog vratila generatora koji generiše dodatnu električnu energiju [7].

U posmatranoj mreži, kao što je to već napomenuto u prvom poglavlju, parna turbina će biti instalirane u postrojenju PSGN-4. Parna turbina nominalne snage 120 MW napaja generator snage 150 MVA koji je zatim preko transformatora 10.5/220 kV/kV snage 150 MVA i kratkog kabla priključen na sabirnice postrojenja. Parna turbina predviđena za ugradnju ima mogućnost napajanja preko dve gasne turbine iz istog postrojenja (PSGN-4). Treba napomenuti da je nominalna snaga gasnih turbina u ovom postrojenju, kao i u svim ostalim postrojenjima, približno 100 MW.

Zavisnost maksimalne snage parne turbine od pojedinačnih snaga dveju napojnih gasnih turbina dobijena je od proizvođača u vidu kalkulatora. Za unetu ambijentalnu temperaturu, maksimalnu aktivnu snagu gasnih turbina kao i trenutnu aktivnu snagu gasnih turbina kao izlaz se dobija maksimalna aktivna snaga parne turbine. Treba napomenuti da sistem sadrži i ventil kojim je moguće „višak“ pare iz gasnih turbina po potrebi preusmeriti (ispustiti u okolinu), tako da izlaz parne turbine može biti i vrednost manja od maksimalne aktivne snage. Izlazna aktivna snaga PT ne može biti veća vrednost od one dobijene pomoću kalkulatora, budući da je tada sva raspoloživa energija iz gasnih turbina iskorišćena. Na Sl. 3 je grafički prikazana maksimalna snaga parne turbine (PT) u zavisnosti od snage jedne (od ukupno dve) gasne turbine (GT). Slika pokazuje zavisnost u slučaju kada obe GT napajaju PT. Ujedno se pretpostavlja da obe GT rade istom aktivnom snagom. Analize su pokazale da su optimalna rešenja ona u kojima sve gasne turbine u PSGN-4 koje napajaju PT generišu približno istu aktivnu snagu. Takođe, optimalno (najjeftinije) rešenje se dobija kada obe GT napajaju PT, budući da je tada moguć rad PT sa najvećom izlaznom snagom.

Sam CCGT blok predstavlja komplikovan sklop turbina čiji je rad međusobno povezan. Zavisnost izlaza parne turbine od gasnih turbina bilo je potrebno korektno modelovati za analize tokova snaga, optimizacije, dinamičke analize itd. Za potrebe optimizacije sistema radi minimizacije potrošnje goriva parna turbina u PSGN-4 kao i njene napojne gasne turbine su u PSS®E softveru modelovane zasebno, ali je njihov rad povezan. Postavljena su ograničenja tako da aktivna snaga parne turbine „prati“ krivu na Sl. 3, a obe napojne gasne turbine u PSGN-4 uvek rade istom aktivnom snagom. Ovo je učinjeno pomoću opcije „Linear Constraints“ u PSS®E-u [8]. Naime, softveru se mogu zadati linearna ograničenja između pojedinih promenljivih preko jednačina:

$$\left(\sum_{i=1}^N c_i \cdot x_i \right) - s = 0 \quad (2)$$

$$s_{\min} \leq s \leq s_{\max} \quad (3)$$

Gde su:

x_i - zavisna promenljiva sistema (napon, ugao snage, snaga itd.),

c_i - koeficijent uz i -tu promenljivu,

N - broj ograničenja u jednačini,

s_{\min} - minimalna granična vrednost ,

s_{\max} - maksimalna granična vrednost.

