

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINARSKI RAD

**INTELIGENTNI PROGRAMSKI AGENT ZA
TRGOVANJE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

Siniša Matetić

Voditelj: *doc. dr. sc. Vedran Podobnik*

Zagreb, svibanj 2012.

Sadržaj

Uvod	1
1. Simulacijsko okruŕje rada inteligentnog agenta za trgovanje električnom energijom ..	2
1.1. Maloprodajno tržište električne energije	3
1.2. Veleprodajno tržište električne energije	4
1.3. Distribucijski operator električne energije	4
2. Tipovi kupaca električne energije na maloprodajnom tržištu	6
2.1. Modeli kupaca i vrste potrošnje električne energije	6
2.2. Uzorci kontrolirane potrošnje kupaca u simulacijskom okruŕju	7
3. Specifikacija tarifa za trgovanje električnom energijom	9
3.1. Œivotni ciklus tarife	11
3.2. Račun korisnosti tarifa	12
3.3. Dinamičko određivanje cijena	14
4. Primjeri modeliranih tarifa za trgovanje električnom energijom	16
5. Rezultati agenta <i>CrocodileAgent</i> unutar natjecanje <i>P-TAC 2012</i>	18
Zaključak	19
Literatura	20

Uvod

U proteklih desetak godina proizvođači električne energije diljem svijeta, zajedno s komunalnim poduzećima koja se bave distribucijom, nadograđuju i unaprijeđuju svoju elektroenergetsku mrežu. Uzrok promjena je u velikoj mjeri nastao kao odgovor na sve veću potražnju korisnika, regulatorne promjene, ali i zbog restrukturiranja postojećih proizvodnih kapaciteta kako bi se uključili obnovljivi izvori poput vjetra i solarne energije.

Nadalje, restrukturiranje elektroenergetske mreže provodi se uvođenjem komunikacijske infrastrukture u postojeće sustave koja za zadatak ima pravovremeno obavještavati o stanju sustava te pružati okosnicu u samom upravljanju. Rezultat restrukturiranja dovodi do pojave naprednih elektroenergetskih mreža (engl. *smart grid*, [3]) koje predstavljaju sintezu proizvodnje i distribucije energije, informacijske tehnologije (skr. IT od engl. *Information Technology*) i komunikacijske infrastrukture [2]. Neke od prednosti koje napredne elektroenergetske mreže pružaju su pouzdanost opskrbe električnom energijom, sigurnost, energetska učinkovitost, očuvanje okoliša kroz smanjenje emisije stakleničkih plinova te na kraju direktna financijska dobit kupaca, ali i distributera [4].

Izgradnja takvih sustava predstavlja izazov te su oni još uvijek predmet brojnih istraživanja kako bi konačne izvedbe sustava opravdale definiciju i ciljeve kojima su sustavi i opisani.

Cilj seminarskog rada je prezentirati kompetitivno simulacijsko okružje za trgovanje električnom energijom kroz djelovanje inteligentnih programskih agenata (skr. P-TAC od engl. *Power Trading Agent Competition*). Simulacija je modelirana kroz liberalizirano maloprodajno tržište električne energije gdje pojedini poslovni entiteti – pametni agenti (brokeri) - nude električnu energiju krajnjim kupcima kroz sustav ugovaranja specifičnih tarifa te potom isporučuju ugovorene količine uz trgovanje na veleprodajnom tržištu [1].

U radu će slijedno biti prikazana i pojašnjena struktura kompetitivne simulacije, način rada inteligentnog programskog agenta, specifikacija maloprodajnog tržišta i način ugovaranja tarifa te na implementirani modeli, odnosno specifikacije tarifa.

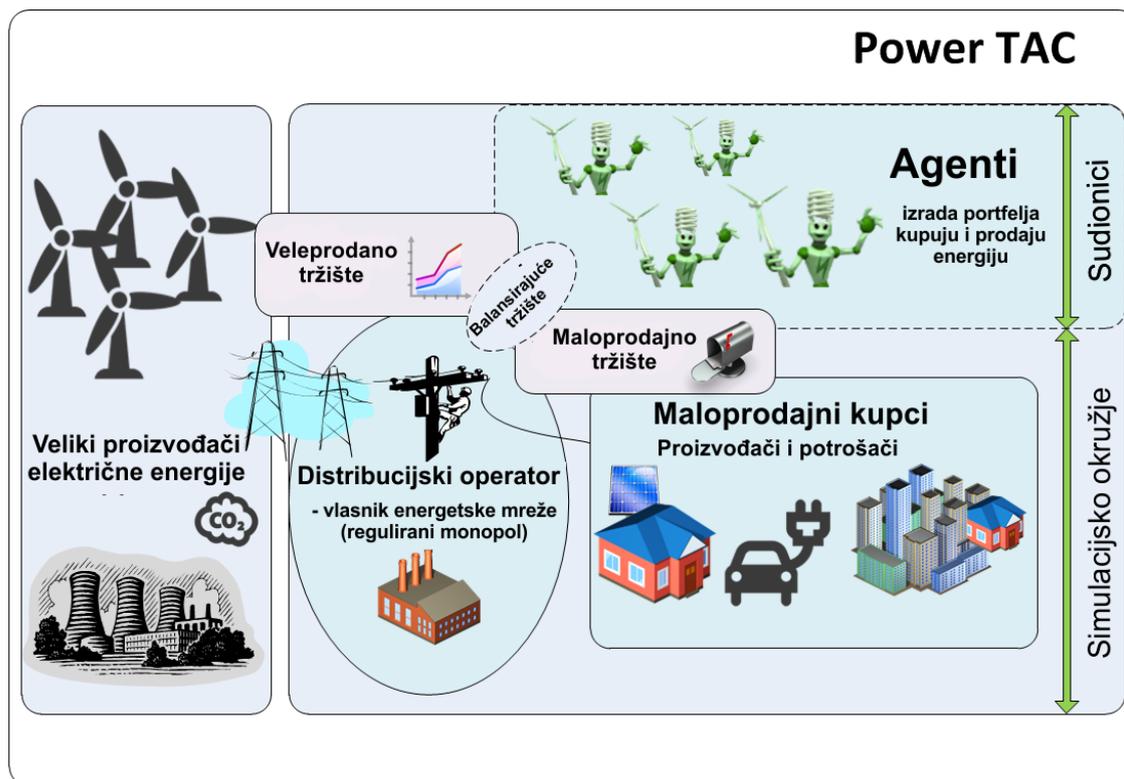
1. Simulacijsko okružje rada inteligentnog agenta za trgovanje električnom energijom

