

Владимир М. Шилјукт¹, Никола Георгијевић², Саша Милић³,
Александар Латиновић¹, Душан Влаисављевић², Радош Чабаркапа¹



Агрегација композитне виртуелне електране – могућности и ограничења за примену у Србији

¹ Акционарско друштво „Електропривреда Србије“, Београд, Србија¹

² Електроенергетски координациони центар, Београд, Србија

³ Електротехнички институт „Никола Тесла“, Београд, Србија

<https://doi.org/10.18485/epij.2023.1.1.3>

Категорија рада: Прегледни чланак

Кључне поруке

- Дат детаљни приказ литературе о виртуелним електранама, преглед концепата и конкретних решења
- Сагледани извори енергије, начини агрегације и технички потенцијал за успостављање виртуелне електране
- Предложен концепт композитне виртуелне електране, процењени трошкови, користи, законска ограничења

Кратак садржај

Електроенергетски сектор Србије се све више суочава с изазовима будућности. Већина производње електричне енергије заснива се на нискокалоричном лигниту. Његов све лошији квалитет узрокује пад нивоа сигурности, поузданости и ефикасности термоелектрана, уз повећање загађења. Осим значајних средстава намењених њиховој ревитализацији, велика су улагања у нове, скупе системе за смањење емисија штетних материја. Уз најављене угљеничне таксе, чији се раст очекује у будућности, исплативост ових извора и тржишна конкурентност цене електричне енергије добијене из њих, постају крајње упитни и неизвесни. У процесу неминовне декарбонизације, поставља се и стратешко питање пред српске експерте – чиме надоместити знатне базне (термо)капацитете, који ће вероватно бити угашени?

На другом крају система, проблем представљају неефикасно коришћење електричне енергије, неприхватљиво висок ниво њених губитака, укључујући и оне услед њеног неовлашћеног коришћења. При томе, ни из близа нису искоришћене техничке могућности за управљање оптерећењем нити за примену већег броја тарифних ставова, ради жељеног одзива потрошње.

У таквим околностима, кључно је питање – какву стратегију инвестирања треба одабрати? Овај рад предлаже решење које би имало позитиван утицај на оба краја система и његове актере, али и на мреже између њих и њихове операторе. „Електропривреда Србије“ би могла да искористи најављено увођење агрегатора, као новог учесника на тржишту електричне енергије, за својеврсни заједнички подухват са крајњим корисницима, за успостављање композитне виртуелне електране. Она би за електропривреду представљала нови, заменски капацитет, а за купце извор уштеда и потенцијалног прихода. Оваква електрана би обухватила различите, дисперговане обновљиве изворе, како електричне енергије, тако и топлотне, системе за складиштење енергије, пуњаче за електрична возила, управљиво оптерећење купаца и различите програме за одзив потрошње. Повећањем обима овакве агрегације, композитна виртуелна електрана би агрегатору такође омогућила пружање помоћних системских услуга оператору преносног система, што би представљало додатни бенефит. У синергији с другим неопходним, стратешким корацима, предложени концепт би Србији могао да обезбеди сигурнију енергетску будућност.

Кључне речи

Агрегација, декарбонизација, дистрибуирана производња, помоћне услуге, одзив потрошње, управљање оптерећењем, виртуелна електрана

Напомена:

Чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Агрегација композитне виртуелне електране – један од могућих одговора на изазове за електроенергетски систем Србије у процесу декарбонизације“, награђеног у Стручној комисији СТК-5 Планирање дистрибутивних система на 13. Саветовању ЦИРЕД Србија, Копаоник, 12-16. септембра 2022.

Примљено: 7. април 2023. Рецензирано: 9. мај 2023.
Измењено: 16. мај 2023. Одобрено: 25. мај 2023.

¹Кореспондирајући аутор: Владимир М. Шилјукт
Тел. +381-64-897-46-72 Имејл: vladimir.siljkut@eps.rs

1. УВОД

1.1 Контекст проблематике електроенергетике у Србији

Изузев функционалног и организационог раздвајања ком је био изложен у претходном периоду током процеса дерегулације, а чијим се ефектима још прилагођава, комплетан електроенергетски сектор Србије све више се суочава са новим, претећим изазовима које доноси будућност. Примаран проблем представља вишедценијско већинско ослањање на лигнит као примарно гориво за производњу електричне енергије. Његов квалитет (калоријска вредност) је последњих година забележио значајан пад, а и расположиве количине су све више упитне. Последнице су вишеструке – од пада нивоа сигурности, поузданости рада и ефикасности термоелектрана, преко додатног хабања опреме, до повећања загађења ваздуха. Термоелектране (ТЕ) су изузетно старе па захтевају огромна улагања, не само у ревитализације, него и изградњу нових и скувих (инвестиционо, али и експлоатационо) пратећих система у функцији заштите животне средине. Кад се тим трошковима додају и најављене угљеничне таксе које ће рапидно расти у будућности, исплативост ових извора и тржишна конкурентност цене електричне енергије добијене из њих, постају крајње неизвесни. У условима неминовне декарбонизације се, у случају Србије, поставља и питање – чиме надоместити базне (термо)капацитете, којима, из једног или другог разлога, прети гашење?

Обновљиви извори енергије (енгл. *Renewable Energy Sources*, RES) на преносном систему надоместиће део електричне енергије након повлачења термокапацитета. Значајна интеграција варијабилних RES (*Variable RES*, V-RES) условиће нове проблеме. V-RES имају нижи степен искоришћења капацитета у односу на ТЕ на угаљ. Да би се надоместила енергија коју у току једне године испоручи једна ТЕ на угаљ, неопходно је изградити RES значајно веће инсталисане снаге, што може довести до загушења у постојећој преносној мрежи или може ограничити прикључење нових RES. Такође, интеграција V-RES условиће повећање неопходне балансне резерве за балансирање система у реалном времену, а проблем ће постати и билансирање система, односно неусклађеност производње и потрошње на дужем, сезонском нивоу.

На другом крају система, не мањи проблем представља неефикасно коришћење електричне енергије, неприхватљиво висок ниво њених губитака, укључујући и губитке услед њеног неовлашћеног коришћења. При томе, ни из близа нису искоришћене, већ сада расположиве, техничке могућности за управљање оптерећењем или коришћење евентуално већег броја тарифних ставова, у циљу жељеног одзива потрошње. Надасве, интереси снабдевача и оператора дистрибутивног и преносног система не морају бити подударни, [1]; први тежи да прода што већу количину електричне енергије, са што већом зарадом, а други да

систем одржи стабилним, тј. да његови елементи не буду преоптерећени.

У таквим околностима, пред дугорочне планере и креаторе развоја електроенергетског система (ЕЕС), као целине, поставља се питање – у ком правцу треба ићи, какву стратегију инвестирања треба одабрати?

Овај рад предлаже, као тему за разматрање, решење које би имало позитиван утицај, како на технички аспект система (и то на оба његова краја), тако и на његове актере, али и на мреже између њих и њихове операторе. Уместо огромних инвестиција у термосектор упитне перспективности и исплативости, Акционарско друштво „Електропривреда Србије“ (ЕПС) би могло да искористи најављено увођење агрегатора, као новог учесника на тржишту електричне енергије, [2], за својеврсни заједнички подухват са својим крајњим корисницима – купцима електричне енергије, за успостављање мултиенергетске, композитне (тј. колаборативне, кооперативне) виртуелне електране, [3]-[5]. Она би за ЕПС фактички представљала нови, заменски капацитет, а за купце извор уштеда и потенцијалних прихода. Оваква електрана би обухватила различите, дисперговане, управљиве и неуправљиве, обновљиве изворе, и то не само електричне, већ и топлотне енергије (нпр. соларне колекторе за загревање воде), системе за складиштење енергије, пуњаче за електрична возила, управљиво оптерећење купаца (термо-акумулационе пећи, електричне бојлере и котлове) и различите програме за одзив потрошње. Повећањем обима овакве агрегације – својеврсним „повећањем капацитета“ и своје флексибилности – композитна виртуелна електрана би ЕПС-у као Агрегатору створила додатну могућност за пружање помоћних системских услуга оператору преносног система, попут учешћа у регулацији фреквенције, као и пружање услуга оператору дистрибутивног система, што би у одговарајућем регулаторном оквиру представљало још један извор прихода за ЕПС. У синергији с другим потребним корацима, као што је јаче ослањање на хидропотенцијале, овакав концепт би Србији могао да обезбеди сигурнију енергетску будућност.

1.2 Виртуелне електране - преглед литературе и искустава

1.2.1 Дефиниције и функције виртуелне електране.

У свету, основни мотив за настанак и развој концепта виртуелне електране представља све већи удео V-RES. Наиме, због своје неизвесне и испрекидане (тј. варијабилне) природе, обновљиви извори енергије какви су сунце и ветар, могу изазвати проблеме у раду електроенергетског система, као што су они са балансирањем и билансирањем система, квалитетом електричне енергије, ефикасношћу, стабилношћу и поузданошћу. Концепт виртуелне електране, (енгл. *Virtual Power Plant*, VPP) осмишљен је како би се олакшала интеграција V-RES, без угрожавања стабилности и поузданости рада система, уз нуђење многих других техно-економских бенефита. Шта је,

заправо, виртуелна електрана? У [6] она је дефинисана као „концепт који обједињује једну разноликост дистрибуираних извора електричне енергије, управљивог оптерећења и складишта електричне енергије, ради учешћа у диспечингу и управљању тржиштем електричне енергије и радом мреже, у виду још једне, специјалне електране.“ Друга дефиниција каже да је „VPP структура ICT (информационо-комуникационе технологије – прим. аут.) која интегрише различите врсте дистрибуираних извора енергије, флексибилних потрошача и складишта енергије, међусобно и са другим тржишним сегментима, у реалном времену, путем интелигентне (смарт) мреже“, [3]. У [7] се користи назив „нови телеинформатички систем који омогућава управљање енергетским ресурсима.“ Тако VPPs обављају задатак флексибилног управљања консолидацијом V-RES, ефективним складиштењем и дистрибуцијом електричне енергије, у променљивим размерама када је то потребно.

Бројна су истраживања и моделовања бескрајних могућности напајања паметних градова помоћу технологије VPP и уопште, могућности очувања екосистема животне средине и очувања тј. штедне енергије које се тиме постижу. „Паметни градови“ представљају модел будућег градског планирања и урбаног развоја, интегришући ICT решења, као и механизме за очување енергије и борбу против климатских промена са основном технологијом познатом као интернет ствари (енгл. *Internet of Things*, IoT). Будући да је базирана на ICT и (најчешће) на IoT, VPP је најефикасније средство дистрибуције енергије за паметне градове, [8].

