

D) OBRAZLOŽENJE PRIJEDLOGA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

Model za optimalnu nabavku električne energije u konkurentnom tržišnom okruženju

1. Tip istraživanja

Istraživanje se bazira na matematičkom modeliranju tehničko-tehnoloških karakteristika i ograničenja kod velikih kupaca na tržištu električne energije (industrijski kapaciteti uključujući i njihove pripadajuće proizvodne kapacitete – vlastitu proizvodnju, snabdjevači), ugovornih produkata i njihovom uključivanju u optimizacioni problem podmirjenja ukupnih potreba čije se rješavanje provodi u okviru funkcija planiranja pogona tih kupaca unutar elektroenergetskog sistema, odnosno na tržištu električne energije. Precizan i sveobuhvatan model vremenske i po svojoj prirodi nelinearne karakterizacije performansi velikih kupaca električne energije nametnut je potrebom korištenja efikasnijih i tačnijih alata kao podrška i) odlukama u planiranju pogona, ii) poslovnim odlukama kod nabavke električne energije.

Modelom će biti obuhvaćene raspoložive mogućnosti za nabavku električne energije na tržištu (bilateralni ugovori, *power-exchange* (PX)¹, balansno tržište) u srednjeročnom vremenskom horizontu (godina) za velikog kupca uvažavajući karakteristike standardnih produkata sa kojima se trguje na tržištu električne energije (*baseload*², *peak*³, sat), kao i pravila i ograničenja na tržištu električne energije (balansno tržište – energija uravnoteženja, pomoćne usluge).

S obzirom da veliki industrijski kupci često posjeduju vlastite proizvodne kapacitete (vlastiti generatori električne energije), u model će biti uključene i karakteristike tih kapaciteta, što dodatno usložnjava problem, ograničava upotrebu robustnih optimizacionih tehnika, nameće korištenje empirijskih i heurističkih pravila, ili čak proizvodi kvazioptimalna rješenja. Zbog toga će se u teorijskom dijelu disertacije razviti precizan model koji uvažava kompleksnost karakteristika i pogonskih ograničenja kod velikih kupaca, ali na način da će se moći koristiti najefikasniji optimizacioni metodi koji uzimaju u obzir prednosti koje pruža formulacija i implementacija problema. Dodatno, model će uvažiti i potrebu za planskim zastojem postrojenja kupaca (zbog remontnih aktivnosti), i to tehnoloških cjelina za proizvodnju osnovnog proizvoda, ali i zastoje vlastitih generatora električne energije.

Dodatno, model će uvažiti i to da industrijski kupac participira na tržištu pomoćnih usluga kao pružalac usluge tercijarne rezerve.

Praktični dio disertacije jasno će ukazati na performanse predstavljenog modela i korištenih optimizacionih tehnika kroz studije slučajeva sa njihovom detaljnom analizom i diskusijom.

¹ Organizovano tržište gdje se trguje električnom energijom dan unaprijed, odnosno berza električne energije.

² Profil isporuke električne energije gdje je isporuka ista u svakom satu i svakom danu tokom perioda (od 00 do 24, svaki dan).

³ Profil vršne isporuke koja se definiše za svako tržište. Na evropskim tržištima je uobičajeno da je to isporuka sa istom snagom od 08 do 20 sati radnim danima (ponedjeljak – petak).

2. Problem kojim se bavi istraživanje

Već duži niz godina elektroprivredne kompanije diljem svijeta se restrukturiraju i iz pozicije monopola prelaze u tržišno orijentisane kompanije. Otvaranje i liberalizacija tržišta električne energije rezultirali su za krajnjeg kupca mogućnošću slobodnog izbora snabdjevača, a samim tim prouzrokovali značajne promjene u poslovnoj politici i krajnjih kupaca i elektroprivrednih kompanija. Razdvajanje elektroprivrednih djelatnosti, gubitak monopolske pozicije i otvaranje tržišta električne energije, su procesi koji imaju dubok uticaj na poslovanje svih učesnika na tržištu električne energije. Novi uslovi zahtijevaju i nove pristupe analizama. Postoji cijeli niz pristupa ekonomskim analizama tržišta električne energije, među kojima je i primjena opštih ekonomskih metoda i postupaka. Međutim, da bi se donijeli zaključci o ponašanju i djelovanju tržišta električne energije, potrebno je uzeti u obzir i specifičnosti električne energije kao „robe“ kojom se trguje. Na tržištu električne energije međusobno se prepliću tehnička ograničenja i ekonomske zakonitosti, pri čemu poseban uticaj ima praktička nemogućnost za skladištenje električne energije, odnosno izbalansiranosti proizvodnje i potrošnje (ponude i potražnje) u svakom trenutku. Priroda električne energije i njena specifičnost su jedan od osnovnih razloga zašto je tržište električne energije toliko vremenski zavisno, odnosno zbog čega je vremenska dinamika veoma bitna. Električna energija mora da se potroši u isto vrijeme kada se i proizvede, tako da se jednostavno ne ostavlja prostor da se određena količina energije „uskладиšti“ (ili „povuče sa skladišta“) nego mora postojati harmoniziranost i unaprijed definisan plan njene upotrebe za svaki vremenski period (uobičajeno sat ili 15 min). U cilju minimizacije finansijskog rizika, ali i povećanja sigurnosti, razvijeni su različiti trgovački mehanizmi i različita tržišta za razne vrste uslova isporuke (od dugoročnog – nekoliko godina unaprijed, preko srednjeročnog – nekoliko mjeseci do godina, do pomoćnih usluga – narednih nekoliko minuta).