Simulacija tržišta P-TAC unutar specifikacije natjecanja inteligentnih agenata za trgovanje električnom energijom modelirana je na način da se primarno oslanja na ekonomski aspekt sustava dok se tehnički aspekt, odnosno fizička infrastruktura stavlja u drugi plan. Pretpostavka je da će ekonomski model istraživanja pametnih sustava biti dovoljan za početak te da će evaluacija koristeći pravu infrastrukturu uslijediti u predstojećim simulacijama sustava.

Cilj simulacije P-TAC je izgradnja inteligentnog programskog agenta koji će djelovati na tržištu električne energije pokušavajući maksimizirati svoj profit. Kao što je situacija i u realnom svijetu, agent će se natjecati s ostalim agentima nudeći primamljivije ponude i ugovore za krajnje kupce i proizvođače energije. Za izvršenje ugovornih obveza prema kupcima te isporuku energije agent će trgovati na veleprodajnom tržištu koje je modelirano po uzoru na postojeća sjeverno-američka ([7]) i europska veleprodajna tržišta energije ([8]).

Vrijeme unutar scenarija prikazano je pomoću fiksnih vremenskih odsječaka (engl. *timeslots*) koji simuliraju jedan sat simulacijskog okružja. Nominalno trajanje jednog vremenskog odsječka je 5 sekundi realnog vremena, dok cjelokupna simulacija traje 60 dana u simulacijskom vremenu. Tijekom dva sata realnog vremena, koliko će cjelokupna simulacija otprilike trajati, agenti će u svakom odsječku trebati balansirati potrošnju električne energije s proizvodnjom za trenutni odsječak, ali također i za buduće odsječke planirajući i predviđajući stanja tržišta u budućnosti [1].

Na slici (Slika 1.1) prikazani su osnovni elementi *P-TAC* scenarija. Inteligentni agenti, kao centralni dio simulacijskog okružja, vršit će interakciju sa maloprodajnim tržištem na kojem će nuditi ugovore za specifične tarife (engl. *tariff market*), veleprodajnim tržištem (engl. *wholesale market*) na kojem će trgovati električnom energijom kako bi zadovoljili potrebe svojih kupaca, te distribucijskim operatorom (engl. *distribution utility*) koji je vlasnik distribucijske mreže i vodova električne energije.



Slika 1.1. Elementi simulacijskog okružja P-TAC [10]

1.1. Maloprodajno tržište električne energije

Na maloprodajnom tržištu agent ugovara tarife s lokalnim malim proizvođačima energije te s lokalnim potrošačima energije. Agenti na maloprodajnom tržištu nudi tarife pod određenim uvjetima i obvezama potom čega kupci biraju iz skupa ponuđenih tarifa pristiglih od različitih agenata. Tarife se mogu nuditi tokom cijelog trajanja simulacije, ali ipak pristižu u skupinama na tržište unutar vremena od x^l vremenskih odsječaka [1].

Vođeno trenutnim ponudama i modelima maloprodajnih tržišta električne energije, simulacijsko maloprodajno tržište nudi bogat izbor specifikacija pojedine tarife. Inteligentni agenti tako mogu specificirati različite periodične naplate, bonuse i naknade za potpisivanje ugovora, odnosno prerano otkazivanje tarife, različite naplate električne energije ovisno o vremenu unutar jednog dana, te mogu dinamički balansirati cijene ukoliko je krajnji kupac zainteresiran za to.

¹ Varijabla x je definirana u inicijalnim parametrima simulacije

Modeli krajnjih kupaca u simulacijskom okružju predstavljeni su različitim tipovima kupaca iz realnog svijeta koji se ponašaju po određenim predefiniranim pravilima. Zadatak agenta je uspješno pretpostaviti modele postojećih kupaca na tržištu, pratiti njihove karakteristike te na osnovu toga specificirati odgovarajuće tarife kojima će stvoriti vlastiti portfelj kupaca i proizvođača energije. Dobar portfelj treba biti pomno planiran od strane agenta, pazeći na moguća ponašanja kupaca i proizvođača u budućnosti, a sve u svrhu maksimalnog balansiranja ponude i potražnje [1][6].

1.2. Veleprodajno tržište električne energije

Veleprodajno tržište zamišljeno je kao drugi segment na kojemu inteligentni agent može ostvariti profit, ali i kao centralno tržište električne energije u kojem broker kupuje energiju za daljnje isporuke svojim kupcima. Tržište radi na principu periodične dvostruke aukcije (skr. PDA od engl. *periodic double auction*) te na taj način predstavlja model realnih veleprodajnih tržišta energije kao što su *NordPool*, *FERC*, *EEX* [1].

