

MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA UPRAVLJANJA VELIKIM ENERGETSKIM SISTEMIMA: MOGUĆNOSTI I RJEŠENJA

MODELLING AND OPTIMIZATION OF LARGE POWER SYSTEMS: POSSIBILITIES AND SOLUTIONS

Mirsad Buljubašić¹, Haris Gavranović¹

Sažetak: U ovom radu je obrađen problem upravljanja energijom velikih razmjera (eng. Large Scale Energy Management - LSEM), sa dva tipa elektrana (termalne i nuklearne). Elektrane prvog tipa mogu istovremeno proizvoditi energiju i snabdijevati se gorivom. Elektrane drugog tipa su nuklearne elektrane koje se s vremena na vrijeme moraju isključiti radi snabdijevanja gorivom i održavanja. LSEM je problem optimizacije proizvodnje elektrana oba tipa i raspoređivanja prekida u radu nuklearnih elektrana s ciljem postizanja minimalnih troškova proizvodnje. Predstavljena je heuristika zasnovana na tehnici lokalne pretrage (eng. Local Search - LS) i uslovnom programiranju (eng. Constraints Satisfaction Programming - CSP). Predstavljani su i rezultati za neke realne instance problema.

Ključne riječi: uslovno programiranje, lokalna pretraga, optimizacija, planiranje, upravljanje energijom.

Abstract: This paper elaborates the issue of Large Scale Energy Management - LSEM, including discussion about two types of power plants (thermal and nuclear plants). Power plants of the first type can be refuelled while still operating. Power plants of the second type are nuclear plants, which need to be shut down from time to time, for refuelling and maintenance. LSEM is a problem of optimizing production plans and scheduling maintenance of nuclear plants, with the objective of keeping the production costs as low as possible. This article presents a heuristic optimization approach based on the Constraint Satisfaction Programming - CSP and Local Search. Results for some realistic instances of the problem are also presented.

Keywords: CSP, Local search, Optimization, Scheduling, Energy management.

UVOD

Potrebe za električnom energijom su u neprestanom porastu. Kako bi se zadovoljio ovakav rast neophodno je pažljivo planirati i graditi nove proizvodne kapacitete. Potrebno je iskoristiti sve izvore energije koji su ekonomski izvodivi i održivi za okolinu. Električna energija se trenutno najvećim dijelom proizvodi iz fosilnih goriva. Budući da fosilna goriva imaju negativne posljedice na okoliš i nisu neiscrpna, sve se više koriste alternativne metode proizvodnje električne energije poput iskorištavanja energije sunca, energije vode, geotermalne energije, energije vjetrova, nuklearne energije i drugih. Rezultat ovog procesa je da sve velike svjetske kompanije za proizvodnju električne energije imaju heterogen portfolio proizvodnih kapaciteta čije uspješno operativno i taktičko upravljanje predstavlja pravi izazov. Izuzetno je složen problem upravljanja ovim resursima ukoliko portfolio sadrži i nuklearne elektrane.

U ovom radu je predstavljen matematski model i metod optimiziranja ovakvog procesa upravljanja heterogenim resursima.

Instance iz realnog svijeta kojima se služi francuska elektroprivreda (Electricite de France – EDF) poslužile su kao motiv i test za naš metod. Isti problem su rješavale i 43 naučne ekipe iz cijelog svijeta tako da smo bili u prilici unaprijediti, ali i odrediti stvarni kvalitet našeg rješenja. Više se o samom problemu, kao i postignutim rezultatima, može vidjeti u [1] i [2]. Zbog same strukture proizvodnih kapaciteta u EDF-u je naročita pažnja posvećena upravljanju i planiranju rada nuklearnih elektrana. Period planiranja je od jedne do nekoliko godina, sa stotinama različitih scenarija proizvodnje i stotinama tehnoloških i drugih ograničenja proizvodnje. Sam problem se pokazao kao jedan od složenijih optimizacijskih problema koji se mogu susresti u praksi.

U radu su predstavljeni načini modeliranja proizvodnih uslova i rješavanje problema za predloženu funkciju cilja, specifičnu za EDF. Problem uključuje planiranje isključenja i snabdijevanja gorivom elektrana drugog tipa, te planiranje proizvodnje u elektranama oba tipa.