1.2.2 Корисници, носиоци и начини агрегације. Поставља се и питање ко може да развија и примењује концепт VPP и у каквим околностима? Концепт VPP могу да развијају многе врсте ентитета / енергетских субјеката, нпр. оператори дистрибутивних система, произвођачи електричне енергије, енергетски кластери, [7]. Постоји много решења због веома широког спектра могућих примена, а могућност изградње система заснованог на модулима омогућава да се он прилагоди потребама корисника, лакше мења и интегрише у веће системе. Доносе се прописи и примењују концепти који омогућавају развој обновљивих извора енергије, укључујући купце-произвођаче и тзв. активне купце, и омогућавају активно учешће потрошача енергије на тржишту енергије. Поред тога, уводе се строжи захтеви за балансирање производње и потрошње енергије, што захтева већу тачност балансирања, [7]. У наставку ћемо дати преглед различитих решења која се могу наћи у релевантној литератури.

Лит. [9] приказује структуре, типове, архитектуру и рад VPP, као и стање њихове примене широм света. Типови VPP су дати детаљно, с оптимизационим алгоритмима који се користе за сваки од њих. VPP је повезана са већином компоненти електроенергетског система, као што су дистрибуирана производња (*Distributed Generation*, DG), активни купци-произвођачи (*prosumers*), оператори преносних (*Transmission System Operator*, TSO) и дистрибутивних

система (*Distribution System Operator*, DSO), мрежне услуге попут елиминације кварова, управљање реактивном снагом, све то уз помоћ технологија комуникација, управљања и оптимизације. Чланак даје један свеобухватни увид у трансформацију микромреже у VPP који може бити од користи истраживачима, потрошачима, купцима-произвођачима и операторима система. Суштина приступа у [9] је да микромрежа са оптимизацијом, способношћу комуникације и уз примену метода вештачке интелигенције, постаје VPP. Аутоматизација микромреже се подразумева, као предуслов за управљивост производње и потрошње и оптимизацију трошкова њеног рада.

Рад [10] наводи концепте VPP из студија разних истраживача и даје детаљна објашњења. Представљени су и неки типични пројекти VPP широм света. Поред тога, изложени су и неки потенцијални изазови и савети за будући развој у студијама о VPP. Распозната су три типа корисника VPP: самостални (*Standalone*), купац енергије (*Energy buying*) и продавац (*Energy selling*). Независни оператор система (*Independent Power System Operator*, IPSO) је кључни, „везни“ играч између спољашњег тржишта, са којим размењује податке о прогнози оптерећења и тржишним информацијама, и центра одлучивања, коме испоставља ценовну стратегију и од кога добија резултате активности.

1.2.3 Архитектура, концепти и модели VPP. У [11] су представљени концепт и експериментални резултати микромреже под називом Окружна електрана (*District Power Plant*), дизајниране да ради као активни елемент у локалној дистрибутивној мрежи, способан да пружи услуге као што су одзив потрошње (*Demand Response*, DR), активно напајање и напредно мерење. Приказан је стабилан рад оваквог система у острвском режиму и режиму поновног повезивања, као и добар квалитет енергије и у повезаном и у острвском режиму.

Рад [12] предлаже нови систем градске VPP, који интегрише дистрибуиране производне јединице, системе за складиштење енергије и управљиво оптерећење. Користи напредне технологије за комуникацију и координисано управљање како би реализовао свеукупну регулацију и управљање различитим врстама дистрибуиране енергије и оптерећења. Тиме су ублажени изазови настали услед великог удела насумичне и променљиве дистрибуиране производње на рад електроенергетске мреже и диспечинг, и смањена неравнотежа између понуде и потражње. У раду је илустрована предложена архитектура система градске VPP и приказани њени ресурси на страни корисника.

Ефикасно управљање и диспечинг такође су предмет рада [6]. У циљу ефикасног диспечинга и управљања великим бројем ресурса за одзив потрошње (попут термички управљивих капацитета оптерећења), овај рад проучава систем управљања енергетском ефикасношћу на бази концепта заснованог на технологији одзива потрошње и теорији VPP и ефикасно користи систем управљања температуром. Прикупљањем и контролом параметара снаге ресурса

за управљање оптерећењем, потпуним искориштавањем потенцијала за смањење оптерећења на страни потрошње, постиже се одговарајуће померање вршног електричног оптерећења, погодно за ублажавање неусаглашености између напајања (производње електричне енергије) и потражње и за обезбеђивање безбедног и стабилног рада електроенергетске мреже.

VPP и компоненте „smart“ енергије, мрежа, система и градова приказане су и повезане у чланку [13]. Приказана је VPP и одговарајуће компоненте „паметне“ мреже које је сачињавају. Приказана је структура „паметне“ енергије, коју сачињавају подгрупе нискоугљеничне производње, ефикасне дистрибуције и оптимизовање потрошње електричне енергије.

Једна платформа за интеграцију различитих типова дистрибуираних извора енергије (*Distributed Energy Resources*, DER) приказана је у истраживању [14]. За планирање и изградњу ове платформе били су неопходни различити домени знања – телекомуникације, електротехника, механика, аутоматизација, информатика, архитектура, социологија. Кључно је било дефинисање обима пројекта, усаглашавање спецификација и заједничког разумевања међу партнерима (укључујући извођаче и подизвођаче), као и дефинисање заједничког језика за ефикасну сарадњу. Осим тога, истакнуто је да корисници-домаћини морају бити информисани што је више могуће током фазе инсталације и повезани са пројектом током његове оперативне фазе. Они такође желе да разумеју сврху интервенција и да буду свесни када инсталирани уређаји раде. Наглашена је критичност интеграције различитих технологија и стандарда: ауторизација http-клијента, SSL сертификата, web сервисâ, заједничких информационих модела (*Common Information Models*, CIM), паметних енергетских профила (*Smart Energy Profiles*, SEM) и др. Под платформом једног тако интегрисаног центра управљања, коме је надређен Агрегатор, могуће је објединити различите кориснике и њихове уређаје и дисперговане изворе; резиденцијалне (термичка складишта и топлотне пумпе, фотонапонске панеле, батерије за складиштење вишкова електричне енергије, управљање оптерећењем), подесиво јавно осветљење, индустријске кориснике (производњу из топлотних соларних колектора, хладњаче), становање и пословне просторе (соларна термална складишта, управљање оптерећењем), [14].

Уведен је и појам енергетског тржишта ствари (*Energy Market of Things*, ЕМОТ), [15]. За трговце енергијом појава DER је историјска прилика која може донети бројне предности, нпр. могућност да се отвори обилна понуда флексибилности на страни снабдевања на ниском и средњем напону, која се састоји од енергетских заједница, па чак и малих фарми PV панела и батерија. Неопходан је приступ подацима иза бројила који се могу користити за фино подешавање алгоритама трговања и предвиђања. Уређаји, од топлотних пумпи до пуњача електричних возила (*Electrical Vehicles*, EV), DER и електроенергетских

објеката и опреме, сада могу прикупљати и размењивати податке (тј. комуницирати) и бити повезани са било којом врстом тржишта електричне енергије.

ЕМОТ омогућава умрежавање физичких уређаја који су у вези са електричном енергијом, за мали обим њене производње, складиштење и флексибилну потрошњу електричне енергије, [15]. Ове „ствари“ имају уграђене сензоре, располажу софтвером и другим технологијама у сврху повезивања и размене података са другим уређајима и било којом врстом тржишта електричне енергије – било да су то локална тржишта флексибилности, платформе за балансирање енергије или класичне берзе као што су EPEX SPOT, Nord Pool и HUPX. Ови уређаји варирају од обичних предмета на нивоу домаћинства до великих комерцијалних или индустријских уређаја.

1.2.4 VPP као мрежа или систем сарадње. У лит. [3] VPP је приказана као мрежа сарадње. Ту је истакнуто да је VPP један од типова виртуелних организација, али да су дефиниције VPP првенствено усмерене на њен технички аспект и да се недовољно пажње поклања аспектима управљања и, посебно, пословном моделу. Стога је у [3] представљена правна позадина за успостављање VPP, као и правне могућности и претње за стварање VPP у Пољској. Наглашено је да је правна анализа полазна основа за сваки практични пројекат. Приказани су законски прописи који се односе на купце-произвођаче и подржавање енергетских микрокластера. Ова питања захтевају стварање нових производа, нпр. VPP. Затим је направљен преглед пословних модела како би се изабрао адекватан модел, [3]. Распозната су углавном три типа модела; први је углавном карактеристика односа између купаца, клијената, партнера и добављача; други наглашава значај ресурса компаније, који се могу проширити и користити, и потенцијалних извора будућих економских користи; трећи представља комбинацију прва два и комбинује кључне ресурсе и кључне односе који су важни за VPP (ово одговара системском приступу). На основу одабраног модела структурира се VPP као мрежа сарадње између различитих врста енергетских субјеката. При томе, сегментација могућих корисника VPP врши се по два критеријума – према врсти тржишта и према врсти производа, [3].

Тренд конвергенције VPP ка колаборативним мрежама потврђен је и у [4,5]. Ту се, наиме, тврди да по свом саставу, VPP формира неку врсту колаборативног пословног екосистема са високим степеном интеракције и међузависности међу заинтересованим странама. Истраживање [4,5] је фокусирано на анализу трендова и идентификацију области конвергенције између дисциплине колаборативних мрежа (*Collaborative Network*, CN) и концепта VPP, као и развоја, користећи предзнање из домена CN. Резултати су показали да се у оквиру VPP формирају различити стратешки и динамични сараднички савези, попут мрежа оријентисаних ка циљу, окружења за размножавање виртуелних организација (*Virtual Organizations Breeding Environment*, VBE), мрежа вођених коришћењем могућности и мрежа вођених континуираном

производњом. Различити основни функционални принципи VPP су слични онима код CN: стварање, рад и распуштање виртуелне организације, преговори, брокерске услуге, VBE администраторске услуге, услуге планера и координатора виртуелне организације, и процеси тражења и одабира партнера, [4,5]. Учесће DER на енергетском тржишту се, наравно, обезбеђује кроз агрегацију VPP, [4]. Она обухвата више заинтересованих страна: тржишта/купце, операторе дистрибутивних услуга, DER/купце-произвођаче/управљаче купцима-произвођачима, системе управљања енергијом, провајдере услуга, енергетске заједнице и енергетске кооперације, регулаторна тела, [4].

Аутори [4,5] су надаље, у [16], развили и разматрали појам екосистема колаборативне виртуелне електране (*Colaborative/Cooperative/Composite VPP Ecosystem*, CVPP-E). Он доприноси ефикасној организацији обновљивих енергетских заједница (*Renewable Energy Communities*, REC) на начин да оне могу деловати као VPP или испољавати њене атрибуте. Овај концепт је изведен спајањем или интеграцијом принципа организационих структура и механизма из домена CN у област VPP. Очекује се да, уколико се актери у REC ангажују у сарадничким акцијама, то омогући да REC обавља функције које су сличне VPP. Концептуално, CVPP-E се састоји од менаџерске заједнице, заједничког система за складиштење енергије у заједници, потрошача који поседују комбинацију фотонапонских и система батеријских складишта и пасивних потрошача, који су сви повезани на енергетску мрежу. Кључни атрибут овог предложеног екосистема је да се чланови ангажују у колективним акцијама или сарадничким подухватима који се заснивају на заједничком циљу, усмереном на постизање одрживе производње енергије, потрошње и продаје. У студији [16] представљен је модел високог нивоа за аспекте сарадње у CVPP-E. Ово укључује оквир компатибилних (заједничких) циљева, оквир за дељење и оквир колективних акција. Ови оквири служе као окосница CVPP-E и играју виталну улогу у моделирању CVPP-E. За процену предложеног модела, у [16] су коришћени различити сценарији симулације.

