

Igor Kuzle
Fakultet elektrotehnike i računarstva
igor.kuzle@fer.hr

Tomislav Tomiša
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.tomisa@fer.hr

Hrvoje Pandžić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
hrvoje.pandzic@fer.hr

ODRŽAVANJE ELEMENATA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA U NOVIM TRŽIŠNIM UVJETIMA

SAŽETAK

U radu su ukratko teorijski opisane promjene u načinu i metodama izrade rasporeda održavanja elemenata elektroenergetskog sustava, prvenstveno elektrana, uslijed uvođenja otvorenog tržišta električne energije.

Razvoj procesorske snage današnjih računala omogućio je korištenje matematičkog programiranja kao vrlo učinkovite metode u određivanju rasporeda održavanja. U svijetu se sve više kao metoda matematičkog programiranja za optimizaciju rasporeda održavanja proizvodnih postrojenja elektroenergetskog sustava koristi Bendersova dekompozicija. Njena velika prednost pred ostalim metodama je vrlo brzi pronalazak optimalnog rasporeda zbog učinkovitosti Bendersovog reza. U radu se opisuju razlozi uvođenja Bendersove dekompozicije, čije je djelovanje prikazano jednostavnim primjerom na kraju rada.

Ključne riječi: Bendersova dekompozicija, matematičko programiranje, optimizacija, otvaranje tržišta, raspored održavanja, restrukturiranje

POWER SYSTEM FACILITY MAINTENANCE IN A RESTUCTURED ELECTRICITY MARKET

SUMMARY

This paper describes changeovers in power system elements maintenance planning procedures and methods due to power market liberalization. The emphasis is on the power generating unit maintenance.

The great improvement in computer processors performance made mathematical programming possible in practice as an extremely efficient generating unit maintenance planning tool. The worldwide most spread mathematical programming method for generating units maintenance optimization is the Benders decomposition. Its great advantage is very good convergence to the optimal solution, due to efficiency of the Benders cut. This paper also describes reasons for the implementation of the Benders decomposition in liberalized power market. For better understanding a simple example is provided at the end of the paper.

Key words: Benders decomposition, maintenance planning, mathematical programming, optimization, power market liberalization, restructuring

1. UVOD

U širem smislu, postoje dvije vrste održavanja postrojenja u elektroenergetskom sustavu: održavanje proizvodnih jedinica i održavanje prijenosnih vodova. U okomito ustrojenim elektroprivredama raspored održavanja elektrana, transformatorskih stanica, rasklopnih postrojenja i prijenosnih vodova stvarao se paralelno i usklađivao s jednog mjesta. Velika prednost ovakvog centraliziranog odlučivanja bila je mogućnost nalaženja optimuma između pouzdanosti i troškova za cijeli sustav. Budući da se u okomito ustrojenim elektroprivredama problem planiranja održavanja promatra iz iste perspektive, mnogi zahtjevi se istovremeno uzimaju u obzir i nema sukobljenih interesa.

Neki od zahtjeva koje je potrebno poznavati za planiranje održavanja [1]:

- broj članova ekipe za održavanje,
- vremenski interval u kojem može biti izvedeno održavanje postrojenja,
- vremensko trajanje održavanja: vrijeme potrebno za održavanje,
- redoslijed prvenstva: određena postrojenja trebaju biti održavana prije drugih,
- ponovljeno održavanje: određena postrojenja trebaju biti održavana češće u određenom vremenu,
- zahtjev za opterećenjem,
- nominalni kapacitet postrojenja,
- geografski zahtjevi – maksimalni broj postrojenja koje je moguće održavati u svakom području,
- broj prisilnih ispada i pouzdanost postrojenja te
- pouzdanost sustava.

2. PROMJENE U ODREĐIVANJU RASPOREDA ODRŽAVANJA USLIJED OTVARANJA TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Uslijed restrukturiranja tržišta električne energije, koje je počelo krajem 80-ih godina prošlog stoljeća i nejednoliko zahvaća svjetske regije, dolazi do promjene u organiziranju održavanja elemenata elektroenergetskog sustava.