Nakon liberalizacije tržišta električne energije najznačajnija nova karakteristika za učesnike na tržištu je finansijska neizvjesnost, odnosno postepeno nestajanje „fiksni cijena električne energije“ ili regulisanih tarifa. Uvođenjem tržišta učesnici na tržištu (elektroprivredne kompanije i kupci) se susreću sa svim rizicima koje nosi nastup na tržištu (pronalaženje snabdjevača, odnosno kupaca, cijene energije i usluga, naplata, garancije, prekogranični prijenosni kapaciteti i slično). Otvaranje tržišta i deregulacija nudi veću slobodu i fleksibilnost proizvođačima i snabdjevačima, ali istovremeno se pojavljuju i neke „problematične“ karakteristike tržišta kao što su promjenljivost cijena, problematika naplate, pravovremeno obezbjeđenje snabdjevača i slično. Jedan od najznačajnijih rizika je rizik od promjene cijena električne energije. Kompanije trebaju da se osiguraju dinamičkim upravljanjem nabavkama, odnosno plasmanom električne energije uz pomoć različitih vrsta ugovora.

Veliki kupci električne energije su aktivni sudionici procesa restrukturiranja elektroprivrednih kompanija i uspostave tržišta električne energije, odnosno stvaranja konkurentnog okruženja u elektroenergetskom sektoru. Praksa sklapanja ugovora po regulisanim cijenama postaje prošlost i veliki industrijski kupci u svom poslovanju dobijaju novi, značajan, poslovni rizik: cijenu električne energije koja se mijenja iz sata u sat. Dodatno, kupci mogu postati i prodavači energije, ali i pružaoci pomoćnih usluga.

Ambijent tržišne ekonomije zahtijeva sveobuhvatan i precizan model tehničkih, tehnoloških i troškovnih karakteristika i ograničenja kod velikih kupaca električne energije koji treba biti inkorporiran u funkcije optimalnog planiranja i odlučivanja, bez obzira da li je funkcionalni cilj minimizacija ukupnih operativnih troškova, ili maksimizacija profita. Problem koji će se tretirati

uzima u obzir oba ova funkcionalna cilja, što znači da će se moći primjenjivati u različitim scenarijima, što je imperativ modernog upravljanja.

Veliki kupci imaju mogućnost da nabave potrebnu energiju putem bilateralnih ugovora, putem vlastite proizvodnje i na dan unaprijed organizovanom tržištu električne energije (PX), a u slučaju da nakon završetka trgovine ne budu imali izbalansirane svoje potrebe i nabavke, razlika će im se tretirati kroz energiju uravnoteženja na balansnom tržištu.

Zaključivanjem bilateralnih ugovora kupac reducira rizik povezan sa promjenljivošću cijena električne energije (*volatility*) na dnevnom tržištu. Vlastita proizvodnja električne energije takođe redukuje rizik povezan sa cijenom na dnevnom tržištu, dok se u slučaju oslanjanja na nabavku potrebnih količina na dnevnom tržištu kupac izlaže, potencijalno neprihvatljivim, promjenjivim troškovima nabavke električne energije. Dakle, kupac se suočava sa problemom odabira količina energije prema bilo kojem od ovih načina njene nabavke (bilateralni ugovori, dnevno tržište, vlastita proizvodnja) [44].

Nabavka električne energije za velike kupce u deregulisanom okruženju generalno predstavlja plansko-operativni problem koji je adresiran na odabir takvog ugovornog portfolia (seta ugovora) i nalaženje takvog angažovanja vlastitih kapaciteta, koji će obezbijediti potreban miks u ukupno potrebnim količinama električne energije za proizvodnju osnovnog proizvoda i procesa koji prate osnovni proces (vlastita proizvodnja električne energije i/ili tehnološke pare) tokom svakog perioda vremenskog horizonta. Pri tome će zahtjev kupca za proizvodnjom osnovnog proizvoda biti zadovoljen pri minimalnim proizvodnim troškovima za nabavku električne energije, uz ispunjenje svih pridruženih ograničenja.

Ovakav pristup problemu karakterizacija je regulisanog ambijenta u kojem se provodi troškovno-bazirana optimizacija. Dakle, tri elementa su uključena u tradicionalni optimizacioni problem: cijena električne energije, aspekt sigurnosti, te minimizacija proizvodnih troškova.

U deregulisanom ambijentu veliki kupci električne energije u optimizaciju resursa uključuju novu dimenziju – „tržišnu cijenu električne energije“. Ovakav pristup ima razliku u odnosu na tradicionalni koncept i svodi se na profit-baziranu optimizaciju gdje se u proračun dodatno uključuje ugovorni portfolio za nabavku električne energije, energija uravnoteženja, prihodi i troškovi sa balansnog tržišta i prihodi sa tržišta pomoćnih usluga. Kupac, pored nabavke električne energije putem različitih vrsta standardnih produkata (ugovora) ima i mogućnost da i ostvari prihod od prodaje električne energije na tržištu i to putem vlastite proizvodnje električne energije, putem pružanja pomoćnih usluga, te putem energije uravnoteženja.