1.2.5 Компоненте VPP и оптимизациони модели. Веома су разноврсне компоненте које могу бити обухваћене концептом композитне VPP, CVPP. У [17] је разматрано балансирање флоте ветрогенератора портфолиом флексибилних средстава – електранама на биогаз и кондензаторским батеријама. Првобитна намена електрана на биогаз које су разматране у VPP била је зарада на берзи, пре свега на тржишту дан унапред. Када ова средства постану део VPP, њихов задатак се мења тако да он постаје максимизирање профита од продаје електричне енергије уз обезбеђивање балансирања флоте ветрогенератора, што такође резултира учешћем на унутардневном тржишту. Овај задатак је изазован у смислу метода оптимизације и предвиђања цена. У [17] се разматрају два аспекта: оптимизација и прогноза цена. Прва је мешовита целобројна оптимизација и развијене су софистициране методе декомпозиције. За прогнозу

цена спроводи се неколико метода предвиђања заснованих на машинском учењу (*Machine Learning*, ML), са циљем да се максимизира резултујући кумулативни приход. Такође се користе комерцијална предвиђања и метода из [17] се показала конкурентна овим предвиђањима у смислу резултујућег кумулативног прихода. Такође је посебна пажња посвећена робусности VPP да рукује великим количинама средстава које обухвата. Осим тога, предиктивна контрола робусног модела (*Robust Model Predictive Control*, RPMC) користи се за узимање у обзир многих сценарија током доношења одлука.

Могућности концепта CVPP се не ограничавају само на повећање флексибилности система комбинавањем различитих, компатибилних извора енергије. Тако је у [18], осим промовисања мултиенергетске комплементарности, у циљу ниске карбонизације предложен оптимални модел планирања рада једне VPP са хватањем угљеника и спаљивањем отпада, узимајући у обзир координацију електричне енергије и гаса. Увођењем колаборативног оквира за коришћење система гасног постројења за хватање угљеника – “електрична енергија у гас” (*power-to-gas*, P2G), ухваћени CO₂ може се користити као сировина за P2G, за производњу природног гаса који се испоручује гасној јединици. Поред тога, потрошња енергије за хватање угљеника и третман димних гасова може се пренети путем заједничког диспечинга како би се ублажиле флукуације излазне снаге из V-RES, тако да електрична енергија добијена из ветра и фотонапонских панела може бити индиректно диспечабилна и флексибилно искоришћена. С обзиром на високу димензионалну нелинеарност предложеног модела оптимизације и потешкоће у његовом решавању, нови Гаусов сложени диференцијални еволуциони алгоритам је дизајниран у [18] да би решио овај модел. Резултати симулације показују да предложени модел и метода могу да обезбеде капацитет померања вршног оптерећења и да побољшају потрошњу обновљиве енергије, ефективно смањујући цену и емисију угљеника из VPP.

Да би се решио велики број дискретних кластера различитих дистрибуираних енергетских ресурса у руралним подручјима, у [19] је трговац електричном енергијом (*Electricity Retailer*, ER) постављен као агент ових кластера путем VPP, односно продавац електричне енергије (ER) је интегрисан са виртуелном електраном (VPP- ER). Затим се у [19] расправља о колаборативном режиму трансакција “електрична енергија-угљеник” и оптималном моделу трансакције куповине-продаје, на два нивоа. Модел вишег нивоа примењује метод условне вредности под ризиком (*Conditional Value-at-Risk*, CVaR) за успостављање модела координисане трансакције “електрична енергија-угљеник” за рурални VPP-ER. Модел нижег нивоа примењује теорију робусне оптимизације за мерење ризика неизвесности излазне снаге ветроелектране (VE) или соларне PV електране, да би успоставио оптимални модел диспечинга за VPP. Треће, модел се претвара у услове оптималности *Karush–Kuhn–Tucker* (ККТ) да би се решио двостепени модел трансакције куповине-продаје. На примеру

једног индустријског кластера (*Henan Lankao*), резултати показују, између осталог, да предложени двостепени модел може успоставити координисану оптималну шему трговања електричном енергијом и угљеником. Закључак студије [19] је да би њени налази могли да обезбеде ефикасан алат за доношење одлука за рурални VPP-ER на кинеском тржишту електричне енергије.

Учешће електропривреде у трговини угљеником и зеленим сертификатима је ефикасан приступ, заснован на тржишту, за решавање негативних екстерних ефеката производње електричне енергије. У том погледу се и VPP показује као ефикасно средство. Тако је у [20] VPP узета као агрегатор за координацију и оптимизацију трговине угљеником и зеленим сертификатима између купца електричне енергије и крајње продаје електричне енергије, како би се постигао циљ максимизирања свеобухватне користи од VPP. Прво, анализира се начин рада VPP који агрегира различите врсте дистрибуиране енергије и различите кориснике који учествују на тржишту зелених сертификата и тржишту емисија угљеника. Друго, конструисан је двостепени колаборативни оптимизациони модел VPP који учествује у трансакцији куповине и продаје електричне енергије и трансакцији зеленог сертификата. С једне стране, трошкови куповине електричне енергије и стицања зеленог сертификата минимизирају се комбиновањем различитих врста ресурса за производњу електричне енергије при крајњој куповини електричне енергије, а са друге стране, купљена енергија се дистрибуира међу различитим типовима корисника приликом продаје електричне енергије, како би се максимизирао приход од продаје електричне енергије и приход од продаје зелених сертификата. На основу тога, VPP као целина учествује на тржишту електричне енергије, тржишту емисија угљеника и тржишту зелених сертификата како би се максимизирао свеобухватни приход. Коначно, VPP је узета као пример за верификацију економичности и ефикасности модела предложеног у [20].

1.3 Садржај, допринос и структура чланка

Концепт CVPP која би – осим електричне – обухватила и друге врсте енергије, какав предлажу аутори овог чланка, приказан је у поглављу 2 и заснован је на вертикалном концепту Индустријског интернета ствари (*Industrial Internet of Things*, IIoT), [21-23], уважавајући његове предности како са аспекта управљања и обраде података и информација, тако и са аспекта дистрибуиране реализације и сајбер сигурности. Осим веома широког дијапазона врста дистрибуираних ресурса за производњу енергије и њених потрошача, концепт који се предлаже у овом чланку не само да разматра позицију и улогу CVPP у ширем окружењу, него остаје отворен и за обухватање појединачних већих производних јединица или складишта енергије. Кад је реч о дистрибуираним ресурсима, у условима типичним за Србију, као најзначајније и потенцијално најнефективније, распознато је успостављање функционалности

управљања над припремом санитарне топле воде. Осим тога, акценат је стављен и на могући допринос оптимизацији рада и флексибилности система који би дало функционално повезивање и подвођење под концепт CVPP топлотних складишта (како дистрибуираних мањих, тако и већих, наменски грађених) и складишта потенцијалне енергије (попут водоторњева) и управљања њима.

Осим техничко-технолошког повезивања различитих компоненети, на коме је иначе заснован концепт CVPP, у случају када би се ЕПС појавио као Агрегатор, и његова функција управљања електроенергетским портфељом (тзв. „Трговина“) би, закључивањем дугорочних уговора са приватним инвеститорима ветропаркова и соларних фарми о испоруци електричне енергије (*Long Term Power Purchase Agreement*, LT PPA), кроз нуђење услуге балансирања могла допринети овде предложеном моделу CVPP. Тако би и овај део „зелене“ енергије постао једна од компоненти предложеног концепта и портфеља ЕПС, био задржан у Србији и стављен на располагање за оптимизацију рада и повећање флексибилности система.

На напред описане начине, CVPP би стекла додатне перформансе као алат за оптимизацију рада система и коришћење електричне и топлотне енергије, произведених и ускладиштених не само у капацитетима ЕПС и његових крајњих корисника, него и других енергетских и привредних субјеката. Све ово, наравно, не ограничава самосталне енергетске субјекте да се на тржишту појаве као независни агрегатори (нудећи своје услуге и развијајући сопствене концепте VPP), сходно прихваћеној европској пракси и регулативи.

У поглављу 3 овог чланка приказани су начини агрегације дистрибуиране производње купаца-произвођача и њихове потрошње. У поглављу 4 дата је груба процена ефеката који би могли да се постигну увођењем и применом концепта виртуелне композитне електране. У приказаном примеру прорачунати су и презентовани само ефекти који би се имали од агрегирања акумулационих бојлера за припрему санитарне топле воде, опремљених даљински управљивим термостатима и „паметним“ прекидачима. Поглавље 5 даје преглед законског оквира и тренутних ограничења у Србији за даљи развој овога концепта. На крају рада су дати одговарајући закључци.

2. ОРГАНИЗАЦИОНА СТРУКТУРА И ТЕХНИЧКИ ПОТЕНЦИЈАЛ ЗА УСПОСТАВЉАЊЕ КОМПОЗИТНЕ ВИРТУЕЛНЕ ЕЛЕКТРАНЕ

Аутори рада су препознали три кључна питања на која треба одговорити пре инвестиционог планирања и практичне реализације виртуелне електране. Прво питање се односи на контролу и управљање процесима производње и потрошње, друго се односи на технолошке аспекте различитих извора и потрошње

електричне енергије и треће је организационе природе, с обзиром да се мора усагласити просторна разуђеност извора и потрошње, односно да се створи њихова јединствена мрежа.

2.1 Вертикална и хибридна концепција контроле и управљања

Примена модерних концепата контроле, обраде података, управљања и одлучивања подразумева да се многи процеси одлучивања са оперативног нивоа пребацују на више хијерархијске нивое. Основни циљ модерних концепата контроле, управљања и одлучивања је смањење оперативних трошкова и скраћење времена анализе и обраде података. Виртуелна електрана представља изузетно сложен систем са великим бројем подсистема. Полазећи од предности вертикалних концепција контроле, управљања и обраде података и информација, које су постале једно од поузданих прихватљивих решења концепата базираних на ПоТ-у [21-23], на Слици 1 је дат предлог структуре будуће виртуелне електране ЕПС.

Данас нове технологије омогућавају брзу и јефтину двосмерну комуникацију између купаца и енергетских компанија. „Паметни“ мерни уређаји са могућношћу даљинског управљања могу пратити, анализирати, прослеђивати и/или складиштити податке о потрошњи различитих облика енергије са високим учестаностима одабирања. Доступност стотина хиљада временских профила оптерећења различитих група потрошача ствара могућност примене алгоритама вештачке интелигенције (*Artificial Intelligence*, AI) за груписање потрошача са сличним обрасцима потрошње.