Cilj uvođenja otvorenog tržišta električne energije je povećanje učinkovitosti elektroenergetskog sektora, što se teorijski postiže povećanjem broja subjekata koji nude pojedine usluge [2]. Zbog toga se mijenja način određivanja rasporeda održavanja. Naime, u okomito ustrojenim elektroprivredama, isti subjekt je upravljao i proizvodnjom i prijenosom i distribucijom, što je pojednostavljalo problem stvaranja rasporeda održavanja proizvodnih i prijenosnih postrojenja zbog usklađenosti djelovanja [3]. Restrukturiranjem elektroenergetskih kompanija, taj problem postaje složeniji, jer pojedina proizvodna postrojenja imaju različite vlasnike, a ti vlasnici imaju ugovore o isporuci koje moraju poštivati. Budući da operator sustava mora svim sudionicima tržišta omogućiti nediskriminirajuće uvjete poslovanja, a ujedno visoku razinu pouzdanosti elektroenergetskog sustava i najjeftiniju moguću cijenu električne energije potrošačima u postojećim uvjetima, potrebno je složeni raspored održavanja optimizirati da se svi ti uvjeti zadovolje.

Teorijski, održavanje proizvodnje i prijenosa može se promatrati neovisno. Međutim, zahtjevi sustava kao što su ograničenja prijenosa, energetske potrebe i zahtjevi na pouzdanost čvrsto povezuju oba rješenja kako bi omogućili praktičnu optimizaciju i pronalazak najisplativijeg zajedničkog rješenja ova dva problema.

Problem planiranja održavanja prijenosnih vodova prvotno je bio uključen kao ograničenje za rješenja održavanja proizvodnih jedinica. Međutim, uvođenjem otvorenog tržišta električne energije u velike moderne elektroenergetske sustave, planiranje održavanja prijenosnog sustava postao je zaseban dio jer proizvodne jedinice i prijenosni vodovi u liberaliziranom okružju pripadaju potpuno različitim subjektima (vlasnicima).

Funkcionalna raspodjela prijenosa i proizvodnje stvara probleme vezane uz provođenje i planiranje održavanja. Dodatna opterećenja na održavanje prijenosnog sustava stvaraju se pri dodatnoj proizvodnji i potrebnim žurnim rasterećenjima, kada treba uključiti vodove koji se održavaju. Slični učinci mogu se javiti kada se agregati odvajaju od mreže zbog održavanja. Iz toga slijedi da se planovi održavanja moraju usklađivati preko nezavisnog tijela kako bi se postigla pouzdanost i ekonomska učinkovitost. Budući da se konkurentski interesi proizvodnih i prijenosnih tvrtki najčešće ne podudaraju, operator sustava u ovakvim uvjetima rješava sukobe oko planova održavanja proizvodnih i prijenosnih postrojenja.

Operator prijenosnog sustava treba otkazati ili prerasporediti planirane izlaske iz pogona generatora i prijenosnih vodova zbog održavanja ako ta isključenja ozbiljno ugrožavaju sustav. Iskapčanje prijenosnih vodova može ugroziti tržište zbog značajnih promjena u mogućnostima prijenosa.

Da bi odobrio, prekinuo ili promijenio predviđeni plan održavanja, nezavisni operator sustava mora razviti protokol o usklađivanju iskapčanja kako bi ispoštovao planove iskapčanja generatora i prijenosnih vodova koji bi trebali održati pouzdanost i sigurnost sustava, te uzeti u obzir ekonomsku tržišnu vrijednost imovine proizvodnih i prijenosnih tvrtki. Nezavisni operator sustava također treba provjeriti da li planirani raspored održavanja različitih subjekata ima namjeru dobivanja nepoštene tržišne prednosti ili zadobivanja tržišne moći dizanjem cijena iznad kompetitivnih razina.

3. ČIMBENICI RESTRUKTURIRANOG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Tri najbitnija čimbenika restrukturiranog elektroenergetskog sustava su raspoloživost, pouzdanost i ekonomičnost.