Kao zavisne promenljive u konkretnom slučaju će se koristiti aktivne snage napojnih gasnih turbina u PSGN-4 (P_{GT1} , P_{GT2}) i aktivna snaga parne turbine (P_{PT}). Sledeće dve jednačine modeluju rad CCGT za potrebe optimizacije:

$$1 \cdot P_{GT1} + (-1) \cdot P_{GT2} = s \quad (4)$$

$$1 \cdot P_{PT} + (-1.026) \cdot P_{GT1} = 16.436 + s \quad (5)$$

Pomoću jednačine (4) je uslovljeno je da obe gasne turbine u postrojenju PSGN-4, koje napajaju PT, rade istom aktivnom snagom. Za s_{\min} i s_{\max} zadate su vrednosti od -0.1 MW i 0.1 MW, respektivno. Time se dozvoljava mala devijacija radi izbegavanja problema sa divergencijom proračuna tokova snaga. Zadavanje ekvivalentnih ograničenja za reaktivnu snagu nije potrebno, jer softver sam prepoznaje da je sistem u optimalnom režimu kada gasne turbine proizvode jednaku reaktivnu snagu.

Sa Sl. 3 može se zaključiti da se aktivna snaga parne turbine može linearizovati za opseg rada gasnih turbina između 60 i 100 MW. Ovo je ujedno i jedini realan opseg u kome će sve gasne turbine u sistemu raditi, budući da je zabranjen rad između 40 i 60 MW a rad ispod 40 MW je neekonomičan. Tako se jednačinom (5) uslovljava da aktivna snaga parne turbine sledi pravu kojom je linearizovan rad PT u odgovarajućem opsegu rada gasnih turbina. Budući da je na Sl. 3 prikazana maksimalna snaga PT, za s_{\max} je zadata vrednost 0.1 MW. Time se onemogućava da aktivna snaga PT uzima vrednosti iznad krive na Sl. 3. Kako sistem poseduje ventil za ispuštanje dela pare, za vrednost s_{\min} zadata je vrednost od -120 MW. Time je omogućeno da aktivna snaga PT, ukoliko se to pokaže kao jeftinije rešenje, bude manja od maksimalne moguće vrednosti.

Kako se parna turbina napaja iz „otpadne“ pare gasnih turbina, za cenu goriva parne turbine je uzeta vrednost 0 \$/MBtu. Kada međusobna zavisnost generisanja električne snage gasnih turbina i parne turbine ne bi bila zadata, sistem bi pri optimizaciji, maksimalno angažovao PT dok bi angažovanje napojnih gasnih turbina u PSGN-4 bilo nedovoljno da se željena aktivna snaga PT zaista i fizički ostvari. Ovo je posledica toga što sistem posmatra snagu iz PT kao besplatnu,

pa time i najjeftiniju, i želi da njenim maksimalnim angažovanjem minimizuje troškove u sistemu. Kako su ograničenja koja modeluju rad CCGT bloka zadata, sistem ispravno angažuje sve jedinice unutar CCGT bloka a ujedno mora i da zadovolji sva ograničenja opisana u prvom poglavlju. Time se ne samo minimizuju ukupni troškovi goriva u sistemu, već softver daje rešenja koja su ostvariva i sigurna za rad samog sistema.

V. REZULTATI OPTIMIZACIJE

Nakon unosa svih ograničenja u model moguće je pokrenuti optimizaciju. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabela 1. U tabeli su zadate aktivne snage potrošnje po svim postrojenjima kao i aktivne snage generisanja GT i PT u postrojenjima u kojim postoji generisanje. U poslednjem redu tabele dati su ukupni časovni troškovi goriva za neoptimizovan sistem kao i optimizovan sistem sa i bez parne turbine. Primetno je smanjenje ukupnih troškova od 1.7% (bez PT) i 16.8% (sa PT) u odnosu na neoptimizovan sistem. Ujedno dobijeni rezultati zadovoljavaju sva zadata ograničenja.

