Broj rada: R6-06
DOI:10.46793/CIRED2026.R6-06_164

MOGUĆI PRUŽAOCI USLUGA FLEKSIBILNOSTI KAO UČESNICI U REDISPEČINGU NA ELEKTRODISTRIBUTIVNOM NIVOU

POSSIBLE FLEXIBILITY SERVICE PROVIDERS AS PARTICIPANTS IN REDISPATCHING AT THE ELECTRICITY DISTRIBUTION LEVEL

Vladimir ŠILJKUT, Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije Beograd, Srbija*
Danijela JOVIĆ PIŠOT, Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije Beograd, Srbija
Radeta MARIĆ, Privredno društvo Elektrodistribucija Srbije d.o.o., Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Porast udela obnovljivih izvora energije (OIE) sa varijabilnom proizvodnjom (V-OIE) u elektroenergetskom sistemu (EES) uslovljava kontinuirano uvećanje obima balansnih usluga koje je, prema Zakonu, dužan da obezbeđuje operator prenosnog sistema (OPS). On, međutim, ne raspolaže sopstvenim kapacitetima za balansiranje i održavanje ili unapređivanje nivoa stabilnosti i fleksibilnosti EES. Fleksibilnost se, uglavnom, i dalje obezbeđuje oslanjanjem na proizvodnju baziranu na fosilnim gorivima. Međutim, rad termoenergetskih postrojenja prati značajan nivo emisija gasova sa efektom staklene bašte i zagađivača vazduha, što ih čini neusklađenim sa ciljevima postavljenim u oblasti smanjenja emisija i dostizanja dugoročne klimatske neutralnosti. Sa druge strane, svi učesnici na tržištu treba da imaju jednak pristup tržištima električne energije, kako bi se trgovalo ne samo proizvedenom električnom energijom, nego i eventualnom fleksibilnošću onih učesnika koji za to imaju mogućnost i interes. Iz oba ova razloga, neophodno je uključivanje u tržišnu utakmicu novih pružalaca usluga fleksibilnosti, u cilju očuvanja stabilnosti, sigurnosti i pouzdanosti rada EES. Imajući u vidu i sve veći broj i ukupne kapacitete distribuiranih V-OIE, fleksibilnost se sve više ističe i kao jedna od ključnih potreba operatora distributivnog sistema (ODS). Obezbeđujući je, ona postaje njegov resurs i prednost u optimizaciji upravljanja distributivnim sistemom električne energije (DSEE) i u obezbeđivanju pouzdanosti i efikasnosti sistema. Naime, sve intenzivnije korišćenje raspoloživih kapaciteta distributivne mreže dovodi do povećanog rizika pojave zagušenja i do smanjenja nivoa raspoloživih operativnih rezervi sistema. U takvim uslovima, neophodno je obezbediti adekvatan okvir za aktiviranje usluga fleksibilnosti, radi pravovremenog i efikasnog upravljanja mrežnim ograničenjima na delovima DSEE, u skladu sa nadležnostima ODS i važećim nacionalnim propisima. U ovom radu je razmotreno ko su mogući pružaoci usluga fleksibilnosti na distributivnom nivou, koji bi – zahvaljujući tehničkim rešenjima i tehnologijama koje koriste – mogli da se pojave kao učesnici u redispečingu, doprinoseći optimizaciji upravljanja DSEE-om, njegovoj pouzdanosti, pouzdanosti EES kao celine i sigurnosti napajanja krajnjih kupaca. Osim tehničkog aspekta, u radu se analizira i pravni okvir u Republici Srbiji i uslovi za obezbeđivanje usluga fleksibilnosti na elektrodistributivnom nivou. Zaključeno je da ODS mora da deluje kao neutralni posrednik na tržištu kako bi se obezbedila jednaka konkurencija između različitih tehnologija i rešenja prilikom nabavke fleksibilnih resursa. Da bi postupak ove nabavke bio efikasan i tržišno zasnovan, ključni preduslovi su opservabilnost (mogućnost praćenja stanja DSEE tj. informacijâ ODS o poznatom i prognoziranom stanju mreže) i upravljivost (radi