3.1 Raspoloživost

Raspoloživost, koja se definira kao broj radnih sati postrojenja podijeljen s ukupnim brojem sati u promatranom periodu, otvaranjem tržišta električne energije dobiva na značaju zbog važnosti poštivanja bilateralnih ugovora između proizvođača i opskrbljivača električne energije. Ako proizvođač električne energije, zbog prisilnog izlaska iz pogona uslijed kvara, nije u mogućnosti ispoštovati ugovor, dužan je platiti kaznu. Ako se to dogodi, cijena električne energije na veletržištu raste jer opskrbljivač mora dogovoriti hitnu isporuku električne energije od drugog proizvođača. Tada se javlja mogućnost da zbog maksimizacije profita vlasnici velikih kompanija odgode predviđeno preventivno održavanje svojih proizvodnih postrojenja, što može značajno utjecati na smanjenje radnog vijeka opreme elektrane[4]. Ovo ukazuje da cijena električne energije u liberaliziranom tržištu ovisi o trenutnoj ponudi i potražnji, a ne o cijeni proizvodnje [5].

Nadalje, problemi se javljaju i zbog angažiranja vanjskih izvođača koji izvode poslova održavanja. Naime, budući da su elektrane složena postrojenja s mnoštvom specifične opreme, restrukturiranjem poslovanja očekuje se smanjenje osoblja koje vodi elektranu i provodi se eksternalizacija, što znači da većinu poslova održavanja izvode specijalizirani vanjski izvođači. Nakon odgode pojedinih poslova održavanja, osim ponovnog usklađivanja rasporeda održavanja s operatorom sustava zbog promjene datuma planiranog izlaska iz pogona, potrebno je ponovo uskladiti planove sa specijaliziranim vanjskim izvođačima, čiji je broj, te čiji su kapaciteti ograničeni.

3.2 Pouzdanost i ekonomičnost

Pouzdanost i ekonomičnost su najčešće suprotstavljeni zahtjevi. Povećanje pouzdanosti zahtijeva veća izdavanja i troškove održavanja i dijagnostičkih pregleda, što smanjuje ekonomičnost. Stoga se u matematičkim modelima optimizacije rasporeda održavanja troškovi smatraju ciljem optimizacije, a pouzdanost se predstavlja brojnim ograničenjima. Budući da je broj ograničenja i varijabli jako velik, diferencijalni i integralni račun nije pogodan, te se u ovom radu za optimiziranje rasporeda održavanja, što matematički predstavlja pronalazak minimuma funkcije cilja, predlaže upotreba matematičkog programiranja, odnosno Bendersove dekompozicije.

4. STVARANJE PLANOVA ODRŽAVANJA

Cilj proizvodne tvrtke je produljenje životnog vijeka proizvodnih jedinica odgovarajućim održavanjem i stvaranje dobiti trgovanjem energijom. Cilj prijenosne tvrtke je održavanje prijenosnih vodova u zadovoljavajućem stanju i stvaranje dobiti prijenosom energije. Operator sustava jamči pouzdanost sustava i prilikom odlučivanja ne uzima u obzir profit proizvodnih i prijenosnih tvrtki. Zbog toga je jako teško tražiti zajedničke ciljeve optimizacije za planove održavanja postrojenja u restrukturiranim uvjetima, a pogotovo jer su ciljevi i potrebe ovih subjekata potpuno drugačiji, pa će njihove pojedinačne formule i rješenja problema biti također drugačiji.

Planiranje održavanja utvrđuje planove preventivnih isključenja u određenom vremenskom razdoblju, najčešće jedne godine. Općenito, prilikom pronalaženja rješenja vremensko razdoblje u kojem se obavlja održavanje se razdjeli na manje vremenske intervale, kao što su tjedni, i tada se određuje kada počinje isključenje pojedinog objekta kako bi se optimizirao njegov rad.

Rješenje problema planiranja održavanja u restrukturiranim sustavima sastoji od dva odvojena koraka. U prvom koraku vlasnik postrojenja izrađuje plan održavanja. U drugom koraku, taj plan se šalje nezavisnom operatoru sustava na ispitivanje da li udovoljava svim zahtjevima sustava. Kako su proizvodne i prijenosne tvrtke neovisni subjekti u restrukturiranom sustavu, za usklađivanje i optimiziranje planiranja održavanja koristi se mješovito cjelobrojno programiranje. Problem se općenito dijeli na jedan glavni problem i nekoliko podproblema koji se iteracijski rješavaju dokle god se ne dobije zadovoljavajuće rješenje.