Agent ima mogućnost trgovanja energijom za vremenske odsječke unutar sljedeća 24 sata simulacijskog vremena. Za ta vremena agent može slati svoje ponude za kupnjom ili prodajom te se one spremaju u listu ponuda za svaki od buduća 24 vremenska odsječka. Na početku svakog vremenskog odsječka lista ponuda se zaključuje (engl. *clearing*) te se određuje zaključna cijena (engl. *clearing price*) za svaki od tih vremenskih odsječaka. Zaključna cijena predstavlja sjecište krivulja ponude i potražnje od svih agenata koji su sudjelovali u trgovini za određeni vremenski odsječak te se po toj cijeni trguje energijom u tom vremenskom odsječku.

Proces trgovanja na veleprodajnom tržištu iterativan je za svaki vremenski odsječak i igra važnu ulogu u predviđanju fluktuacija na tržištu električnom energijom kao i samom procesu balansiranja i održavanja portfelja brokera [5].

1.3. Distribucijski operator električne energije

Distribucijski operator predstavlja regulirani komunalni entitet koji je vlasnik cjelokupne distribucijske mreže i fizičkog sklopovlja za prijenos električne energije. Također igra ulogu osnovnog ponuđača tarifa, odnosno električne energije. Taj način modela reprezentativan je za nekompetitivna tržišta koja postoje na mjestima gdje tržište

još nije otvoreno liberalnom trgovanju različitih entiteta u svrhu ostvarivanja vlastite dobiti. U realnom svijetu takvi operatori su često državni entiteti i služe regulaciji tržišta [1].

S obzirom da inteligentni agent prodanu energiju dostavlja svojim kupcima pomoću distribucijske mreže koja nije u njegovom vlasništvu mora plaćati određene naknade operatoru. Također agent je dužan distribucijskom operatoru plaćati određene naknade ukoliko na kraju simulacijskog dana njegova ponuda i potražnja ne bude u balansu. Iz toga proizlazi kako je za agente važno ostvarivanje dobrog portfelja te planiranje i balansiranje kako ne bi morao plaćati naknadu i gubiti ostvareni profit [6].

Valja napomenuti da na simulacijsko okružje i ishode utječu vremenske prilike koje su agentima dostupne na početku svakom simulacijskog sata. Vremenske prilike važne su agentu za predviđanje ponašanja vremenski osjetljivih kupaca kao što su male solarne elektrane ili vjetroelektrane. Kako bi simulacija bila što realnija, i u ovom slučaju uzimat će se podaci iz realnog svijeta koji su zabilježeni na određenom području te u određenom vremenskom razdoblju [1].

2. Tipovi kupaca električne energije na maloprodajnom tržištu

U prethodnom poglavlju objašnjena je struktura sustava u kojem inteligentni programski agent trgovati električnom energijom, ali nisi specificirani tipovi kupaca i korisnika kojima programski agent nude svoje usluge.

2.1. Modeli kupaca i vrste potrošnje električne energije

Kupci energije na maloprodajnom tržištu predstavljat će modele brojnih tipova kupaca koji se pojavljuju u simulacijskom okružju kao što su električna vozila, kombinirani energetsko-toplinski sustavi, solarni paneli, vjetrenjače, poslovni uredi, tvornice i na kraju privatna kućanstva. Svaki od navedenih tipova kupaca obavlja zadatak odabira odgovarajućih tarifa s obzirom na navedene karakteristike vlastite potrošnje, praćenja toka energije i novca uz popratnu analizu dobivenih podataka te opcionalno pruža kontrolirano balansiranje kapaciteta [1]. Modeli kupaca dizajnirani su na način da odgovaraju promjenama cijena električne energije na način kako bi djelovali i kupci u realnom životu.

Profil opterećenja (engl. *load*) kupaca dodatno je opisan sa tipom korištenja energije koje podržava. Svaki kupac sadrži barem jedan od sljedećih tipova korištenja [10]:

- Potrošnja (engl. *consumption*) – tok električne energije od elektroenergetske mreže prema kupcu;
- Potrošnja s mogućnošću prekidanja (engl. *interruptible consumption*) – tok električne energije od elektroenergetske mreže prema kupcu koji može biti prekinut od strane distribucijskog operatora unutar određenih granica, obično okarakterizirano toplinskim kapacitetima pri prekidanju;
- Proizvodnja (engl. *production*) – tok električne energije od kupca prema elektroenergetskoj mreži (tip je dalje podijeljen na podtipove korištenja unutar proizvodnje koji unose diferencijaciju između različitih izvora nastajanja energije);

- Spremište (engl. *storage*) – tok električne energije od i prema elektroenergetskoj mreži pri čemu je kontinuirani rad u jednom smjeru ograničen kapacitetom spremišta.

Agregirane modele kupaca s različitim tipovima korištenja električne energije može se podijeliti na sljedeći način [1]:

- Domaćinstva (engl. *households*) – karakterizirana ponašanjem potrošnje za tipična rezidencijalna područja uključujući ograničenu proizvodnju od solarnih ćelija;
- Uredi (engl. *offices*) – tipična potrošnja slična potrošnji stanova u stambenim zgradama koja se odvija tijekom radnog vremena, dok je potrošnja ograničena tokom ostatka dana;
- Tvornice (engl. *factories*) – slično kao i kod ureda, ali uz veće amplitude potrošnje i osjetnije varijacije;
- Električna vozila (engl. *electric vehicles*) – okarakterizirana velikim opterećenjem koje je u plusu kada se vozila pune, a u minusu kada je tok energije prema elektroenergetskoj mreži (dodatna opcija u kojoj se mogu naći jest kada je vrijednost opterećenja jednaka nula – tada vozilo nije spojeno na mrežu);
- Institucije (engl. *institutions*) – sveučilišta, općinske zgrade, bolnice, i dr.