* Vladimir Šiljkut vladimir.siljkut@eps.rs; Danijela Jović Pišot danijela.jovic-pisot@eps.rs; Radeta Marić radeta.maric@es.rs

pravilne aktivacije fleksibilnosti od strane korisnikâ DSEE). Aktiviranje resursa fleksibilnosti od strane ODS, međutim, ne mora uvek biti kompatibilno potrebama celog EES za fleksibilnošću. Ono se može preklapati sa tim potrebama ili, ponekad, čak pogoršati uslove za njihovo namirenje, npr. u kontekstu obezbeđivanja balansnih usluga. Zbog toga koordinacija između OPS i ODS postaje suštinski važna prilikom planiranja i angažovanja resursa fleksibilnosti od strane korisnika mreže. Uspostavljanje adekvatne razmene podataka o raspoloživoj i aktiviranoj fleksibilnosti predstavlja temeljni preduslov za ovakvu koordinaciju.

Ključne reči: Balansiranje, fleksibilnost, operator sistema, redispečing, tržište

ABSTRACT

Increased share of renewable energy sources (RES) with variable generation (V-RES) in the power system (PS) necessitates a continuous increase in the balancing services volume that Transmission System Operator (TSO) is obliged to provide, according to the Law. However, TSO does not have its own capacities for balancing and maintaining or improving the level of the PS stability and flexibility. Flexibility is still largely ensured by relying on fossil fuel-based electricity generation. However, the operation of thermal power plants is accompanied by significant levels of greenhouse gas emissions and air pollutants, making them inconsistent with the goals set in the field of reducing emissions and achieving long-term climate neutrality. On the other hand, all market participants should have equal access to electricity markets, in order to trade not only the electricity generated, but also the possible flexibility of those participants having such opportunity and interest. For both of these reasons, it is necessary to include new providers of flexibility services in the market competition, in order to preserve the stability, security and reliability of the PS operation. Considering the increasing number and total capacities of distributed V-RES, flexibility is increasingly emerging as one of the key needs of Distribution System Operators (DSOs). By providing it, flexibility becomes a DSO's resource and advantage in optimizing the management of the electricity distribution system (EDS) and in ensuring the reliability and efficiency of the system. Namely, the increasingly intensive use of the available capacities of distribution networks leads to an increased risk of congestion and to a decrease of the system's available operational reserves. Hence, it is necessary to provide an adequate framework for the flexibility services activation, to manage timely and efficiently network constraints on EDS parts, in accordance with the competences of the DSO and national regulations. This paper discusses the possible flexibility services' providers at the distribution level, which - thanks to the technical solutions and technologies they use - could appear as participants in redispatching, contributing to the EDS' management optimization, its reliability, the reliability of the whole PS, and the security of supply to end customers. Beside the technical aspect, the paper analyses the legal framework in Serbia, and the conditions for providing flexibility services at distribution level. DSO must act as a neutral intermediary in the market to ensure equal competition between different technologies and solutions when purchasing flexible resources. In order for this procurement process to be efficient and market-based, the key prerequisites are observability (of EDS' state) and manageability (correct flexibility activation by its users). Activation of flexibility resources by a DSO, however, may not always be compatible with the needs of the entire PS for flexibility. It may overlap with these needs or, sometimes, even worsen the conditions for their satisfaction, e.g., in the context of providing balancing services. Therefore, coordination between the TSO and DSO(s) becomes essential when planning and engaging flexibility resources by network users. Establishing adequate data exchange on available and activated flexibility is a fundamental prerequisite for such coordination.