5. MATEMATIČKO PROGRAMIRANJE

Optimiziranje troškova u matematičkom smislu znači traženje minimuma funkcije troškova. Za rješavanje ovog problema nije pogodan klasični matematički aparat diferencijalnog i integralnog računa. Stoga je bilo potrebno razviti teoriju i konstruirati posebne metode pomoću kojih je moguće rješavati složene probleme pronalaska ekstrema, često s velikim brojem varijabli i ograničenja koja mogu biti u obliku jednadžbi ili nejednadžbi. Tako je prije šezdesetak godina nastala disciplina matematičko programiranje, koja se razvijanjem snage i brzine računala danas sve više primjenjuje u praksi.

Problem matematičkog programiranja sastoji se u određivanju ekstrema funkcije na nekom skupu. Neka je $f: S \mapsto R$ funkcija od n varijabli $x_1, x_2, \dots, x_n$ definirana na skupu S iz euklidskog prostora $\mathbb{R}^n$. Tada problem matematičkog programiranja glasi:

$$\text{minimizirati } f(x) \quad (1)$$

uz ograničenja

$$x \in S \quad (2)$$

gdje je $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ vektor, dok T u eksponentu označava transpoziciju. Dakle, treba naći točku (vektor) $x^* \in S$, koja ne mora postojati, sa svojstvom:

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in S \quad (3)$$

Funkcija koju treba minimizirati zove se funkcija cilja, a skup S je skup mogućih (ili dopustivih) rješenja. Točka $x^* \in S$ je moguće rješenje za koje se postiže minimalna vrijednost funkcije cilja i zove se optimalno rješenje problema (1)-(2).

Najčešće se problem matematičkog programiranja promatra u obliku:

$$\min f(x) \quad (4)$$

uz ograničenja

$$g_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$h_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

$$x \in G \quad (7)$$

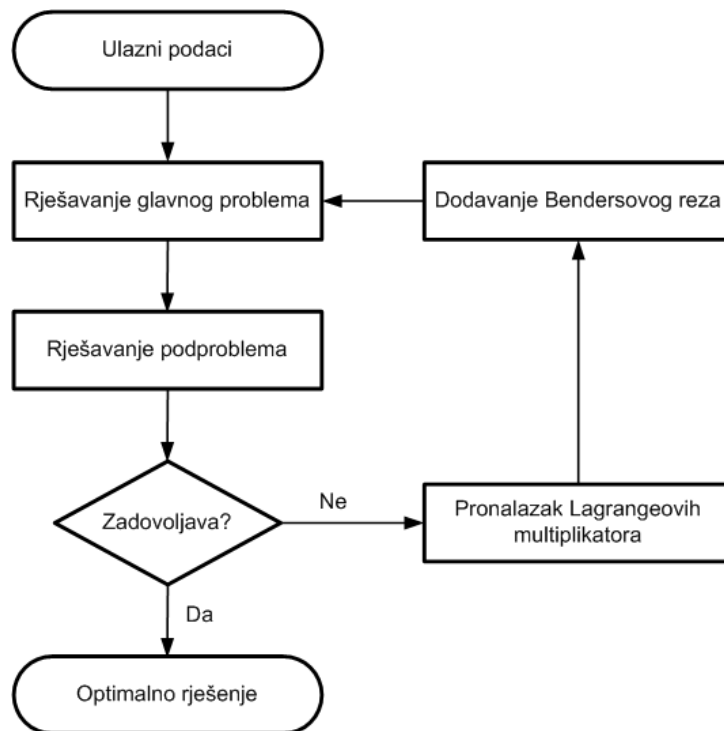
Pritom su $g_i: \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ i $h_j: \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ realne funkcije, dok je $G \subseteq \mathbb{R}^n$. Ograničenja (5) su u obliku jednadžbi, ograničenja (6) su u obliku nejednadžbi, dok su (7) najčešće ograničenja nenegativnosti varijabli, pa je skup $G = \{x \mid x \in \mathbb{R}^n, x \geq 0\}$.

