

Vladimir M. Šiljkut¹, Nikola Georgijević², Saša Milić³,
Aleksandar Latinović¹, Dušan Vlasisavljević², Radoš Čabarkapa¹



Agregacija kompozitne virtuelne elektrane – mogućnosti i ograničenja za primenu u Srbiji

¹ Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Beograd, Srbija*

² Elektroenergetski koordinacioni centar, Beograd, Srbija

³ Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, Srbija

Kategorija rada: Pregledni članak

Ključne poruke

- Dat detaljni prikaz literature o virtuelnim elektranama, pregled koncepata i konkretnih rešenja
- Sagledani izvori energije, načini agregacije i tehnički potencijal za uspostavljanje virtuelne elektrane
- Predložen koncept kompozitne virtuelne elektrane, procenjeni troškovi, koristi, zakonska ograničenja

Kratak sadržaj

Elektroenergetski sektor Srbije se sve više suočava s izazovima budućnosti. Većina proizvodnje električne energije zasniva se na niskokaloričnom lignitu. Njegov sve lošiji kvalitet uzrokuje pad nivoa sigurnosti, pouzdanosti i efikasnosti termoelektrana, uz povećanje zagađenja. Osim značajnih sredstava namenjenih njihovoj revitalizaciji, velika su ulaganja u nove, skupe sisteme za smanjenje emisija štetnih materija. Uz najavljene ugljenične takse, čiji se rast očekuje u budućnosti, isplativost ovih izvora i tržišna konkurentnost cene električne energije dobijene iz njih, postaju krajnje upitni i neizvesni. U procesu neminovne dekarbonizacije, postavlja se i strateško pitanje pred srpske eksperte – čime nadomestiti znatne bazne (termo)kapacitete, koji će verovatno biti ugašeni?

Na drugom kraju sistema, problem predstavljaju neefikasno korišćenje električne energije, neprihvatljivo visok nivo njenih gubitaka, uključujući i one usled njenog neovlašćenog korišćenja. Pri tome, ni iz bliza nisu iskorišćene tehničke mogućnosti za upravljanje opterećenjem niti za primenu većeg broja tarifnih stavova, radi željenog odziva potrošnje.

U takvim okolnostima, ključno je pitanje – kakvu strategiju investiranja treba odabrati? Ovaj rad predlaže rešenje koje bi imalo pozitivan uticaj na oba kraja sistema i njegove aktere, ali i na mreže između njih i njihove operatore. „Elektroprivreda Srbije“ bi mogla da iskoristi najavljeno uvođenje agregatora, kao novog učesnika na tržištu električne energije, za svojevrsni zajednički poduhvat sa krajnjim korisnicima, za uspostavljanje kompozitne virtuelne elektrane. Ona bi za elektroprivredu predstavljala novi, zamenski kapacitet, a za kupce izvor ušteda i potencijalnog prihoda. Ovakva elektrana bi obuhvatila različite, dispergovane obnovljive izvore, kako električne energije, tako i toplotne, sisteme za skladištenje energije, punjače za električna vozila, upravljivo opterećenje kupaca i različite programe za odziv potrošnje. Povećanjem obima ovakve agregacije, kompozitna virtuelna elektrana bi agregatoru takođe omogućila pružanje pomoćnih sistemskih usluga operatoru prenosnog sistema, što bi predstavljalo dodatni benefit. U sinergiji s drugim neophodnim, strateškim koracima, predloženi koncept bi Srbiji mogao da obezbedi sigurniju energetska budućnost.

Ključne reči

Agregacija, dekarbonizacija, distribuirana proizvodnja, pomoćne usluge, odziv potrošnje, upravljanje opterećenjem, virtuelna elektrana

Napomena:

Članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Agregacija kompozitne virtuelne elektrane – jedan od mogućih odgovora na izazove za elektroenergetski sistem Srbije u procesu dekarbonizacije“, nagrađenog u Stručnoj komisiji STK-5 Planiranje distributivnih sistema na 13. Savetovanju CIRED Srbija, Kopaonik, 12-16. septembra 2022.

Primitljeno: 7. april 2023. Recenzirano: 9. maj 2023.

Izmenjeno: 16. maj 2023. Odobreno: 25. maj 2023.

*Korespondirajući autor: Vladimir M. Šiljkut

Tel. +381-64-897-46-72 E - mail: vladimir.siljkut@eps.rs

1. UVOD

1.1 Kontekst problematike elektroenergetike u Srbiji

Izuzev funkcionalnog i organizacionog razdvajanja kom je bio izložen u prethodnom periodu tokom procesa deregulacije, a čijim se efektima još prilagođava, kompletan elektroenergetski sektor Srbije sve više se suočava sa novim, pretećim izazovima koje donosi budućnost. Primaran problem predstavlja višedecenijsko većinsko oslanjanje na lignit kao primarno gorivo za proizvodnju električne energije. Njegov kvalitet (kalorijska vrednost) je poslednjih godina zabeležio značajan pad, a i raspoložive količine su sve više upitne. Posledice su višestruke – od pada nivoa sigurnosti, pouzdanosti rada i efikasnosti termoelektrana, preko dodatnog habanja opreme, do povećanja zagađenja vazduha. Termoelektrane (TE) su izuzetno stare pa zahtevaju ogromna ulaganja, ne samo u revitalizacije, nego i izgradnju novih i skupih (investiciono, ali i eksploataciono) pratećih sistema u funkciji zaštite životne sredine. Kad se tim troškovima dodaju i najavljene ugljenične takse koje će rapidno rasti u budućnosti, isplativost ovih izvora i tržišna konkurentnost cene električne energije dobijene iz njih, postaju krajnje neizvesni. U uslovima neminovne dekarbonizacije se, u slučaju Srbije, postavlja i pitanje – čime nadomestiti bazne (termo)kapacitete, kojima, iz jednog ili drugog razloga, preči gašenje?

Obnovljivi izvori energije (engl. *Renewable Energy Sources*, RES) na prenosnom sistemu nadomestiće deo električne energije nakon povlačenja termokapaciteta. Značajna integracija varijabilnih RES (*Variable RES*, V-RES) usloviće nove probleme. V-RES imaju niži stepen iskorišćenja kapaciteta u odnosu na TE na ugalj. Da bi se nadomestila energija koju u toku jedne godine isporuči jedna TE na ugalj, neophodno je izgraditi RES značajno veće instalisane snage, što može dovesti do zagušenja u postojećoj prenosnoj mreži ili može ograničiti priključenje novih RES. Takođe, integracija V-RES usloviće povećanje neophodne balansne rezerve za balansiranje sistema u realnom vremenu, a problem će postati i bilansiranje sistema, odnosno neusklađenost proizvodnje i potrošnje na dužem, sezonskom nivou.

Na drugom kraju sistema, ne manji problem predstavlja neefikasno korišćenje električne energije, neprihvatljivo visok nivo njenih gubitaka, uključujući i gubitke usled njenog neovlašćenog korišćenja. Pri tome, ni iz bliza nisu iskorišćene, već sada raspoložive, tehničke mogućnosti za upravljanje opterećenjem ili korišćenje eventualno većeg broja tarifnih stavova, u cilju željenog odziva potrošnje. Nadasve, interesi snabdevača i operatora distributivnog i prenosnog sistema ne moraju biti podudarni, [1]; prvi teži da proda što veću količinu električne energije, sa što većom zaradom, a drugi da sistem održi stabilnim, tj. da njegovi elementi ne budu preopterećeni.

U takvim okolnostima, pred dugoročne planere i kreatore razvoja elektroenergetskog sistema (EES), kao celine, postavlja se pitanje – u kom pravcu treba ići, kakvu strategiju investiranja treba odabrati?

Ovaj rad predlaže, kao temu za razmatranje, rešenje koje bi imalo pozitivan uticaj, kako na tehnički aspekt sistema (i to na oba njegova kraja), tako i na njegove aktere, ali i na mreže između njih i njihove operatore. Umesto ogromnih investicija u termosektor upitne perspektivnosti i isplativosti, Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“ (EPS) bi moglo da iskoristi najavljeno uvođenje agregatora, kao novog učesnika na tržištu električne energije, [2], za svojevrsni zajednički poduhvat sa svojim krajnjim korisnicima – kupcima električne energije, za uspostavljanje multienenergetske, kompozitne (tj. kolaborativne, kooperativne) virtualne elektrane, [3]-[5]. Ona bi za EPS faktički predstavljala novi, zamenski kapacitet, a za kupce izvor ušteda i potencijalnih prihoda. Ovakva elektrana bi obuhvatila različite, dispergovane, upravljive i neupravljive, obnovljive izvore, i to ne samo električne, već i toplotne energije (npr. solarne kolektore za zagrevanje vode), sisteme za skladištenje energije, punjače za električna vozila, upravljivo opterećenje kupaca (termo-akumulacione peći, električne bojlere i kotlove) i različite programe za odziv potrošnje. Povećanjem obima ovakve agregacije – svojevrsnim „povećanjem kapaciteta“ i svoje fleksibilnosti – kompozitna virtualna elektrana bi EPS-u kao Agregatoru stvorila dodatnu mogućnost za pružanje pomoćnih sistemskih usluga operatoru prenosnog sistema, poput učešća u regulaciji frekvencije, kao i pružanje usluga operatoru distributivnog sistema, što bi u odgovarajućem regulatornom okviru predstavljalo još jedan izvor prihoda za EPS. U sinergiji s drugim potrebnim koracima, kao što je jače oslanjanje na hidropotencijale, ovakav koncept bi Srbiji mogao da obezbedi sigurniju energetska budućnost.

1.2 Virtualne elektrane - pregled literature i iskustava

1.2.1 Definicije i funkcije virtualne elektrane. U svetu, osnovni motiv za nastanak i razvoj koncepta virtualne elektrane predstavlja sve veći udeo V-RES. Naime, zbog svoje neizvesne i isprekidane (tj. varijabilne) prirode, obnovljivi izvori energije kakvi su sunce i vetar, mogu izazvati probleme u radu elektroenergetskog sistema, kao što su oni sa balansiranjem i bilansiranjem sistema, kvalitetom električne energije, efikasnošću, stabilnošću i pouzdanošću. Koncept virtualne elektrane, (engl. *Virtual Power Plant*, VPP) osmišljen je kako bi se olakšala integracija V-RES, bez ugrožavanja stabilnosti i pouzdanosti rada sistema, uz nuđenje mnogih drugih tehno-ekonomskih benefita. Šta je, zapravo, virtualna elektrana? U [6] ona je definisana kao „koncept koji objedinjuje jednu raznolikost distribuiranih izvora električne energije, upravljivog opterećenja i skladišta električne energije, radi učešća u dispečingu i upravljanju tržištem električne energije i radom mreže, u vidu još jedne, specijalne elektrane.“ Druga definicija kaže da je „VPP struktura ICT (informaciono-komunikacione tehnologije – *prim. aut.*) koja integriše različite vrste distribuiranih izvora energije, fleksibilnih potrošača i skladišta energije, međusobno i sa drugim tržišnim segmentima, u realnom vremenu, putem inteligentne (smart) mreže“, [3]. U [7] se koristi naziv „novi

teleinformatički sistem koji omogućava upravljanje energetskim resursima.“ Tako VPPs obavljaju zadatak fleksibilnog upravljanja konsolidacijom V-RES, efektivnim skladištenjem i distribucijom električne energije, u promenljivim razmerama kada je to potrebno.

Brojna su istraživanja i modelovanja beskrajnih mogućnosti napajanja pametnih gradova pomoću tehnologije VPP i uopšte, mogućnosti očuvanja ekosistema životne sredine i očuvanja tj. štednje energije koje se time postižu. „Pametni gradovi“ predstavljaju model budućeg gradskog planiranja i urbanog razvoja, integrišući ICT rešenja, kao i mehanizme za očuvanje energije i borbu protiv klimatskih promena sa osnovnom tehnologijom poznatom kao internet stvari (engl. *Internet of Things*, IoT). Budući da je bazirana na ICT i (najčešće) na IoT, VPP je najefikasnije sredstvo distribucije energije za pametne gradove, [8].

1.2.2 Korisnici, nosioci i načini agregacije. Postavlja se i pitanje ko može da razvija i primenjuje koncept VPP i u kakvim okolnostima? Koncept VPP mogu da razvijaju mnoge vrste entiteta / energetskih subjekata, npr. operatori distributivnih sistema, proizvođači električne energije, energetski klasteri, [7]. Postoji mnogo rešenja zbog veoma širokog spektra mogućih primena, a mogućnost izgradnje sistema zasnovanog na modulima omogućava da se on prilagodi potrebama korisnika, lakše menja i integriše u veće sisteme. Donose se propisi i primenjuju koncepti koji omogućavaju razvoj obnovljivih izvora energije, uključujući kupce-proizvođače i tzv. aktivne kupce, i omogućavaju aktivno učešće potrošača energije na tržištu energije. Pored toga, uvode se stroži zahtevi za balansiranje proizvodnje i potrošnje energije, što zahteva veću tačnost balansiranja, [7]. U nastavku ćemo dati pregled različitih rešenja koja se mogu naći u relevantnoj literaturi.