3. State-of-the-art

Tehnička literatura koja obrađuje nastup na tržištu električne energije samostalnog kupca nije tako brojna kao literatura koja tretira nastup na tržištu proizvođača i probleme povezane s tim, kao što su različite politike i strategije nudičenja energije (*bidding strategy*), problem optimalne raspodjele angažovanja jedinica i opterećenja na te jedinice (*self-scheduling unit commitment*) [68 – 70, 89, 94]. U svom radu [88] Xia i Elaiw su dali pregled istraživanja problema optimalnog dinamičkog dispečinga (*optimal power dynamic dispatch*).

Generalni aspekti nastupa na tržištu električne energije i alati koje kupci i snabdjevači trebaju da imaju da bi participirali na tržištu, obrađeni su od strane *Kirchena* [43], kao i *Trevina* [34].

Optimalni odgovor velikih potrošača na promjenljivu cijenu električne energije na dan unaprijed tržištu (*day-ahead*, *pool*, *power exchange*), *Xiao*, *Chung*, *Li*, *Boutaba* i *Hong* [71] rješavaju na način da traže rješenje blisko optimalnom koristeći raspoložive mogućnosti iz *Demand Response* programa (redukcija vršnog opterećenja, redukcija potrošnje, povećanje efikasnosti). *Daryanian* [72, 73] rješava taj problem na način da vrši ažuriranje dnevnog rasporeda (*rescheduling*) i upravljanje potrošnjom, dok *Wang*, *Kennedy* i *Kirtley* proširuju *Demand Response* program sa mehanizmom nuđenja na dnevnom tržištu [93].

Conejo, *Gonzales* i *Alguacil* [32] su razradili moguće opcije za velikog industrijskog potrošača električne energije koji nabavlja električnu energiju putem bilateralnih ugovora i na *pool*⁴-u. U cilju minimizacije troškova nabavke električne energije određuje se optimalni miks električne energije, odnosno količina koja će se nabaviti putem bilateralnih ugovora, količina koja će se nabaviti na *pool*-u i količina energije koja je proizvedena vlastitim generatorima.

Carrion, *Philpott*, *Conejo* i *Arroyo* [44] su predstavili metodologiju stohastičkog programiranja koja daje mogućnost snabdjevaču da maksimizira očekivani profit uz odgovarajući rizik u toku srednjeročnog perioda i to na način da sklopi *forward*⁵ ugovor(e) za nabavku električne energije i da odredi optimalni set prodajnih cijena za svoje kupce.

Principi *forward* ugovora koji su potencijalno korisni za kupce (*demand side*) su predstavljeni od strane *Gedra* [74], te *Ausubela* i *Cramtona* [96], dok su principi bilateralnih ugovora i prijedlog *sheme* za pregovorni par (proizvođač i potrošač) u cilju postizanja obostrano prihvatljivog benefita i rizika detaljno obrađeni od strane *Khatiba* i *Galiana* [59]. Bilateralne ugovore putem kojih se trguje većinom energije na tržištu i slučajeve kada dolazi do otkazivanja ili korekcije takvih ugovora obradio je *Palamarchuk* [90].

Gomez-Villalva i *Ramos* [42] su primjenili mješovito cjelobrojno linearno programiranje da bi riješili optimizacioni problem kod upravljanja nabavke električne energije, toplotne energije, gasa i nafte za industrijskog kupca koji potrebne energente nabavlja prema tržišnim uslovima.

Wang i *Zu* [41] su obradili način traženja optimalnog odnosa između energije nabavljene putem ugovora i energije nabavljene na aukcijama uz minimizaciju troškova i izbjegavanje rizika. Za rješavanje problema koristili su genetski algoritam koji koordinira troškove nabavke i rizika.

Istraživanja vezana za nabavku električne energije kroz tri kratkoročna vremenska horizonta, odnosno kroz tri vrste tržišta *day-ahead*, *intra-day* i balansnom tržištu su opisana i diskutovana od strane *Liu* i *Guana* [75, 76]. Upravljanje ugovornim portfoliom za snabdjevača koji se sastoji od „izvedenih ugovora“ (*derivative contracts*) tokom više perioda je analizirano od *Rocha* i *Kuhn* [86].

Plan nabavke električne energije po modelu za dan unaprijed (*day ahead schedule*), jedan je od često obrađivanih problema koji je najviše zastupljen u skorašnjoj literaturi [33, 45, 69, 70, 72, 73], dok je problem bilateralnih ugovora često obrađivan u literaturi, ali su uglavnom korištene specifične vrste bilateralnih ugovora ili ugovora za nabavku električne energije koji više

⁴) Pool je centralizovano organizovano tržište dan unaprijed

⁵ Ugovor između dvije strane o kupovini i prodaji električne energije u tačno dogovorenom vremenskom periodu u budućnosti.

odgovaraju „regulisanom pristupu“ kod preuzimanja električne energije (ToU - vrijeme korištenja, vršna snaga...) [32]. *Rebennack, Kallrath i Pardalos* [92] su obradili slučaj optimizacije portfolia kada snabdjevač nabavlja energiju na spot tržištu, od vlastitih proizvodnih objekata i putem *load-following* ugovora te primjenili realne podatke (Njemačka).