6. BENDERSOVA DEKOMPOZICIJA

Bendersova dekompozicija razvijena je za rješavanje mješovitih cjelobrojnih problema. Budući da je zasnovana na dualnoj teoriji linearnog programiranja [6], izvorni problem se rastavlja na glavni problem i podproblem. Tok rješavanja glavnog problema počinje sa samo nekoliko ili bez ijednog ograničenja. Podproblem se koristi kao test da bi se provjerilo da li rješenje glavnog problema zadovoljava preostala ograničenja. Ako da, rješenje je optimalno jer je funkcija cilja minimizirana s obzirom na sva ograničenja. Ako ne, ograničenje koje je najmanje zadovoljeno dodaje se glavnom problemu i glavni problem se

ponovno riješava s više ograničenja. Za dobivanje konačnog rješenja pomoću Bendersovog algoritma, potrebne su iteracije između glavnog problema i podproblema. Kako je varijabla y obično cjelobrojna, glavni problem je cjelobrojni problem. Podproblem je problem linearnog programiranja koji testira optimalnost rješenja glavnog problema i, ako je potrebno, dodaje najmanje zadovoljeno ograničenje, to jest najdublji rez, glavnom problemu.

Nakon rješavanja glavnog problema i pronalaska optimalnog rasporeda održavanja uz zadane uvjete, rješavanjem podproblema provjerava se da li taj raspored zadovoljava sva ograničenja podproblema. Ukoliko zadovoljava, proračun je gotov jer je pronađen optimalni raspored održavanja. Ukoliko ne zadovoljava, pronalaze se Lagrangeovi multiplikatori te se glavnom problemu dodaje novo ograničenje, Bendersov rez, i on se ponovo rješava. Tok proračuna je grafički prikazan na slici 1.



Slika 1. dijagram toka Bendersove dekompozicije

6.1 Matematički opis Bendersove dekompozicije

Problem koji treba optimizirati ima sljedeći oblik:

$$\text{Min} \sum_t \sum_i \{C_{it}(1-x_{it}) + c_{it}g_{it}\} \quad (8)$$

uz ograničenja sustava:

$$Sf + g + r = d \quad (9)$$

$$g \leq \bar{g} \cdot x \quad (10)$$

$$|f| \leq \bar{f} \quad (11)$$

$$\sum_i r_{it} \leq \varepsilon \quad (12)$$

gdje je:

C_{it}	troškovi održavanja agregata i u vremenskom intervalu t
c_{it}	troškovi rada agregata i u vremenskom intervalu t
x_{it}	status održavanja agregata i u vremenskom intervalu t

g_{it}	proizvodnja agregata i u vremenskom intervalu t
S	matrica incidencije čvor-grana
f	vektor toka djelatne snage
g	vektor proizvodnje djelatne snage u vremenskom intervalu t
r	vektor manjka djelatne snage u vremenskom intervalu t
d	vektor potrošnje djelatne snage u vremenskom intervalu t
$\bar{g}$	vektor najveće moguće proizvodnje agregata
$\bar{f}$	vektor prijenosne moći voda
ε	dopušteni manjak djelatne snage

Nepoznate varijable x_{it} u (8) su cjelobrojne, a C_{it} , c_{it} i g_{it} su kontinuirane varijable. Cilj je minimizirati funkciju cilja (8) poštujući ograničenja sustava (9)-(12). Ako je agregat u vremenskom intervalu t izvan pogona zbog održavanja, varijabla x_{it} ima vrijednost 0, inače ima vrijednost 1.

Ograničenje (9) je jednadžba jednakosti vršnog opterećenja i proizvodnje, a ograničenja (10) i (11) predstavljaju proizvodni i prijenosni kapacitet. Posljednje ograničenje (12) zadaje dopušten manjak neraspoložive vršne djelatne snage.