Svaki od ovih navedenih modela ima drugačije ponašanje koje uključuje različite uzorke potrošnje, načine na koji kupac evaluira pojedinu tarifu te način na koji reagira na dinamičku promjenu cijene.

2.2. Uzorci kontrolirane potrošnje kupaca u simulacijskom okružju

Inteligentni programski agent, prilikom stvaranja različitih tarifnih modela, mora uzeti u obzir i uzorke ponašanja kupaca s obzirom na potrošnju električne energije i opterećenje. Naime, kupci mogu imati implementiranu logiku kojom potencijalno mogu balansirati svoju potrošnju na različite načine kako bi se prilagodili određenoj tarifi, njenim karakteristikama i cijenama koje ona nudi u različitim vremenskim intervalima. Efekt

odabira tarife s obzirom na realizirane uzorke opterećenja predstavlja esencijalni dio cijelog simulacijskog okružja [1][10].

U cilju pružanja različitog utjecaja kupaca na trenutačno opterećenje, unutar simulacijskog okružja implementirana je višestruka logika za proizvodnju i potrošnju [9][10]: *fully static*, *static amount*, *flexible timing*, *flexible amount*, *static timing* i *fully dynamic*.

Prva od implementiranih je potpuna statička logika (engl. *fully static*) u kojoj kupci ne prilagođavaju svoju potrošnju ratama pojedine tarife. Razlog može biti višestruk, od manjka mogućnosti promjene potrošnje prema tarifi do nevažnosti cijene električne energije (npr. bogati industrijski kupci kojima cijena električne energije nije bitan faktor poslovanja).

Kupci koji imaju mogućnost promjene vremenskih perioda u kojima troše električnu energiju, pri čemu neće mijenjati ukupnu potrošnju električne energije spadaju u logiku statičke potrošnje s fleksibilnom vremenskim periodima potrošnje (engl. *static amount*, *flexible timing*).

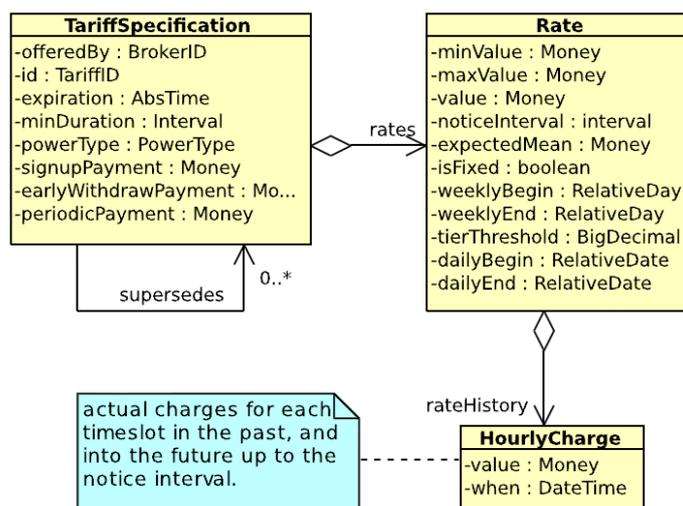
Slijedeća logika, koja koristi fleksibilnu potrošnju u statičkim vremenskim periodima (engl. *flexible amount*, *static timing*), predstavlja klasični model ponašanja kupaca u kojem kupci neće pomicati svoje opterećenje u vremenski periodima već će pokušati smanjiti količinu energije ukoliko njezina cijena postane veća.

Na kraju imamo logiku koja je potpuno dinamična (engl. *fully dynamic*). Uključuje upravljanje i količinom potrošnje električne energije kao i vremenskim periodima u kojima se energija koristi.

3. Specifikacija tarifa za trgovanje električnom energijom

Stvaranje tarifa koje će biti ponuđene kupcima unutar simulacijskog okruženja predstavlja važan faktor inteligentnom programskom agentu u upravljanju vlastitim portfeljom. Agent tijekom simulacije na osnovu dostupnih parametara koje prima stvara tarife te ih nudi na maloprodajnom tržištu kupcima. Također, postoji mogućnost modificiranja već postojećih tarifa zamjenom (engl. *superseding*) starih tarifa s novima te potom povlačenjem zamijenjene tarife sa maloprodajnog tržišta [1].

Detaljna struktura tarifa (klasa *TariffSpecification*) unutar PowerTAC simulacijskog okruženja prikazana je slikom (Slika 3.1. Dio dijagrama klasa koji prikazuje parametre i specifikaciju tarifa Slika 3.1) [1].



Slika 3.1. Dio dijagrama klasa koji prikazuje parametre i specifikaciju tarifa

Unutar strukture *TariffSpecification* vidimo sve elemente koje inteligentni programski agent može postavljati prilikom kreiranja tarife. Vrlo čest model stvaranja tarife sastoji se od više atributa (klasa *Rate*) unutar pojedine tarife kojima se definiraju vremenski intervali na dnevnoj i tjednoj osnovi prema kojima će karakteristike tarife i cijena biti drukčije. Neki od primjera koji se dobiju specifikiranjem različitih parametara unutar tarifa su:

- Dvodijelne specifikacije tarifa u kojima se naplaćuje fiksna dnevna cijena te se vrši naplata s obzirom na potrošnju (primjer tarife u kojima bi cijena potrošnje električne energije bila manja u odnosu na standardnu, ali bi za kompenzaciju korisnik plaćao fiksnu dnevnu cijenu distributeru);
- Naknade i bonusi prilikom potpisivanja ugovora s agentom o novoj tarifi (primjer je kada imamo više distributera električne energije te pojedini distributeri nude bonuse prilikom prelaska s korištenja usluga jednog operatora na drugi);
- Tarife s specificiranim atributima na dnevnoj razini uz veće i manje cijene naplate (primjer iz trenutne realne situacije u Republici Hrvatskoj gdje su za domaćinstva definirani dvo-tarifni sustavi sa manjom i većom naplatom ovisno o dobu dana);
- Rangiran (engl. *tiered*) atributi tarife u kojima se određena cijena za električnu energiju plaća do određene vrijednosti potrošnje, dok se nakon te vrijednosti cijena mijenja za daljnju potrošnju energije (primjer također u Republici Hrvatskoj, gdje kućanstva koja troše ispod 3000 kWh imaju jednu cijenu, a nakon te potrošnje formira se nova cijena električne energije);
- Tarife koje uključuju kontrolu opterećenja ili proizvodnje kod kupaca pri kojima agent može upravljati elementima potrošnje/proizvodnje u različitim uvjetima (primjer je kada distributer električne energije ima mogućnost isključivanja određenih kućanskih aparata u kućanstvu prilikom vršne potrošnje koja prelazi njegov proizvodni kapacitet).

U tablici (Tablica 3.1) prikazana su moguće vrijednosti i opisi parametara pojedine tarife koje će broker postavljati prilikom njenog stvaranja.

Tablica 3.1 Vrijednosti parametara pri specifikaciji tarifa za električnu energiju

PARAMETAR	VRIJEDNOST	OPIS
<i>expiration</i>	datum	posljednji datum za koji će se primati nova ugovaranja tarifa
<i>minDuration</i>	milisekunde	minimalna duljina trajanja ugovora o tarifi u milisekundama
<i>powerType</i>	(<i>INTERRUPTIBLE</i>) <i>CONSUPTION, PRODUCTION</i>	tip korištenja električne energije definiran tarifom (samo jedan)
<i>signupPayment</i>	+/- vrijednost novca (broj)	jednokratna naknada plaćena od strane kupca (-) ili od strane agenta (+)
<i>earlyWithdrawalPa</i>	vrijednost novca (broj)	jednokratna naknada koju kupac plaća ukoliko raskine

<i>yment</i>		ugovor prije prolaska <i>minDuration</i>
<i>periodicPayment</i>	vrijednost novca (broj)	periodična naknada za svaki period u višedijelnim tarifama
ATRIBUTI - PARAMETRI		
<i>weeklyBegin</i>	dan u tjednu	predstavlja dan u tjednu kada rata počinje djelovati
<i>weeklyEnd</i>	dan u tjednu	predstavlja dan u tjednu kada rata prestaje djelovati
<i>dailyBegin</i>	sat u danu	predstavlja sat u danu kada rata počine djelovati
<i>dailyEnd</i>	sat u danu	predstavlja sat u danu kada rata prestaje djelovati
<i>tierTreshold</i>	energija	količina energije nakon koje se mijenja cijena naplate
<i>isFixed</i>	true/false	označava da li je tarifa podložna dinamičnoj promjeni cijena rata u tarifi
<i>minValue</i>	vrijednost novca (broj)	minimalna cijena za promjenjive rate koja može biti definirana
<i>maxValue</i>	vrijednost novca (broj)	maksimalna cijena za promjenjive rate koja može biti definirana
<i>noticeInterval</i>	sat	minimalni interval u satima koji mora proći za obavijest o promjeni rate od zadnje promjene
<i>maxCurtailment</i>	0.0 - 1.0	postavlja maksimalnu proporciju ponuđenog opterećenja ili ponude energije koja se može smanjiti za tarife s kontroliranim potrošnjom

3.1. Životni ciklus tarife

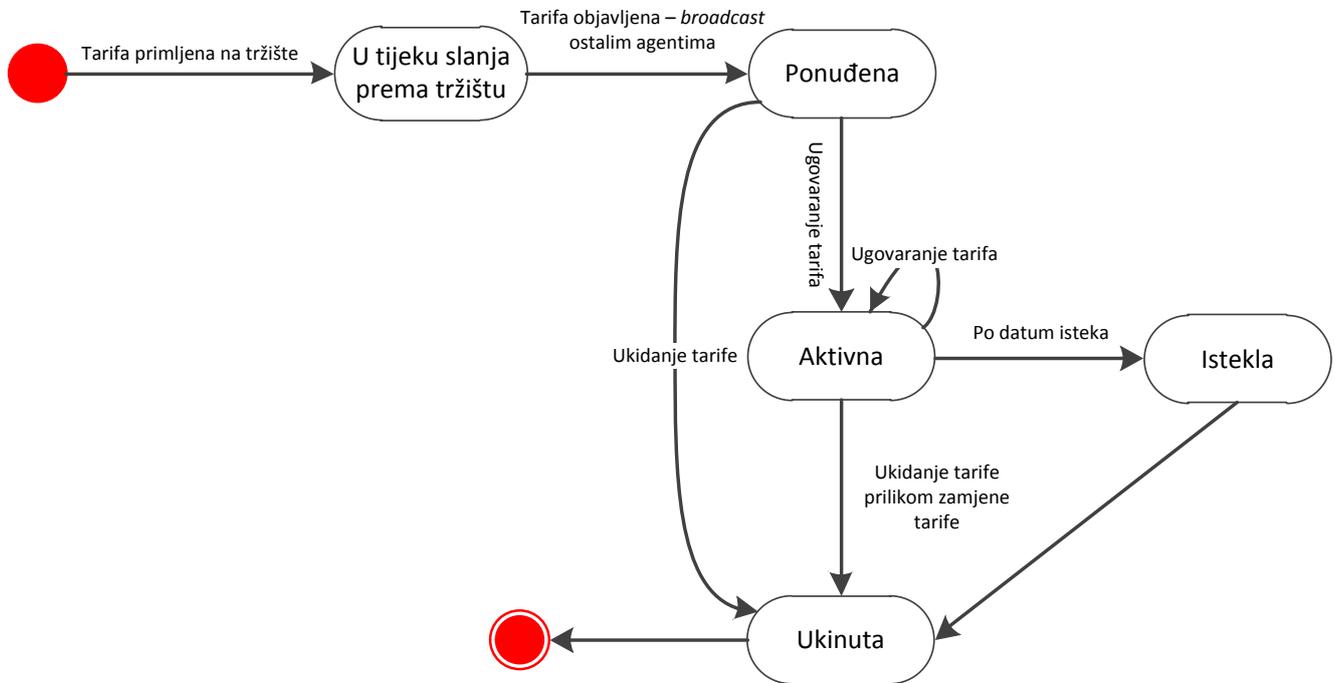
Inteligentni programski agenti specificiraju tarife unutar svakog vremenskog odsječka simulacije te je potom šalju na maloprodajno tržište. Nakon što se tarifa pošalje na tržište ona nije odmah ponuđena kupcima, već se taj proces ponude obavlja na periodičnoj bazi svakih x vremenskih odsječaka. Tarifa nakon što je ponuđena kupcima čeka potpisivanje ugovora.