Podrška menadžmentu za odlučivanje o načinu kupovine i količinama, gdje je predloženo da se energija nabavlja putem višestrukih internet-baziranih aukcija, a da se količine energije odrede rješavanjem problema putem minimizacije troškova uz definisanje ograničenja, obrađena je od strane *Woo, Karimova i Horowitz* [58]. Robustan i fleksibilan alat za podršku odlučivanju (*Decision Support Tool*) za odabir ugovora za prodaju električne energije baziran na *Data-mining* tehnikama predstavljen je od strane *Figueiredo, Rodrigues, Pinto i Vale* [94].

Chao je u svom radu [87] obrazložio alternativne pristupe za učešće kupaca (potrošnje) na tržištu električne energije gdje se fokusirao na interakciju između tržišne cijene i regulisane cijene snabdijevanja. *Stacke i Cuervo* [91] su predložili model za određivanje cijena predviđen za primjenu na tržištima gdje se cijena određuje na principu marginalne cijene, ali i na tržištima gdje se cijena određuje na *pay as bid* principu.

4. Ciljevi istraživanja

Problem optimizacije (minimizacije) troškova nabavke električne energije za velike potrošače, tradicionalno je modeliran kao problem matematičkog programiranja koji je *kombinatorni, nelinearni, mješovito-cjelobrojni* i generalno *problem velikih dimenzija*. U postupku modeliranja ovako složenog problema bila su neophodna pojednostavljenja u formulaciji optimizacionog cilja (kriterijuma), ali i u sistemu tehničko-tehnoloških ograničenja kod takvih potrošača.

Cilj disertacije je da se predstavi:

- precizan opis i matematički tretman različitih vrsta ugovora koji postoje na tržištu električne energije i koji su od interesa za kupca kod dizajna programa njegovih nabavki;
- precizan opis i matematički tretman troškovnih karakteristika vlastitih proizvodnih jedinica i njenih tehničkih ograničenja;
- precizan opis i matematički tretman regulatorno-tržišnog okvira u kojem se odvija nabavka električne energije.

Funkcija cilja koju formiraju troškovi nabavke električne energije (različita tržišta, različit vremenski okvir i različite vrste ugovora), te troškovi pogona vlastitih generatora, generalno je nelinearna funkcija. Sistem ograničenja, posebno onih koji se odnose na vlastite proizvodne kapacitete kupca, takođe su modelirana sa nelinearnim izrazima i vremenski su međusobno povezana, što dodatno otežava rješavanje optimizacionog problema. Kompletna specifikacija i uobzirenje svih pogonskih ograničenja, kao i modeliranje različitih vrsta standardnih ugovora koji se koriste na tržištu električne energije, je neophodno za razvoj optimalnog programa nabavke električne energije na tržištu uz podršku vlastitih generatorskih kapaciteta za proizvodnju osnovnog proizvoda kod kupaca.

5. Zadaci istraživanja

Osnovni zadaci istraživanja sadržani su u:

- razvoju modela koji će biti osnov velikim kupcima za pripremu optimalnog programa nabavke električne energije na tržištu u vremenskom horizontu od godinu dana, uključujući pri tome i mogućnosti nabavke energije i na kraćim vremenskim osnovama na kojima se danas trguje na savremenim tržištima električne energije;
- razvoju modela koji u program ukupne nabavke električne energije uključuje i mogućnosti podmirenja dijela, ili svih, potreba kupca iz vlastitih proizvodnih kapaciteta, uz opciju da dio te proizvodnje (nakon podmirenja potreba kupca) bude plasiran na tržište;
- inkorporiranju različitih vrsta ugovora za nabavku električne energije u integralni model podmirenja ukupnih potreba za kupce;
- reduciranju matematičke i proračunske složenosti problema upotrebom efikasnih tehnika i transformacija originalnog problema u pojednostavljenu formu problema bez umanjavanja njegove preciznosti i tačnosti;
- upotrebi snažnih optimizacionih tehnika i alata za rješavanje postavljenog problema na realnim studijama slučaja.

U odnosu na objavljene radove sa ovom problematikom, istraživanjem u okviru disertacije će se proširiti modeli koji su primjenjivani. U [32, 71, 72, 73, 93, 44, 41, 33, 45, 69, 70, 92] su razradili moguće opcije za kupca, odnosno snabdjevača koji nabavlja električnu energiju na tržištu i to na *poolu* i/ili bilateralnom tržištu, odnosno *poolu*, *intraday* i balansnom tržištu [75, 76] dok će se istraživanjem razviti model koji će obuhvati sve vremenske domene tržišta električne energije u skladu sa aktuelnim standardnim dizajnom tržišta: bilateralno (godina unaprijed, mjesec unaprijed), organizovano dnevno tržište, balansno tržište (energija uravnoteženja) i pomoćne usluge. U [92] je obrađen slučaj optimizacije ugovornog portfolia koji se sastoji od energije sa *poola*, od vlastite proizvodnje i *load-following* ugovora, dok će se istraživanjem model proširiti na način da će se dodati energija iz bilateralnih standardnih ugovora i energija uravnoteženja umjesto *load-following* ugovora. Dodatno će usložiti model obrađen u [32] sa korištenjem više vlastitih generatora, energije uravnoteženja i mogućnošću pružanja pomoćnih usluga (tercijerana rezerva).