Pored Francuske još 31 zemlja svijeta proizvodi nuklearnu energiju u 439 nuklearnih elektrana. Dakle, moguće je zaključiti da se ovakav problem, uz manje varijacije, može sresti u nemalom broju sistema za proizvodnju električne energije.

¹ Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina
mirsad_bulj@yahoo.com
Rad prihvaćen u maju 2012. godine.

S druge strane veliki je broj kompanija koje nemaju probleme upravljanja nuklearnim elektranama, ali se metodologija rješavanja, kao i osnovna ograničenja problema mogu projicirati i na njihove sisteme. Ovaj rad predstavlja, na određen način, i ideje o mogućnosti definisanja problema u takvim sistemima (na primjer u EPBiH).

Sve kompanije koje imaju heterogen proizvodni portfolio posvećuju izuzetnu pažnju procesu planiranja proizvodnje električne energije. Uslovi koje susrećemo u ovom problemu na gotovo direktan način modeliraju procese remonta i kontrole, kao i nivo proizvodnje u svakoj elektrani, bez obzira na njenu tehnologiju i pogonsko gorivo. Ovaj rad, u isto vrijeme, pokazuje da i domaći kadrovi imaju neophodnu stručnost i uspješnost u rješavanju ovako složenih problema upravljanja proizvodnjom.

U ovom radu su predstavljene različite metodologije istraživanja i rješavanja problema i potproblema. Prije svega, pokazano je na koji način je moguće matematski modelirati i predstaviti diskretne i neprekidne tehnološke uslove proizvodnje. Pored osnovnog problema, predstavljeni model dopušta i poopćenu formulaciju ostalih ograničenja vezanih za sigurnost, dostupnost radnog kadra, zakonske restrikcije i sl. Dobiveni modeli su rješavani koristeći ad-hoc algoritme, kao i neke od vodećih komercijalnih softwera.

Tehnike zadovoljavanja ograničenja, linearno i nelinearno programiranje, konstruktivni algoritmi i metaheuristike su u osnovi ponuđenog rješenja.

Planiranje isključenja je jedna od najznačajnijih aktivnosti u nuklearnim elektranama i ključni je faktor za dobar, siguran i ekonomičan rad elektrane. To je kompleksan zadatak koji uključuje poštovanje politike elektrane, koordinaciju dostupnih resursa, sigurnost, regulatorne i tehničke zahtjeve, te sve aktivnosti prije i poslije isključenja. Određena ograničenja se moraju zadovoljiti prilikom planiranja isključenja. Ova ograničenja se mogu predstaviti matematičkim uslovima.

Rad je organizovan na sljedeći način: poglavlje 1 opisuje prethodna istraživanja vezana za datu temu; poglavlje 2 daje formalnu postavku problema; poglavlje 3 uvodi pomoćnu notaciju koja će biti korištena u radu i opisuje redukciju problema; poglavlje 4 opisuje naš osnovni metod rješavanja problema; poglavlje 5 predstavlja poboljšani metod rješavanja problema, koji se sastoji od kombinovanja osnovnog metoda sa redukcijom problema; u poglavlju 6 dati su rezultati.

1. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Metode koje se uspješno primjenjuju u upravljanju postrojenjima za generisanje energije uključuju genetičke algoritme, optimizaciju kolonija mrava (eng. ant colony search), tabu pretragu (eng. tabu search) i simulirano hlađenje (eng. simulated annealing).

Danas je problem modeliran i riješen koristeći tehnike mješovitog linearnog cjelobrojnog programiranja (Mixed Integer Programming – MIP) zajedno sa tehnikama dekompozicije. Problem sličan datom je obrađen u [3]. Autori formuliraju model pomoću mješovitog cjelobrojnog programiranja i model je u stanju da riješi male probleme sa najviše 20 nuklearnih elektrana koristeći MIP solver. Dio problema koji se odnosi na određivanje rasporeda isključenja je prilično sličan problemu poznatom kao problem raspoređivanja sa ograničenim resursima (eng. Resource Constrained Project Scheduling Problem – RCPSP). Međutim, naš problem uključuje nekoliko uslova koji se ne nalaze u RCPSP problemu.

2. POSTAVKA PROBLEMA

Definicija problema je razvijena od strane francuske kompanije EDF, pa podrazumijeva i neke osobenosti francuske energetske politike. Također sve instance problema su dobivene od EDF-a. Dati problem je postavljen na ROADEF/EURO Challenge 2010 takmičenju [1].