Lit. [9] prikazuje strukture, tipove, arhitekturu i rad VPP, kao i stanje njihove primene širom sveta. Tipovi VPP su dati detaljno, s optimizacionim algoritmima koji se koriste za svaki od njih. VPP je povezana sa većinom komponenti elektroenergetskog sistema, kao što su distribuirana proizvodnja (*Distributed Generation*, DG), aktivni kupci-proizvođači (*prosumers*), operatori prenosnih (*Transmission System Operator*, TSO) i distributivnih sistema (*Distribution System Operator*, DSO), mrežne usluge poput eliminacije kvarova, upravljanje reaktivnom snagom, sve to uz pomoć tehnologija komunikacija, upravljanja i optimizacije. Članak daje jedan sveobuhvatni uvid u transformaciju mikromreže u VPP koji može biti od koristi istraživačima, potrošačima, kupcima-proizvođačima i operatorima sistema. Suština pristupa u [9] je da mikromreža sa optimizacijom, sposobnošću komunikacije i uz primenu metoda veštačke inteligencije, postaje VPP. Automatizacija mikromreže se podrazumeva, kao preduslov za upravljivost proizvodnje i potrošnje i optimizaciju troškova njenog rada.

Rad [10] navodi koncepte VPP iz studijâ raznih istraživača i daje detaljna objašnjenja. Predstavljani su i neki tipični projekti VPP širom sveta. Pored toga, izloženi su i neki potencijalni izazovi i saveti za budući razvoj u studijama o VPP. Raspoznata su tri tipa korisnika VPP: samostalni (*Standalone*), kupac energije (*Energy buying*) i prodavac (*Energy selling*). Nezavisni operator sistema

(*Independent Power System Operator*, IPSO) je ključni, „vezni“ igrač između spoljašnjeg tržišta, sa kojim razmenjuje podatke o prognozi opterećenja i tržišnim informacijama, i centra odlučivanja, kome ispostavlja cenovnu strategiju i od koga dobija rezultate aktivnosti.

1.2.3 Arhitektura, koncepti i modeli VPP. U [11] su predstavljeni koncept i eksperimentalni rezultati mikromreže pod nazivom Okružna elektrana (*District Power Plant*), dizajnirane da radi kao aktivni element u lokalnoj distributivnoj mreži, sposoban da pruži usluge kao što su odziv potrošnje (*Demand Response*, DR), aktivno napajanje i napredno merenje. Prikazan je stabilan rad ovakvog sistema u ostrvskom režimu i režimu ponovnog povezivanja, kao i dobar kvalitet energije i u povezanom i u ostrvskom režimu.

Rad [12] predlaže novi sistem gradske VPP, koji integriše distribuirane proizvodne jedinice, sisteme za skladištenje energije i upravljivo opterećenje. Koristi napredne tehnologije za komunikaciju i koordinisano upravljanje kako bi realizovao sveukupnu regulaciju i upravljanje različitim vrstama distribuirane energije i opterećenja. Time su ublaženi izazovi nastali usled velikog udela nasumične i promenljive distribuirane proizvodnje na rad elektroenergetske mreže i dispečing, i smanjena neravnoteža između ponude i potražnje. U radu je ilustrovana predložena arhitektura sistema gradske VPP i prikazani njeni resursi na strani korisnika.

Efikasno upravljanje i dispečing takođe su predmet rada [6]. U cilju efikasnog dispečinga i upravljanja velikim brojem resursa za odziv potrošnje (poput termički upravljivih kapaciteta opterećenja), ovaj rad proučava sistem upravljanja energetskom efikasnošću na bazi koncepta zasnovanog na tehnologiji odziva potrošnje i teoriji VPP i efikasno koristi sistem upravljanja temperaturom. Prikupljanjem i kontrolom parametara snage resursa za upravljanje opterećenjem, potpunim iskorištavanjem potencijala za smanjenje opterećenja na strani potrošnje, postiže se odgovarajuće pomeranje vršnog električnog opterećenja, pogodno za ublažavanje neusaglašenosti između napajanja (proizvodnje električne energije) i potražnje i za obezbeđivanje bezbednog i stabilnog rada elektroenergetske mreže.

VPP i komponente „smart“ energije, mreža, sistema i gradova prikazane su i povezane u članku [13]. Prikazana je VPP i odgovarajuće komponente „pametne“ mreže koje je sačinjavaju. Prikazana je struktura „pametne“ energije, koju sačinjavaju podgrupe niskouglenične proizvodnje, efikasne distribucije i optimizovanje potrošnje električne energije.

Jedna platforma za integraciju različitih tipova distribuiranih izvora energije (*Distributed Energy Resources*, DER) prikazana je u istraživanju [14]. Za planiranje i izgradnju ove platforme bili su neophodni različiti domeni znanja – telekomunikacije, elektrotehnika, mehanika, automatizacija, informatika, arhitektura, sociologija. Ključno je bilo definisanje obima projekta, usaglašavanje specifikacija i zajedničkog razumevanja među partnerima (uključujući izvođače i podizvođače), kao i definisanje zajedničkog jezika za efikasnu saradnju. Osim toga, istaknuto je da korisnici-domaćini moraju biti informisani što je više moguće tokom faze instalacije i povezani sa projektom tokom njegove operativne faze. Oni

takođe žele da razumeju svrhu intervencija i da budu svesni kada instalirani uređaji rade. Naglašena je kritičnost integracije različitih tehnologija i standarda: autorizacija http-klijenta, SSL sertifikata, web servisa, zajedničkih informacionih modela (*Common Information Models*, CIM), pametnih energetskih profila (*Smart Energy Profiles*, SEM) i dr. Pod platformom jednog tako integrisanog centra upravljanja, kome je nadređen Agregator, moguće je objediniti različite korisnike i njihove uređaje i dispergovane izvore; rezidencijalne (termička skladišta i toplotne pumpe, fotonaponske panele, baterije za skladištenje viškova električne energije, upravljanje opterećenjem), podesivo javno osvetljenje, industrijske korisnike (proizvodnju iz toplotnih solarnih kolektora, hladnjače), stanovanje i poslovne prostore (solarna termalna skladišta, upravljanje opterećenjem), [14].

Uveden je i pojam energetskog tržišta stvari (*Energy Market of Things*, EMoT), [15]. Za trgovce energijom pojava DER je istorijska prilika koja može doneti brojne prednosti, npr. mogućnost da se otvori obilna ponuda fleksibilnosti na strani snabdevanja na niskom i srednjem naponu, koja se sastoji od energetskih zajednica, pa čak i malih farmi PV panela i baterija. Neophodan je pristup podacima iza brojlara koji se mogu koristiti za fino podešavanje algoritama trgovanja i predviđanja. Uređaji, od toplotnih pumpi do punjača električnih vozila (*Electrical Vehicles*, EV), DER i elektroenergetskih objekata i opreme, sada mogu prikupljati i razmenjivati podatke (tj. komunicirati) i biti povezani sa bilo kojom vrstom tržišta električne energije.

EMoT omogućava umrežavanje fizičkih uređaja koji su u vezi sa električnom energijom, za mali obim njene proizvodnje, skladištenje i fleksibilnu potrošnju električne energije, [15]. Ove „stvari“ imaju ugrađene senzore, raspolazu softverom i drugim tehnologijama u svrhu povezivanja i razmene podataka sa drugim uređajima i bilo kojom vrstom tržišta električne energije – bilo da su to lokalna tržišta fleksibilnosti, platforme za balansiranje energije ili klasične berze kao što su EPEX SPOT, Nord Pool i HUPX. Ovi uređaji variraju od običnih predmeta na nivou domaćinstva do velikih komercijalnih ili industrijskih uređaja.

1.2.4 VPP kao mreža ili sistem saradnje. U lit. [3] VPP je prikazana kao mreža saradnje. Tu je istaknuto da je VPP jedan od tipova virtuelnih organizacija, ali da su definicije VPP prvenstveno usmerene na njen tehnički aspekt i da se nedovoljno pažnje poklanja aspektu upravljanja i, posebno, poslovnom modelu. Stoga je u [3] predstavljena pravna pozadina za uspostavljanje VPP, kao i pravne mogućnosti i pretnje za stvaranje VPP u Poljskoj. Naglašeno je da je pravna analiza polazna osnova za svaki praktični projekat. Prikazani su zakonski propisi koji se odnose na kupce-proizvođače i podržavanje energetskih mikroklastera. Ova pitanja zahtevaju stvaranje novih proizvoda, npr. VPP. Zatim je napravljen pregled poslovnih modela kako bi se izabrao adekvatan model, [3]. Raspoznata su uglavnom tri tipa modela; prvi je uglavnom karakteristika odnosa između kupaca, klijenata, partnera i dobavljača; drugi naglašava značaj resursa kompanije, koji se mogu proširiti i koristiti, i potencijalnih izvora budućih ekonomskih koristi; treći predstavlja kombinaciju prva dva i kombinuje

ključne resurse i ključne odnose koji su važni za VPP (ovo odgovara sistemskom pristupu). Na osnovu odabranog modela strukturira se VPP kao mreža saradnje između različitih vrsta energetskih subjekata. Pri tome, segmentacija mogućih korisnika VPP vrši se po dva kriterijuma – prema vrsti tržišta i prema vrsti proizvoda, [3].

Trend konvergencije VPP ka kolaborativnim mrežama potvrđen je i u [4,5]. Tu se, naime, tvrdi da po svom sastavu, VPP formira neku vrstu kolaborativnog poslovnog ekosistema sa visokim stepenom interakcije i međuzavisnosti među zainteresovanim stranama. Istraživanje [4,5] je fokusirano na analizu trendova i identifikaciju oblasti konvergencije između discipline kolaborativnih mreža (*Collaborative Network*, CN) i koncepta VPP, kao i razvoja, koristeći predznanje iz domena CN. Rezultati su pokazali da se u okviru VPP formiraju različiti strateški i dinamični saradnički savezi, poput mreža orijentisanih ka cilju, okruženja za razmnožavanje virtuelnih organizacija (*Virtual Organizations Breeding Environment*, VBE), mreža vođenih korišćenjem mogućnosti i mreža vođenih kontinuiranom proizvodnjom. Različiti osnovni funkcionalni principi VPP su slični onima kod CN: stvaranje, rad i raspuštanje virtuelne organizacije, pregovori, brokerske usluge, VBE administratorske usluge, usluge planera i koordinatora virtuelne organizacije, i procesi traženja i odabira partnera, [4,5]. Učešće DER na energetskom tržištu se, naravno, obezbeđuje kroz agregaciju VPP, [4]. Ona obuhvata više zainteresovanih strana: tržišta/kupce, operatore distributivnih usluga, DER/kupce-proizvođače/upravljače kupcima-proizvođačima, sisteme upravljanja energijom, provajdere usluga, energetske zajednice i energetske kooperacije, regulatorna tela, [4].

Autori [4,5] su nadalje, u [16], razvili i razmatrali pojam ekosistema kolaborativne virtuelne elektrane (*Colaborative/Cooperative/Composite VPP Ecosystem*, CVPP-E). On doprinosi efikasnoj organizaciji obnovljivih energetskih zajednica (*Renewable Energy Communities*, REC) na način da one mogu delovati kao VPP ili ispoljavati njene atribute. Ovaj koncept je izveden spajanjem ili integracijom principa organizacionih struktura i mehanizama iz domena CN u oblast VPP. Očekuje se da, ukoliko se akteri u REC angažuju u saradničkim akcijama, to omogući da REC obavlja funkcije koje su slične VPP. Konceptualno, CVPP-E se sastoji od menadžerske zajednice, zajedničkog sistema za skladištenje energije u zajednici, potrošača koji poseduju kombinaciju fotonaponskih i sistema baterijskih skladišta i pasivnih potrošača, koji su svi povezani na energetsku mrežu. Ključni atribut ovog predloženog ekosistema je da se članovi angažuju u kolektivnim akcijama ili saradničkim poduhvatima koji se zasnivaju na zajedničkom cilju, usmerenom na postizanje održive proizvodnje energije, potrošnje i prodaje. U studiji [16] predstavljen je model visokog nivoa za aspekte saradnje u CVPP-E. Ovo uključuje okvir kompatibilnih (zajedničkih) ciljeva, okvir za deljenje i okvir kolektivnih akcija. Ovi okviri služe kao okosnica CVPP-E i igraju vitalnu ulogu u modeliranju CVPP-E. Za procenu predloženog modela, u [16] su korišćeni različiti scenariji simulacije.

1.2.5 Komponente VPP i optimizacioni modeli. Veoma su raznovrsne komponente koje mogu biti obuhvaćene konceptom kompozitne VPP, CVPP. U [17] je razmatrano balansiranje flote vetrogeneratora portfoliom fleksibilnih sredstava – elektranama na biogas i kondenzatorskim baterijama. Prvobitna namena elektrana na biogas koje su razmatrane u VPP bila je zarada na berzi, pre svega na tržištu dan unapred. Kada ova sredstva postanu deo VPP, njihov zadatak se menja tako da on postaje maksimiziranje profita od prodaje električne energije uz obezbeđivanje balansiranja flote vetrogeneratora, što takođe rezultira učešćem na unutardnevnim tržištu. Ovaj zadatak je izazovan u smislu metoda optimizacije i predviđanja cena. U [17] se razmatraju dva aspekta: optimizacija i prognoza cena. Prva je mešovita celobrojna optimizacija i razvijene su sofisticirane metode dekompozicije. Za prognozu cena sprovodi se nekoliko metoda predviđanja zasnovanih na mašinskom učenju (*Machine Learning*, ML), sa ciljem da se maksimizira rezultujući kumulativni prihod. Takođe se koriste komercijalna predviđanja i metoda iz [17] se pokazala konkurentna ovim predviđanjima u smislu rezultujućeg kumulativnog prihoda. Takođe je posebna pažnja posvećena robusnosti VPP da rukuje velikim količinama sredstava koje obuhvata. Osim toga, prediktivna kontrola robusnog modela (*Robust Model Predictive Control*, RPMC) koristi se za uzimanje u obzir mnogih scenarija tokom donošenja odluka.