U onom trenutku kada se prvi kupac odluči za tarifu ona postaje aktivna. U aktivnom stanju tarife inteligentni agent prima u svakom vremenskom odsječku poruke vezane uz tu aktivnu tarifu kao što su potpisivanja novih ugovora, prekidanje ugovora, količina energije koja je dostavljena pojedinim kupcima i naplata koja je izvršena na osnovu te tarife.

Svaka tarifa također može imati i datum prestanka postojanja, odnosno datum isteka tarife nakon kojeg više nije dopušteno ugovaranje te tarife s novim kupcima. Kupcima koji se nalaze na tom tarifnom modelu može se dopustiti ostanak na istom. Ukoliko pak inteligentni agent želi mijenjati parametre određene tarife mora prvo ponuditi zamjenjujuću tarifu na tržište te potom prisiliti kupce i korisnike stare tarife da se presele na novu ukidanjem stare tarife. Ukinu li se tarifa, a prethodno nije poslana zamjenjujuća

tarifa na tržište, kupci su prisiljeni vratiti se na početnu (engl. *default*) tarifu koju pruža distribucijski operator.

Na slici (Slika 3.2) prikazan je dijagram stanja koji opisuje životni ciklus specificirane tarife unutar simulacijskog okružja [1].



Slika 3.2. Dijagram stanja životnog ciklusa tarife u simulacijskom okružju

3.2. Račun korisnosti tarifa

Korisnost tarifa (engl. *tariff utility*) predstavlja direktnu mjeru koju pojedini kupci koriste pri odlučivanju o ugovaranju nove tarife sa određenim inteligentnim agentom te prema tome služi agentu da sam evaluira svoje tarife međusobno kao i ostale tarife na tržištu.

Kako bi mogli evaluirati dostupne tarife potrebno je izvući sve parametre i izračunati korisnost svake tarife koju označavamo sa u_i . Korisnost u_i računamo formulom [1]:

$$u_i = -(c_v + c_f)\alpha_{cost} - r_i\alpha_{risk} - I_i\alpha_{inertia} \quad (1)$$

Parametri α_{cost} , α_{risk} i $\alpha_{inertia}$ su specifični težinski faktori pri računu korisnosti za svaku vrstu kupaca kojima unosimo ovisnosti o ukupni troškovima, riziku i faktoru

inercije određene tarife. Varijabilni trošak pojedine tarife c_v se izračunava iz naplate električne energije po potrošnji na način da se iz ukupnog uzorka nad kojim je tarifa definirana uzima k slučajno odabranih dana te se za svaki od njih izvlači optimalna potrošnja s obzirom na tu tarifu. Rezultat se na kraju sumira i dijeli sa brojem slučajno odabranih dana, pa imamo:

$$c_v = \frac{\sum_k c_v^*(k)}{k} \quad (2)$$

Za varijabilne tarife izračun se vrši koristeći prosjek trenutno realiziranih vrijednosti troška energije. Fiksni troškovi tarife c_f sadrže:

- naknade ili bonuse koji se obračunavaju prilikom ugovaranja tarife ($c_{sign-up}$);
- periodične dnevne naplate (c_{daily});
- te izlazne naknade prilikom prekidanja tarife (c_{exit}).

Sve vrijednosti moraju biti normalizirane jer postoji razlika između pojedinih fiksnih troškova koja se očituje kroz višestruku ili jednostruku naplatu pojedinog troška u vremenu. Stoga se fiksni troškovi tarife računaju prema formuli:

$$c_f = c_{daily} + \frac{c_{sign-up} + c_{exit}}{\bar{t}} \quad (3)$$

gdje \bar{t} označava očekivano trajanje tarife.

Rizik pojedine tarife r_i predstavlja vjerojatnost pojave nepovoljnog razvoja rata i cijena unutar tarife. Dobiva se računanjem varijance već postojećih realiziranih cijena. Posljednji parametar koji imamo jest faktor inercije I_i koji predstavlja trošak mijenjanja tarife pojedinog kupca. On za vrijednost ima jedan ukoliko se promatraju sve tarife različite od trenutačne, dok u slučaju promatranja vlastite tarife ima vrijednost 0.