Počinjemo sa uvodom u model u poglavlju 2.1., poslije čega slijede neke opće definicije u poglavlju 2.2. Nakon toga, poglavlje 2.3. predstavlja srž modela: različite tipove uslova. Poglavlje 2.4. daje definiciju funkcije cilja.

2.1. Uvod

Ovdje predstavljamo model za planiranje proizvodnje električne energije koristeći skup elektrana. Model se proteže u određenom vremenskom periodu (npr. 5 god.), koji se sastoji od uniformnih vremenskih intervala pode-sive dužine (npr. 1 dan). Dva prvorazredna entiteta našeg modela su skup različitih elektrana i skup nesigurnih scenarija proizvodnje. Za svaki scenario se traži određivanje proizvodnje tako da je zadovoljena potražnja. Potreba za više različitih scenarija proizilazi iz mnogobrojnih neizvjesnosti koje se trebaju uzeti u obzir. U našem modelu postoje dva tipa elektrana. Elektrane prvog tipa mogu neprestano proizvoditi energiju i njihova opskrba gorivom je izvan opsega problema. U toku svakog vremenskog intervala one mogu proizvoditi određenu količinu energije u datom intervalu, koji zavisi od scenarija i vremenskog intervala. Proizvodnja u ovim elektranama uzrokuje troškove koji su proporcionalni izlaznoj snazi elektrane i koji također zavise od scenarija i vremenskog intervala. Elektrane ovog tipa mogu biti elektrane koje koriste ugalj, gas i sl.

Elektrane drugog tipa moraju periodično biti isključene radi snabdijevanja gorivom i održavanja, pa modeliranje ovog tipa postrojenja zahtijeva posebnu pažnju. Za razliku od elektrana prvog tipa, troškovi proizvodnje su proporcionalni količini potrošenog goriva, čija cijena zavisi od ciklusa i elektrane. Za svaku elektranu drugog tipa trebaju biti zadovoljeni dati uslovi proizvodnje vezani za gorivo. Dalje, isključenja različitih elektrana su međusobno zavisna (putem različitih uslova kao što su maksima-

lan broj isključenja, količina resursa, dostupnost radnika i dr.). Elektrane ovog tipa su obično nuklearne elektrane.

Raspored isključenja i proizvodnja elektrana drugog tipa su isti za svaki scenario, za razliku od elektrana prvog tipa čija proizvodnja varira u zavisnosti od scenarija.

Da zaključimo, problem se sastoji od dva uzajamno zavisna potproblema:

1. Odrediti raspored isključenja elektrana drugog tipa. Ovaj raspored mora zadovoljavati date uslove u skladu sa ograničenjima resursa potrebnih za izvršavanje operacija tokom isključenja.
2. Odrediti optimalan plan proizvodnje koji zadovoljava zahtjeve za energijom tj. odrediti proizvodnju u svakoj elektrani, scenariju i vremenskom intervalu.

Cilj je minimizirati ukupne troškove proizvodnje.

2.2. Varijable odluke i opće definicije

Varijable odluke koje sačinjavaju problem su: vrijeme početka svakog isključenja, količina goriva kojim se svaka elektrana drugog tipa snabdijeva prilikom svakog isključenja i nivo proizvodnje za elektrane oba tipa.

Ispod su navedeni neki osnovni pojmovi koji će se koristiti kroz ovaj rad:

- Vremenski interval – vremenski horizont problema je podijeljen na vremenske intervale. To je najmanja jedinica vremena u datom problemu. Proizvodnja elektrana se određuje za svaki vremenski interval.
- Sedmica – niz uzastopnih vremenskih intervala. Broj vremenskih intervala u sedmici je konstantan.
- Scenario – zbog nejasnih zahtjeva i predviđanja definiše se više različitih scenarija proizvodnje.

Sljedeći pojmovi se odnose na elektrane drugog tipa:

- Isključenje/Prekid – niz sedmica u kojima elektrana ne može proizvoditi energiju.
- Kampanja proizvodnje – niz sedmica u kojima elektrana proizvodi energiju.
- Ciklus – slijed isključenja i kampanje proizvodnje.
- Punjenje – količina goriva kojim se elektrana snabdijeva prilikom isključenja.
- Modulacija – ukupno odstupanje od maksimalne snage u toku kampanje proizvodnje.
- Specijalni režim – uslov postavljen na proizvodnju kada je količina goriva manja od date granice.