Keywords: Balancing, Flexibility, Market, Redispatching, System Operator

UVOD

Porast udela obnovljivih izvora energije (OIE) sa varijabilnom proizvodnjom (V-OIE) u elektroenergetskom sistemu (EES) uslovljava kontinuirano uvećanje obima balansnih usluga koje je, prema Zakonu, dužan da obezbeđuje operator prenosnog sistema (OPS). On, međutim, ne raspolaže sopstvenim kapacitetima za balansiranje i održavanje ili unapređivanje nivoa stabilnosti i fleksibilnosti EES. Fleksibilnost se, uglavnom, i dalje obezbeđuje oslanjanjem na proizvodnju baziranu na fosilnim gorivima. Međutim, rad termoenergetskih postrojenja prati značajan nivo emisija gasova sa efektom staklene bašte i zagađivača vazduha, što ih čini neusklađenim sa ciljevima postavljenim u oblasti smanjenja emisija i dostizanja dugoročne klimatske neutralnosti. Sa druge strane, svi učesnici na tržištu treba da imaju jednak pristup tržištima električne energije, kako bi se trgovalo ne samo proizvedenom električnom energijom, nego i eventualnom fleksibilnošću onih učesnika koji za to imaju mogućnost i interes. Iz oba ova razloga, neophodno je uključivanje u tržišnu utakmicu novih pružalaca usluga fleksibilnosti, u cilju očuvanja stabilnosti, sigurnosti i pouzdanosti rada EES.

Imajući u vidu i sve veći broj i ukupne kapacitete distribuiranih V-OIE, fleksibilnost se sve više ističe i kao jedna od ključnih potreba operatora distributivnog sistema (ODS). Naime, sve intenzivnije korišćenje raspoloživih kapaciteta distributivne mreže dovodi do povećanog rizika pojave zagušenja i do smanjenja nivoa raspoloživih operativnih rezervi sistema. U takvim uslovima, neophodno je obezbediti adekvatan okvir za aktiviranje usluga fleksibilnosti, radi pravovremenog i efikasnog upravljanja mrežnim ograničenjima na delovima distributivnog sistema električne energije (DSEE), u skladu sa nadležnostima ODS-a i važećim nacionalnim propisima. U ovom radu je stoga razmotreno ko su mogući pružaoci usluga fleksibilnosti na distributivnom nivou, koji bi – zahvaljujući tehničkim rešenjima i tehnologijama koje koriste – mogli da se pojave kao učesnici u redispečingu. Osim tehničkog aspekta, u radu se analizira i pravni okvir u Republici Srbiji i uslovi za obezbeđivanje usluga fleksibilnosti na elektrodistributivnom nivou.

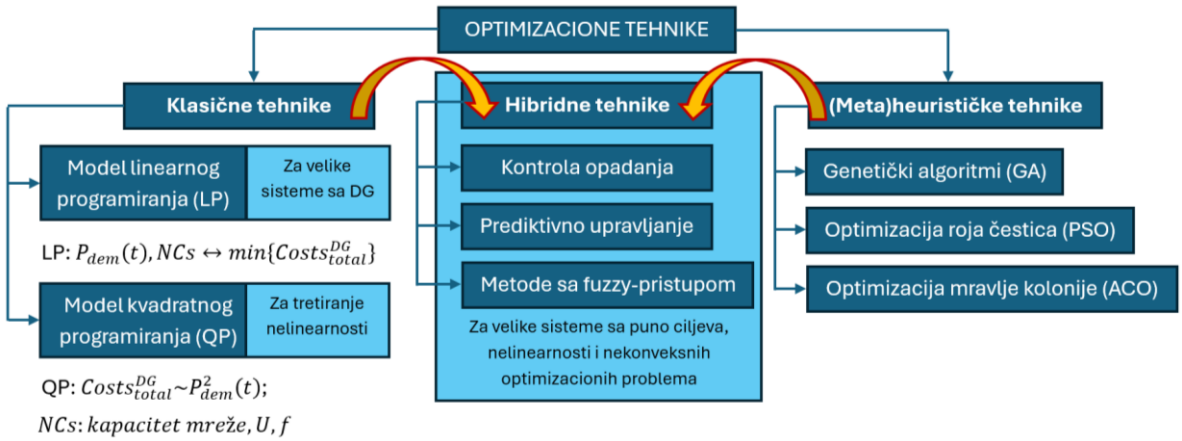
U Poglavlju 1 ovog rada dat je pregled i uvid u noviju, referentnu naučnu i stručnu literaturu koja se odnosi na oblasti fleksibilnosti i redispečinga, sa posebnim akcentom na optimizacione tehnike i metode koje se koriste. U Poglavlju 2 prikazan je pravni okvir i uslovi za obezbeđivanje fleksibilnosti u našoj zemlji u cilju realizacije efikasnog redispečinga, a dat je i pregled relevantne regulative EU. U Poglavlju 3 sagledano je ko su mogući pružaoci fleksibilnosti na elektrodistributivnom nivou, s analizom trenutnih prilika u DSEE-u Srbije. Analizirana je i kompatibilnost potrebâ za fleksibilnošću u DSEE-u i u EES-u kao celini. Na kraju rada, dati su odgovarajući zaključci.