6.2 Bendersov rez

Ukoliko optimalno rješenje dobiveno rješavanjem glavnog problema ne zadovoljava sva ograničenja podproblema, glavni problem se ponovno rješava s dodatnim ograničenjem, tzv. Bendersovim rezom. Taj rez sadrži ograničenje najmanje zadovoljenog ograničenja u podproblemu i ima oblik:

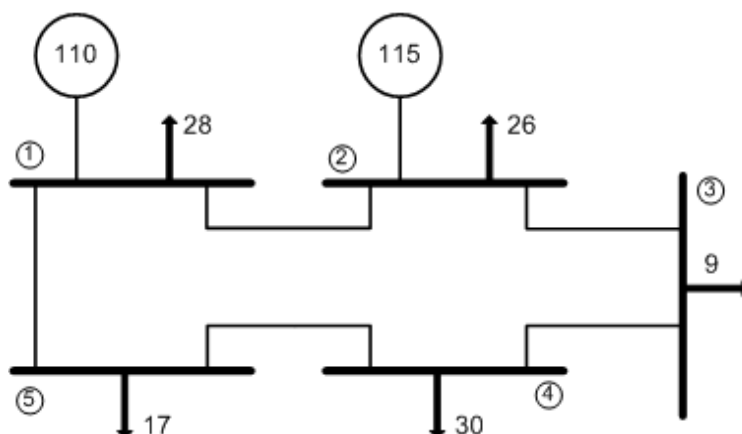
$$\sum_i r_{it}^n + \sum_i \lambda_{it}^n \bar{g}_i (x_{it}^n - x_{it}) \leq \varepsilon \quad (13)$$

gdje λ_{it}^n predstavlja granično smanjenje manjka djelatne snage u n -toj iteraciji ako se proizvodnja agregata i poveća za 1 MW.

Bendersov rez eliminira sva rješenja koja ne zadovoljavaju tražene uvjete.

7. PRIMJER PRIMJENE BENDERSOVE DEKOMPOZICIJE

Za mrežu na slici 2 potrebno je odrediti optimalan raspored održavanja oba generatora. Maksimalna djelatna snaga agregata u prvom čvorištu je 110 MW, a agregata u drugom čvorištu je 115 MW. Vremenski period, tzv. prozor, u kojem se može provesti održavanje traje 4 tjedna, a održavanje svakog agregata traje tjedan dana. U svakom čvorištu su zadane potražnje djelatne snage u MW. Dozvoljen manjak snage u promatranom dijelu sustava je 20 MW.



Slika 2. mreža na kojoj se provodi Bendersova dekompozicija

Dodatno, u nekim tjednima je predviđeno održavanje dalekovoda pa je prijenosna moć vodova za pojedine tjedne dana u tablici I. Ovdje se uočava da se u drugom tjednu održava vod između čvorišta 3 i 4, a u trećem tjednu vod između čvorišta 2 i 3.

Tablica I. prijenosna moć vodova po tjednima

tjedan	f15	f12	f23	f34	f45
1	40	40	50	50	40
2	40	40	50	0	40
3	40	40	0	50	40
4	40	40	50	50	40

Budući da nije svejedno u kojem će se tjednu koji agregat održavati, na temelju brojnih čimbenika određuju se kazneni faktori. Ti faktori predstavljaju varijabilne troškove, a na njih utječu predviđena cijena električne energije, cijena goriva za termoelektre, protok vode za hidroelektre i slično. Troškovi samog održavanja su nevarijabilni i uvijek jednaki za razmatrani period te za svaki agregat iznose 100 pu (relativnih jedinica). Iznos varijabilnih troškova ovisi o kaznenim faktorima i funkcija cilja je minimiziranje nevarijabilnih troškova uz zadovoljenje svih uvjeta sigurnosti i pouzdanosti sustava. Kazneni faktori po tjednima su zadani u tablici II. Važno je napomenuti da ovdje izneseni kazneni faktori služe samo kao primjer. Za određivanje realnih kaznenih faktora potrebni su zahtjevniji i opsežniji proračuni te podaci iz prošlosti, kao i predviđanja kretanja cijene električne energije i goriva u budućnosti.

Tablica II. kazneni faktori za održavanje agregata po tjednima

tjedan	penalizirajući faktor
1	1.33
2	1.08
3	1.00
4	1.28

7.1 Tijek proračuna

Rješavanjem glavnog problema u prvoj iteraciji, bez ijednog ograničenja, za optimalno rješenje dobiva se raspored po kojem se oba agregata trebaju održavati u 3. tjednu (tablica III). Tada nema varijabilnih troškova jer je kazneni faktor za oba agregata 1.00. Međutim, tada se u trećem tjednu javlja manjak snage od 110 MW, što je i logično jer niti jedan od dva agregata nije u pogonu, a ukupna vršna potrošnja je 110 MW.