Mogućnosti koncepta CVPP se ne ograničavaju samo na povećanje fleksibilnosti sistema kombinovanjem različitih, kompatibilnih izvora energije. Tako je u [18], osim promovisanja multienergetske komplementarnosti, u cilju niske karbonizacije predložen optimalni model planiranja rada jedne VPP sa hvatanjem ugljenika i spaljivanjem otpada, uzimajući u obzir koordinaciju električne energije i gasa. Uvođenjem kolaborativnog okvira za korišćenje sistema gasnog postrojenja za hvatanje ugljenika – “električna energija u gas” (*power-to-gas*, P2G), uhvaćeni CO₂ može se koristiti kao sirovina za P2G, za proizvodnju prirodnog gasa koji se isporučuje gasnoj jedinici. Pored toga, potrošnja energije za hvatanje ugljenika i tretman dimnih gasova može se preneti putem zajedničkog dispečinga kako bi se ublažile fluktuacije izlazne snage iz V-RES, tako da električna energija dobijena iz vetra i fotonaponskih panela može biti indirektno dispečabilna i fleksibilno iskorišćena. S obzirom na visoku dimenzionalnu nelinearnost predloženog modela optimizacije i poteškoće u njegovom rešavanju, novi Gausov složeni diferencijalni evolucionni algoritam je dizajniran u [18] da bi rešio ovaj model. Rezultati simulacije pokazuju da predloženi model i metoda mogu da obezbede kapacitet pomeranja vršnog opterećenja i da poboljšaju potrošnju obnovljive energije, efektivno smanjujući cenu i emisiju ugljenika iz VPP.

Da bi se rešio veliki broj diskretnih klastera različitih distribuiranih energetske resursa u ruralnim područjima, u [19] je trgovac električnom energijom (*Electricity Retailer*, ER) postavljen kao agent ovih klastera putem VPP, odnosno prodavac električne energije (ER) je integrisan sa virtuelnom elektranom (VPP-ER). Zatim se u [19] raspravlja o kolaborativnom režimu transakcija “električna energija-ugljenik” i optimalnom modelu transakcije kupovine-prodaje, na dva nivoa. Model višeg nivoa

primenjuje metod uslovne vrednosti pod rizikom (*Conditional Value-at-Risk*, CVaR) za uspostavljanje modela koordinisane transakcije “električna energija-ugljenik” za ruralni VPP-ER. Model nižeg nivoa primenjuje teoriju robusne optimizacije za merenje rizika neizvesnosti izlazne snage vetroelektrane (VE) ili solarne PV elektrane, da bi uspostavio optimalni model dispečinga za VPP. Treće, model se pretvara u uslove optimalnosti *Karush–Kuhn–Tucker* (KKT) da bi se rešio dvostepeni model transakcije kupovine-prodaje. Na primeru jednog industrijskog klastera (*Henan Lankao*), rezultati pokazuju, između ostalog, da predloženi dvostepeni model može uspostaviti koordinisanu optimalnu šemu trgovanja električnom energijom i ugljenikom. Zaključak studije [19] je da bi njeni nalazi mogli da obezbede efikasan alat za donošenje odluka za ruralni VPP-ER na kineskom tržištu električne energije.

Učešće elektroprivrede u trgovini ugljenikom i zelenim sertifikatima je efikasan pristup, zasnovan na tržištu, za rešavanje negativnih eksternih efekata proizvodnje električne energije. U tom pogledu se i VPP pokazuje kao efikasno sredstvo. Tako je u [20] VPP uzeta kao agregator za koordinaciju i optimizaciju trgovine ugljenikom i zelenim sertifikatima između kupca električne energije i krajnje prodaje električne energije, kako bi se postigao cilj maksimiziranja sveobuhvatne koristi od VPP. Prvo, analizira se način rada VPP koji agregira različite vrste distribuirane energije i različite korisnike koji učestvuju na tržištu zelenih sertifikata i tržištu emisija ugljenika. Drugo, konstruisan je dvostepeni kolaborativni optimizacioni model VPP koji učestvuje u transakciji kupovine i prodaje električne energije i transakciji zelenog sertifikata. S jedne strane, troškovi kupovine električne energije i sticanja zelenog sertifikata minimiziraju se kombinovanjem različitih vrsta resursa za proizvodnju električne energije pri krajnjoj kupovini električne energije, a sa druge strane, kupljena energija se distribuira među različitim tipovima korisnika prilikom prodaje električne energije, kako bi se maksimizirao prihod od prodaje električne energije i prihod od prodaje zelenih sertifikata. Na osnovu toga, VPP kao celina učestvuje na tržištu električne energije, tržištu emisija ugljenika i tržištu zelenih sertifikata kako bi se maksimizirao sveobuhvatni prihod. Konačno, VPP je uzeta kao primer za verifikaciju ekonomičnosti i efikasnosti modela predloženog u [20].

1.3 Sadržaj, doprinos i struktura članka

Koncept CVPP koja bi – osim električne – obuhvatila i druge vrste energije, kakav predlažu autori ovog članka, prikazan je u poglavlju 2 i zasnovan je na vertikalnom konceptu Industrijskog interneta stvari (*Industrial Internet of Things*, IIoT), [21-23], uvažavajući njegove prednosti kako sa aspekta upravljanja i obrade podataka i informacija, tako i sa aspekta distribuirane realizacije i sajber sigurnosti. Osim veoma širokog dijapazona vrsta distribuiranih resursa za proizvodnju energije i njenih potrošača, koncept koji se predlaže u ovom članku ne samo da razmatra poziciju i ulogu CVPP u širem okruženju, nego ostaje otvoren i za obuhvatanje pojedinačnih većih proizvodnih jedinica ili skladišta energije. Kad je reč o distribuiranim resursima, u uslovima tipičnim za Srbiju,

kao najznačajnije i potencijalno najefektivnije, raspoznato je uspostavljanje funkcionalnosti upravljanja nad pripremom sanitarne tople vode. Osim toga, akcenat je stavljen i na mogući doprinos optimizaciji rada i fleksibilnosti sistema koji bi dalo funkcionalno povezivanje i podvođenje pod koncept CVPP toplotnih skladišta (kako distribuiranih manjih, tako i većih, namenski građenih) i skladišta potencijalne energije (poput vodotornjeva) i upravljanja njima.

Osim tehničko-tehnološkog povezivanja različitih komponenti, na kome je inače zasnovan koncept CVPP, u slučaju kada bi se EPS pojavio kao Agregator, i njegova funkcija upravljanja elektroenergetskim portfeljom (tzv. „Trgovina“) bi, zaključivanjem dugoročnih ugovora sa privatnim investitorima vetroparkova i solarnih farmi o isporuci električne energije (*Long Term Power Purchase Agreement*, LT PPA), kroz nuđenje usluge balansiranja mogla doprineti ovde predloženom modelu CVPP. Tako bi i ovaj deo „zelene“ energije postao jedna od komponenti predloženog koncepta i portfelja EPS, bio zadržan u Srbiji i stavljen na raspolaganje za optimizaciju rada i povećanje fleksibilnosti sistema.

Na napred opisane načine, CVPP bi stekla dodatne performanse kao alat za optimizaciju rada sistema i korišćenje električne i toplotne energije, proizvedenih i uskladištenih ne samo u kapacitetima EPS i njegovih krajnjih korisnika, nego i drugih energetske i privrednih subjekata. Sve ovo, naravno, ne ograničava samostalne energetske subjekte da se na tržištu pojave kao nezavisni agregatori (nudeći svoje usluge i razvijajući sopstvene koncepte VPP), shodno prihvaćenoj evropskoj praksi i regulativi.

U poglavlju 3 ovog članka prikazani su načini agregacije distribuirane proizvodnje kupaca-proizvođača i njihove potrošnje. U poglavlju 4 data je gruba procena efekata koji bi mogli da se postignu uvođenjem i primenom koncepta virtualne kompozitne elektrane. U prikazanom primeru proračunati su i prezentovani samo efekti koji bi se imali od agregiranja akumulacionih bojlera za pripremu sanitarne tople vode, opremljenih daljinski upravljivim termostatom i „pametnim“ prekidačima. Poglavlje 5 daje pregled zakonskog okvira i trenutnih ograničenja u Srbiji za dalji razvoj ovoga koncepta. Na kraju rada su dati odgovarajući zaključci.

2. ORGANIZACIONA STRUKTURA I TEHNIČKI POTENCIJAL ZA USPOSTAVLJANJE KOMPOZITNE VIRTUELNE ELEKTRANE

Autori rada su prepoznali tri ključna pitanja na koja treba odgovoriti pre investicionog planiranja i praktične realizacije virtualne elektrane. Prvo pitanje se odnosi na kontrolu i upravljanje procesima proizvodnje i potrošnje, drugo se odnosi na tehnološke aspekte različitih izvora i

potrošnje električne energije i treće je organizacione prirode, s obzirom da se mora usaglasiti prostorna razuđenost izvora i potrošnje, odnosno da se stvori njihova jedinstvena mreža.

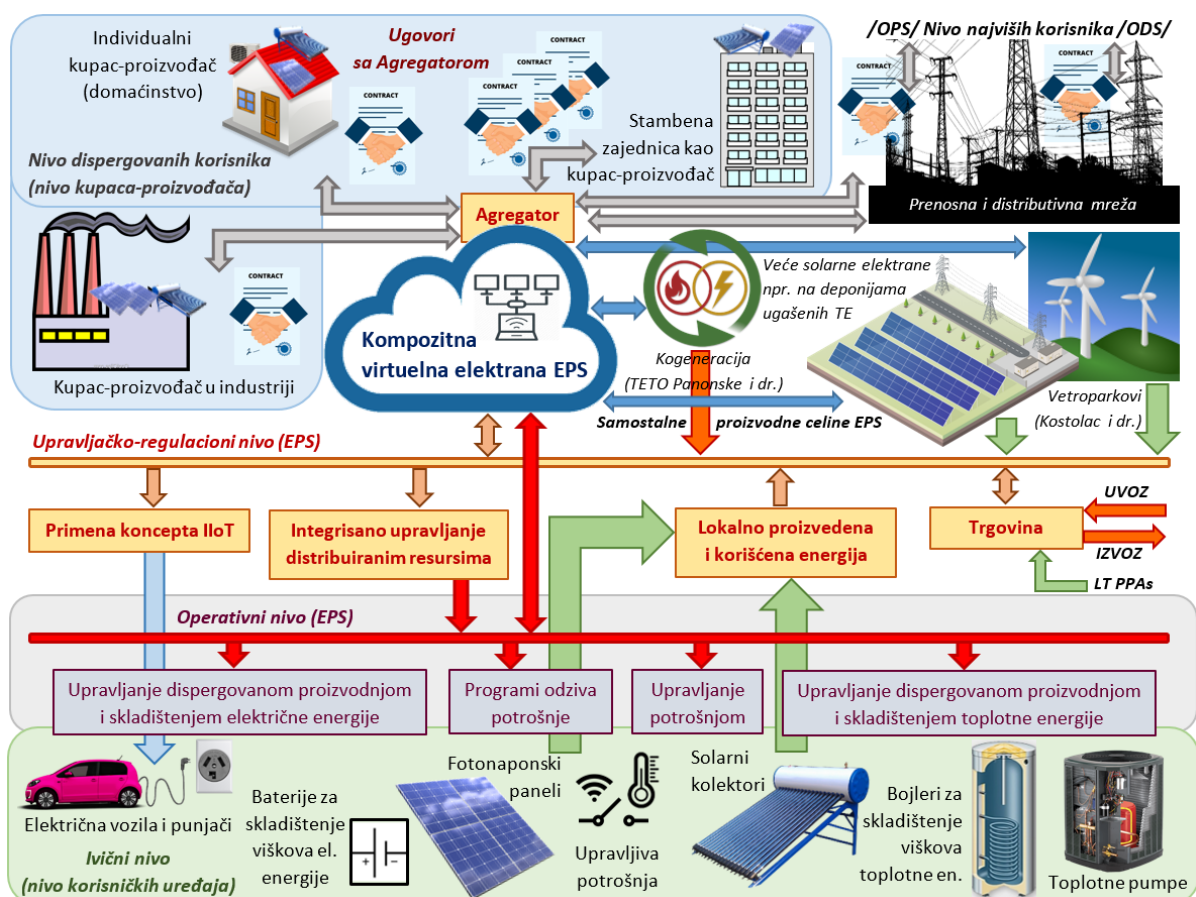
2.1 Vertikalna i hibridna koncepcija kontrole i upravljanja

Primena modernih koncepata kontrole, obrade podataka, upravljanja i odlučivanja podrazumeva da se mnogi procesi odlučivanja sa operativnog nivoa prebacuju na više hijerarhijske nivoe. Osnovni cilj modernih koncepata kontrole, upravljanja i odlučivanja je smanjenje operativnih troškova i skraćivanje vremena analize i obrade podataka. Virtualna elektrana predstavlja izuzetno složen sistem sa velikim brojem podsistema. Polazeći od prednosti vertikalnih koncepcija kontrole, upravljanja i obrade podataka i informacija, koje su postale jedno od pouzdanih prihvatljivih rešenja koncepata baziranih na IIoT-u [21-23], na Slici 1 je dat predlog strukture buduće virtualne elektrane EPS.