Анализа великог броја података (*Big Data Analytics*, BDA) је значајно изменила праксе пословања у различитим индустријама. Можда најизраженији примери су велике платформе за куповину преко интернета (Alibaba, Amazon и др.) које се значајно ослањају на BDA и податке о претходним куповинама корисника и бихевиоралној анализи на основу историје прегледања и активности на интернету, [24].

Слика 2 приказује могућу схему BDA примењену на ЕЕС. Процес прикупљања података почиње различитим изворима информација (Слика 2.а)), као што су „паметна“ бројила, тржиште електричне енергије, временске прогнозе, сензори за мерење брзине ветра итд. Над тим подацима могућа је обрада (Слика 2.б) и примена напредних статистичких метода и техника машинског учења (*Machine Learning*, ML) (Слика 2.в)), као што су анализа временских серија, груписање (*clustering*) и дубоко учење (*deep learning*) да би се генерисале информације о особеностима целокупног система које се могу применити за потребе естимације техничког потенцијала и предиктивног управљања ресурсима, [25]. Овакве информације могу да се користе за добробит енергетских компанија, њихових корисника и трећих страна које су укључене у овај процес (Слика 2.г)).

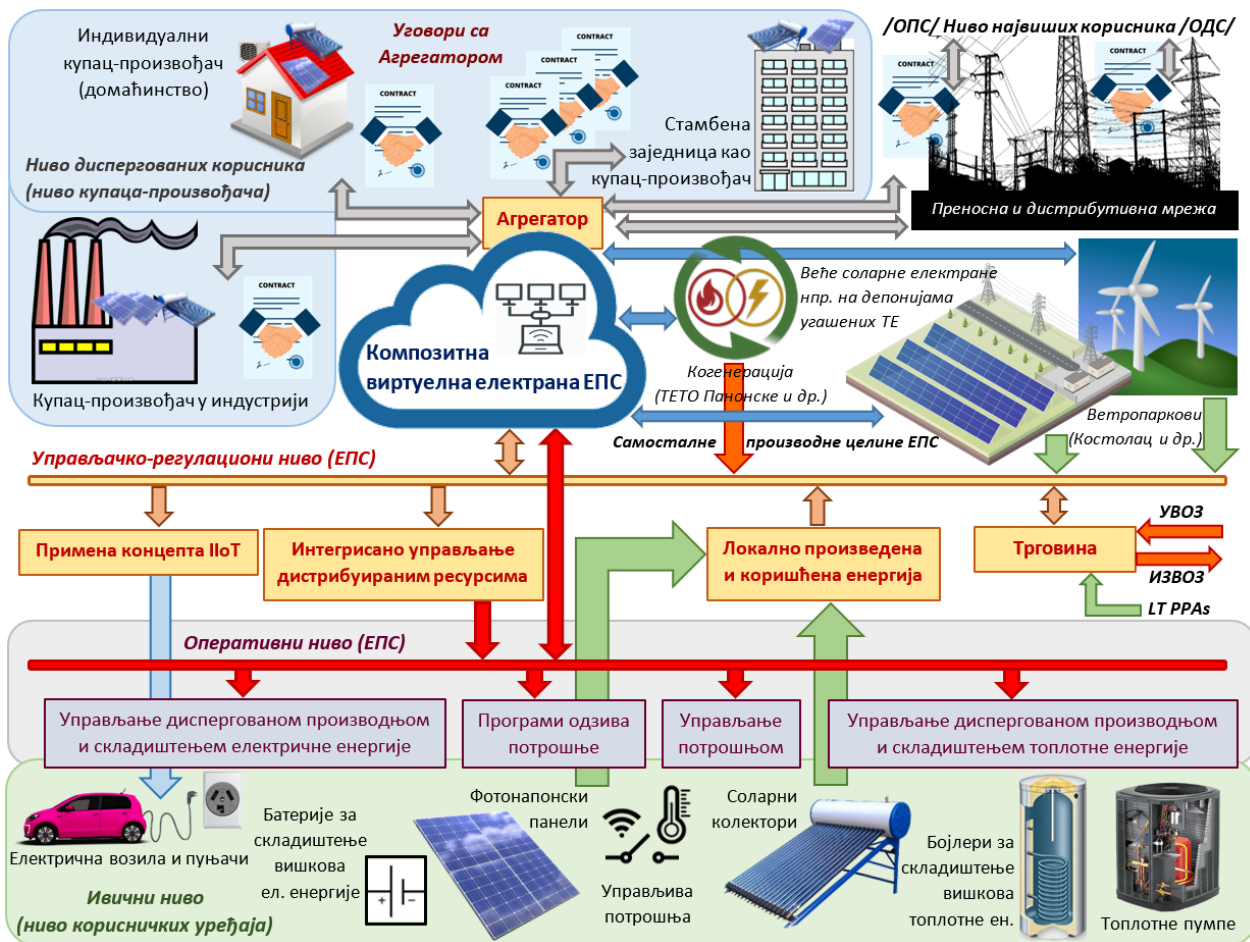
2.2 Технички потенцијал на страни крајњих корисника

Виртуелна електрана може да интегрише (агрегира) крајње кориснике у смислу управљиве потрошње електричне енергије, а кад су у питању купци-произвођачи, може да агрегира и управљиву дисперговану производњу електричне енергије. Идеја која се заговара у овом раду је интеграција дисперговане производње и управљиве потрошње и других видова енергије. При томе, сви разматрани типови енергије посматрају се у односу на електричну енергију. Крајњи корисник може бити домаћинство или привредни субјект (в. Сliku 1, горе лево). Виртуелна електрана може да пружи и валоризује две врсте услуга, балансирање и економски диспечинг, и сходно томе анализиран је технички потенцијал крајњих корисника који би могли да повећају капацитет виртуелних електрана за пружање предметних услуга оператерима системâ, као корисницима највишег ранга (в. Сliku 1, горе десно).

Потрошња електричне енергије крајњих корисника се своди на претварање електричне енергије у неки други облик енергије. Највећим делом се електрична енергија претвара у топлотну, потом у хемијску, у потенцијалну енергију или у друге видове енергије. Са становишта виртуелне електране, од значаја је управљива потрошња која у свом технолошком процесу има одређени вид складиштења енергије, без утицаја на технолошки процес потрошње енергије. Технолошки процеси у којима се троши електрична енергија, а који немају одређене акумулације енергије, неће бити разматрани у овом раду.

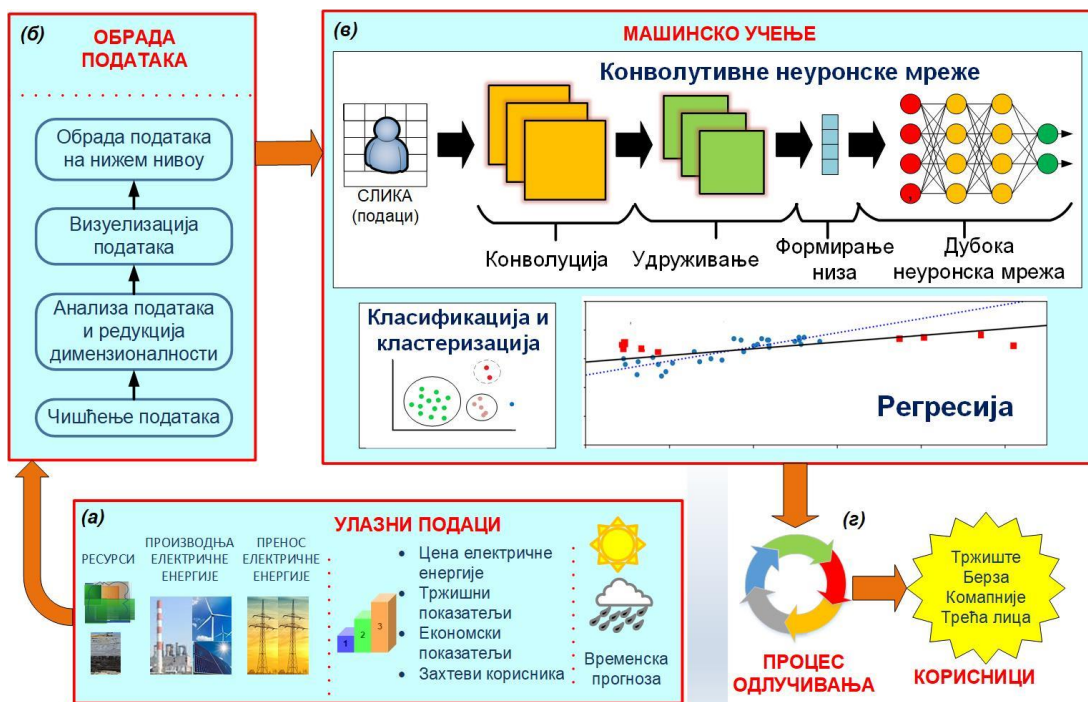
Финална енергија се доминантно троши на процесе загревања и хлађења. У земљама ЕУ28, половина финалне енергије се претвори у топлоту, [26], а за земље које су на нижем нивоу економског развоја тај проценат је и већи. У Републици Србији, на основу грубе процене, приближно једна трећина укупне потрошње у зимском периоду одлази на загревање простора (просечан дневни конзум електричне енергије у месецу мају је око 80 GWh, а у јануару око 120 GWh). Са ниском ценом акумулатора топлоте, потрошња топлотне енергије представља најзначајнији ресурс виртуелних електрана и за балансне услуге и за економски диспечинг. Употреба потрошње електричне енергије за производњу топлотне у сврху балансирања система већ је у примени. У Белорусији је, [27], за потребе балансирања система, инсталирано око 1200 MW управљивих електричних бојлера за потребе даљинског грејања и загревања топле воде за грађанство.

Потрошња електричне енергије у сврху претварања у хемијску енергију је у највећем порасту. У питању су батерије, а доминантан раст представљају батерије електричних аутомобила. Правац развоја пуњача батерија не иде у корист управљиве потрошње. Произвођачи електричних аутомобила улажу знатна средства да смање време пуњења батерија, тако што повећавају снагу пуњача, па пуњачи достижу снаге од 400 kW, [28]. Батерије електричних аутомобила у току



Легенда:
 ↔ уговорни однос
 ↔ обухват велике електране у CVPP
 ↔ функционално структурирање CVPP
 ↔ оперативно командовање, комуникација и аквизиција података
 ↔ пропaгација концепта IIoT наниже
 ↔ „зелена“ енергија
 ↔ енергија из класичних електрана и интеркoneкције

Слика 1 Могућа структура, функционалности и окружење композитне виртуелне електране ЕПС



Слика 2 Могућа схема за BDA у EEC

процеса пуњења, у спрези са „паметним“ пуњачима, у блиској будућности могу постати значајан ресурс за управљање потрошњом.