Tablica III. predviđeni optimalni raspored održavanja agregata

agregat	1. tjedan	2. tjedan	3. tjedan	4. tjedan
1	pogon	pogon	održavanje	pogon
2	pogon	pogon	održavanje	pogon

Budući da nije zadovoljen podproblem, generira se Bendersov rez, koji se dodaje glavnom problemu i on se opet rješava s dodanim ograničenjem. Za određivanje Bendersovog reza potrebno je pronaći Lagrangeove multiplikatore za oba agregata. Lagrangeov multiplikator ima vrijednost 1 ako bi povećanje proizvodnje tog agregata za 1 MW smanjilo ukupni manjak djelatne snage za 1 MW. Budući da je u drugom tjednu vod 3-4 nedostupan, nastaje zagušenje na vodu 1-5 i povećanje proizvodnje bilo kojeg agregata ne smanjuje ukupni manjak snage u promatranom dijelu mreže. Suprotno tome, povećanje proizvodnje bilo kojeg agregata za 1 MW u trećem tjednu bi smanjilo manjak djelatne snage za 1 MW. Stoga Lagrangeov multiplikator za oba agregata iznosi $\lambda = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$.

Rješenje glavnog problema u drugoj iteraciji predlaže da se manji agregat održava u drugom, a veći u trećem tjednu. Važno je uočiti da rješenje uključuje 8 pu varijabilnih troškova koji predstavljaju gubitke elektrani. Rješavanjem podproblema se određuju manji snage u pojedinim tjednima: 7 MW u drugom i 16 MW u trećem tjednu. Budući da je ukupni manjak snage manji od traženih 20 MW, sva su ograničenja zadovoljena i predloženo rješenje glavnog problema je optimalno rješenje određivanja planova održavanja ova dva agregata u zadanom vremenskom razdoblju sa zadanim kaznenim faktorima.

Konačan optimalan raspored održavanja je prikazan u tablici IV.

Tablica IV. predviđeni optimalni raspored održavanja agregata

agregat	1. tjedan	2. tjedan	3. tjedan	4. tjedan
1	pogon	održavanje	pogon	pogon
2	pogon	pogon	održavanje	pogon

8. ZAKLJUČAK

U uvjetima otvorenog tržišta električne energije potrebno je izmijeniti metode određivanja planiranja održavanja svih elemenata elektroenergetskog sustava. Naime, do sada je stvaranje tih planova bio interni dogovor unutar okomito ustrojene elektroprivrede, a sada treba postojati transparentan sustav kojim će svi učesnici tržišta biti zadovoljni. Zbog složenosti toga problema, a prvenstveno zbog brojnih ograničenja, mora se uzeti u obzir najbolja metoda optimizacije kojom će se smanjiti cijena pouzdanosti sustava i samim time cijena električne energije potrošačima.

Bendersova dekompozicija je relativno jednostavna metoda za provođenje takvih proračuna. Ističe se jako brzom konvergencijom zbog učinkovitosti Bendersovog reza. Najveći problem za njeno korištenje predstavlja precizno i točno određivanje kaznenih faktora, koji trebaju sadržavati brojne kaznene komponente, a važan je i njihov međusobni odnos.

5. LITERATURA

- [1] M. Shahidehpour, M. Marwali, "Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems", Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 2000.
- [2] G. Lagerstedt, N. Andersson, "Nuclear Power in the Competitive Nordic Electricity Market", The Uranium Institute, Twenty Third Annual International Symposium, rujan 1998.
- [3] M.G. Pollitt, "The Impact of Liberalisation on the Performance of the Electricity Supply Industry: an International Survey", Sidney Sussex College, Cambridge, listopad 1997.
- [4] H. Pandžić, "Utjecaj otvorenog tržišta električne energije na održavanje elemenata elektroenergetskog sustava", diplomski rad, FER-ZVNE, svibanj 2007.
- [5] S. Beder, "Power Failure", New Zeland Listener 190 (3309), listopad 2003. str. 22–24
- [6] L. Neralić, "Uvod u matematičko programiranje 1", Element, Zagreb, 2003.