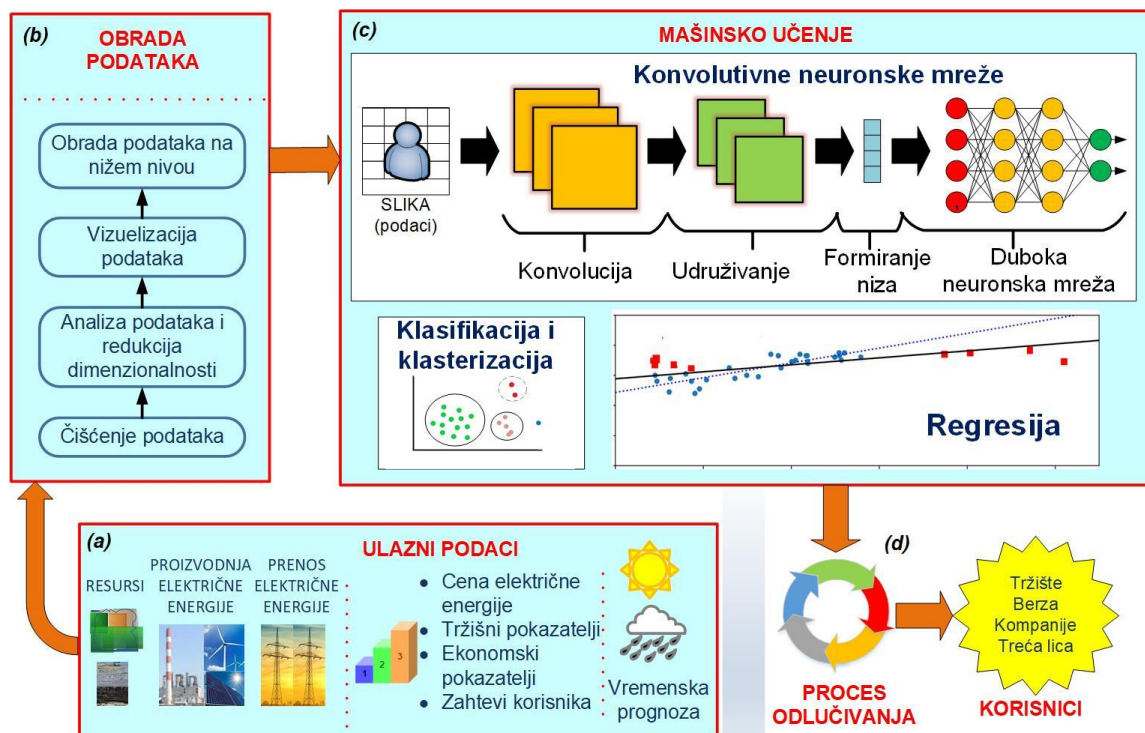
Danas nove tehnologije omogućavaju brzu i jeftinu dvosmernu komunikaciju između kupaca i energetske kompanije. „Pametni“ merni uređaji sa mogućnošću daljinskog upravljanja mogu pratiti, analizirati, prosljeđivati i/ili skladištiti podatke o potrošnji različitih oblika energije sa visokim učestanostima odabiranja. Dostupnost stotina hiljada vremenskih profila opterećenja različitih grupa potrošača stvara mogućnost primene algoritama veštačke inteligencije (*Artificial Intelligence*, AI) za grupisanje potrošača sa sličnim obrascima potrošnje.

Analiza velikog broja podataka (*Big Data Analytics*, BDA) je značajno izmenila prakse poslovanja u različitim industrijama. Možda najizraženiji primeri su velike platforme za kupovinu preko interneta (Alibaba, Amazon i dr.) koje se značajno oslanjaju na BDA i podatke o prethodnim kupovinama korisnika i bihevioralnoj analizi na osnovu istorije pregledanja i aktivnosti na internetu, [24].

Slika 2 prikazuje moguću shemu BDA primenjenu na EES. Proces prikupljanja podataka počinje različitim izvorima informacija (Slika 2.a)), kao što su „pametna“ brojila, tržište električne energije, vremenske prognoze, senzori za merenje brzine vetra itd. Nad tim podacima moguća je obrada (Slika 2.b) i primena naprednih statističkih metoda i tehnika mašinskog učenja (*Machine Learning*, ML) (Slika 2.c)), kao što su analiza vremenskih serija, grupisanje (*clustering*) i duboko učenje (*deep learning*) da bi se generisale informacije o osobenostima celokupnog sistema koje se mogu primeniti za potrebe estimacije tehničkog potencijala i prediktivnog upravljanja resursima, [25]. Ovakve informacije mogu da se koriste za dobrobit energetske kompanije, njihovih korisnika i trećih strana koje su uključene u ovaj proces (Slika 2.d)).



Slika 1 Moguća struktura, funkcionalnosti i okruženje kompozitne virtualne elektrane EPS



Slika 2 Moguća shema za BDA u EES

2.2 Tehnički potencijal na strani krajnjih korisnika

Virtualna elektrana može da integriše (agregira) krajnje korisnike u smislu upravljive potrošnje električne energije, a kad su u pitanju kupci-proizvođači, može da agregira i upravljivu dispergovanu proizvodnju električne energije. Ideja koja se zagovara u ovom radu je integracija dispergovane proizvodnje i upravljive potrošnje i drugih vidova energije. Pri tome, svi razmatrani tipovi energije posmatraju se u odnosu na električnu energiju. Krajnji korisnik može biti domaćinstvo ili privredni subjekt (v. Sliku 1, gore levo). Virtualna elektrana može da pruži i valorizuje dve vrste usluga, balansiranje i ekonomski dispečing, i shodno tome analiziran je tehnički potencijal krajnjih korisnika koji bi mogli da povećaju kapacitet virtualnih elektrana za pružanje predmetnih usluga operaterima sistemâ, kao korisnicima najvišeg ranga (v. Sliku 1, gore desno).

Potrošnja električne energije krajnjih korisnika se svodi na pretvaranje električne energije u neki drugi oblik energije. Najvećim delom se električna energija pretvara u toplotnu, potom u hemijsku, u potencijalnu energiju ili u druge vidove energije. Sa stanovišta virtualne elektrane, od značaja je upravljiva potrošnja koja u svom tehnološkom procesu ima određeni vid skladištenja energije, bez uticaja na tehnološki proces potrošnje energije. Tehnološki procesi u kojima se troši električna energija, a koji nemaju određene akumulacije energije, neće biti razmatrani u ovom radu.

Finalna energija se dominantno troši na procese zagrevanja i hlađenja. U zemljama EU28, polovina finalne energije se pretvori u toplotu, [26], a za zemlje koje su na nižem nivou ekonomskog razvoja taj procenat je i veći. U Republici Srbiji, na osnovu grube procene, približno jedna trećina ukupne potrošnje u zimskom periodu odlazi na zagrevanje prostora (prosečan dnevni konzum električne energije u mesecu maju je oko 80 GWh, a u januaru oko 120 GWh). Sa niskom cenom akumulatora toplote, potrošnja toplotne energije predstavlja najznačajniji resurs virtualnih elektrana i za balansne usluge i za ekonomski dispečing. Upotreba potrošnje električne energije za proizvodnju toplotne u svrhu balansiranja sistema već je u primeni. U Belorusiji je, [27], za potrebe balansiranja sistema, instalirano oko 1200 MW upravljivih električnih bojlera za potrebe daljinskog grejanja i zagrevanja tople vode za građanstvo.

Potrošnja električne energije u svrhu pretvaranja u hemijsku energiju je u najvećem porastu. U pitanju su baterije, a dominantan rast predstavljaju baterije električnih automobila. Pravac razvoja punjača baterija ne ide u korist upravljive potrošnje. Proizvođači električnih automobila ulažu znatna sredstva da smanje vreme punjenja baterija, tako što povećavaju snagu punjača, pa punjači dostižu snage od 400 kW, [28]. Baterije električnih automobila u toku procesa punjenja, u sprezi sa „pametnim“ punjačima, u bliskoj budućnosti mogu postati značajan resurs za upravljanje potrošnjom.

Drugi vid pretvaranja električne energije u hemijsku je proizvodnja vodonika ili produkata vodonika, što postaje jedan od glavnih pravaca razvoja energetskeg sektora. EU je za razvoj projekata za korišćenje vodonika krajem 2021. godine izdvojila sredstva u iznosu od preko 500 mlrd € koja

bi trebalo da budu utrošena do 2030. godine. Trenutno se broj krajnjih korisnika, koji mogu da proizvode vodonik, svodi na privredne subjekte koji se bave proizvodnjom tehničkih gasova, ali je cilj EU da se poveća korišćenje vodonika, prvenstveno u svrhe transporta. S adekvatnim rezervoarima za vodonik, i postrojenjima za proizvodnju vodonika koja dostižu gradijent promene potrošnje od 10%/s, proizvodnja vodonika u bliskoj budućnosti može postati značajan resurs za virtualne elektrane, i za usluge balansiranja i za ekonomski dispečing. Izražen problem skladištenja vodonika trenutno se rešava u dva pravca, dobijanjem metanola ili amonijaka.

Pretvaranje električne energije u potencijalnu kod krajnjih potrošača je takođe perspektivno sa stanovišta VPP. Krajni korisnici koji vrše ovu konverziju energije su prvenstveno javna komunalna preduzeća vodovoda i kanalizacije. Tehnološki procesi snabdevanja vodom i odvođenja kanalizacione vode, podrazumevaju procese pumpanja vode iz prostorâ akumuliranja vode/kanalizacije, ili u njih, i uobičajeno imaju određenu slobodu kretanja nivoa u akumulaciji (rezervoaru). Kao takvi, predstavljaju značajan potencijal za agregiranje upravljive potrošnje, pogotovo sa stanovišta ukupnjavanja krajnjih korisnika koji su agregirani. Na razvoj resursa ovog tipa potrošnje nije potrebno čekati bližu ili dalju budućnost, oni su već sada dostupni.

2.2.1 Izvori energije. Najznačajniji izvori energije krajnjih korisnika EES, koji su perspektivni za agregiranje u virtualne elektrane mogu se podeliti u grupe prema upravljivosti:

- Neupravljivi izvori energije:
 - solarni paneli,
 - solarni kolektori,
 - solarni termo paneli (paneli čijim se hlađenjem zagreva voda);
- Upravljivi izvori energije, čiju primenu je moguće optimizovati (ekonomski dispečing):
 - biomasa i biogas (toplotna energija),
 - fosilna goriva (toplotna energija),
 - toplotne pumpe (izvor toplotne energije),
 - neupravljivi izvori sa skladištima energije;
- Kombinovani izvori energije, najperspektivniji sa stanovišta primene u aplikacijama virtualnih elektrana, sa značajnim brojem promenljivih stanja koje je potrebno pratiti:
 - kogeneracije (uglavnom ih koriste privredni subjekti čiji proizvodni proces zahteva primenu i električne i toplotne energije, eventualno i tehnološke pare),
 - toplotne pumpe u kombinaciji sa skladištima toplote (izvori toplotne energije čijom primenom se povećava kapacitet termalnih skladišta),
 - niskotemperaturni izvori toplotne energije (izvori koji su u značajnom razvoju, kombinacija toplotnih pumpi i otpadne toplote iz industrijskih procesa ili toplote nastale hlađenjem računarskih centara).

2.2.2 Upravljiva potrošnja i skladištenje energije. Skladišta energije na strani krajnjih korisnika EES koja su

trenutno u primeni, odgovaraju već pomenutim vidovima transformacije električne energije u drugi vid energije. Najčešće su prisutna skladišta toplotne energije (akumulatori toplote), skladišta hemijske energije (dominantno baterije) i skladišta energije u kojima se električna energija skladišti kao potencijalna. S obzirom na to da su trenutno široko dostupni i da nije potrebno čekati na njihov razvoj, u ovom radu biće razmatrani samo akumulatori toplote i skladišta potencijalne energije. Akumulatori toplote mogu biti ciljno realizovani, a mogu se i termičke kapacitivnosti raznih drugih objekata koristiti kao akumulatori toplote (npr. zidovi prostora koji se greje). Upravljava potrošnja u kombinaciji sa skladištima energije proširuje opseg usluga koje sistemu može da pruži virtuelna elektrana – balansiranje sistema i ekonomski dispečing.

Koncept upravljanja potrošnjom kao podrška regulaciji frekvencije pominje se pre više od četrdeset godina, [29], gde je pored koncepta „proizvodnja prati potrošnju“, prikazan i koncept „potrošnja prati proizvodnju“. U [29] je izvršena i kategorizacija na pasivno i aktivno upravljanje potrošnjom. Pasivno upravljanje potrošnjom se uglavnom odnosi na opterećenja koja prirodno koriste radni ciklus i mogu da se uključe/isključe privremeno bez ugrožavanja radnog ciklusa i komfora korisnika. Kao prvi kandidati za upravljivu potrošnju, kod kojih nisu potrebna dodatna ulaganja sem upravljanja, izdvajaju se termostatski kontrolisani uređaji, koji svojstveno poseduju skladištenje toplotne energije, a istovremeno su i veliki potrošači u domaćinstvima kao krajnjim korisnicima, [30]. Takvi uređaji uključuju klima-uređaje, električne bojlere, TA peći, i slično. Autori [29] su prikazali mogućnosti za upotrebu uređaja koji, na osnovu merenja učestanosti mreže na koju je priključen, može da uključi/isključi određenog električnog potrošača. Međutim, u to vreme na raspolaganju nije postojala infrastruktura i tehnologija koja bi mogla da podrži brzi protok, skladištenje i obradu velikog broja informacija.

Uz primenu novih tehnologija na stare ideje, u [31] je prikazan prototip daljinski upravljivog prekidača električnog bojlera, zasnovan na IIoT konceptu, sa mogućnošću očitavanja vrednosti sa senzora za merenje temperature vode, struje potrošnje i učestanosti mreže. U [31] je izvršena statistička analiza rada električnog bojlera i date su procene raspoloživih promena njegove snage i energije – povećanja i smanjenja, zavisno od trenutnih potreba EES, ali i očekivanih zahteva kupaca. Na osnovu dobijenih statističkih pokazatelja, predložen je dinamički model velikog broja bojlera koji se koriste na sličan način – dinamički model jednog klastera. Analizom mogućnosti rada u sekundarnoj regulaciji učestanosti, pokazano je da je ovakvim sistemom moguće postići čak i bolje rezultate u pogledu vremena odziva, te rasteretiti postojeće, konvencionalne proizvodne jedinice i doprineti stabilnosti EES kao i sigurnom snabdevanju kupaca. Pored tehničkih analiza, u [31] je izvršena i uprošćena ekonomska analiza jednog takvog projekta. Istaknuto je da bi se investicija vratila korisniku za oko pet meseci, te da je stopa godišnjeg prihoda već u prvoj godini oko 270%.