TABELA I. REZULTATI MINIMIZACIJE TROŠKOVA GORIVA

	P_{POTR} (MW)	P_{GEN} NEOPTIMIZOVAN (MW)	P_{GEN} OPTIMIZOVAN BEZ PT (MW)	P_{GEN} OPTIMIZOVAN SA PT (MW)
PSGN-1	78.48	-	-	-
PSGN-2	161.61	3×60.5	3×76.41	3×61.0
PSGN-3	53.88	-	-	-
PSGN-4	117.43	3×80.1	3×85.52	2×100(GT) +119 (PT)
PSGN-5	72.75	-	-	-
PSGN-6	225.07	4×80.5	3×85.52	3×80.1
PSGN-7	31.14	-	-	-
Troškovi goriva (\$/h):		7 301	7 180	6 147

VI. ZAKLJUČAK

Upotreba postrojenja sa kombinovanim ciklusom je sve češća budući da je stepen iskorišćenja energije viši u odnosu na konvencionalne elektrane sa samo gasnim ciklusom. Takođe, nadogradnja parnog ciklusa u postojeća postrojenja sa gasnim ciklusom, je investicija koja se može pokazati ekonomski isplativom. U radu je opisan jedan takav slučaj gde je pored postojećih gasnih turbina, u postrojenju za separaciju gasa i nafte, ugrađena i parna turbina u kombinovanom ciklusu. Da bi se procenila isplativost ovakve investicije potrebno je sračunati novonastale troškove rada (goriva) sa kombinovanim gasno-parnim turbinama. Rad pokazuje jednostavni način modelovanja rada kombinovanog postrojenja za potrebe tokova snaga i optimizacije sistema radi minimizacije troškova goriva. Ukratko je opisan model prenosne mreže kao i glavna operativna ograničenja sistema koja moraju biti ispunjena prilikom procesa optimizacije. Dat je i kratak teorijski osvrt na kombinovana postrojenja i optimizaciju. Na kraju rada su prikazani rezultati optimizacije pomoću kojih je moguće oceniti isplativost investicije u parni ciklus.

LITERATURA

- [1] D. Saez and A. Cipriano, "Economic optimal control with environmental constraints for combined cycle power plants," IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.98CH36200), Aachen, Germany, 1998, pp. 640-645 vol.2.
- [2] J. Alvarez Lopez, R. Nieva Gomez and I. Guillen Moya, "Commitment of Combined Cycle Plants Using a Dual Optimization–Dynamic Programming Approach," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 2, pp. 728-737, May 2011.
- [3] D. Saez and A. Cipriano, "Fuzzy models based economic predictive control for a combined cycle power plant boiler," Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Intelligent Control Intelligent Systems and Semiotics (Cat. No.99CH37014), Cambridge, MA, USA, 1999, pp. 417-422
- [4] Momoh, J. (2009). Electric Power System Applications of Optimization. Boca Raton: CRC Press.
- [5] Talaq, J. H., El-Hawary, F., and El-Hawary, M. E., A summary of environmental economic dispatch algorithms, IEEE Transactions on Power Systems, 9(3), 1994, 1508–1516.
- [6] Wood, A. J. and Wollenberg, B. F., Power Generation, Operation and Control, Wiley, New York, 1984
- [7] Combined Cycle Power Plant, General Electric GE Power, www.ge.com/power/resources/knowledge-base/combined-cycle-power-plant-how-it-works
- [8] PSS®E 34 Program Operation Manual. March 2015. Siemens Industry, Inc.

ABSTRACT

The paper presents the model of the transmission-industrial network for the gas and oil separation for which optimization was carried out in order to minimize fuel costs. In the current state, the network is powered only by gas turbines, and the optimization of the active power dispatch of the existing turbines has resulted in savings in fuel costs. As the installation of a steam turbine, which will be powered from existing gas turbines, is planned in the near future, the network optimization was performed with gas as well as combined cycle gas turbine (CCGT) in service. The CCGT modelling for the needs of optimization as well as optimization results are presented in this work. Analyses were performed in the PSS®E program package.

CCGT PLANT MODELING FOR OPF ANALYSIS

Miloš Anđelković
Petar Pavlović
Rastko Kostić
Ana Anđelković
Goran Lepović