Други вид претварања електричне енергије у хемијску је производња водоника или продуката водоника, што постаје један од главних праваца развоја енергетског сектора. ЕУ је за развој пројеката за коришћење водоника крајем 2021. године издвојила средства у износу од преко 500 млрд € која би требало да буду утрошена до 2030. године. Тренутно се број крајњих корисника, који могу да производе водоник, своди на привредне субјекте који се баве производњом техничких гасова, али је циљ ЕУ да се повећа коришћење водоника, првенствено у сврхе транспорта. С адекватним резервоарима за водоник, и постројењима за производњу водоника која достижу градијент промене потрошње од 10%/с, производња водоника у блиској будућности може постати значајан ресурс за виртуелне електране, и за услуге балансирања и за економски диспечинг. Изражен проблем складиштења водоника тренутно се решава у два правца, добијањем метанола или амонијака.

Претварање електричне енергије у потенцијалну код крајњих потрошача је такође перспективно са становишта VPP. Крајни корисници који врше ову конверзију енергије су првенствено јавна комунална предузећа водовода и канализације. Технолошки процеси снабдевања водом и одвођења канализационе воде, подразумевају процесе пумпања воде из простора акумулирања воде/канализације, или у њих, и уобичајено имају одређену слободу кретања нивоа у акумулацији (резервоару). Као такви, представљају значајан потенцијал за агрегирање управљиве потрошње, поготово са становишта укрупњавања крајњих корисника који су агрегирани. На развој ресурса овог типа потрошње није потребно чекати ближу или даљу будућност, они су већ сада доступни.

2.2.1 Извори енергије. Најзначајнији извори енергије крајњих корисника ЕЕС, који су перспективни за агрегирање у виртуелне електране могу се поделити у групе према управљивости:

- Неуправљиви извори енергије:
 - соларни панели,
 - соларни колектори,
 - соларни термо панели (панели чијим се хлађењем загрева вода);
- Управљиви извори енергије, чију примену је могуће оптимизовати (економски диспечинг):
 - биомаса и биогаз (топлотна енергија),
 - фосилна горива (топлотна енергија),
 - топлотне пумпе (извор топлотне енергије),
 - неуправљиви извори са складиштима енергије;
- Комбиновани извори енергије, најперспективнији са становишта примене у апликацијама виртуелних електрана, са значајним бројем променљивих стања које је потребно пратити:
 - когенерације (углавном их користе привредни субјекти чији производни процес захтева

примену и електричне и топлотне енергије, евентуално и технолошке паре),

- топлотне пумпе у комбинацији са складиштима топлоте (извори топлотне енергије чијом применом се повећава капацитет термалних складишта),
- нискотемпературни извори топлотне енергије (извори који су у значајном развоју, комбинација топлотних пумпи и отпадне топлоте из индустријских процеса или топлоте настале хлађењем рачунарских центара).

2.2.2 Управљива потрошња и складиштење енергије. Складишта енергије на страни крајњих корисника ЕЕС која су тренутно у примени, одговарају већ поменутих видовима трансформације електричне енергије у други вид енергије. Најчешће су присутна складишта топлотне енергије (акумулатори топлоте), складишта хемијске енергије (доминантно батерије) и складишта енергије у којима се електрична енергија складишти као потенцијална. С обзиром на то да су тренутно широко доступни и да није потребно чекати на њихов развој, у овом раду биће разматрани само акумулатори топлоте и складишта потенцијалне енергије.

Акумулатори топлоте могу бити циљно реализовани, а могу се и термичке капацитивности разних других објеката користити као акумулатори топлоте (нпр. зидови простора који се греје). Управљива потрошња у комбинацији са складиштима енергије проширује опсег услуга које систему може да пружи виртуелна електрана – балансирање система и економски диспечинг.

Концепт управљања потрошњом као подршка регулацији фреквенције помиње се пре више од четрдесет година, [29], где је поред концепта „производња прати потрошњу“, приказан и концепт „потрошња прати производњу“. У [29] је извршена и категоризација на пасивно и активно управљање потрошњом. Пасивно управљање потрошњом се углавном односи на оптерећења која природно користе радни циклус и могу да се укључе/искључе привремено без угрожавања радног циклуса и комфора корисника. Као први кандидати за управљиву потрошњу, код којих нису потребна додатна улагања сем управљања, издвајају се термостатски контролисани уређаји, који својствено поседују складиштење топлотне енергије, а истовремено су и велики потрошачи у домаћинствима као крајњим корисницима, [30]. Такви уређаји укључују клима-уређаје, електричне бојлере, ТА пећи, и слично. Аутори [29] су приказали могућности за употребу уређаја који, на основу мерења учестаности мреже на коју је прикључен, може да укључи/искључи одређеног електричног потрошача. Међутим, у то време на располагању није постојала инфраструктура и технологија која би могла да подржи брзи проток, складиштење и обраду великог броја информација.

Уз примену нових технологија на старе идеје, у [31] је приказан прототип даљински управљивог прекидача електричног бојлера, заснован на IoT концепту, са могућношћу читавања вредности са

сензора за мерење температуре воде, струје потрошње и учестаности мреже. У [31] је извршена статистичка анализа рада електричног бојлера и дате су процене расположивих промена његове снаге и енергије – повећања и смањења, зависно од тренутних потреба ЕЕС, али и очекиваних захтева купаца. На основу добијених статистичких показатеља, предложен је динамички модел великог броја бојлера који се користе на сличан начин – динамички модел једног кластера. Анализом могућности рада у секундарној регулацији учестаности, показано је да је оваквим системом могуће постићи чак и боље резултате у погледу времена одзива, те растеретити постојеће, конвенционалне производне јединице и допринети стабилности ЕЕС као и сигурном снабдевању купаца. Поред техничких анализа, у [31] је извршена и упрошћена економска анализа једног таквог пројекта. Истакнуто је да би се инвестиција вратила кориснику за око пет месеци, те да је стопа годишњег прихода већ у првој години око 270%.

Топлотни акумулатори, као циљно реализована складишта енергије, представљају један од најјефтинијих облика складишта енергије, са ценом испод 15 USD/kWh, [32], док према [33] велика складишта топлоте могу да имају цену у опсегу од 15-50 €/m³. Јефтине топлотни акумулатори топлоту акумулирају најчешће у води, а у примени су акумулатори од 50 литара воде, па све до сезонских акумулатора топлоте капацитета од преко 500.000 m³ воде, [34]. У комбинацији са топлотном пумпом, која спушта доњу границу температуре воде коју је могуће искористити на испод 20 °C, топлотни акумулатори представљају изузетно еластично постројење са становишта управљивости потрошње.

Уколико се складиште зонира, тако да има два посебна складишта, енергија из топлијег складишта се може користити директно за грејање простора када је цена електричне енергије висока, а у случају повољне цене електричне енергије, преко топлотне пумпе се топлота из хладнијег акумулатора може искористити тако да конвертована преко топлотне пумпе има параметре за примену у грејању простора. Извор топлоте акумулатора су најчешће соларни колектори (као на сликама 1 и 3), али могу бити и отпадна топлота из когенерације или чак претварање електричне енергије у топлотну. Велики акумулатори топлоте (*Large Thermal Energy Storages*) могу да достигну и капацитет од преко 40 GWh појединачно. На просторима где се 27% финалне енергије троши на грејање простора, [26], могу представљати идеално решење за годишње балансирање производње електричне енергије из V-RES. Губици енергије сезонских акумулатора топлоте могу да се спусте и до 10%.

Управљива потрошња са складиштењем енергије у виду потенцијалне, присутна је у технолошким процесима у којима се флуид претаче са једног на друго место, више надморске висине. Пример крајњег потрошача електричне енергије који врши описану конверзију енергије су јавна комунална предузећа водовода и канализације. У равничарским крајевима уобичајено је да се притисак воде у водоводном

систему одржава тако што се вода упумпава у водоторањ, највишу тачку насељеног места. Водоторањ је акумулација воде која има мерач нивоа, са максималном и минималном дозвољеном вредношћу. У зависности од потрошње воде, пумпе водоводних система су управљиве на сатном нивоу, а управљивост зависи од дозвољених минималних и максималних волумена воде у водоторњу. Канализациони системи, поседују колекторе који такође имају дозвољене нивое и пумпе којима је могуће управљати, као и у случају водовода.

3. НАЧИНИ АГРЕГАЦИЈЕ ПРОИЗВОДЊЕ И ПОТРОШЊЕ

3.1 Активни начин агрегације – ЕПС као могући Агрегатор

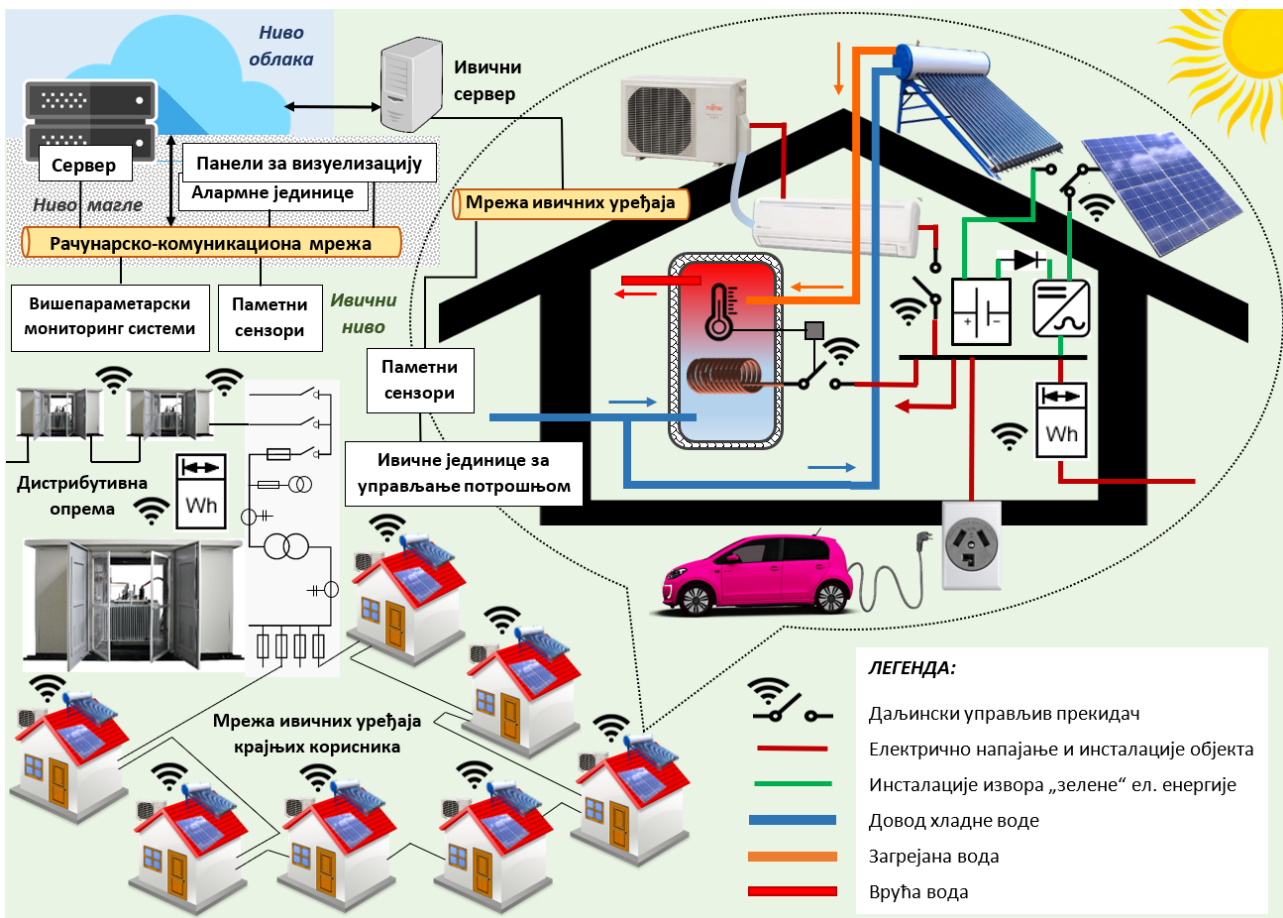
Будући да ЕПС, између осталог, обавља улоге произвођача, трговца и снабдевача електричном енергијом, приликом оптимизације целокупног портфеља ЕПС, израђују се различите врсте планова, на неколико временских хоризоната. При изради средњерочних (кварталних, месечних и седмичних) и краткорочних (дан-унапред и унутардневних) планова производње и трговине електричном енергијом, циљ је да се максималним искоришћењем флексибилности електрана оптимизује њихова производња, тако да компанија оствари највећи могући профит. Да би се то постигло, потребно је највећи могући део расположиве енергије пласирати у периоде највиших тржишних цена, уз задовољење већ уговорених обавеза/испорука (снабдевање и претходно закључени уговори за трговину) и постојећих ограничења (пре свега техничких карактеристика електрана, као и максималних и минималних садржаја акумулација, односно депонија угља). Средство којим се то постиже је трговина електричном енергијом, тако што се у периодима ниских тржишних цена електране „потискују“ до техничких, односно биолошких минимума, док се разлика између потрошње („конзума“) и производње надомешћује куповином на „spot“ тржишту, чиме се највећи део примарне енергије (угља, воде) преноси у периоде високих цена. У том смислу, да би се што већи део примарне енергије пренео из периода ниских, у период високих цена, потребно је да електране располажу што већим распонем између номиналних снага и техничких (односно биолошких) минимума, тј. да поседују што већу флексибилност.