Instance problema koje smo rješavali imaju do 75 elektrana drugog tipa, do 120 scenarija i do 5800 diskretnih vremenskih intervala. Vremenski period je oko 5 godina. Ovo su, uz nekoliko malih izuzetaka, realni problemi koji se rješavaju u EDF-u. Instance su podijeljene na instance A (do 30 elektrana drugog tipa), te B i X instance (do 75 elektrana drugog tipa).

2.3. Uslovi

Srž datog problema predstavljaju različiti uslovi koji su vezani za proizvodnju energije u svim elektranama i za

raspored isključenja elektrana drugog tipa. Ti uslovi su sljedeći:

- Za svaki scenario suma nivoa proizvodnje svih elektrana mora biti jednaka potražnji (u svakom vremenskom intervalu).
- Tehnički uslovi za svaku elektranu
 - o Elektrane prvog tipa: nivo proizvodnje mora biti između zadane donje i gornje granice.
 - o Elektrane drugog tipa imaju sljedeće uslove:
 - Nivo proizvodnje mora biti između zadane donje i gornje granice.
 - Dinamika nivoa goriva, koja povezuje količinu goriva i proizvodnju.
 - Minimalna i maksimalna količina goriva koje se može dodati prilikom isključenja.
 - Minimalna i maksimalna količina goriva u elektrani neposredno prije ili poslije isključenja.
- Uslovi vezani za raspored isključenja:
 - o Isključenja traju određeni broj sedmica.
 - o Minimalan razmak između isključenja.
 - o Maksimalan broj preklapajućih isključenja.
 - o Maksimalan broj isključenja koja mogu početi u određenom vremenskom period.

2.4. Funkcija cilja

Troškovi proizvodnje su suma sljedeća dva dijela:

1. troškovi punjenja elektrana drugog tipa smanjeni za cijenu preostalog goriva na kraju vremenskog horizontal,
2. troškovi proizvodnje elektrana prvog tipa.

3. NOTACIJA, PRETPOSTAVKE I REDUKCIJE

Ovdje predstavljamo nekoliko novih pojmova i pojednostavljenje problema koji su se pokazali korisnim za samu prezentaciju, ili su uticali na poboljšanje rješenja. Osnovni razlozi pojednostavljenja su složenost problema, veličina instanci i vremensko ograničenje za rješavanje. Redukcija je često neophodna da bi se dobilo bar jedno moguće rješenje problema. Pošto je cijena goriva za elektrane drugog tipa u svim datim instancama manja od cijene proizvodnje u elektranama prvog tipa, onda je i proizvodnja u tim elektranama ekonomičnija. Ova činjenica će se koristiti u proceduri za određivanje proizvodnje.

3.1. Marginalna cijena

Da bi troškovi bili što manji, jasno je da proizvodnju energije treba rasporediti na elektrane sa najmanjim troškovima proizvodnje. Pošto smo pretpostavili da su elektrane drugog tipa jeftinije od elektrana prvog tipa, njihov nivo proizvodnje treba biti što je moguće veći. Za neke vremenske intervale i scenarije određeni dio potražnje mora biti zadovoljen koristeći elektrane prvog tipa. Problem određivanja proizvodnje u elektranama prvog tipa je jednostavan problem sličan relaksiranom problemu ruksaka. Rješenje se sastoji od sortiranja elektrana u odnosu

na cijenu proizvodnje i postavljanje maksimalne proizvodnje redom dok se ne zadovolji potražnja.

Cijenu proizvodnje elektrane koja ima najveće troškove proizvodnje i koja proizvodi energiju nazivamo marginalna cijena.

3.2. Smanjivanje veličine problema

Jedna od stvari koje čine ovaj problem vrlo složenim je veličina instanci problema. Smanjivanje veličine problema, kako zbog vremena računanja tako i zbog zauzeća memorije, je jako korisno.

Spajanje vremenskih intervala je jednostavan i prirodan način smanjivanja veličine instanci problema smanjivanjem ukupnog broja vremenskih intervala. Potražnja, snaga i cijena proizvodnje variraju po vremenskim intervalima i scenarijima. Pretpostaviti ćemo da ove varijacije nisu drastične i da ih možemo dobro aproksimirati za nekoliko uzastopnih vremenskih intervala. S druge strane uslovi vezani za isključenja su zadani u sedmicama i također je važno poštovati njihovu strukturu u novodobivenim instancama. Redukcija se sastoji od spajanja određenog broja vremenskih intervala u jedan, uz poštovanje njihove pripadnosti odgovarajućim sedmicama. Najjednostavnija redukcija je spajanje vremenskih intervala koji pripadaju jednoj sedmici u jedan vremenski interval, uz računanje prosječnih vrijednosti za potražnju, maksimalnu (minimalnu) snagu i cijenu proizvodnje.