6. Obuhvat istraživanja

Disertacija će obuhvatiti sljedeće cjeline:

- I. *Uvod*
Motivacija, Rezime teze, Pregled tehničke literature i *state-of-the-art*, Korišteni proračunski metodi, Obim i ciljevi teze, Organizacija teze.
- II. *Modelovanje velikog industrijskog kupca*
Notacija, Tehničko-tehnološka ograničenja, Ukupni troškovi proizvodnje osnovnog proizvoda, Tradicionalna formulacija.

III. Modelovanje ugovornog portfolia

Notacija, Standardni dizajn tržišta električne energije, Tehnička ograničenja kod standardnih produkata, Modelovanje standardnih produkata.

IV. Modelovanje vlastitih proizvodnih kapaciteta

Notacija, Tehničko-tehnološka ograničenja kod vlastitih proizvodnih kapaciteta, Ukupni troškovi proizvodnje kod vlastitih proizvodnih kapaciteta.

V. Modelovanje pomoćnih usluga i energije uravnoteženja

Notacija, Tehnička ograničenja kod pomoćnih usluga, debalansa i energije uravnoteženja, Modelovanje ugovora i tehničkih ograničenja za pomoćne usluge i balansno tržište.

VI. Postavka modela

Postavka modela u centralizovanom uređenju elektroenergetskog sektora, Postavka modela u konkurentnom tržišnom okruženju, Uticajni faktori u funkciji cilja, Hibridni model funkcije cilja, Proračunska složenost problema.

VII. Tehnike rješavanja i algoritam rješavanja

Pregled aktuelnih tehnika rješavanja, Proračunske prednosti i nedostaci, Razvoj algoritamskog rješenja koje obuhvata postavljene ciljeve istraživanja.

VIII. Proračunski rezultati

Studije slučajeva, Ulazni podaci, Rezultati, Studija dobijenih raspodjela i pogonskih trajektorija, Studija kvaliteta rješenja i konvergencija.

IX. Zaključci, Doprinosi i Pravci za dalja istraživanja

Sumarizacija i zaključci, Doprinosi, Prednosti i nedostaci predstavljenog modela, Pravci za dalja istraživanja.

X. Prilozi

7. Metodologija istraživanja

Metodološki koncept u izradi doktorske disertacije bazira se na teorijskim razmatranjima, modeliranju, simulacijama različitih varijantnih test slučajeva, te analizi dobijenih rezultata.

8. Software-ski alati i laboratorijski resursi

U cilju provođenja studija slučajeva na odabranim test primjerima sa različitom veličinom proizvodnog portfolia, kako u fazama pripreme ulaznih podataka i obrade rezultata, tako i u pripremi programskog koda razvijenog modela, koristit će se sljedeći software-ski alati:

- *MatLab* (verzija 7.0), The MathWorks, Inc.;
- *LINGO* (verzija 7.0), LINDO Systems, Inc.;
- *MOSEK Solver Engine for Excel* – Premium Solver Platform (verzija 6.0), Frontline System, Inc.;

9. Značaj – doprinos predložene teme doktorske disertacije

Postavljeni ciljevi i zadaci u disertaciji ponudit će sljedeće doprinose:

1. razvoj integralnog i preciznog modela koji obuhvata submodel portfolia ugovora i submodel tehnološkog procesa kupca i tržišta na kojem taj kupac učestvuje;
2. razvoj fleksibilnog modela nabavke električne energije za velikog kupca koji se podjednako dobro uklapa u oba oblika organizacionog ustrojstva elektro-sektora (liberalizovani, odnosno regulisani);
3. razvoj fleksibilnog modela ugovornog portfolia koji se može primjeniti na bilo kojeg kupca (bez obzira na različitost tehnološkog procesa) i u bilo kojem organizacionom modelu tržišta (razvijeno, slabo razvijeno, prijelazni period, ...);
4. redukcija proračunske složenosti proizvodnog portfolia kupca uzrokovana prisustvom binarnih varijabli koje opisuju pogonsku politiku tehnoloških i proizvodnih kapaciteta tog kupca (optimalno angažovanje, optimalan raspored remonata, optimalna raspodjela izlaznih snaga, optimalno upravljanje opterećenjem), kao i odabir tipa ugovora;
5. aplikacija razvijenog modela na karakteristične tehnološke procese velikih kupaca u Bosni i Hercegovini čije tržište je u početnoj razvojnoj fazi uz razradu mogućih scenarija koji uključuju energiju uravnoteženja, razvoj *day-ahead* tržišta i nabavku na berzi, ...;
6. korištenje modernih računarskih metoda i razvoj vlastitog algoritma za rješavanje postavljenog problema.