Са друге стране, исти ефекат се може постићи коришћењем расположивог опсега управљиве потрошње, односно „померањем“ дела потрошње из периода виших цена у периоде нижих цена. Ипак, могућност примене управљиве потрошње је прилично ограничена, јер постоји релативно мали број великих индустријских/комерцијалних потрошача (купаца) електричне енергије којима процес производње дозвољава управљање потрошњом и код којих трошак електричне енергије представља значајан удео у цени финалног производа (енергетски интензивни купци),

како би се могли мотивисати адекватним ценовним сигналимa. Насупрот томе, постоји релативно велики број малих купаца и домаћинстава где је „померање“ потрошње могуће, али још увек не постоји адекватна регулатива, инфраструктура, као ни ценовни сигнали који би то омогућили. Осим тога, значајнији ефекти управљиве потрошње могу се постићи једино агрегацијом (обједињавањем, груписањем) великог броја (углавном мањих) крајњих корисника ЕЕС, што је један од основних разлога због којих се и уводи нови учесник на тржишту електричне енергије – Агрегатор.

Агрегатор може објединити и мање, дистрибуиране (дисперговане) произвођаче електричне енергије, и то најчешће оне са управљивом производњом, какав је пример купца-произвођача са

могућношћу складиштења електричне енергије, илустрован на Слици 3. На њој је приказана једна енергетски „паметна“ кућа, као и радијално напојена електродистрибутивна мрежа на коју је прикључен низ таквих, просторно распоређених, кућа. Са аспекта потрошача и „локалне зелене производње“, приказана је ивична (*edge*) концепција, чије су основне предности кратко време обраде података (смањења кашњења) и једноставније управљање локалним процесима производње и потрошње. На Слици 3 је приказан општи случај - домаћинство које може да производи и акумулира и топлотну и електричну енергију. Агрегатор може објединити и мање комплексне случајеве, као у [31].



Слика 3 Хибридна концепција ПоТ за агрегацију и управљање композитном виртуелном електраном

Циљ је обезбедити што већу флексибилност, коју Агрегатор касније валоризује на тржишту електричне енергије. У зависности од техничких могућности којима располаже у оквиру свог портфела, поред „померања“ потрошње/производње, Агрегатор остварује приходе од флексибилности и на тржиштима системских услуга и балансне енергије. С тим у вези, Агрегатор остварује профит нудећи своје услуге (флексибилност) различитим заинтересованим странама (тржишним учесницима):

- другим произвођачима/снабдевачима, којима је флексибилност битна због оптимизације портфела производње/снабдевања, као и због

балансне одговорности на тржишту балансне енергије,

- оператору преносног система, кроз пружање системских услуга (обезбеђивање секундарне и терцијарне резерве снаге), чиме се индиректно смањује потребан ниво резерве на страни производње (а тиме и опортунитетни трошкови производње),
- оператору дистрибутивног система, имајући у виду чињеницу да због све масовнијег прикључивања V-RES на дистрибутивну мрежу постоји потреба за флексибилношћу у циљу ефикасног и сигурног управљања

дистрибутивном мрежом, као и могућих смањења инвестиционих трошкова (у дистрибутивну мрежу).

Узимајући у обзир величину портфеља ЕПС, делатности које ЕПС обавља, као и потенцијале које улога Агрегатора доноси, постоји јасан интерес ЕПС за обављањем ове улоге, како би се употпуниле могућности портфеља ЕПС и обезбедио додатни извор прихода. С обзиром да се у оквиру ЕПС налази и функција снабдевања електричном енергијом, а да је у [2] сагледана и могућност да се на тржишту електричне енергије, осим независних агрегатора, агрегирањем баве и снабдевачи, једна од могућих опција, чију изводљивост треба истражити, јесте да се „ЕПС Снабдевање“ региструје и као Агрегатор.

У том погледу, као угледни пример могао би да послужи начин пословања сличног државног предузећа, попут GEN-I. Ova kompanija vrši ulogu agregatora-snaabdevača 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 да у Словенији и Аустрији активно учествује у пружању баланских услуга из виртуелне електране, [35].

3.2 Пасивни начин агрегације – динамичко тарифирање

Динамичко тарифирање, опција коју обично нуде традиционални снабдевачи електричном енергијом, представља тип уговора о снабдевању који садржи варијабилни део цене који, донекле или у потпуности, одражава флукуацију цене на велепродајном тржишту електричне енергије. У оваквом уговорном облику, купци се подстичу да реагују на ценовне сигнале са тржишта, те подешавају своју потрошњу у складу са променама цена (тј. теже да смање потрошњу енергије током сати са високом ценом и повећају је током сати са ниском ценом). Овакав проактиван приступ купаца може довести до уштеда у рачуну за електричну енергију. Међутим, потребно је истаћи да тај приступ носи и одређене ризике са собом, у погледу изненадне изложености високим ценама у одређеним периодима. Из тог разлога врло је важно да купац буде добро упознат са свим аспектима и ризицима, да добро сагледа могућност управљања сопственом потрошњом, а можда и испреговара такав уговор који ће садржати одређене лимите који би га заштитили од нагле промене цена енергије или њене велике волатилности у кратком року.

Неки од примера динамичког тарифирања из европске праксе, [36], описани су у наставку:

- Снабдевач *Octopus* (Velika Britanija): у понуди има тарифу под називом „Agile“ унутар које се цена електричне енергије за купца мења на сваких 30 минута. Снабдевач на својој интернет страници нуди интерактивни приказ примера

купца за кога је овај вид тарифирања најпогоднији, а такође даје и преглед и поређење са осталим статичким тарифама које има у понуди. Уговор садржи клаузулу о лимиту („*price cap*“), тј. максималној цени којој купац може бити изложен.

- Снабдевач *easyEnergy* (Холандија): у понуди има тарифу која рефлектује цену за крајњег корисника као комбинацију варијабилног дела (сатне велетржишне цене) и фиксног дела (фиксна такса дефинисана на месечном нивоу). Не постоји неки вид заштите или аларма за купца који би указао на појаву високих цена и самим тим нагло повећања рачуна за електричну енергију.

4. ТЕХНО-ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ РЕАЛИЗАЦИЈЕ VPP

У Србији постоји релативно мали број великих индустријских (комерцијалних) купаца електричне енергије којима би процес производње дозволио управљање потрошњом и код којих трошак електричне енергије представља значајан удео у цени финалног производа. То су енергетски интензивни купци, који би могли бити мотивисани адекватним ценовним сигнаlima. Последњим растом цене електричне енергије за комерцијалне купце додатно је увећан њен удео у финалним производу код великог броја енергетски интензивних купаца, тако да би требало испитати заинтересованост комерцијалних купаца за учешће у могућим програмима управљања потрошњом.

Насупрот њих, постоји релативно велики број малих купаца и домаћинстава код којих је „померање“ потрошње могуће, али за то још увек не постоји адекватна инфраструктура (нпр. „паметна“ бројила, даљински управљиви прекидачи и сл.). Осим тога је и цена за гарантовано снабдевање и даље значајно нижа од тржишне, тако да су релативно ретки периоди у којима би било могуће ценовним сигнаlima мотивисати домаћинства и мале купце да измене начин и време коришћења својих електричних уређаја. Наиме, ретко се дешава да је цена на тржишту нижа од цене за гарантовано снабдевање.

Из наведених разлога, а надасве због недостајуће регулативе (в. Поглавље 5) и садашње немогућности да управља асетима који нису његови (попут акумулационих бојлера у примеру из [31]), ЕПС у својству искључиво снабдевача (када је реч о потрошњи) не може остварити онакве уштеде на страни својих постојећих купаца какве би то могао у својству агрегатора једне виртуелне електране и након обезбеђивања техничких предуслова за такав, активни приступ. Процена трошкова и могућих бенефита успостављања VPP илустрована је у овом поглављу, и то само за компоненту управљиве потрошње базиране на даљински контролисаној припреми санитарне топле воде.

4.1 Трошкови реализације VPP – процењени трошкови потребних хардверских и софтверских ресурса

У зависности од типа прекидача и броја сензора (симболички приказаних на сликама 1 и 3, код управљиве потрошње), цена уређаја ПоТ за аквизицију са даљинским прекидачем, са уградњом, износи између 50 и 300 EUR по потрошачу/прекидачу. Укупна цена по кориснику зависи од броја и типа уређаја једног ентитета (нпр. домаћинства). Потребна су и средства за куповину или изнајмљивање сервера, као и за одржавање и развој софтвера. У зависности од комплексности и очекиваног броја корисника, средства за развој софтвера се процењују на опсег од 300.000 до 1.000.000 EUR. За опсег 10.000 до 100.000 корисника трошкови одржавања софтвера и закупа сервера износили би од 30.000 до 60.000 EUR /год. Процена инвестиционих и експлоатационих трошкова за 10.000 корисника, што би одговарало оквирном опсегу једне композитне VPP од 50 MW, приказани су у Табели I. Важно је истаћи да трошкови развоја софтвера практично не зависе од броја корисника, те се њихов удео процентуално умањује са порастом броја корисника.