Toplotni akumulatori, kao ciljno realizovana skladišta energije, predstavljaju jedan od najjeftinijih oblika

skladišta energije, sa cenom ispod 15 USD/kWh, [32], dok prema [33] velika skladišta toplote mogu da imaju cenu u opsegu od 15-50 €/m³. Jeftini toplotni akumulatori toplotu akumuliraju najčešće u vodi, a u primeni su akumulatori od 50 litara vode, pa sve do sezonskih akumulatora toplote kapaciteta od preko 500.000 m³ vode, [34]. U kombinaciji sa toplotnom pumpom, koja spušta donju granicu temperature vode koju je moguće iskoristiti na ispod 20 °C, toplotni akumulatori predstavljaju izuzetno elastično postrojenje sa stanovišta upravljivosti potrošnje.

Ukoliko se skladište zonira, tako da ima dva posebna skladišta, energija iz toplijeg skladišta se može koristiti direktno za grejanje prostora kada je cena električne energije visoka, a u slučaju povoljne cene električne energije, preko toplotne pumpe se toplota iz hladnijeg akumulatora može iskoristiti tako da konvertovana preko toplotne pumpe ima parametre za primenu u grejanju prostora. Izvor toplote akumulatora su najčešće solarni kolektori (kao na slikama 1 i 3), ali mogu biti i otpadna toplota iz kogeneracije ili čak pretvaranje električne energije u toplotnu. Veliki akumulatori toplote (*Large Thermal Energy Storages*) mogu da dostignu i kapacitet od preko 40 GWh pojedinačno. Na prostorima gde se 27% finalne energije troši na grejanje prostora, [26], mogu predstavljati idealno rešenje za godišnje balansiranje proizvodnje električne energije iz V-RES. Gubici energije sezonskih akumulatora toplote mogu da se spuste i do 10%.

Upravljiva potrošnja sa skladištenjem energije u vidu potencijalne, prisutna je u tehnološkim procesima u kojima se fluid pretače sa jednog na drugo mesto, više nadmorske visine. Primer krajnjeg potrošača električne energije koji vrši opisanu konverziju energije su javna komunalna preduzeća vodovoda i kanalizacije. U ravničarskim krajevima uobičajeno je da se pritisak vode u vodovodnom sistemu održava tako što se voda upumpava u vodotoranj, najvišu tačku naseljenog mesta. Vodotoranj je akumulacija vode koja ima merač nivoa, sa maksimalnom i minimalnom dozvoljenom vrednošću. U zavisnosti od potrošnje vode, pumpe vodovodnih sistema su upravljive na satnom nivou, a upravljivost zavisi od dozvoljenih minimalnih i maksimalnih volumena vode u vodotoranju. Kanalizacioni sistemi, poseduju kolektore koji takođe imaju dozvoljene nivoe i pumpe kojima je moguće upravljati, kao i u slučaju vodovoda.

3. NAČINI AGREGACIJE PROIZVODNJE I POTROŠNJE

3.1 Aktivni način agregacije – EPS kao mogući Agregator

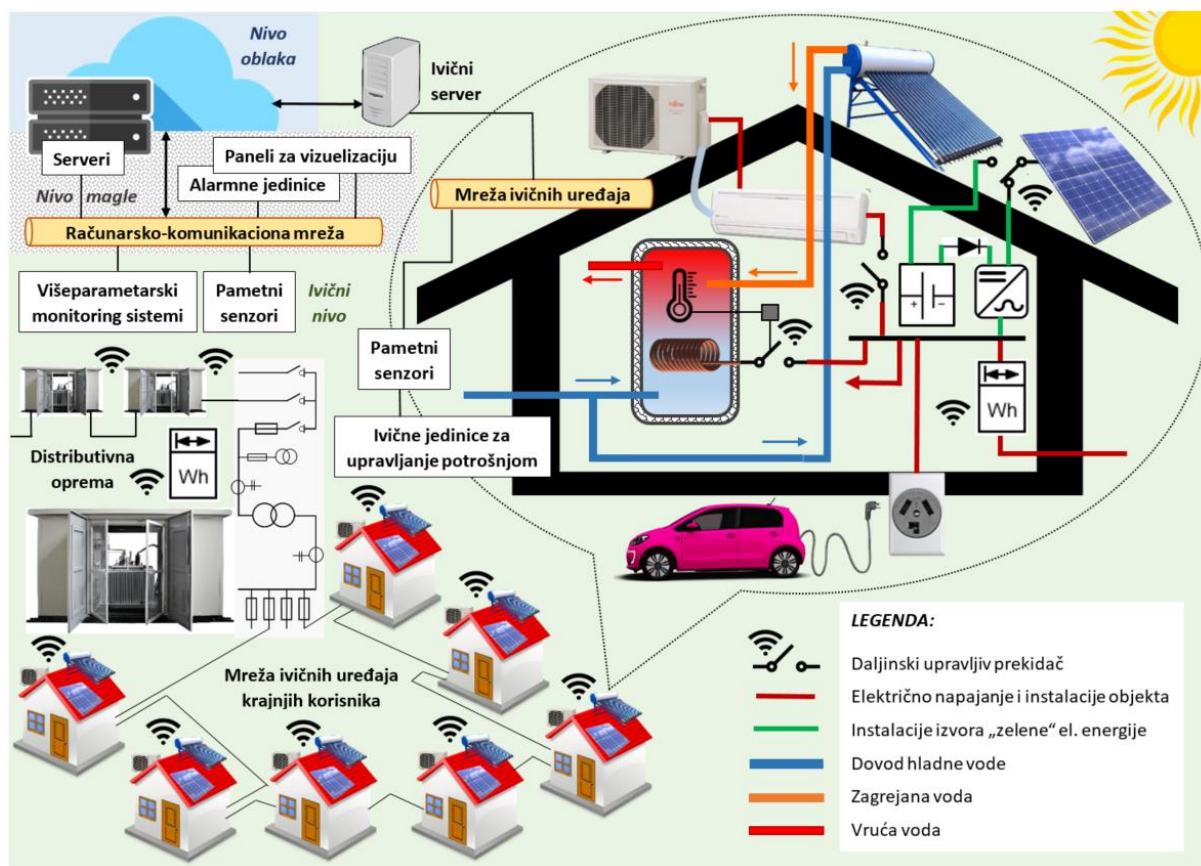
Budući da EPS, između ostalog, obavlja uloge proizvođača, trgovca i snabdevača električnom energijom, prilikom optimizacije celokupnog portfelja EPS, izrađuju se različite vrste planova, na nekoliko vremenskih horizonata. Pri izradi srednjeročnih (kvartalnih, mesečnih i sedmičnih) i kratkoročnih (dan-unapred i unutardnevnih) planova proizvodnje i trgovine električnom energijom, cilj je da se maksimalnim iskorišćenjem fleksibilnosti elektrana optimizuje njihova proizvodnja, tako da kompanija ostvari najveći mogući profit. Da bi se to postiglo, potrebno je najveći mogući deo raspoložive

energije plasirati u periode najviših tržišnih cena, uz zadovoljenje već ugovorenih obaveza/ispоруka (snabdevanje i prethodno zakljućeni ugovori za trgovinu) i postojećih ogranićenja (pre svega tehnićkih karakteristika elektrane, kao i maksimalnih i minimalnih sadržaja akumulacija, odnosno deponija uglja). Sredstvo kojim se to postiže je trgovina elektrićnom energijom, tako što se u periodima niskih tržišnih cena elektrane „potiskuju“ do tehnićkih, odnosno bioloćkih minimuma, dok se razlika između potrošnje („konzuma“) i proizvodnje nadomešćuje kupovinom na „spot“ tržištu, čime se najveći deo primarne energije (uglja, vode) prenosi u periode visokih cena. U tom smislu, da bi se što veći deo primarne energije preneo iz perioda niskih, u period visokih cena, potrebno je da elektrane raspolazu što većim rasponom između nominalnih snaga i tehnićkih (odnosno bioloćkih) minimuma, tj. da poseduju što veću fleksibilnost.

Sa druge strane, isti efekat se može postići korišćenjem raspoloživog opsega upravljive potrošnje, odnosno „pomeranjem“ dela potrošnje iz perioda viših cena u periode nižih cena. Ipak, mogućnost primene upravljive potrošnje je prilićno ogranićena, jer postoji relativno mali broj velikih industrijskih/komercijalnih potrošaća (kupaca) elektrićne energije kojima proces proizvodnje dozvoljava upravljanje potrošnjom i kod kojih trošak elektrićne energije predstavlja znaćajan udeo u ceni finalnog proizvoda (energetski intenzivni kupci), kako bi se mogli

motivisati adekvatnim cenovnim signalima. Nasuprot tome, postoji relativno veliki broj malih kupaca i domaćinstava gde je „pomeranje“ potrošnje moguće, ali još uvek ne postoji adekvatna regulativa, infrastruktura, kao ni cenovni signali koji bi to omogućili. Osim toga, znaćajniji efekti upravljive potrošnje mogu se postići jedino agregacijom (objedinjavanjem, grupisanjem) velikog broja (uglavnom manjih) krajnjih korisnika EES, što je jedan od osnovnih razloga zbog kojih se i uvodi novi ućesnik na tržištu elektrićne energije – Agregator.

Agregator može objediniti i manje, distribuirane (dispergovane) proizvođaće elektrićne energije, i to najćešće one sa upravljivom proizvodnjom, kakav je primer kupca-proizvođaća sa mogućnoću skladištenja elektrićne energije, ilustrovan na Slici 3. Na njoj je prikazana jedna energetski „pametna“ kuća, kao i radikalno napojena elektrodistributivna mreža na koju je prikljućen niz takvih, prostorno raspoređenih, kuća. Sa aspekta potrošaća i „lokalne zelene proizvodnje“, prikazana je ivićna (edge) koncepcija, čije su osnovne prednosti kratko vreme obrade podataka (smanjenja kašnenja) i jednostavnije upravljanje lokalnim procesima proizvodnje i potrošnje. Na Slici 3 je prikazan opšti slućaj - domaćinstvo koje može da proizvodi i akumulira i toplotnu i elektrićnu energiju. Agregator može objediniti i manje kompleksne slućajeve, kao u [31].



Slika 3 Hibridna koncepcija IIoT za agregaciju i upravljanje kompozitnom virtualnom elektranom

Cilj je obezbediti što veću fleksibilnost, koju Agregator kasnije valorizuje na tržištu elektrićne energije. U zavisnosti od tehnićkih mogućnosti kojima raspolaze u

okviru svog portfelja, pored „pomeranja“ potrošnje/proizvodnje, Agregator ostvaruje prihode od fleksibilnosti i na tržištima sistemskih usluga i balansne

energije. S tim u vezi, Agregator ostvaruje profit nudeći svoje usluge (fleksibilnost) različitim zainteresovanim stranama (tržišnim učesnicima):

- drugim proizvođačima/snabdevačima, kojima je fleksibilnost bitna zbog optimizacije portfelja proizvodnje/snabdevanja, kao i zbog balansne odgovornosti na tržištu balansne energije,
- operatoru prenosnog sistema, kroz pružanje sistemskih usluga (obežbeđivanje sekundarne i tercijarne rezerve snage), čime se indirektno smanjuje potreban nivo rezerve na strani proizvodnje (a time i oportunitetni troškovi proizvodnje),
- operatoru distributivnog sistema, imajući u vidu činjenicu da zbog sve masovnijeg priključivanja V-RES na distributivnu mrežu postoji potreba za fleksibilnošću u cilju efikasnog i sigurnog upravljanja distributivnom mrežom, kao i mogućih smanjenja investicionih troškova (u distributivnu mrežu).

Uzimajući u obzir veličinu portfelja EPS, delatnosti koje EPS obavlja, kao i potencijale koje uloga Agregatora donosi, postoji jasan interes EPS za obavljanjem ove uloge, kako bi se upotpunile mogućnosti portfelja EPS i obezbedio dodatni izvor prihoda. S obzirom da se u okviru EPS nalazi i funkcija snabdevanja električnom energijom, a da je u [2] sagledana i mogućnost da se na tržištu električne energije, osim nezavisnih agregatora, agregiranjem bave i snabdevači, jedna od mogućih opcija, čiju izvodljivost treba istražiti, jeste da se „EPS Snabdevanje“ registruje i kao Agregator.

U tom pogledu, kao ugledni primer mogao bi da posluži način poslovanja sličnog državnog preduzeća, poput GEN-I. Ova kompanija vrši ulogu agregatora-snabdevača u više zemalja u centralno-istočnoj Evropi. U pogledu agregacije, GEN-I raspolaže i upravljivom potrošnjom, kao i distribuiranom proizvodnjom. Koncept virtuelne elektrane im se zasniva na razvoju jedinstvene platforme koja objedinjuje upravljanje agregatorskim portfeljem, pristup različitim tržištima, e-mobilnost, naprednu analitiku. Ovakav koncept omogućava GEN-I da u Sloveniji i Austriji aktivno učestvuje u pružanju balansnih usluga iz virtuelne elektrane, [35].