II) PREGLED POLAZNE LITERATURE IZ OBLASTI OBUHVAĆENE ISTRAŽIVANJEM

- [1] D. S. Kirschen, G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 2004.
- [2] S. Stoft, *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*, IEEE Press & WILEY-INTERSCIENCE, 2002.
- [3] C. Harris, *Electricity markets Pricing, Structured and Economics*, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 2006.
- [4] A. J. Conejo, M. Carrión, J. M. Morales, *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, International Series in Operations Research & Management Science, Springer Science+Business Media, 2010.
- [5] H. Khatib, *Economic Evaluation of Projects in the Electricity Supply Industry*, IET, Herts, 2003.
- [6] B. Murray, *Electricity markets: investment, performance and analysis*, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 1998.
- [7] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, *Power generation, operation and control*, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- [8] J. H. Chow, F. F. Wu, J. Momoh, *Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems: Optimization, Control and Computational Intelligence*, Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
- [9] R. Narayan, *Optimization principles : practical applications to the operation and markets of the electric power industry*, IEEE Press Power Engineering Series, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [10] M. Shahidehpour, M. Alomoush, *Restructured Electrical Power Systems: Operation, Trading, and Volatility*, Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [11] J. A. Momoh, *Electric Power System Applications of Optimization*, Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [12] F. I. Denny, D. E. Dismukes, *Power System Operations and Electricity Markets*, CRC Press LLC, New York, 2002.
- [13] M. Greer, *Electricity cost modeling calculations*, Academic Press, Burlington, 2011.
- [14] J. Casazza, F. Delea, *Understanding Electric Power Systems: An Overview of the Technology, the Marketplace, and Governmental Regulation, Second Edition*, IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [15] E. Sinclair, *Volatility trading*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

- [16] H. Spliethoff, *Power Generation from Solid Fuels*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [17] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, *Embedded Generation*, The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [18] S. C. Bhattacharyya, *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*, Springer-Verlag London Limited, 2011.
- [19] M. E. El-Hawary, G. S. Christensen, *Optimal economic operation of electric power systems*, Academic Press, New York, 1979.
- [20] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, IEEE, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [21] D. W. Edwards, *Energy Trading & Investing: Trading, Risk Management, and Structuring Deals in the Energy Markets*, McGraw-Hill, 2010.
- [22] K. B. Leggio, D. L. Bodde, M. L. Taylor, *Managing Enterprise Risk: What the Electric Industry Experience Implies for Contemporary Business*, Elsevier, 2006.
- [23] J. Schlabbach, K. Rofalski, *Power System Engineering: Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.
- [24] J. Kallrath, P. M. Pardalos, S. Rebennack, M. Scheidt, *Optimization in the Energy Industry*, Springer-Verlag Berlin, 2009.
- [25] A. Gomez-Exposito, A. J. Conejo, C. Canizares, *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*, CRC Press, Electric Power Engineering Series, 2008.
- [26] D. W. Bunn, *Modelling Prices in Competitive Electricity Markets*, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, 2004.
- [27] B.F. Hobbs, M.H. Rothkopf, R.P. O'Neill, H. Chao, *The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models*, Kluwer, 2002.
- [28] F. Lévêque, *Competitive electricity markets and sustainability*, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham, UK, 2006.
- [29] J. Casazza, F. Delea, *Understanding Electric Power Systems: An Overview of the Technology and the Marketplace*, IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [30] M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management*, Wiley-IEEE Press, 2002.
- [31] S. C. Bhattacharyya, *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*, Springer-Verlag London Limited, 2011.

- [32] A. J. Conejo, J. J. Fernandez-Gonzalez, N. Alguacil, *Energy procurement for large consumers in electricity markets*, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 152, No. 3, May 2005.
- [33] A. B. Philpott, E. Pettersen, *Optimizing Demand-Side Bids in Day-Ahead Electricity Markets*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, May 2006.
- [34] L. Trevino, *Large industrials and electricity sourcing during the process of liberalization: Power sourcing strategies according to different market structures*, EPFL CDM, Lausanne, 2008.
- [35] R. W. Seifert, U. W. Thonemann, W. H. Hausman, *Optimal procurement strategies for online spot markets*, European Journal of Operational Research, Vol. 152, No. 3, February 2004.
- [36] X. Brusset, *Comparison between minimum purchase, quantity flexibility contracts and spot procurement in a supply chain*, EconWPA – series Econometrics, 2005.
- [37] I. Vehvilainen, *Basics of electricity derivative pricing in competitive markets*, Applied Mathematical Finance, Vol. 9, No. 1., 2002.
- [38] A. J. Conejo, M. Carrion, R. Garca-Bertrand, *Medium-Term Electricity Trading Strategies for Producers, Consumers and Retailers*, International Journal of Electronic Business Management Vol. 5; No. 3; 2007.
- [39] Jason W Black, *Demand Response as a Substitute for Electric Power System Infrastructure Investments*, MIT, The Carnegie Mellon Electricity Industry Center Seminar, 2005.
- [40] C. L. Su, *Optimal Demand-Side Participation in Day-Ahead Electricity Markets*, PhD Thesis, The University of Manchester, the Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2007.
- [41] H. Wang, B. Zou, *A research on the purchase quantity allocation between contract market and power auction market*, International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE 2007) Proceedings, 2007.
- [42] E. Gómez-Villalva, A. Ramos, *Optimal Energy Management of an Industrial Consumer in Liberalized Markets*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 18, No. 2, May 2003.
- [43] D. S. Kirschen, *Demand-Side View of Electricity Markets*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 18, No. 2, May 2003.
- [44] M. Carrión, A. B. Philpott, A. J. Conejo, J. M. Arroyo, *A stochastic programming approach to electric energy procurement for large consumers*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2., 2007.
- [45] C. Goldman, N. Hopper, R. Bharvirkar, B. Neenan, R. Boisvert, P. Cappers, D. Pratt, K. Butkins, *Customer Strategies for Responding to Day-Ahead Market Hourly Electricity Pricing*, Lawrence Berkeley National Laboratory prepared for the California Energy Commission, 2005.