4. PROCEDURA RJEŠAVANJA

Rješenje problema se sastoji od faze raspoređivanja isključenja i faze planiranja proizvodnje. Nakon pronalaska mogućeg rješenja problema, rješenje se popravljajući koristeći niz lokalnih poboljšanja. Novodobiveno rješenje koje je lokalno optimizirano daje povod za novi raspored isključenja i ciklus se ponavlja. Ovo je kratki opis rješenja kojeg prezentujemo. Skup uslova je podijeljen u dva prirodna skupa: jedan se bavi isključivanjima elektran drugog tipa, a drugi se sastoji od uslova koji se odnose na proizvodnju svih elektran i potrošnju goriva u elektranama drugog tipa. Uslovi o specijalnom režimu rada su nelinearni i čine problem znatno složenijim. Rješenje se sastoji od tri dijela koji se primjenjuju u datom poretku:

1. Uslovno programiranje – za konstrukciju rasporeda isključenja.
2. Konstruktivna procedura – za planiranje proizvodnje
3. Lokalna pretraga – za poboljšanje kvaliteta rješenja

4.1. Raspored isključenja

Skup uslova koji se odnose na raspored isključenja elektran drugog tipa je modeliran koristeći OPL optimizacioni jezik i riješen koristeći različite solvere (Comet, IBM Ilog CP, Mistral). Rezultirajući raspored je validan u odnosu na uslove vezane za isključenja.

Ovako dobiveni rasporedi nisu zadovoljavajući jer s jedne strane nemaju osobinu raznolikosti, a s druge strane zbog činjenice da ne dopuštaju uvijek izvodiv plan proizvodnje. Uslov koji se često ne može ispuniti za ovako dobiveni raspored je uslov o maksimalnoj količini goriva u elektranama neposredno prije ili poslije isključenja. Ovo je razlog dodavanja novih uslova u model. Zasnovani na postojećem rasporedu i aproksimativnom planu proizvodnje, dodaju se potrebni uslovi razmaka između svaka dva susjedna isključenja.

U aproksimativnom planu proizvodnje su količine snabdijevanja gorivom minimalne i proizvodnja u svakom vremenskom intervalu maksimalna. Za svako rješenje sa narušenim uslovom dodaju se novi uslovi razmaka i model se ponovo rješava.

Raspored isključenja može biti optimiziran u odnosu na neku ciljnu funkciju. Numerički eksperimenti ukazuju na to da je dobro rasporediti isključenja u sedmicama sa manjom potražnjom. Rješavanje problema isključenja koristeći solver vodi ka ovakvim rješenjima korištenjem odgovarajuće funkcije cilja, korištenjem skupa sedmica sa niskom potražnjom kao početnog rješenja za pretragu, ili kombinacijom ova dva načina. U kasnijim fazama rješavanja kada imamo moguće rješenje, sedmice sa najmanjom marginalnom cijenom se koriste kao početno rješenje za solver. Ispod je prikazan algoritam za rješavanje problema rasporeda isključenja.

Algoritam 1: Raspored isključenja

Izračunaj minimalne razmake između susjednih isključenja aproksimativno.

Odredi raspored isključenja koristeći solver.

Aproksimativni plan proizvodnje.

While Plan proizvodnje nije validando –

Povećaj minimalan razmak.

Odredi raspored isključenja koristeći solver.

Aproksimativni plan proizvodnje.

End while

4.2. Planiranje proizvodnje

Za svaki raspored isključenja konstruktivna procedura za određivanje proizvodnje daje rješenje problema. Ovo rješenje ne mora uvijek biti validno zbog aproksimativnog planiranja proizvodnje u fazi traženja rasporeda isključenja. U tom slučaju se dodaju novi uslovi razmaka u CSP model i model se ponovo rješava.