1 PREGLED NOVIJE LITERATURE O FLEKSIBILNOSTI I REDISPEČINGU

Povećana potražnja za električnom energijom i rastući udeo V-OIE u proizvodnom miksu, uključujući distribuiranu proizvodnju (*Distributed Generation*, DG), istakli su važnost upravljanja energetskom fleksibilnošću u električnim mrežama. Energetska fleksibilnost je kapacitet proizvođača i potrošača da promene svoju proizvodnju i potrošnju kako bi podržali rad mreže, osiguravajući njenu stabilnost i efikasnost. Tehnički, fleksibilnost se definiše kao promena snage aktivirana u određeno vreme tokom određenog trajanja na određenom čvoru mreže unutar EES-a, uključujući i distributivne, [1]. Lokalna tržišta fleksibilnosti (*Local Flexibility Markets*, LFMs) tržišno su orijentisani mehanizmi koji funkcionišu na različitim vremenskim horizontima i podržavaju pružanje fleksibilnosti i trgovinu na nivou distribucije, gde ODS-ovi predstavljaju aktere koji zahtevaju fleksibilnost, a potrošači su pružaoci

fleksibilnosti, [1]. Rad [1] istražuje zahteve i ograničenja algoritama za prognoziranje, potrebnih za učešće u LFMs i analizira adekvatnost trenutno raspoloživih algoritama da ispune zahteve LFMs. Procenjuje se kako obim podataka, horizont prognoziranja i agregacija učesnika utiču na performanse modela prognoziranja. Rezultati su pokazali da agregacija učesnika i smanjenje horizonta prognoziranja značajno poboljšavaju tačnost prognoziranja.

Pružaoci fleksibilnosti igraju ključnu ulogu u balansiranju brzo promenljive ponude i potražnje u EES-u. Međutim, koordinacija heterogenih pružalaca fleksibilnosti zahteva temeljno razumevanje njihovih različitih kašnjenja odziva, što komplikuje njihovo efikasno angažovanje, [2]. Da bi se povećala efikasnost, smanjili troškovi i osiguralo konzistentno snabdevanje električnom energijom, tehnike optimizacije predstavljaju neophodne alate koji se koriste u ekonomskom dispečerskom (pre)raspoređivanju energije iz DG, [3]. Na Slici 1 ilustrovane su različite vrste metoda i tehnikâ optimizacije i najvažnije među njima.



Slika 1 – Pregled optimizacionih tehnika za ekonomski dispečing snage iz DG;
NCs – mrežna ograničenja (*Network Constraints*), $P_{dem}(t)$ – trenutna snaga potrošnje,
$Costs_{total}^{DG}$ – ukupni troškovi proizvodnje iz DG; izvor podataka za kreiranje slike: [3]

U [2], primenjen je pristup mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (*Mixed-Integer Linear Programming*, MILP), gde promenljive odlučivanja predstavljaju različite tipove pružalaca fleksibilnosti, kategorisane kao kontinuirane ili diskretne. Da bismo uravnotežili računarsku efikasnost, optimalnost i skalabilnost, koristimo metod particionisanja i ograničavanja koji iterativno rafiniše particije neizvesnih skupova potražnje. Numeričke studije potvrđuju efikasnost algoritma iz [2] i naglašavaju važnost karakterizacije heterogenih kašnjenja odgovora u adaptivnom raspoređivanju.

Uključivanjem modela dubokog učenja, usavršene su u [4] tradicionalne metode dispečerske raspodele energije, olakšavajući donošenje odluka o dispečerskoj raspodeli, zasnovanih na podacima i optimizujući alokaciju resursa energije i efikasnost dispečerske raspodele.