- [46] Y. Hongming, Z. Yeping, T. Xiaojiao, *System Dynamics Model for Demand Side Management*, IEEE 3rd International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2006.
- [47] M. Povh, S.-E. Fleten, *Modeling Long-Term Electricity Forward Prices*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 24, No. 4, November 2009.
- [48] A. J. Conejo, F. J. Nogales, M. Carrión, J. M. Morales, *Electricity pool prices: long-term uncertainty characterization for futures-market trading and risk management*, Journal of The Operational Research Society - J OPER RES SOC , Vol. 61, No. 2, 2010.
- [49] B. Lu, M. Shahidehpour, *Unit Commitment With Flexible Generating Units*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005.
- [50] S. H. Fathi, A. Shabani, *Optimization of energy consumption and load management in industries*, Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Applications of electrical engineering (AEE'05), 2005.
- [51] L. Jiang, S. H. Low, *Multi-period Optimal Energy Procurement and Demand Responses in Smart Grid with Uncertain Supply*, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2011.
- [52] K. Zare, M. P. Moghaddam, M. K. Sheikh-El-Eslami, *Electricity procurement for large consumers based on Information Gap Decision Theory*, Elsevier Energy Policy Vol. 38, No. 1, 2010.
- [53] H. Y. Benson, *Optimal pricing and procurement strategies in a supply chain with multiple capacitated suppliers*, Proceedings of the Northeast Decision Sciences Institute Meeting, Philadelphia, USA, 2005.
- [54] B. Peleg, H. L. Lee, W. H. Hausman, *Short-Term E-Procurement Strategies Vs. Long-Term Contracts*, Production and Operations Management, Vol. 11, No. 4, December 2002.
- [55] M. Liu, F. F. Wu, Y. Ni, *Market allocation between bilateral contracts and spot market without financial transmission rights*, Power Engineering Society General Meeting, IEEE 08/2003; Vol. 2, 2003.
- [56] P. Bajpai, S. N. Singh, *Electricity Trading In Competitive Power Market: An Overview And Key Issues*, International Conference On Power Systems, ICPS2004, Kathmandu, 2004.
- [57] A. R. Hatami, H. Seifi, M. K. Sheikh-El-Eslami, *Optimal selling price and energy procurement strategies for a retailer in an electricity market*, Electric Power Systems Research, ELSEVIER, Vol. 79, No. 1, January 2009.
- [58] C. K. Woo, R. I. Karimova, I. Horowitz, *Managing electricity procurement cost and risk by a local distribution company*, Energy Policy, ELSEVIER, Vol. 32, No. 5, March 2004.
- [59] S. El Khatib, F. D. Galiana, *Negotiating Bilateral Contracts in Electricity Markets*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, May 2007.

- [60] L. P. Garcés, A. J. Conejo, *Weekly Self-Scheduling, Forward Contracting, and Offering Strategy for a Producer*, IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 25, No. 2, May 2010.
- [61] L. G. B. Marzano, A. C. G. Melo, R. C. Souza, *An Approach for Portfolio Optimization of Energy Contracts in the Brazilian Electric Sector*, IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 2003.
- [62] H. Chao, *Demand Management in Restructured Wholesale Electricity Markets*, Harvard Electricity Policy Group, ISO New England, 2010.
- [63] L. Fengkui, Z. Xiaolin, J. Junguo, Z. Wenyu, *A New Model of Large Electricity Customer Access Regional Power Market*, 7th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2006), Hong Kong, China, 2006.
- [64] L. Pinto, M. Fernandez, L. H. Macêdo, J. Szczupak, *Building the Optimal Contract Portfolio under Non-Probabilistic Uncertainties*, IEEE Power Tech 2007, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [65] S. Riedel, H. Weigt, *German Electricity Reserve Markets*, Electricity Markets Working Paper No. EM-20. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1137282>, 2007.
- [66] D. Thukaram, C. Vyjayanthi, *Estimation of Most Economic Bilateral Contract using Relative Electrical Distance Concept in a Deregulated Environment*, Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, December 2008.
- [67] P. Chana, C. W. Huia, W. Lia, H. Sakamotob, K. Hiratab, P. Li, *Long-term electricity contract optimization with demand uncertainties*, Elsevier Energy, Vol. 31, No. 13, October 2006.
- [68] A. J. Conejo, J. Contreras, J. M. Arroyo, S. Torre, *Optimal response of an oligopolistic generating company to a competitive pool-based electric power market*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 424-430, May 2002.
- [69] S. Torre, J. M. Arroyo, A. J. Conejo, J. Contreras, *Price maker self-scheduling in a pool-based electricity market: A mixed-integer LP approach*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 1037-1042, November 2002.
- [70] J. M. Arroyo, A. J. Conejo, *Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1098-1104, August 2000.
- [71] J. Xiao, J.Y. Chung, J. Li, R. Boutaba, J.W. Hong, *Near optimal demand-side energy management under real-time demand-response pricing*, Proceedings of the 6th International Conference on Network and Service Management, CNSM 2010, Canada, October 2010.
- [72] B. Daryanian, R. E. Bohn, R. D. Tabors, *Optimal Demand-Side Response to Electricity Spot Prices for Storage-Type Customers*, IEEE Power Engineering Review, Vol: 9, No: 8, 1989.