Algoritam koristeći pohlepnu strategiju postavlja što je moguće veći nivo proizvodnje elektranama sa najmanjim troškovima proizvodnje, dok se ne ispuni potražnja. Poželjno je da svaka elektrana drugog tipa proizvodi što je moguće više energije. Određena količina goriva se gubi prilikom punjenja radi sigurnosnih razloga, pa zaključujemo da nije poželjno imati velik nivo goriva u elektranama drugog tipa neposredno prije isključenja. S druge strane ako je nivo goriva nizak, tj. ako je ispod zada-

ne granice, elektrana mora raditi po specijalnom režimu u kojem je proizvodnja obično manja od maksimalne, pa dužina ovog načina rada ne bi trebala biti velika.

Zbog svega navedenog, naša strategija punjenja je da se prilikom svakog isključenja napuni minimalna količina goriva, koja se povećava ako elektrana uđe u specijalni režim rada (ako je povećanje moguće).

Sljedeći problemi se mogu pojaviti tokom postavljanja proizvodnje elektrana drugog tipa:

- prevelika proizvodnja (ukupna proizvodnja u elektranama drugog tipa veća od potražnje),
- prevelika modulacija,
- nivo goriva prije ili nakon isključenja veći od dozvoljenog.

Redoslijed elektrana drugog tipa prilikom planiranja proizvodnje je ključan za rješavanje navedenih problema, jer se oni gotovo uvijek pojavljuju prilikom postavljanja proizvodnje u zadnjih nekoliko elektrana. Metod rješava ove probleme sortiranjem elektrana drugog tipa prije postavljanja proizvodnje za svaki vremenski interval. Elektrane sa većom mogućnošću pojavljivanja navedenih problema se stavljaju na vrh liste za proceduru planiranja proizvodnje. Prioritet se daje elektranama koje su u specijalnom režimu rada u datom vremenskom intervalu (jer se na snagu elektrane u tom periodu ne može utjecati), elektranama sa velikom modulacijom prije datog intervala i elektranama koje moraju imati visok nivo proizvodnje u trenutnoj kampanji radi zadovoljavanja uslova o maksimalnoj količini goriva prije/poslije isključenja. Ovo sortiranje se izvodi za svaki vremenski interval nezavisno. Navedeni problemi se ne pojavljuju u instancama A, što ove instance čini mnogo lakšim za rješavanje.

Kada je određena proizvodnja u elektranama drugog tipa, preostala potražnja za energijom se raspoređuje na elektrane prvog tipa, koje se neposredno prije postavljanja proizvodnje sortiraju u rastućem redoslijedu po cijeni proizvodnje. Opisani algoritam planiranja proizvodnje efektivno nalazi rješenje problema za svih 15 ponuđenih instanci.

4.3. Lokalna poboljšanja

Čak i za male instance problema pronalaženje dobre aproksimacije optimalnog rješenja može biti vrlo teško. U nekim slučajevima je pronalazak bilo kakvog mogućeg rješenja problema izuzetno računarski zahtjevan zadatak. Težina problema je prouzrokovana veličinom instanci s jedne strane, te postojanjem nelinearnih uslova za proizvodnju u elektranama drugog tipa s druge strane. Naš metod rješava ove nelinearnosti s tri tipa lokalnih poboljšanja koji su pažljivo dizajnirani i testirani. Strategije lokalnog pretraživanja optimiziraju proizvodnju, punjenje (količine goriva kojim se elektrane drugog tipa snabdijevaju) i raspored isključenja.

4.3.1. Lokalna poboljšanja proizvodnje

Ova procedura pokušava poboljšati rješenje problema modifikacijom nivoa proizvodnje u dva vremenska intervala koji pripadaju istoj proizvodnoj kampanji jedne elektrane drugog tipa. Prilikom ove promjene količina punjenja ostaje nepromijenjena. Promjena proizvodnje u datoj elektrani samo utiče na promjenu proizvodnje u elektranama prvog tipa i to samo u dva vremenska intervala. Ukupna cijena rješenja mijenja se samo prema promjeni proizvodnje elektrana prvog tipa. Marginalne cijene pomažu u efikasnom pronalaženju interesantnih vremenskih intervala i određivanju ove promjene.