Pozivajući se na gore naveden opis može se zaključiti kako je korisnost tarife vrlo bitan faktor prilikom odabira tarifa. Stoga je nužno i da sam inteligentni agent ima uvid u korisnosti, kako svojih, tako i tuđih tarifa, kako bi mogao što bolje balansirati svoj portfelj i imati maksimiziran profit.

Međutim, odluka kojom će pojedini kupac odabrati tarifu ne mora uvijek biti zasnovana na najvećoj korisnosti tarife. Umjesto takvog načina odabira uvodi se model logičkog odabira (engl. *logit choice model*) koji na proporcionalan način alokira odabir tarifa sličnih korisnosti među kupcima. Može se reći da takav model unosi mjerljivi faktor slučajnog odabira pojedine tarife. Tada se umjesto direktnog odabira pojedine tarife uvodi vjerojatnost ρ_i za svaku tarifu i unutar skupa tarifa T . Računamo:

$$\rho_i = \frac{e^{\lambda u_i}}{\sum_{t \in T} e^{\lambda u_t}} \quad (4)$$

Parametar $\lambda \geq 0$ predstavlja vrijednost koja opisuje koliko racionalno korisnik bira određenu tarifu. Za vrijednost $\lambda = 0$ imamo potpuno slučajan odabir tarife na koji ne utječe korisnost, dok pri vrijednosti $\lambda = \infty$ imamo potpuno racionalno odabiranje tarifa pri čemu je uvijek odabrana tarifa sa maksimalnom korisnošću.

3.3. Dinamičko određivanje cijena

S obzirom da je već rečeno na početku kako je cilj inteligentnog agenta maksimizirati svoj profit te imati izbalansiran portfelj kupaca, postavlja se pitanje načina na koji će inteligentni agent to raditi. Važno svojstvo simulacijske okoline koje agent može i treba iskoristiti je dinamična promjena cijena postojećih tarifa s klauzulom koja dopušta varijabilnu promjenjivost parametara same tarife. Kada agent odluči promijeniti cijenu nekog atributa u tarifi, on tu odluku mora poslati u obliku poruke do svojih kupaca par vremenskih odsječaka prije nego što će promjena stupiti na snagu. Inteligentni agent mora na dobar način predvidjeti kretanja tržišta upravo za taj vremenski odsječak u kojem će se postavljene atributi tarife početi primjenjivati.

Na osnovnoj razini unutar simulacijskog okružja agent već može pretpostaviti cijenu električne energije koju mora dostaviti za pojedini vremenski odsječak na osnovu poslovanja na veleprodajnom tržištu električne energije. Inteligentni agent će također vršiti predviđanje ponude i potražnje energije s obzirom na dva osnovna faktora:

- Postojeća i zabilježena ponuda i potražnja koja se odvijala u vremenskim odsječcima prethodnim promatranom odsječku;
- Vremenski uvjeti za promatrani vremenski odsječak.

Sve gore navedene procjene vršit će se neprekidno tokom simulacijskog vremena prateći i efektivnost samog predviđanja. Ukoliko se dođe do zaključka da određeni modeli predviđanja nisu dobri, inteligentni agent će imati više modela predviđanja prema kojima će pokušati uspostaviti novi balans ponude i potražnje u svom portfelju.

4. Primjeri modeliranih tarifa za trgovanje električnom energijom

U ovom odjeljku prikazat će se tri modela tarifa koji su trenutno aktivni unutar *Crocodile* agenta kojeg razvija tim studenata sa Fakulteta elektrotehnike i računarstva za natjecanje unutar simulacijskog okružja *P-TAC*.

Prva tarifa predstavlja najjednostavniji mogući oblik tarife u kojemu je cijena za energiju fiksna tijekom cijelog trajanja tarife. Cijena se formira na osnovu prosječne težinske cijene energije postignute na veleprodajnom tržištu unutar proteklih 336 vremenskih odsječaka. Tarifa se sukladno definiranom parametru zamjenjuje novom tarifom (koja ima ponovno proračunatu fiksnu cijenu) svakih n vremenskih odsječaka pri čemu je n slučajno odabrani broj unutar razumnog intervala.

Druga tarifa sastoji se od više atributa u kojima se definiraju cijene električne energije s obzirom na dan u tjednu i sat u danu. Promatranjem simulacijskog okružja utvrđen je oblik krivulje tjedne potrošnje električne energije pri kojem je cijena energije subotom i nedjeljom najmanja i iznosi prosječnu težinsku cijenu električne energije postignutu na veleprodajnom tržištu unutar protekla 336 vremenska odsječaka. Ponedjeljkom, utorkom i srijedom cijena raste za 10% nominalne cijene, respektivno, pri čemu je tada najveća cijena energije u srijedu. Potom cijena energije pada za 10% u četvrtak i petak čime dolazi do prethodno definirane prosječne vrijednosti. S obzirom na sate u danu, rate su dvodijelne te predstavljaju primjer modela iz realnog svijeta u kojem postoji „skupa“ i „jeftina“ struja u vremenskim periodima od 8:00 do 21:59 sati i od 22:00 do 7:59 sati. Tarifa se također kao i prethodna zamjenjuje novom tarifom u svrhu proračuna novih prosječnih cijena električne energije.