- [73] B. Daryanian, *Scheduling of electricity consumption under spot prices*, Thesis Ph.D., Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, 1989.
- [74] T. W. Gedra, *Optional Forward Contracts for Electric Power Markets*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No.4, Nov 1994.
- [75] Y.A. Liu, X.H. Guan, *Market Allocation Problem for Energy Demand in Power Market*, Proceedings of CSEE, 2001.
- [76] Y.A. Liu, X.H. Guan, *Optimization of Purchase Allocation in Dual Electric Power Markets with Risk Management*, Automation of Electric System, 2002.
- [77] J. R. Guillen, A. B. Moreno, E. C. Hernaez, Mariano R. Ventosa, M. R. Abbad, A. R. Galan, *Strategies to fulfill medium-term objectives through short-term operation in competitive power markets*, IEEE Power Tech '03 Conference, Bologna, June 2003.
- [78] S. Bišanović, M. Šabanović, M. Dlakić, *Optimizacija proizvodnog portfolia u tržišnom okruženju koristeći metod unutrašnje tačke*, VII Savjetovanje BH K CIGRE, Neum, septembar 2005.
- [79] R. C. Bansal, *Optimization methods for electric power systems: An overview*, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 2, No. 1, January 2005.
- [80] J. M. Arroyo, A. J. Conejo, *Multiperiod auction for a pool-based electricity market*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 1225-1231, November 2002.
- [81] M. Šabanović, M. Džizić, *Electricity procurement opportunities for large customers in Bosnia and Herzegovina*, 11th IAEE European Conference, Vilnius, Lithuania, 2010.
- [82] S. Bišanović, M. Šabanović, M. Dlakić, *Optimizacija proizvodnog portfolia u tržišnom okruženju koristeći metod unutrašnje tačke*, BH K CIGRE, Neum, 2005.
- [83] M. Šabanović, M. Dlakić, *Tržišna moć učesnika na tržištu električne energije*, BH K CIGRE, Neum, 2005.
- [84] M. Šabanović, *Mogućnosti kupaca električne energije na budućem tržištu električne energije u BiH*, BH K CIGRE, Neum, 2003.
- [85] F. A. de Oliveira, A. P. de Paiva, J. W. M. Lima, P. P. M. Balestrassi, R. R. A. Mendes, *Portfolio optimization using Mixture Design of Experiments: Scheduling trades within electricity markets*, Energy Economics, ELSEVIER, Vol. 33, No. 1, 2011.
- [86] P. Rocha, D. Kuhn, *Multistage Stochastic Portfolio Optimisation in Deregulated Electricity Markets Using Linear Decision Rules*, COMISEF Working Papers Series, WPS-040, 2010.
- [87] H. Chao, *Demand response in wholesale electricity markets*, 29th Annual Eastern Conference Skytop Lodge, Skytop, Pennsylvania, May, 2010.

- [88] X. Xia, A.M. Elaiw, *Optimal dynamic economic dispatch of generation: A review*, Electric Power Systems Research, ELSEVIER, Vol. 80, 2010.
- [89] M. Ventosa, Á. Baíllo, A. Ramos, M. Rivier, *Electricity Market Modeling Trends*, Energy Policy, ELSEVIER, Vol 33, No. 7, May 2005.
- [90] S. Palamarchuk, *Bilateral Contract Correction and Cancellation in the Competitive Electricity Markets*, IEEE Power Tech Conference, Bucharest, 2009.
- [91] F. Stacke, P. Cuervo, *Integrated Pool/Bilateral/Reserve Market Operation Under Pay-as-Bid Pricing*, 5th International Conference on European Electricity Market, IEEE EEM 2008., Lisboa, 2008.
- [92] S. Rebennack, J. Kallrath, P. M. Pardalos, *Energy Portfolio Optimization for Electric Utilities: Case Study for Germany*, Energy, Natural Resources and Environmental Economics, Springer, Heidelberg, 2010.
- [93] Wang, J., S. Kennedy, J. Kirtley, *A new wholesale bidding mechanism for enhanced demand response in smart grids*, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE, 2010.
- [94] V. Figueiredo, F. Rodrigues, R. Pinto, Z. Vale, *A Data Mining Decision Support Tool to Study Electricity Retail Contracts*, 11th. Spanish-Portuguese Conference On Electrical Engineering, AEDIE, APDEE, Zaragoza, 2009.
- [95] A. Saleh, T. Tsuji, T. Oyama, *Optimal Bidding Strategies for Generation Companies in a Day-Ahead Electricity Market with Risk Management Taken into Account*, American Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol 2:, 2009.
- [96] L. M. Ausubel, P. Cramton, *Using Forward Markets to Improve Electricity Market Design*, Utilities Policy 18 (2010): 195-200., 2010.