3.2 Pasivni način agregacije – dinamičko tarifiranje

Dinamičko tarifiranje, opcija koju obično nude tradicionalni snabdevači električnom energijom, predstavlja tip ugovora o snabdevanju koji sadrži varijabilni deo cene koji, donekle ili u potpunosti, odražava fluktuaciju cene na veleprodajnom tržištu električne energije. U ovakvom ugovornom obliku, kupci se podstiču da reaguju na cenovne signale sa tržišta, te podešavaju svoju potrošnju u skladu sa promenama cena (tj. teže da smanje potrošnju energije tokom sati sa visokom cenom i povećaju je tokom sati sa niskom cenom). Ovakav proaktivan pristup kupaca može dovesti do ušteda u računu za električnu energiju. Međutim, potrebno je istaći da taj pristup nosi i određene rizike sa sobom, u pogledu iznenadne izloženosti visokim cenama u određenim periodima. Iz tog razloga vrlo je važno da kupac bude dobro upoznat sa svim aspektima i rizicima, da dobro sagleda mogućnost upravljanja sopstvenom potrošnjom, a

možda i ispregovara takav ugovor koji će sadržati određene limite koji bi ga zaštitili od nagle promene cena energije ili njene velike volatilnosti u kratkom roku.

Neki od primera dinamičkog tarifiranja iz evropske prakse, [36], opisani su u nastavku:

- Snabdevač *Octopus* (Velika Britanija): u ponudi ima tarifu pod nazivom „Agile“ unutar koje se cena električne energije za kupca menja na svakih 30 minuta. Snabdevač na svojoj internet stranici nudi interaktivni prikaz primera kupca za koga je ovaj vid tarifiranja najpogodniji, a takođe daje i pregled i poređenje sa ostalim statičkim tarifama koje ima u ponudi. Ugovor sadrži klauzulu o limitu („*price cap*“), tj. maksimalnoj ceni kojoj kupac može biti izložen.
- Snabdevač *easyEnergy* (Holandija): u ponudi ima tarifu koja reflektuje cenu za krajnjeg korisnika kao kombinaciju varijabilnog dela (satne veletržišne cene) i fiksnog dela (fiksna taksa definisana na mesečnom nivou). Ne postoji neki vid zaštite ili alarma za kupca koji bi ukazao na pojavu visokih cena i samim tim naglog povećanja računa za električnu energiju.

4. TEHNO-EKONOMSKA OPRAVDANOST REALIZACIJE VPP

U Srbiji postoji relativno mali broj velikih industrijskih (komercijalnih) kupaca električne energije kojima bi proces proizvodnje dozvolio upravljanje potrošnjom i kod kojih trošak električne energije predstavlja značajan udeo u ceni finalnog proizvoda. To su energetski intenzivni kupci, koji bi mogli biti motivisani adekvatnim cenovnim signalima. Poslednjim rastom cene električne energije za komercijalne kupce dodatno je uvećan njen udeo u finalnim proizvodima kod velikog broja energetski intenzivnih kupaca, tako da bi trebalo ispitati zainteresovanost komercijalnih kupaca za učešće u mogućim programima upravljanja potrošnjom.

Nasuprot njih, postoji relativno veliki broj malih kupaca i domaćinstava kod kojih je „pomeranje“ potrošnje moguće, ali za to još uvek ne postoji adekvatna infrastruktura (npr. „pametna“ brojlara, daljinski upravljivi prekidači i sl.). Osim toga je i cena za garantovano snabdevanje i dalje značajno niža od tržišne, tako da su relativno retki periodi u kojima bi bilo moguće cenovnim signalima motivisati domaćinstva i male kupce da izmene način i vreme korišćenja svojih električnih uređaja. Naime, retko se dešava da je cena na tržištu niža od cene za garantovano snabdevanje.

Iz navedenih razloga, a nadasve zbog nedostajuće regulative (v. Poglavlje 5) i sadašnje nemogućnosti da upravlja asetima koji nisu njegovi (poput akumulacionih bojlera u primeru iz [31]), EPS u svojstvu isključivo snabdevača (kada je reč o potrošnji) ne može ostvariti onakve uštede na strani svojih postojećih kupaca kakve bi to mogao u svojstvu agregatora jedne virtuelne elektrane i nakon obezbeđivanja tehničkih preduslova za takav, aktivni pristup. Procena troškova i mogućih benefita uspostavljanja VPP ilustrovana je u ovom poglavlju, i to

samo za komponentu upravljive potrošnje bazirane na daljinski kontrolisanoj pripremi sanitarne tople vode.

4.1 Troškovi realizacije VPP – procenjeni troškovi potrebnih hardverskih i softverskih resursa

U zavisnosti od tipa prekidača i broja senzora (simbolički prikazanih na slikama 1 i 3, kod upravljive potrošnje), cena uređaja IIoT za akviziciju sa daljinskim prekidačem, sa ugradnjom, iznosi između 50 i 300 EUR po potrošaču/prekidaču. Ukupna cena po korisniku zavisi od broja i tipa uređaja jednog entiteta (npr. domaćinstva). Potrebna su i sredstva za kupovinu ili iznajmljivanje servera, kao i za održavanje i razvoj softvera. U zavisnosti od kompleksnosti i očekivanog broja korisnika, sredstva za razvoj softvera se procenjuju na opseg od 300.000 do 1.000.000 EUR. Za opseg 10.000 do 100.000 korisnika troškovi održavanja softvera i zakupa servera iznosili bi od 30.000 do 60.000 EUR/god. Procena investicionih i eksploatacionih troškova za 10.000 korisnika, što bi odgovaralo okvirnom opsegu jedne kompozitne VPP od 50 MW, prikazani su u Tabeli I. Važno je istaći da troškovi razvoja softvera praktično ne zavise od broja korisnika, te se njihov udeo procentualno umanjuje sa porastom broja korisnika.

Tabela I Procena troškova za VPP od 50 MW

10.000 korisnika	Vrsta troška	Iznos
CAPEX (EUR)	uređaji IIoT	1.000.000
	razvoj softvera	500.000
	ukupno CAPEX	1.500.000
OPEX (EUR/god.)	server	40.000
	troškovi ljudstva	40.000
	ukupno OPEX	80.000

4.2 Tržišne mogućnosti upotrebe virtualne elektrane i primeri benefita

Veća fleksibilnost na strani potrošnje električne energije i distribuirane proizvodnje, agregirana i upravljana kroz koncept virtualne elektrane, može dovesti do brojnih benefita u pogledu efikasnosti i troškova rada EES. Operator virtualne elektrane, u zavisnosti od tehničkih karakteristika i mogućnosti agregirane proizvodnje i potrošnje, može je koristiti za trgovinu i optimizaciju sopstvenog portfelja na veleprodajnom tržištu, kao i za pružanje sistemskih usluga operatorima prenosnog i distributivnog sistema.

U tom kontekstu, kao primer efekata uvođenja koncepta virtualne elektrane, razmotrena je tržišna vrednost virtualne elektrane sačinjene od 50 MW agregirane fleksibilne potrošnje, upravljane od strane nezavisnog agregatora. Važno je napomenuti da se navedenih 50 MW odnosi na ekvivalentni fleksibilni deo potrošnje iz ukupnog potrošačkog portfelja, koji će biti raspoloživ i koji agregator optimizuje na tržištu. Pravilna procena ovog nivoa raspoloživog fleksibilnog kapaciteta za kreiranje ponude VPP je veoma značajna. U slučaju da agregator nepravilno proceni, tj. preceni nivo raspoloživog

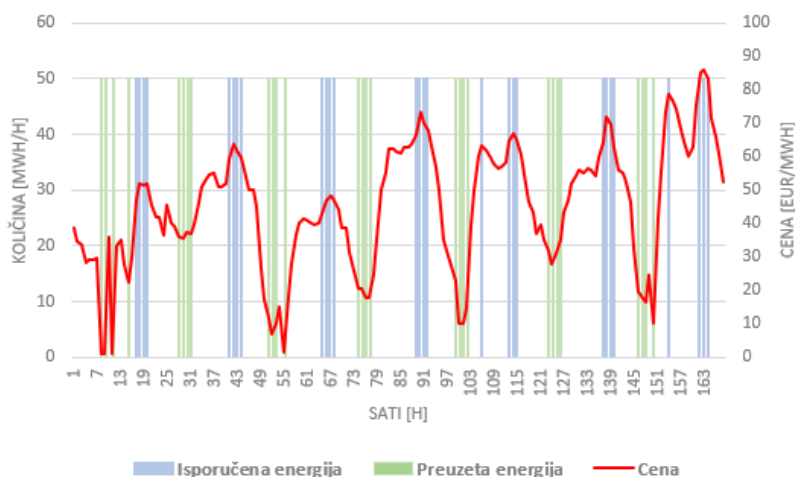
fleksibilnog dela portfelja, biće izložen većem finansijskom riziku ukoliko dođe do neispunjenja ugovorenih usluga (npr. debalans na balansnom tržištu, penali za neispunjenu rezervu, itd.). Fleksibilnost agregirane potrošnje je predstavljena kroz opciju mogućnosti „pomeranja“ unutar dana („Load Shifting“) u maksimalnom trajanju od 4 sata. Opisana virtualna elektrana je modelovana u komercijalnom softverskom alatu za energetske-tržišne simulacije, PLEXOS, i optimizovana kao učesnik na tržištu prema tržišnim uslovima u Srbiji zabeleženim u 2021. godini (satni profil veleprodajnih cena sa berze SEEPEX, [37]). Ilustracija ove optimizacije data je na Slici 4. Sagledani su potencijalni prihodi za Agregatora koji se mogu ostvariti na veleprodajnom tržištu, bez razmatranja dodatnih usluga koje bi virtualna elektrana eventualno mogla pružati. Ti prihodi su prikazani u Tabeli II.

Tabela II Potencijalni prihodi Agregatora za primer optimizacije VPP od 50 MW, sa slike 4

Indikator	Jedinica	Vrednost
Preuzeta energija	GWh/god.	72,8
Isporučena energija	GWh/god.	72,8
Prosečna kupovna cena	EUR/MWh	79,68
Prosečna prodajna cena	EUR/MWh	144,74
Prosečna tržišna cena	EUR/MWh	114,02
Rashod za kupljenu energiju	MEUR/god.	5,80
Prihod od prodaje energije	MEUR/god.	10,54
Tržišna dobit	MEUR/god.	4,74

Cilj analiziranog primera je ilustracija potrebe tržišta za izvorima fleksibilnosti, tj. mogućih prihoda za jedan oblik upotrebe virtualne elektrane. Na osnovu sprovedene analize (Slika 4, Tabela II), može se zaključiti da postoji značajan potencijal u pogledu ekonomskih prihoda od upravljanja virtualnom elektranom.

Naglašavamo da je za svaki potencijalni poslovni slučaj implementacije virtualne elektrane potrebno detaljno analizirati troškove i benefite, tj. sprovesti kompletnu tehnno-ekonomsku analizu sa analizom osetljivosti rezultata na promene ulaznih parametara. Ovo je posebno važno imajući u vidu poslednju energetske krizu i enormni rast cena na tržištu električne energije (s tim u vezi treba zapaziti da su u Tabeli II prosečne cene niže od onih koje su se javile u međuvremenu). Takođe, treba naglasiti da je preduslov za efikasnu implementaciju agregacije postojanje pravno-regulatornog okvira sa otklonjenim barijerama za nastup agregatora na različitim tržištima, naročito u pogledu pružanja pomoćnih usluga operatorima prenosnog i distributivnog sistema. Naime, od adekvatnog vrednovanja ovih usluga uveliko će zavisiti i isplativost realizacije jednog ovakvog koncepta.



Slika 4 Primer optimizacije VPP od 50 MW na veleprodajnom tržištu električne energije, na uzorku jedne sedmice

5. ZAKONSKI OKVIR I TRENUTNA OGRANIČENJA U SRBIJI

Izmenama i dopunama Zakona o energetici („Sl. glasnik RS“ broj 40/2021, u daljem tekstu: ZoE) uvodi se novi učesnik na tržištu električne energije – Agregator, ali njegova uloga, kao i prava i obaveze na tržištu električne energije, još uvek nisu u potpunosti definisane i razrađene u sekundarnoj legislativi. Pojam agregiranja je definisan članom 2. ZoE kao „objedinjavanje potrošnje i/ili proizvodnje električne energije radi kupovine, prodaje ili aukcija na tržištima električne energije“, dok je Agregator kao jedan od učesnika na tržištu električne energije definisan kao „pravno ili fizičko lice koje pruža uslugu objedinjavanja potrošnje i/ili proizvodnje električne energije u cilju dalje prodaje, kupovine ili aukcija na tržištima električne energije“. Uloga Agregatora je definisana Članom 210b ZoE, u kome je navedeno da „Agregator nastupa na tržištu električne energije u ime i za račun učesnika na tržištu za koje vrši uslugu objedinjavanja potrošnje i/ili proizvodnje“, i dužan je da:

- 1) postupa prema učesniku na tržištu na nediskriminatoran način;
- 2) objavi opšte uslove ponude za zaključenje ugovora, odnosno da učesnika na tržištu obavesti na prigodan način o ponuđenim uslovima;
- 3) besplatno obezbedi sve relevantne podatke učesniku na tržištu najmanje jednom u toku obračunskog perioda ukoliko učesnik na tržištu to zatraži;
- 4) na svojoj internet stranici ili na drugi prikladan način, obavesti učesnika na tržištu o funkciji agregiranja.

Agregator i učesnici na tržištu zaključuju ugovore kojim regulišu međusobne odnose (ilustrovano na Sl. 1, gore).