Табела I Процена трошкова за VPP од 50 MW

10.000 корисника	Врста трошка	Износ
CAPEX (EUR)	уређаји ПоТ	1.000.000
	развој софтвера	500.000
	укупно CAPEX	1.500.000
OPEX (EUR/год.)	сервер	40.000
	трошкови људства	40.000
	укупно OPEX	80.000

4.2 Тржишне могућности употребе виртуелне електране и примери бенефита

Већа флексибилност на страни потрошње електричне енергије и дистрибуиране производње, агрегирана и управљана кроз концепт виртуелне електране, може довести до бројних бенефита у погледу ефикасности и трошкова рада ЕЕС. Оператор виртуелне електране, у зависности од техничких карактеристика и могућности агрегиране производње и потрошње, може је користити за трговину и оптимизацију сопственог портфеља на veleпродајном тржишту, као и за пружање системских услуга операторима преносног и дистрибутивног система.

У том контексту, као пример ефеката увођења концепта виртуелне електране, размотрена је тржишна вредност виртуелне електране сачињене од 50 MW агрегиране флексибилне потрошње, управљане од стране независног агрегатора. Важно је напоменути да се наведених 50 MW односи на еквивалентни флексибилни део потрошње из укупног потрошачког портфеља, који ће бити расположив и који агрегатор оптимизује на тржишту. Правилна процена овог нивоа расположивог флексибилног капацитета за креирање

понуде VPP је веома значајна. У случају да агрегатор неправилно процени, тј. прецени ниво расположивог флексибилног дела портфеља, биће изложен већем финансијском ризику уколико дође до неиспуњења уговорених услуга (нпр. дебаланс на балансном тржишту, пенали за неиспуњену резерву, итд.). Флексибилност агрегиране потрошње је представљена кроз опцију могућности „померања“ унутар дана („Load Shifting“) у максималном трајању од 4 сата. Описана виртуелна електрана је моделована у комерцијалном софтверском алату за енергетско-тржишне симулације, PLEXOS, и оптимизована као учесник на тржишту према тржишним условима у Србији забележеним у 2021. години (сатни профил veleпродајних цена са берзе SEEPX, [37]). Илустрација ове оптимизације дата је на Слици 4. Сагледани су потенцијални приходи за Агрегатора који се могу остварити на veleпродајном тржишту, без разматрања додатних услуга које би виртуелна електрана евентуално могла пружати. Ти приходи су приказани у Табели II.

Табела II Потенцијални приходи Агрегатора за пример оптимизације VPP од 50 MW, са слике 4

Индикатор	Јединица	Вредност
Преузета енергија	GWh/god.	72,8
Испоручена енергија	GWh/god.	72,8
Просечна куповна цена	EUR/MWh	79,68
Просечна продајна цена	EUR/MWh	144,74
Просечна тржишна цена	EUR/MWh	114,02
Расход за купљену енергију	MEUR/god.	5,80
Приход од продаје енергије	MEUR/god.	10,54
Тржишна добит	MEUR/god.	4,74

Циљ анализираних примера је илустрација потребе тржишта за изворима флексибилности, тј. могућих прихода за један облик употребе виртуелне електране. На основу спроведене анализе (Слика 4, Табела II), може се закључити да постоји значајан потенцијал у погледу економских прихода од управљања виртуелном електраном.

Наглашавамо да је за сваки потенцијални пословни случај имплементације виртуелне електране потребно детаљно анализирати трошкове и бенефите, тј. спровести комплетну техно-економску анализу са анализом осетљивости резултата на промене улазних параметара. Ово је посебно важно имајући у виду последњу енергетску кризу и енормни раст цена на тржишту електричне енергије (с тим у вези треба запазити да су у Табели II просечне цене ниже од оних које су се јавиле у међувремену).

Такође, треба нагласити да је предуслов за ефикасну имплементацију агрегације постојање

правно-регулаторног оквира са отклоњеним баријерама за наступ агрегатора на различитим тржиштима, нарочито у погледу пружања помоћних услуга операторима преносног и дистрибутивног

система. Наиме, од адекватног вредновања ових услуга увелико ће зависити и исплативост реализације једног оваквог концепта.



Слика 4 Пример оптимизације VPP од 50 MW на велепродајном тржишту електричне енергије, на узорку једне седмице

5. ЗАКОНСКИ ОКВИР И ТРЕНУТНА ОГРАНИЧЕЊА У СРБИЈИ

Изменама и допунама Закона о енергетици („Сл. гласник РС“ број 40/2021, у даљем тексту: ЗоЕ) уводи се нови учесник на тржишту електричне енергије – Агрегатор, али његова улога, као и права и обавезе на тржишту електричне енергије, још увек нису у потпуности дефинисане и разрађене у секундарној легислативи. Појам агрегирања је дефинисан чланом 2. ЗоЕ као „обједињавање потрошње и/или производње електричне енергије ради куповине, продаје или аукција на тржиштима електричне енергије“, док је Агрегатор као један од учесника на тржишту електричне енергије дефинисан као „правно или физичко лице које пружа услугу обједињавања потрошње и/или производње електричне енергије у циљу даље продаје, куповине или аукција на тржиштима електричне енергије“. Улога Агрегатора је дефинисана Чланом 210б ЗоЕ, у коме је наведено да „Агрегатор наступа на тржишту електричне енергије у име и за рачун учесника на тржишту за које врши услугу обједињавања потрошње и/или производње“, и дужан је да:

- 1) поступа према учеснику на тржишту на недискриминаторан начин;
- 2) објави опште услове понуде за закључење уговора, односно да учесника на тржишту обавести на пригодан начин о понуђеним условима;
- 3) бесплатно обезбеди све релевантне податке учеснику на тржишту најмање једном у току обрачуноског периода уколико учесник на тржишту то затражи;
- 4) на својој интернет страници или на други прикладан начин, обавести учесника на тржишту о функцији агрегирања.

Агрегатор и учесници на тржишту закључују уговоре којим регулишу међусобне односе (илустровано на Сл. 1, горе).

Законом о коришћењу обновљивих извора енергије („Сл. гласник РС“, број 40/21, у даљем тексту: ЗОИЕ) такође је, посредно, предвиђено постојање и улога агрегатора; у члану 58. ЗОИЕ утврђено је да „купац-произвођач има право да самостално или посредством агрегатора производи електричну енергију за сопствену потрошњу, складиштити електричну енергију за сопствене потребе, вишак произведене електричне енергије испоручи у преносни, дистрибутивни, односно затворени дистрибутивни систем и не може користити подстицајне мере у виду тржишне премије и фид-ин тарифе, нити може имати право на гаранције порекла“. Такође, чланом 66. ЗОИЕ одређено је да „заједница обновљивих извора енергије, односно правно лице основано на принципу отвореног и добровољног учешћа својих чланова“... „има право на производњу, потрошњу, складиштење и продају обновљиве енергије и право на приступ свим тржиштима енергије, директно или преко агрегатора, на недискриминаторни начин, као и друга права и обавезе повлашћеног произвођача у складу са овим законом.“

Иако је, наведеним законима којима се уређује област енергетике у Републици Србији, агрегатор предвиђен као учесник на тржишту/корисник система и дефинисана делатност агрегирања, правна регулатива у овом делу није у потпуности уређена. Посебно се мора имати у виду чињеница да агрегирање није предвиђено као енергетска делатност, па агрегатор (физичко или правно лице које пружа услугу обједињавања потрошње и/или производње електричне енергије у циљу даље продаје, куповине или аукција на тржиштима електричне енергије), не може да обезбеди лиценцу или другу сагласност за пружање ове услуге.

Стога је за даље дефинисање улоге агрегатора потребно изменити националну секундарну легислативу у складу са „Пакетом чисте енергије“ Европске уније који је ступио на снагу јуна 2019. године и смерницама из *ЕУ Директиве 2019/944*. Овим Пакетом су одређени и нови учесници на тржишту као што су агрегатори, односно независни агрегатори, и ближе одређене енергетске делатности као што су агрегирање и складиштење енергије. Према Директиви, генерално, сваки учесник на тржишту електричне енергије дужан је да уговором уреди своју балансну одговорност; да је пренесе на другог учесника на тржишту електричне енергије, да потпише уговор о потпуном снабдевању или да се региструје као балансно одговорна страна. У складу са чланом 17(3.д) ове Директиве, та обавеза није заобишла ни новог учесника на тржишту – Агрегатора. У том смислу, нема суштинске разлике између Снабдевача и Агрегатора. Ипак, једна од основних разлика између ова два учесника на тржишту је што Снабдевач управља потрошњом имплицитно (купац реагује на ценковне сигнале Снабдевача из рачуна, а тежња је да се иде ка динамичком тарифирању са увођењем „паметних“ бројила), док Агрегатор има могућност да управља потрошњом и експлицитно (директно, активно). То би требало да подразумева дефинисање/уговарање услова под којима Агрегатор управља потрошњом купца и по којој цени, у оквиру посебног уговора или у оквиру Уговора о снабдевању. Експлицитно управљање потрошњом би омогућило Агрегатору да остварује профит и на тржиштима системских услуга и балансне енергије, али је за то, поред тренутно недостајуће регулативе, неопходна и адекватна инфраструктура која подразумева масовну употребу одговарајућих „паметних“ бројила, што је још једна од препрека коју је потребно отклонити у циљу пуне примене концепта Агрегатора на тржишту Републике Србије.

Додатно ограничење и могући проблем, пре свега у регулисању односа између Агрегатора и DSO, представља и легислативна одредница да је управљање обновљивим изворима већим од 160 kW у надлежности DSO, „Електродистрибуције Србије“ (ЕДС).

Мишљење аутора овог рада је да би ЕДС требало да управља електранама на RES појединачне снаге веће од 160 kW само у функцији обезбеђења сигурног рада електродистрибутивног система. У том смислу, Агрегатор би требало да планира ангажовање и ових електрана и да управља њима, док би ЕДС имао могућност промене њиховог ангажовања (укључујући и ограничење/смањење снаге) једино у тренуцима када је угрожена сигурност дистрибутивног система (тзв. *Redispatching* – мера промене производње и/или потрошње коју спроводи оператор система, у циљу промене физичких токова снага у систему како би се обезбедила сигурност система и отклонила загушења у њему). Они ресурси (електране на RES, управљива потрошња, складишта) чије је ангажовање измењено од стране ЕДС у односу на план (због угрожене сигурности система), требало би да буду финансијски компензовани због изгубљене добити.

Практично, управљање електранама на RES појединачне снаге веће од 160 kW од стране DSO (ЕДС) требало би уредити на сличним техничким и тржишним

принципима као када TSO (у Србији: ЕМС АД) у тренуцима угрожене сигурности система управља електранама веће снаге, прикљученим на преносни систем.