Metod razvijen u [5] uspostavlja matematičke modele analizirajući karakteristike dinamičkog odziva i granice regulacije fleksibilnosti podesivih resursa, agregirajući ih u virtuelnu elektranu (*Virtual Power Plant*, VPP), obuhvatajući: fotonaponske (*Photo-Voltaic*, PV) sisteme, energiju vetra, skladištenje energije, punjače, prekidna opterećenja i klima uređaje. Konstruisan je ekonomski optimalan model dispečerske raspodele sa niskim sadržajem ugljenika za VPP sa ciljem minimiziranja ukupnih troškova rada sistema i troškova ugljenika.

Primene optimizacije roja čestica (*Particle Swarm Optimization*, PSO), generičkih algoritama (*Generic Algorithms*, GA) i metoda diferencijalne evolucije i njihove strategije poboljšanja u dispečerskoj raspodeli mikromreže razmatrane su u [6]. Takođe, metode optimizacije zasnovane na učenju sa pojačanjem (*Reinforcement Learning*, RL), uključujući duboko učenje sa pojačanjem (*Deep Reinforcement Learning*, DRL), duboki gradijent determinističke politike (*Deep Deterministic Policy Gradient*, DDPG) i optimizaciju proksimalne politike (*Proximal Policy Optimization*, PPO), analizirane su u [6], fokusirajući se na njihove prednosti u rešavanju visokodimenzionalnih, nelinearnih problema i problema dispečerskog upravljanja u realnom vremenu. Strategija kombinacije „optimizacije predviđanja plus“, kao što su Bajesova optimizacija (*Bayesian optimization*), metaheuristička optimizacija i metode optimizacije sa više scenarija zasnovane na mašinskom učenju (*Machine Learning*, ML), može se nositi sa problemima neizvesnosti i robusnosti mikromreža, [6].

Okvir predložen u [7] unapređuje dispečersko upravljanje „pametnog” EES integrišući analitiku teksta, predstavljanje znanja i adaptivno rezonovanje. Predložen je integrisani model dispečerskog upravljanja zasnovan na grafovima znanja (*Knowledge Graph*, KG) za reagovanje u vanrednim situacijama, koji kombinuje prethodnu obradu teksta zasnovanu na Markovljevom lancu, konstrukciju KG-ova izvučenih iz entiteta i optimizaciju rezonovanja zasnovanu na slučajevima – novi pristup koji poboljšava i donošenje odluka u realnom vremenu i bezbednost sistema. Eksperimenti su pokazali da ovaj model postiže visoku efikasnost i pouzdanost, značajno poboljšavajući bezbednost elektroenergetske mreže.

Da bi se poboljšale prednosti, osmišljen je u [8] dvostepeni model dispečerskog upravljanja koji uključuje kompenzaciju grešaka u prognozi snage i primenjen je na hibridni sistem vetra i solara bez konvencionalnih izvora energije. Ovo obuhvata model dispečerskog upravljanja dan unapred i model raspodele snage. Optimizovani sistem, sa hibridnim sistemom za skladištenje energije (*Hybrid Energy Storage System*, HESS, koji se sastoji od baterije i zamajca), postiže efikasno korišćenje obnovljive energije, obezbeđujući stabilan rad mikromreže.

U [9], predstavljen je novi okvir za automatizaciju dispečerskog upravljanja sledeće generacije koji sinergistički integriše modele velikih jezika (*Large Language Models*, LLM), KG i tehnologije AI agenata. Zajedno, ove komponente uspostavljaju inteligentnu arhitekturu zatvorene petlje koja obuhvata „percepciju-kogniciju-odluku-izvršenje“, poboljšavajući svest o situaciji u celom EES-u i adaptivnu kontrolu. Takođe su date sveobuhvatne analize više scenarija kako bi se potvrdila operativna efikasnost.

U radu [10] istražena je metoda optimizacije za sveobuhvatni sistem dispečerske raspodele električne energije zasnovana na fuziji algoritma mravlje kolonije (*Ant Colony Algorithm*) i strategije dinamičkog raspoređivanja težina. Eksperimentalni rezultati pokazuju da takva integrisana metoda optimizacije sistema raspoređivanja električne energije i snage značajno poboljšava efikasnost raspoređivanja (smanjujući prosečno vreme dispečerske raspodele za 20%) i iskorišćenje resursa (za 15% kada se radi o problemima dispečerske raspodele električne energije velikih razmera).