Zakonom o korišćenju obnovljivih izvora energije („Sl. glasnik RS“, broj 40/21, u daljem tekstu: ZOIE) takođe je, posredno, predviđeno postojanje i uloga agregatora; u članu 58. ZOIE utvrđeno je da „kupac-proizvođač ima pravo da samostalno ili posredstvom agregatora proizvodi električnu energiju za sopstvenu potrošnju, skladišti električnu energiju za sopstvene potrebe, višak proizvedene električne energije isporuči u prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem i ne može koristiti podsticajne mere u vidu tržišne premije i fid-in tarife, niti može imati pravo na

garancije porekla“. Takođe, članom 66. ZOIE određeno je da „zajednica obnovljivih izvora energije, odnosno pravno lice osnovano na principu otvorenog i dobrovoljnog učešća svojih članova“... „ima pravo na proizvodnju, potrošnju, skladištenje i prodaju obnovljive energije i pravo na pristup svim tržištima energije, direktno ili preko agregatora, na nediskriminatorni način, kao i druga prava i obaveze povlašćenog proizvođača u skladu sa ovim zakonom.“

Iako je, navedenim zakonima kojima se uređuje oblast energetike u Republici Srbiji, agregator predviđen kao učesnik na tržištu/korisnik sistema i definisana delatnost agregiranja, pravna regulativa u ovom delu nije u potpunosti uređena. Posebno se mora imati u vidu činjenica da agregiranje nije predviđeno kao energetska delatnost, pa agregator (fizičko ili pravno lice koje pruža uslugu objedinjavanja potrošnje i/ili proizvodnje električne energije u cilju dalje prodaje, kupovine ili aukcija na tržištima električne energije), ne može da obezbedi licencu ili drugu saglasnost za pružanje ove usluge.

Stoga je za dalje definisanje uloge agregatora potrebno izmeniti nacionalnu sekundarnu legislativu u skladu sa „Paketom čiste energije“ Evropske unije koji je stupio na snagu juna 2019. godine i smernicama iz EU Direktive 2019/944. Ovim Paketom su određeni i novi učesnici na tržištu kao što su agregatori, odnosno nezavisni agregatori, i bliže određene energetske delatnosti kao što su agregiranje i skladištenje energije. Prema Direktivi, generalno, svaki učesnik na tržištu električne energije dužan je da ugovorom uredi svoju balansnu odgovornost; da je prenese na drugog učesnika na tržištu električne energije, da potpiše ugovor o potpunom snabdevanju ili da se registruje kao balansno odgovorna strana. U skladu sa članom 17(3.d) ove Direktive, ta obaveza nije zaobišla ni novog učesnika na tržištu – Agregatora. U tom smislu, nema suštinske razlike između Snabdevača i Agregatora. Ipak, jedna od osnovnih razlika između ova dva učesnika na tržištu je što Snabdevač upravlja potrošnjom implicitno (kupac reaguje na cenovne signale Snabdevača iz računa, a težnja je da se ide ka dinamičkom tarifiranju sa uvođenjem „pametnih“ brojlara), dok Agregator ima mogućnost da upravlja potrošnjom i eksplicitno (direktno, aktivno). To bi trebalo da podrazumeva definisanje/ugovaranje uslova pod kojima Agregator upravlja

potrošnjom kupca i po kojoj ceni, u okviru posebnog ugovora ili u okviru Ugovora o snabdevanju. Eksplicitno upravljanje potrošnjom bi omogućilo Agregatoru da ostvaruje profit i na tržištima sistemskih usluga i balansne energije, ali je za to, pored trenutno nedostajuće regulative, neophodna i adekvatna infrastruktura koja podrazumeva masovnu upotrebu odgovarajućih „pametnih“ brojila, što je još jedna od prepreka koju je potrebno otkloniti u cilju pune primene koncepta Agregatora na tržištu Republike Srbije.

Dodatno ograničenje i mogući problem, pre svega u regulisanju odnosa između Agregatora i DSO, predstavlja i legislativna odrednica da je upravljanje obnovljivim izvorima većim od 160 kW u nadležnosti DSO, „Elektrodistribucije Srbije“ (EDS).

Mišljenje autora ovog rada je da bi EDS trebalo da upravlja elektranama na RES pojedinačne snage veće od 160 kW samo u funkciji obezbeđenja sigurnog rada elektrodistributivnog sistema. U tom smislu, Agregator bi trebalo da planira angažovanje i ovih elektrana i da upravlja njima, dok bi EDS imao mogućnost promene njihovog angažovanja (uključujući i ograničenje/smanjenje snage) jedino u trenucima kada je ugrožena sigurnost distributivnog sistema (tzv. *Redispatching* – mera promene proizvodnje i/ili potrošnje koju sprovodi operator sistema, u cilju promene fizičkih tokova snaga u sistemu kako bi se obezbedila sigurnost sistema i otklonila zagušenja u njemu). Oni resursi (elektrane na RES, upravljiva potrošnja, skladišta) čije je angažovanje izmenjeno od strane EDS u odnosu na plan (zbog ugrožene sigurnosti sistema), trebalo bi da budu finansijski kompenzovani zbog izgubljene dobiti.

Praktično, upravljanje elektranama na RES pojedinačne snage veće od 160 kW od strane DSO (EDS) trebalo bi urediti na sličnim tehničkim i tržišnim principima kao kada TSO (u Srbiji: EMS AD) u trenucima ugrožene sigurnosti sistema upravlja elektranama veće snage, priključenim na prenosni sistem.

6. ZAKLJUČAK

Na strani krajnjih korisnika EES-a postoji značajan kapacitet u upravljivoj potrošnji. Sa pojavom i očekivanim širenjem dispergovane (distribuirane) proizvodnje električne energije, uključujući i „kupce-proizvođače“, za koje je tokom 2021. godine u Srbiji stvoren zakonski okvir, jačaće potreba, ali i interes, da se efektivno i efikasno upravlja potrošnjom i proizvodnjom na nivou korisnika. Kada se tome doda nužnost unapređenja energetske efikasnosti na strani potrošnje, kao i činjenica da možda i najveći potencijal – kako za uštede, tako i za upravljivost i fleksibilnost – leži u uređajima za grejanje vode i prostora, kao moguće rešenje nameće se koncept agregacije u multienergetsku, kompozitnu (kooperativnu, kolaborativnu) virtualnu elektranu. Investiranje u njeno kreiranje, razvoj, tehničku realizaciju i ekspanziju može se ispostaviti kao povoljnije rešenje od ulaganja u dotrajale termoelektrične kapacitete čija se proizvodnja zasniva na niskokaloričnom i ekološki sve manje prihvatljivom lignitu. U tom pogledu, kompozitna virtualna elektrana može olakšati očekivani veći obim integracije V-RES i faktički predstavljati zamenski kapacitet u EES Srbije.

Za realizaciju virtualne elektrane, prvo je potrebno definisati metodologiju na osnovu koje bi se ocenjivali tehnički uslovi upravljivosti za krajnje kupce koji žele da budu

deo virtualne elektrane. Metodologija bi morala da sadrži ocenu dostupnosti upravljive potrošnje krajnjeg korisnika, kapacitet skladišta i rezerve, kao i maksimalnu aktivnu snagu skladišta. Veliki broj krajnjih korisnika, koji bi bio uključen u realizaciju virtualne elektrane, generisao bi velike administrativne troškove. Primarno treba koristiti veća skladišta. Najpre je potrebno iskoristiti upravljivost značajnih korisnika EES-a. Sa stanovišta iskorišćenja skladišnih kapaciteta, redosled u strategiji investiranja u ovu komponentu kompozitne virtualne elektrane, bio bi sledeći:

- iskoristiti postojeća termalna skladišta,
- iskoristiti postojeća skladišta potencijalne energije,
- ulaganje u nova termalna skladišta,
- kada se iscrpe sve opcije izgradnje i primene termalnih skladišta, uključiti u projekat realizacije skladišta na bazi baterija i vodonika.

Jasno je da je jedan od preduslova za realizaciju virtualne elektrane primena savremenih, „pametnih“ uređaja, kakvi su daljinski upravljani prekidači, zatim primena odgovarajućih softvera za upravljanje i komandovanje i odgovarajućih protokola za dvosmernu komunikaciju i prenos podataka. Što se tiče složene strukture sistema virtualne elektrane, kao najpodesniji za njeno organizovanje u efikasan sistem kontrole, obrade podataka, upravljanja i odlučivanja, ocenjen je koncept zasnovan na IIoT. Veća fleksibilnost na strani potrošnje električne energije i distribuirane proizvodnje, agregirana i upravljana kroz tako osmišljen koncept virtualne elektrane, može dovesti do brojnih benefita u pogledu efikasnosti i troškova rada EES-a.

U zavisnosti od tehničkih karakteristika i mogućnosti agregirane proizvodnje i potrošnje, Agregator tj. operator virtualne elektrane, može je koristiti za trgovinu i optimizaciju sopstvenog portfelja na veleprodajnom tržištu, kao i za pružanje sistemskih usluga operatorima prenosnog i distributivnog sistema.

Treba istaći da preduslov za efikasnu implementaciju agregacije jeste postojanje odgovarajućeg pravno-regulatornog okvira sa otklonjenim barijerama za nastup Agregatora na različitim tržištima, uključujući i tržište pomoćnih usluga.

LITERATURA

- [1] Belonogova N, Kaipia T, Lassila J, Partanen J, „Demand response: Conflict between distribution system operator and retailer“, CIREN 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011, Paper No. 1085
- [2] Vukovljak M, Janković M, „Novi učesnici na tržištu električne energije“, 35. Savetovanje CIGRE Srbije, Zlatibor, 2021.
- [3] Ropuszyńska-Surma E., Borgosz-Koczwaro (Weglarz) M., „A virtual power plant as a cooperation network“, *Marketing and Management of Innovations*, Issue 4, 2018, DOI: 10.21272/mmi.2018.4-13
- [4] Adu-Kankam K. O, Camarinha-Matos L, „Towards Collaborative Virtual Power Plants“, Chapter, *Technological Innovation for Resilient Systems*, pp 28-39, Advances in Information and Communication

- Technology, vol 521, Springer, January 2018, DOI: 10.1007/978-3-319-78574-5_3
- [5] Adu-Kankam K. O, Camarinha-Matos L, „Towards collaborative Virtual Power Plants: Trends and convergence“, Article, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 16, December 2018, Pages 217-230, DOI: 10.1016/j.segan.2018.08.003
- [6] Chen X., Yang G., Lv Y., Huang Z., „Power Management System Based on Virtual Power Plant“, 2019 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **356** 012006
- [7] Przychodzień A., „Virtual power plants - types and development opportunities“, E3S Web of Conferences 137, 01044 (2019), RDPE 2019, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913701044>
- [8] Agbozo E., Masih A., „Virtual power plants: Powering smart cities of the future“, 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, DOI: 10.5593/sgem2018/4.1/S17.105
- [9] Yavuz L., Önen A., Muyeen S.M., Kamwa I., „Transformation of Microgrid to Virtual Power Plant – A Comprehensive Review“, IET Generation, Transmission and Distribution, January 2019, DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.5649.
- [10] Zhang J., „The Concept, Project and Current Status of Virtual Power Plant: A Review“, 2022 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2152 012059
- [11] Gomes Makohin D. et al., „District Power Plant as a Virtual Power Plant Solution for Utilities“, Conference Paper, June 2015, DOI: 10.1109/ISIE.2015.7281550
- [12] Li S., Yu G., Zhou X., Xing N., „Research on New Urban Virtual Power Plant System“, E3S Web of Conferences 248, 02004 (2021) CAES 2021, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124802004>
- [13] Mohanty S., Choppali U., Kougianos E., „Everything You Wanted To Know About Smart Cities: The Internet Of Things Is The Backbone“, IEEE Consumer Electronics Magazine, vol: 5 (3), 2016, pp 60-70
- [14] Tranchita C., „France Pilots Virtual Power Plant“, Research, April 2016, DOI: 10.13140/RG.2.1.2296.6165, <http://tdworld.com/grid-opt-smart-grid/france-pilots-virtual-power-plant>
- [15] EMoT, dostupno na: <https://navitasoft.com/en/news/what-is-energy-market-of-things> (pristupljeno novembra 2022.)
- [16] Kankam O. Adu-Kankam and Luis M. Camarinha-Matos, „A Framework for Collaborative Virtual Power Plant Ecosystem“, Chapter, in: *Collaborative Networks in Digitalization and Society 5.0. PRO-VE 2022*. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 662. Springer, Cham., September 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-031-14844-6_13
- [17] Omelčenko, V., Kavanagh, R., „edgeFLEX Project – D3.3 Report on VPP Optimisation, V2 (WP3 – Optimisation of a VPP consisting of variable and dispatchable RES)“, ALPIQ, March 31, 2022
- [18] Zhang, Z., et al., „Optimization scheduling of virtual power plant with carbon capture and waste incineration considering P2G coordination“, *Energy Reports* 8(5): 7200-7218, November 2022, DOI: 10.1016/j.egyr.2022.05.027
- [19] Ju, L., et al., „Bi-level electricity-carbon collaborative transaction optimal model for the rural electricity retailers integrating distributed energy resources by virtual power plant“, *Energy Reports* 8(95): 9871-9888, November 2022, DOI: 10.1016/j.egyr.2022.07.171
- [20] Hongliang, W., Benjie, L., Daoxin, P., Ling, W., Jun, X., „Virtual Power Plant Participates in the Two-Level Decision-Making Optimization of Internal Purchase and Sale of Electricity and External Multi-Market“, *IEEE Access* PP(99):1-1, September 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3112549
- [21] Milić S. D, Babić B. M, „Towards the Future - Upgrading Existing Remote Monitoring Concepts to IIoT Concepts“, *IEEE Internet of Things Journal*, Electronic ISSN: 2327-4662, DOI: 10.1109/JIOT.2020.2999196, Vol. 7, Issue 12, December 2020, pp. 11693-11700.
- [22] Milić S. D, Veinović S, Ponjavić M, „Industrial Internet of Things (IIoT) – Strategies and Concepts“, XIX International Symposium Infoteh-Jahorina 2020, Proc., Vol.19, KST-4, Jahorina, Republic of Srpska, March 18-20, 2020, pp. 81-85.
- [23] Milić S, Stojadinović G, Tomić N, „Prilagođenje postojećih sistema daljinskog nadzora IIoT konceptima sa hijerarhijski definisanim nivoima obrade podataka“, CIGRE - Srbija 35. savetovanje, Zbornik radova, ISBN: 978-86-82317-84-5, rad R D2 - 09, 03 - 08. oktobar 2021. godine, Zlatibor, Srbija.
- [24] Zhuang W. W, Morgan C, Nakamoto I, Jiang M, „Big Data Analytics in E-commerce for the U.S. and China Through Literature Reviewing“, *Journal of Systems Science and Information* 9, no. 1 (2021): 16-44. <https://doi.org/10.21078/JSSI-2021-016-29>
- [25] Kang C, Wang Y, Xue Y, Mu G, Liao R, „Big data analytics in China's electric power industry: modern information, communication technologies, and millions of smart meters“, *IEEE Power and Energy Magazine*, 16(3), pp.54-65, 2018.
- [26] Fleiter T, Elsland R, Rehfeldt M, Steinbach J, Reiter U, Catenazzi G, et al., „Profile of heating and cooling demand in 2015“. Heat Roadmap Europe Deliverable 3.1; 2017.
- [27] Belarus energy profile, IEA, 2019.
- [28] <https://newsroom.porsche.com/en.html>
- [29] Schweppe F. C, Tabors R. D, Kirtley J. L, Outhred H. R, Pickel F. H, Cox A. J, „Homeostatic utility control“, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1980, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319745>
- [30] Tindemans S. H, Trovato V, Strbac G, „Decentralized Control of Thermostatic Loads for Flexible Demand Response“, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015; 23. <https://doi.org/10.1109/TCST.2014.2381163>.
- [31] Georgijević N, Vlasisavljević D, Šiljkut V, Misović D, Milić S, „Primena koncepta „Industrijski internet