6. ЗАКЉУЧАК

На страни крајњих корисника ЕЕС-а постоји значајан капацитет у управљивој потрошњи. Са појавом и очекиваним ширењем дисперговане (дистрибуиране) производње електричне енергије, укључујући и “купце-произвођаче”, за које је током 2021. године у Србији створен законски оквир, јачаће потреба, али и интерес, да се ефективно и ефикасно управља потрошњом и производњом на нивоу корисника. Када се томе дода нужност унапређења енергетске ефикасности на страни потрошње, као и чињеница да можда и највећи потенцијал – како за уштеде, тако и за управљивост и флексибилност – лежи у уређајима за грејање воде и простора, као могуће решење намеће се концепт агрегације у мултиенергетску, композитну (кооперативну, колаборативну) виртуелну електрану. Инвестирање у њено креирање, развој, техничку реализацију и експанзију може се испоставити као повољније решење од улагања у дотрајале термоенергетске капацитете чија се производња заснива на нискокалоричном и еколошки све мање прихватљивом лигниту. У том погледу, композитна виртуелна електрана може олакшати очекивани већи обим интеграције V-RES и фактички представљати заменски капацитет у ЕЕС Србије.

За реализацију виртуелне електране, прво је потребно дефинисати методологију на основу које би се оцењивали технички услови управљивости за крајње купце који желе да буду део виртуелне електране. Методологија би морала да садржи оцену доступности управљиве потрошње крајњег корисника, капацитет складишта и резерве, као и максималну активну снагу складишта. Велики број крајњих корисника, који би био укључен у реализацију виртуелне електране, генерисао би велике административне трошкове. Примарно треба користити већа складишта. Најпре је потребно искористити управљивост значајних корисника ЕЕС-а. Са становишта искоришћења складишних капацитета, редослед у стратегији инвестирања у ову компоненту композитне виртуелне електране, био би следећи:

- искористити постојећа термална складишта,
- искористити постојећа складишта потенцијалне енергије,
- улагање у нова термална складишта,
- када се исцрпе све опције изградње и примене термалних складишта, укључити у пројекат реализације складишта на бази батерија и водоника.

Јасно је да је један од предуслова за реализацију виртуелне електране примена савремених, “паметних” уређаја, какви су даљински управљани прекидачи, затим примена одговарајућих софтвера за управљање и командовање и одговарајућих протокола за двосмерну комуникацију и пренос података. Што се тиче сложене структуре система виртуелне електране, као најподеснији за њено организовање у ефикасан систем контроле, обраде података, управљања и

одлучивања, оцењен је концепт заснован на IIoT. Већа флексибилност на страни потрошње електричне енергије и дистрибуиране производње, агрегирана и управљана кроз тако осмишљен концепт виртуелне електране, може довести до бројних бенефита у погледу ефикасности и трошкова рада ЕЕС-а.

У зависности од техничких карактеристика и могућности агрегиране производње и потрошње, Агрегатор тј. оператор виртуелне електране, може је користити за трговину и оптимизацију сопственог портфеља на велепродајном тржишту, као и за пружање системских услуга операторима преносног и дистрибутивног система.

Треба истаћи да предуслов за ефикасну имплементацију агрегације јесте постојање одговарајућег правно-регулаторног оквира са отклоњеним баријерама за наступ Агрегатора на различитим тржиштима, укључујући и тржиште помоћних услуга.

LITERATURA

- [1] Belonogova N, Kaipia T, Lassila J, Partanen J, „Demand response: Conflict between distribution system operator and retailer“, CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011, Paper No. 1085
- [2] Вуковљак М, Јанковић М, „Нови учесници на тржишту електричне енергије“, 35. Саветовање ЦИГРЕ Србије, Златибор, 2021.
- [3] Ropuszyńska-Surma E., Borgosz-Koczwara (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., Kougiianos 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, доступно на: <https://navitasoft.com/en/news/what-is-energy-market-of-things> (приступљено новембра 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.egy.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.egy.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 Infotech-Jahorina 2020, Proc., Vol.19, KST-4, Jahorina, Republic of Srpska, March 18-20, 2020, pp. 81-85.
- [23] Милић С, Стојадиновић Г, Томић Н, "Прилагођавање постојећих система даљинског надзора IIoT концептима са хијерархијски дефинисаним нивоима обраде података", ЦИГРЕ - Србија 35. саветовање, Зборник радова, ИСБН: 978-86-82317-84-5, рад Р Д2 - 09, 03 - 08. октобар 2021. године, Златибор, Србија.
- [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] Георгијевић Н, Влаисављевић Д, Шиљкут В, Мисовић Д, Милић С, „Примена концепта „Индустријски интернет ствари“ на примеру управљивог електричног бојлера као потрошача и анализа могућности у регулацији учестаности“, 35. Саветовање ЦИГРЕ Србије, Златибор, 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/>

БИОГРАФИЈЕ



Владимир М. Шиљкут је рођен 1966. године у Београду, где је дипломирао 1994. и докторирао 2015. године на Електротехничком факултету. Радио је у „Електродистрибуцији Београд“ (1995-2013) на пословима планирања, развоја и истраживања дистрибутивних мрежа, водио Лабораторију за бројила електричне енергије и Центар за интегрисани систем менаџмента. У „Електропривреди Србије“ је водио Сектор за трговину и односе са тарифним купцима у Дирекцији за дистрибуцију електричне енергије (2013-2015). Потом је (2015/16) водио и координирао пројекте на смањењу губитака у Оператору дистрибутивног система. Од 2016. до 2022. је био шеф Службе за припрему нових улагања у електране и обновљиве изворе енергије, на којој позицији је и тренутно, а у периоду од марта 2022. до јула 2023. је био саветник за пословни систем директора ЕПС. Више од једне деценије био је ангажован и као гостујући предавач за области дистрибуције и малопродаје електричне енергије и електрана и разводних постојења, на Вишој електротехничкој

школи у Београду. В. Шиљкут је и (ко)аутор више од 75 чланака и радова (од тога четири чланка у међународним часописима), објављених у публикацијама или презентованих на бројним националним, регионалним и међународним конференцијама. Ови радови су из домена метода прогнозе оптерећења, оптималног планирања мреже, процене губитака електричне енергије, обновљивих извора енергије, управљања оптерећењем, енергетских трансформатора, метрологије и др. Коаутор је и једне практичне књиге из електродистрибуције и малопродаје електричне енергије, на српском језику. Члан је Српског националног комитета CIRED, његовог Извршног одбора, највише активан у сесији 1 – Компоненте мреже (као председник), у сесији 2 – Квалитет електричне енергије (члан) и у сесији 5 – Планирање дистрибутивних мрежа.



Никола Георгијевић је рођен 1987. године у Београду, где је студирао на Електротехничком факултету. Ту је стекао дипломе мастер инжењера електротехнике и рачунарства 2011. и доктора наука 2020. године. Радио је у Институту Никола Тесла (од 2011. до 2020.), где се бавио истраживањима из области анализе

и оптимизације ЕЕС, а од 2020. године је запослен у Електроенергетском координационом центру као руководилац сектора за развој софтвера. Области интересовања су му рачунарско програмирање, математичко моделовање, оптимизација и анализе стабилности ЕЕС, машинско учење и вештачка интелигенција. Руководио је и учествовао на више стручних пројеката у регионима Југоисточне Европе, Блиског истока, Африке и Јужне Америке.



Саша Милић је рођен 11. јула 1967. године у Београду. Дипломирао је 1993. године, магистрирао је 2000. године и докторирао 2008. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Научни саветник је од 2021. године. Области интересовања и стручне експертизе су му: електрична и магнетска мерења, ласерска техника, оптоелектроника и инфрацрвена техника, фази логика, машинско учење и вештачка интелигенција, интернет ствари и индустријски интернет ствари, анализа и процена ризика, развојне стратегије и алгоритми управљања и одлучивања, мониторинг системи и експертски системи. Руководио је са више научних, стручних и иновационих пројеката, Објавио преко 100 научних радова у земљи и иностранству. Објавио је 10 техничких решења и одржао више стручних и научних предавања у еминентним научним установама. Од 1994. је запослен у Електротехничком институту Никола Тесла, Универзитета у Београду. Члан је више научних и стручних одбора конференција и часописа.



Александар Латинић је рођен у Бихаћу, 6. септембра 1986. године. Завршио је Зрењанинску гимназију, а основне и мастер студије завршио је на Електротехничком факултету, Универзитет у Београду, на Одсеку за енергетику. Од 2010. године запослен је у ЕПС. Његова посебна интересовања су област помоћних услуга у електроенергетици, првенствено турбинска регулација, а поред тога друга интересовања су дигитализација у енергетици као и техничко-правна регулатива у области енергетике. Током школовања, Александар је остварио следеће успехе: ђак генерације основне и средње школе, више награда на републичким и савезним такмичењима из физике, награде на такмичењу у знању на Електријади, као и остварена просечна оцена током основних и мастер студија изнад 9,5. Након запослења Александар је учествовао у више пројеката развоја турбинских регулатора који су имплементирани у ЕПС, као и развоја симулатора термоелектрана. Од пројеката

којима је Александар директно управљао издвајају се пројекти подизања техничког квалитета помоћних услуга као и један од највећих пројеката дигитализације у Републици Србији, пројекат PROTIS.



Душан Влаисављевић је рођен 1988. године у Београду. Стекао је диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства 2012. године на Електротехничком факултету у Београду. Тренутно обавља функцију руководиоца тима за тржиште енергије и енергетске анализе у Електроенергетском координационом центру. Главне области професионалног ангажовања обухватају моделовање и анализу тржишта електричне енергије, оптимизацију производног портфела, планирање развоја електроенергетског система, развој механизма и процедура везаних за veleprodajно и балансно тржиште електричне енергије, као и техно-економске анализе инвестиционих пројеката у производне и преносне објекте. Ангажован на великом броју регионалних и међународних пројеката за електропривреде, операторе преносних система и међународне институције (Светска Банка, Европска комисија, USAID, Енергетска Заједница) у Европи, Црноморском региону, јужном Кавказу, југоисточној и централној Азији.



Радош Чабаркача је рођен 1. маја 1986. године у Београду. Завршио је основну школу „Петар Петровић Његош“ као носиоца Вукове дипломе и ђак генерације. У периоду од 2001. до 2005. године похађа Математичку гимназију у Београду. Након тога, 2005. године уписује основне студије на Електротехничком факултету у Београду, на одсеку за енергетику (смер електроенергетски системи), које завршава 2009. године, док је мастер студије на истом факултету завршио 2012. године. Од 1. јуна 2010. године запослен је у јавном предузећу „Електропривреда Србије“ где је обављао више позиција у Пословима трговине електричном енергијом, а тренутно је у истом предузећу на позицији Шефа службе за подршку планирању и анализу остварења планова у Пословима управљања електроенергетским портфелом. Области интересовања и стручног деловања су му усмерене на анализу тржишта електричне енергије, затим на софтверско моделовање у области енергетике, као и на изазове транзиције на ОИЕ. Као члан радних група Министарства рударства и енергетике учествовао је у изради стратешких докумената, подзаконских аката и Закона о коришћењу ОИЕ.

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