Posljednja u nizu tarifa predstavlja složeniji oblik tarife te se temelji na kontroliranju opterećenja i proizvodnje od strane agenta prema kupcima. Parametar tarife *maxCurtailement* postavljen je na vrijednost 0.25 što znači da agent može kontrolirati do 25% ukupnog opterećenja nastalog za pojedinu vrstu kupaca. Naravno, podrazumijeva se da tip kupaca koji ugovaraju navedenu tarifu imaju omogućeno upravljanje kontrolabilnim kapacitetima kao što su grijači vode, klima uređaji i sl. Tarifa je za sada u testnom modu te se prati

efektivnost upravljanja kapacitetom. Ostali parametri tarife su fiksni, odnosno, cijena je prosječna kao i u prethodnim tarifama te nema podjele na attribute ovisno o vremenskom periodu djelovanja tarife.

5. Rezultati agenta *CrocodileAgent* unutar natjecanje *P-TAC* 2012.

Kvalifikacijsko *PowerTAC* natjecanje održat će se od 21.5. do 28.5.2012. godine te će rezultati agenta *CrocodileAgent*, koji je zajednički projekt studenata različitih godina Sveučilišta u Zagrebu, Fakulteta elektrotehnike i računarstva, biti prikazani u prezentacijskom dijelu predmeta *Seminar*.

Rezultati ostalih natjecanja u kojima će agent sudjelovati bit će prezentirani u daljnjim radovima koji slijede.

Zaključak

Elektroenergetski sustavi kakve poznajemo danas vrlo brzo će biti zamjenjeni naprednim elektroenergetskim sustavima i pametnim mrežama koje će svojim uslugama unijeti revoluciju u način trgovanja i distribucije električnom energijom. Stoga je od esencijalne važnosti stvoriti što realističnije simulacijsko okruženje koje će moći na realističan način prezentirati principe otvorenog tržišta, uz sva ograničenja koja se mogu pojaviti.

P-TAC predstavlja jedno od takvih simulacijskih okruženja u kojem djeluju inteligentni programski agenti (simulirajući rad ljudi, ali i umjetne inteligencije koja će se koristiti u realnim sustavima kojima tek predstoji implementacija) trgujući energijom u cilju maksimiziranja svog profita. Proučavanjem ponašanja sustava, ali i agenata, tijekom natjecanja P-TAC koja će se odvijati u predstojećim mjesecima pokušat će se kreirati realističan model koji će biti implementiran u našu svakodnevicu. Cilj je stvoriti otvoreno i ravnopravno tržište električne energije koje je danas u većini zemalja u obliku monopola upravljanog od samo jedne tvrtke ili države.

U seminarskom radu postavljene su teorijske postavke za kreiranje inteligentnog programskog agenta koji će se natjecati s ostalim agentima unutar simulacijskog okruženja. Također, izvršena je implementacija tarifnog sustava o čijoj efektivnosti ćemo više znati u bližoj budućnosti. Tokom cijelog radnog vijeka naglasak je bio i ostatak će na stvaranju neovisnih modula za upravljanje logikom programskog agenta kao i dobrim modelima kojim će agent moći predviđati daljnje efektno djelovanje.

Razvoj inteligentnog programskog agenta nastaviti će se u sklopu predmeta *Projekt*. Raditi će se na daljnjim poboljšanjima za predstavljanje agenta na natjecanjima koja će se odvijati kroz sljedeću godinu.

Literatura

- [1] WOLFGANG, K., COLLINS, J., ET AL., THE POWER TRADING AGENT COMPETITION, ERIM REPORT SERIES RESEARCH IN MENAGEMENT, 2011.
- [2] GORMAN, J., GLICK, Y., ET AL., SMART-GRID COMMUNICATIONS: ENABLING NEXT-GENERATION ENERGY NETWORKS, ERICSSON BUSINESS REVIEW, VOL. 2012., No. 1, PP. 38 – 41
- [3] [HTTP://WWW.SMARTGRIDS.HR](http://www.smartgrids.hr), DATUM PRISTUPA: 7.4.2012.
- [4] CIMETRICS, INC., HYPERTAK, INC. ET AL., REPORT TO NIST ON THE SMART GRID INTEROPERABILITY STANDARDS ROADMAP – POST COMMENT PERIOD VERSION, TECHNICAL REPORT 2009.
- [5] BLOCK, C., COLLINS, J., KEETER, W., EXPLORING RETAIL ENERGY MARKETS THROUGH COMPETITIVE SIMULATION, IN PROCEEDINGS OF TADA 2010, BOSTON, USA, 2010.
- [6] WEERDT, M., KEETER, W., COLLINS, J., PRICING MECHANISM FOR REAL-TIME BALANCING IN REGIONAL ELECTRICITY MARKETS, WORKSHOP ON TRADING AGENT DESIGN AND ANALYSIS, 2011.
- [7] MARKETRESEARCH.COM, NORTH AMERICAN WHOLESALE ENERGY MARKETS, FROST & SULIVAN, 2010.
- [8] RADEMAEKERS, K., SLINGENBERG, A., ET AL., REVIEW AND ANALYSIS OF EU WHOLESALE ENERGY MARKETS, FINAL REPORT, ECORYS NEDERLAND BV, 2005.
- [9] GOTTWALT, S., KEETER, W., ET AL., DEMAND SIDE MANAGEMENT – A SIMULATION OF HOUSEHOLD BEHAVIOUR UNDER VARIABLE PRICES, ENERGY POLICY, VOL. 39., No. 12, PP. 8163 – 8174, 2011.
- [10] BABIC, J., A COMPETITIVE SIMULATION PLATFORM FOR ELECTRICITY TRADING IN SMART GRIDS, TECHNICAL REPORT, UNIVERSITY OF ZAGREB, FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING, 2012.
- [11] BLOCK, C., COLLINS, J., ET AL., A MULTI-AGENT ENERGY TRADING COMPETITION, ERIM REPORT SERIES RESEARCH IN MANAGEMENT, 2010.