Posmatrajmo elektranu drugog tipa indeksa j , takvu da postoji vremenski interval t_1 u kojem elektrana ne radi maksimalnom snagom, niti je u specijalnom režimu rada. Pretpostavimo da postoji vremenski interval t_2 u istoj kampanji, u kojem elektrana nije u specijalnom režimu rada i u kojem proizvodi energiju. Neka su t_1 i t_2 takvi da je marginalna cijena u t_1 veća od marginalne cijene u t_2 . Jednostavno je provjeriti da je profitabilno povećati snagu elektrane j u t_1 i smanjiti snagu elektrane u t_2 za istu vrijednost. Cijela procedura je pažljivo implementirana i optimizirana koristeći liste dobrih kandidata (vremenskih intervala) za promjenu.

4.3.2. Lokalna poboljšanja punjenja

Promjena punjenja na jednom isključenju se odražava na promjenu proizvodnje u sljedećim kampanjama ili promjenu punjenja na sljedećim isključenjima, kao i na količinu preostalog goriva u elektranama na kraju vremenskog horizonta. Postojanje specijalnog režima rada čini i ove promjene nelinearnima. Količine punjenja se optimiziraju u odnosu na ukupne troškove rješenja, koristeći male inkrementalne promjene. Na slučajan način se bira ju elektrane drugog tipa i isključenje, te se aproksimativno računa razlika u ukupnoj cijeni za malu promjenu punjenja na datom isključenju. Ako promjena poboljšava rješenje ona se prihvata i proces se ponavlja. Cijeli proces se ponavlja do pronalaska lokalnog optimuma.

4.3.3. Lokalna poboljšanja rasporeda isključivanja

Ova lokalna poboljšanja su se pokazala kao najvrijednija u smislu kvaliteta dobivenih rješenja. Ova pretraga je obično vremenski zahtjevnija zbog evaluacije promjene rješenja. Promjena početka prekida će dovesti do promjene nivoa goriva na početku i na kraju proizvodne kampanje, proizvodnju elektrane, proizvodnju ostalih elektrana (obično elektrana prvog tipa), kao i drugih manje važnih karakteristika rješenja. Sve ove promjene direktno utiču na vrijednosti rješenja. Posmatramo samo promjene koje vode ka mogućem rješenju. Računa se razlika u rješenju do koje bi pomjeranje dovelo i ako je ona pozitivna, pomjeranje se izvodi. Kreiranje cijelog rješenja i poređenje vrijednosti sa vrijednosti trenutnog rješenja je vremenski vrlo zahtjevno. Iz tog razloga, kvalitet

pomjeranja je procijenjen koristeći marginalnu cijenu i promjenu punjenja, čime pretraga postaje efikasnija. Redoslijed biranja isključenja za pomjeranje utiče na krajnji kvalitet rješenja. Testirali smo različite pristupe te se izbor isključenja i pomjeranja koji najviše poboljšavaju rješenje pokazao najboljim.

5. POBOLJŠANA PROCEDURA RJEŠAVANJA

Ovo poglavlje istražuje i proučava načine kombinovanja prethodno objašnjene procedure i redukcije problema. Testirane su različite postavke. Naši izbori su ovdje često vođeni željom prepuštanja rješavanja problema solveru i različitom skupu kombinovanja lokalnih poboljšanja i njihovih međusobnih veza. Ovaj pristup je moguć i prirodan uzimajući u obzir da smo težak problem planiranja proizvodnje uspješno riješili. Tako smo bili u stanju kreirati širok spektar različitih rješenja i izabrati najbolje. Ovaj proces se također pokazao korisnim u poređenju različitih rješenja i boljem razumijevanju problema. Veličina instanci je mnogo uticala na kvalitet konačnih rješenja i efektivnost metoda. Ideja o smanjivanju instanci se pokazala kao jako korisna. Cijeli metod za veće instance je predstavljen u algoritmu ispod. Potpuno isti metod je korišten za rješavanje manjih instanci, ali bez njihovog smanjivanja.

Algoritam 2: Poboļšana procedura rješavanja

Smanji instancu spajanjem vremenskih interval.

Riješi smanjenu instancu.

Riješi originalnu instancu koristeći isključenja iz najboljeg dobivenog rješenja smanjene instance.

Optimiziraj rješenje koristeći lokalnu pretagu.

While ima još vremena do –

Konstruiši optimalan raspored isključenja u odnosu na marginalne cijene trenutnog rješenja.

Odredi validan plan proizvodnje.

Primjeni lokalna poboljšanja i ažuriraj najbolje rješenje.