- stvari“ na primeru upravljivog električnog bojlera kao potrošača i analiza mogućnosti u regulaciji učestanosti“, 35. Savetovanje CIGRE Srbije, Zlatibor, 2021.
- [32] Kuravi S, Goswami Y, Stefanakos E. K, Ram M, Jotshi C, Pendyala S, Trahan J, Sridharan P, Rahman M, Krakow B, “Thermal energy storage for concentrating solar power plants”, *Technology and Innovation*, Vol. 14, pp. 81–91, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.3727/194982412X13462021397570>
- [33] IEA-SHC TECH SHEET 45.B.3.2, Seasonal pit heat storages - Guidelines for materials & construction December 2014
- [34] Bertelsen N, Petersen U. R, “Thermal Energy Storage in Greater Copenhagen”, Master thesis, Aalborg University Copenhagen, 2017.
- [35] Lacko R., “Unlocking the aggregation in regional markets Practical experience & best practice (aggregator’s perspective)”, Energy Community Workshop, 2022
- [36] BEUC, Flexible Electricity Contracts Report, April 2019
- [37] ENTSO-E Transparency Platform, <https://transparency.entsoe.eu/>

BIOGRAFIJE



Vladimir M. Šiljkut je rođen 1966. godine u Beogradu, gde je diplomirao 1994. i doktorirao 2015. godine na Elektrotehničkom fakultetu. Radio je u „Elektrodistribuciji Beograd“ (1995-2013) na poslovima planiranja, razvoja i istraživanja distributivnih mreža, vodio Laboratoriju za brojila električne

energije i Centar za integrisani sistem menadžmenta. U „Elektroprivredi Srbije“ je vodio Sektor za trgovinu i odnose sa tarifnim kupcima u Direkciji za distribuciju električne energije (2013-2015). Potom je (2015/16) vodio i koordinirao projekte na smanjenju gubitaka u Operatoru distributivnog sistema. Od 2016. do 2022. je bio šef Službe za pripremu novih ulaganja u elektrane i obnovljive izvore energije, na kojoj poziciji je i trenutno, a u periodu od marta 2022. do jula 2023. je bio savetnik za poslovni sistem direktora EPS. Više od jedne decenije bio je angažovan i kao gostujući predavač za oblasti distribucije i maloprodaje električne energije i elektrana i razvodnih postojanja, na Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu. V. Šiljkut je i (ko)autor više od 75 članaka i radova (od toga četiri članka u međunarodnim časopisima), objavljenih u publikacijama ili prezentovanih na brojnim nacionalnim, regionalnim i međunarodnim konferencijama. Ovi radovi su iz domena metoda prognoze opterećenja, optimalnog planiranja mreže, procene gubitaka električne energije, obnovljivih izvora energije, upravljanja opterećenjem, energetskih transformatora, metrologije i dr. Koautor je i jedne praktične knjige iz elektrodistribucije i maloprodaje električne energije, na srpskom jeziku. Član je Srpskog nacionalnog komiteta CIRED, njegovog Izvršnog odbora, najviše aktivan u sesiji 1 – Komponente mreže (kao predsednik), u sesiji 2 – Kvalitet električne energije (član) i u sesiji 5 – Planiranje distributivnih mreža.



Nikola Georgijević je rođen 1987. godine u Beogradu, gde je studirao na Elektrotehničkom fakultetu. Tu je stekao diplome master inženjera elektrotehnike i računarstva 2011. i doktora nauka 2020. godine. Radio je u Institutu Nikola Tesla (od 2011. do 2020.), gde se bavio istraživanjima iz oblasti

analize i optimizacije EES, a od 2020. godine je zaposlen u Elektroenergetskom koordinacionom centru kao rukovodilac sektora za razvoj softvera. Oblasti interesovanja su mu računarsko programiranje, matematičko modelovanje, optimizacija i analize stabilnosti EES, mašinsko učenje i veštačka inteligencija. Rukovodio je i učestvovao na više stručnih projekata u regionima Jugoistočne Evrope, Bliskog istoka, Afrike i Južne Amerike.



Saša Milić je rođen 11. jula 1967. godine u Beogradu. Diplomirao je 1993. godine, magistrirao je 2000. godine i doktorirao 2008. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Naučni savetnik je od 2021. godine. Oblasti interesovanja i stručne ekspertize su mu: električna i magnetska merenja, laserska tehnika, optoelektronika i infracrvena tehnika, fazi logika, mašinsko učenje i veštačka inteligencija, internet stvari i industrijski internet stvari, analiza i procena rizika, razvojne strategije i algoritmi upravljanja i odlučivanja, monitoring sistemi i ekspertski sistemi. Rukovodio je sa više naučnih, stručnih i inovacionih projekata, Objavio preko 100 naučnih radova u zemlji i inostranstvu. Objavio je 10 tehničkih rešenja i održao više stručnih i naučnih predavanja u eminentnim naučnim ustanovama. Od 1994. je zaposlen u Elektrotehničkom institutu Nikola Tesla, Univerziteta u Beogradu. Član je više naučnih i stručnih odbora konferencija i časopisa.



Aleksandar Latinović je rođen u Bihaću, 6. septembra 1986. godine. Završio je Zrenjaninsku gimnaziju, a osnovne i master studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu, na Odseku za energetiku. Od 2010. godine zaposlen je u EPS. Njegova posebna interesovanja su oblast pomoćnih usluga u elektroenergetici, prvenstveno turbinska regulacija, a pored toga druga interesovanja su digitalizacija u energetici kao i tehničko-pravna regulativa u oblasti energetike. Tokom školovanja, Aleksandar je ostvario sledeće uspehe: đak generacije osnovne i srednje škole, više nagrada na republičkim i saveznim takmičenjima iz fizike, nagrade na takmičenju u znanju na Elektrijadi, kao

i ostvarena prosečna ocena tokom osnovnih i master studija iznad 9,5. Nakon zaposlenja Aleksandar je učestvovao u više projekata razvoja turbinskih regulatora koji su implementirani u EPS, kao i razvoja simulatora termoelektrana. Od projekata kojima je Aleksandar direktno upravljao izdvajaju se projekti podizanja tehničkog kvaliteta pomoćnih usluga kao i jedan od najvećih projekata digitalizacije u Republici Srbiji, projekat PROTIS.



Dušan Vlasiavljević je rođen 1988. godine u Beogradu. Stekao je diplomu master inženjera elektrotehnike i računarstva 2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Trenutno obavlja funkciju rukovodioca tima za tržište energije i energetske analize u Elektroenergetskom koordinacionom centru. Glavne oblasti profesionalnog angažovanja obuhvataju modelovanje i analizu tržišta električne energije, optimizaciju proizvodnog portfelja, planiranje razvoja elektroenergetskog sistema, razvoj mehanizama i procedura vezanih za veleprodajno i balansno tržište električne energije, kao i tehno-ekonomske analize investicionih projekata u proizvodne i prenosne objekte. Angažovan na velikom broju regionalnih i međunarodnih projekata za elektroprivrede, operatore prenosnih sistema i međunarodne institucije (Svetska Banka, Evropska

komisija, USAID, Energetska Zajednica) u Evropi, Crnomorskom regionu, južnom Kavkazu, jugoistočnoj i centralnoj Aziji.



Radoš Čabarkapa je rođen 1. maja 1986. godine u Beogradu. Završio je osnovnu školu „Petar Petrović Njegoš“ kao nosilac Vukove diplome i đak generacije. U periodu od 2001. do 2005. godine pohađa Matematičku gimnaziju u Beogradu. Nakon toga, 2005. godine upisuje osnovne studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na odseku za energetiku (smer elektroenergetski sistemi), koje završava 2009. godine, dok je master studije na istom fakultetu završio 2012. godine. Od 1. juna 2010. godine zaposlen je u javnom preduzeću „Elektroprivreda Srbije“ gde je obavljao više pozicija u Poslovima trgovine električnom energijom, a trenutno je u istom preduzeću na poziciji Šefa službe za podršku planiranju i analizu ostvarenja planova u Poslovima upravljanja elektroenergetskim portfeljom. Oblasti interesovanja i stručnog delovanja su mu usmerene na analizu tržišta električne energije, zatim na softversko modelovanje u oblasti energetike, kao i na izazove tranzicije na OIE. Kao član radnih grupa Ministarstva rudarstva i energetike učestvovao je u izradi strateških dokumenata, podzakonskih akata i Zakona o korišćenju OIE.

Vladimir M. Šiljkut (Šiljkut)¹, Nikola Georgijević², Saša Milić³,
Aleksandar Latinović¹, Dušan Vlaisavljević², Radoš Čabarkapa¹

Aggregation of Composite Virtual Power Plant - Application Possibilities and Limitations in Serbia



¹ Joint Stock Company „Elektroprivreda Srbije“, Belgrade, Serbia*

² Electrical Power Coordination Center, Belgrade, Serbia

³ „Nikola Tesla“ Electrotechnical Institute, Belgrade, Serbia

Category of article: Review article

Highlights

- A detailed review of the literature on virtual power plants, an overview of concepts and particular solutions is given
- Considered energy sources, methods of aggregation and technical potential for establishing a virtual power plant
- Proposed composite virtual power plant concept, estimated costs, benefits, legal restrictions

Abstract

Serbian power industry increasingly faces the challenges of the future. Electricity generation is based mostly on low-caloric lignite. Its deteriorating quality causes a decline in the level of safety, reliability, and efficiency of thermal power plants, increasing pollution. Beside their revitalization, there are huge investments in new, expensive systems for reduction of pollutants' emissions. With the announced introduction of carbon taxes, which will grow rapidly in the future, the profitability of these power sources and the market competitiveness of the price of electricity obtained from them become extremely questionable and uncertain. In inevitable decarbonization process, a strategic question arises for Serbian experts – how to compensate significant basic (thermal) capacities, which will be probably shut down?

At the other end of the system, the problem is inefficient use of electricity, unacceptably high level of its losses, including those due to its theft. At the same time, the technical possibilities for load management and for the application of a larger number of tariffs were not used sufficiently, to provide the desired demand response.

In such circumstances, the key question is - what investment strategy to choose? This paper proposes a solution that would have a positive impact on both ends of the system and its actors, but also on the networks between them and their operators. "Electric Power Industry of Serbia" could use the announced introduction of aggregator, as a new participant in the electricity market, for a kind of joint venture with its end-users, to establish a composite virtual power plant. It would represent a new, replacement capacity for the power industry, and a source of savings and even income for customers. Such a power plant would include various, dispersed renewable sources, both of electricity and heat, energy storage systems, chargers for electric vehicles, controllable customer load and various demand response programs. By increasing the volume of such aggregation, a composite virtual power plant would enable the aggregator to provide ancillary services to the transmission system operator, which would be an additional benefit. In synergy with other necessary, strategic steps, such a concept could provide Serbia more secure energy future.

Keywords

**Aggregation, Ancillary Services, Decarbonization, Demand Response, Distributed Generation,
Load Management, Virtual Power Plant**

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Aggregation of Composite Virtual Power Plant - A Possible Answer to the Challenges for the Serbian Power System in the Decarbonization Process", awarded by Expert Committee EC-5 Distribution System planning at the 13th CIRED Serbia Conference, Kopaonik, September 12-16, 2022

Received: April 7th, 2023

Reviewed: May 9th, 2023

Modified: May 16th, 2023

Approved: May 25th, 2023

*Corresponding Author: Vladimir M. Šiljkut

Phone: +381-64-897-46-72 E - mail: vladimir.siljkut@eps.rs