End while

6. EVALUACIJA I REZULTATI

Cijelo rješenje problema je implementirano u C++ programskom jeziku na Linux x86-64 arhitekturi i kompajlirano sa GCC 4.4.3 kompajlerom. Solver izabran za CSP dio problema je ILOG CPLEX 12. Računar je opremljen sa Intel i7 920 procesorom (2.66 GHz, 8M Cache, RAM 6 GB). Vrijeme računanja je 30 minuta za A instance i 60 minuta za B i X instance (kao na ROADEF/EURO Challenge 2010). Skoro sva dobivena rješenja su udaljena od 0.5% do 3.0% od najboljih nađenih rješenja, dok su razlike na instancama A dosta manje i iznose oko 0.01%. Za tri instance su se dobila najbolja rješenja. Najbolji poznati rezultati su uzeti sa web stranice ROADEF/EURO Challenge takmičenja ili iz [4]. Detaljni rezultati su dati u tabeli I.

Tabela I: Rezultati svih 15 instanci problema. Vrijednosti rješenja su reda 10^{10} .

Instanca	Rješenje autora ($\times 10^{10}$)	Najbolje nađeno rješenje	Razlika (%)
A1	16. 94 745	16. 94 748	-0.00016
A2	14. 59 567	14. 59 568	-0.000045
A3	15. 42 772	15. 43 160	-0.0251
A4	11. 15 057	11. 14 940	0.010
A5	12. 47 166	12. 45 439	0.128
B6	8. 37 632	8. 34 247	0.405
B7	8. 20 702	8. 10 997	1.196
B8	8. 37 866	8. 18 997	2.301
B9	8. 75 425	8. 16 895	7.164
B10	7. 94 669	7. 77 670	2.185
X11	7. 96 508	7. 90 096	0.811
X12	7. 82 742	7. 75 639	0.915
X13	7. 77 210	7. 62 885	1.877
X14	7. 80 275	7. 61 494	2.466
X15	7. 63 107	7. 43 883	2.584

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen metod rješavanja problema upravljanja velikim energetske sistemima. Predstavljena je heuristika zasnovana na lokalnoj pretrazi i uslovnom programiranju, kao i rezultati za realne instance problema. Rješenje problema se sastoji od tri dijela: uslovnog programiranja, konstruktivne procedure za planiranje proizvodnje i lokalnog pretraživanja. Eksperimentalni rezultati su jako dobri. Za tri instance problema smo dobili najbolja poznata rješenja, a ostala rješenja imaju vrlo mala odstupanja od najboljih. Prezentovana metodologija se može poboljšati na različite načine, što se posebno odnosi na rješavanje većih instanci problema (redukcije, relaksacije i sl.), kao i popravljivanje vremenskih performansi, jer nam one nisu bile prioritetne tokom rješavanja.

LITERATURA

- [1] M. Porcheron, A. Gorge, O. Juan, T. Simovic, G. Dereu: Challenge ROADEF/EURO 2010: A large-scale energy management problem with varied constraints, 2009.
- [2] <http://challenge.roadef.org/2010/en>
- [3] F. Fourcade, E. Johnson, M. Bara, C. Dumont: Optimizing nuclear power plant refueling with mixed-integer programming, European Journal of Operational Research, 269-280, 1997.
- [4] F. Gardi, K. Nouioua: Local Search for Mixed-Integer Nonlinear Optimization: a Methodology and an Application, EvoCOP 11th European conference on evolutionary computation in combinatorial optimisation, Torino, Italy, 2011.

BIOGRAFIJA

Mirsad Buljubašić rođen je 21.11.1987. godine u Zavidovićima. Osnovnu i srednju školu završio je u Zavidovićima. Diplomski studij na Prirodno-matematičkom fakultetu u Sarajevu, odsjek Matematika, smjer Teorijsko-kompjuterska nauka završio je 2009. godine. Na istom fakultetu, odsjeku i smjeru 2011. godine završio je i II ciklus studija.

Haris Gavranović rođen je 19.07.1970. u Sarajevu. Osnovnu i srednju školu završio je u Sarajevu, a poslije se školovao u Sarajevu, Tunisu, Italiji i Francuskoj. Doktorirao je kompjuterske nauke – oblast Operaciona istraživanja na Univerzitetu Joseph Fourier u Grenobleu. Zaposlen je kao docent na Prirodno-matematičkom fakultetu u Sarajevu. Oblasti naučnog interesovanja su mu: kombinatorna optimizacija, kompjutaciona biologija i industrijska matematika.