Kolaborativni model „oblaka na rubu“ sa upravljanjem na strani potražnje, razvijen u [11], realizuje višestruko vremenski skalirano pomeranje dispečerske raspodele, smanjujući volatilnost nove energije i troškove rada mreže, čime pruža efikasno rešenje za visoki udeo integracije novih izvora energije u okružnim elektroenergetskim mrežama.

U [12], dizajnirani su mehanizam brzog podešavanja opterećenja, mehanizam tolerancije na greške i inteligentni sistem preporuka za plan vanrednih situacija, putem tehnologije fuzije podataka iz više izvora, u kombinaciji sa mrežom dugoročno-kratkoročne memorije (*Long Short-Term Memory*, LSTM) za prognoziranje opterećenja, optimizacijom distribucije toka snage pomoću GA i dinamičkim podešavanjem strategije raspoređivanja pomoću DRL.

Konvencionalni pristup osetljivosti u velikoj meri zavisi od detaljnog modela sistema, pateći od problema pristrasnosti modela. Studija [13] predlaže jednu metodu onlajn identifikacije osetljivosti zasnovanu na podacima, sa mogućnošću praćenja radnih uslova EES-a.

Veći broj kratkoročnih regulacija hidroelektrana negativno utiče na rečne ekosisteme, posebno u kaskadama, [14]. Umereni nivoi cena električne energije dovode do većih relativnih gubitaka i zahtevaju veću proizvodnju iz termoelektrana. Uključivanje jedinica za skladištenje energije smanjuje ekonomske gubitke i emisije, ističući njihov potencijal kao alternativnih pružalaca fleksibilnosti u EES-u, [14].

Studija [15] uvodi okvir distributivno robusne optimizacije vođene podacima (*Data-Driven Distributionally Robust Optimization*, DRO) za raspoređivanje kapaciteta u EES-u. Prvo, olakšana je formulacija ograničenja ravnoteže fleksibilnosti zasnovana na fizici. Drugo, uspostavljen je dvostepeni model DRO, koji uključuje resurse na strani potražnje, kao što su vozni parkovi električnih vozila, kao dobavljačâ fleksibilnosti. Cilj optimizacije je minimiziranje ukupnih operativnih troškova, obuhvatajući troškove aktivacije resursa i kazne za deficit fleksibilnosti. Treće, struktura optimizacije na dva nivoa transformiše se u rešiv problem mešovitog celobrojnog programiranja korišćenjem ekvivalencije igre sa nultom sumom. Rezultati simulacije pokazuju da predloženi model pozitivno utiče na marginu fleksibilnosti i ekonomičnost EES-a.

Mogući su i multisektorski pristupi povezivanja, zajedničkim dizajniranjem različitih tehnologija sa tržištima električne energije. Hemijski sektor je jedinstveno pozicioniran da pomogne u obezbeđivanju dosad neviđenih nivoa fleksibilnosti, putem modularnih elektrohemijskih (EH) tehnologija koje koriste visoko intermitentnu energiju za proizvodnju hemikalija na distribuiran način, i putem efikasne proizvodnje energetskih nosača (npr. vodonika (H_2), amonijaka (NH_3), mravlje kiseline), koji se mogu koristiti za skladištenje, transport i regeneraciju energije, [16]. U širem smislu, to može pružiti fleksibilnost kako bi se omogućilo ublažavanje rizika (npr. od ekstremnih vremenskih uslova, sajber napada i sl.). Ovo može igrati ključnu ulogu u osiguravanju da elektroenergetska mreža i lanci snabdevanja hemikalijama rade na pouzdan, održiv i ekonomičan način.

Uparivanje modela se takođe obrađuje u [17], uvodeći različite pristupe modelovanju koordinacije rasporeda fleksibilnosti u integrisanim energetskim sistemima sa više nosača (*Multi-Carrier Integrated Energy Systems*, MIES). Predložen je pristup spajanja modela inspirisan tržišnom aukcijom kako bi se rešili izazovi očuvanja autonomije i privatnosti pružalaca fleksibilnosti i pitanje skalabilnosti. Upoređen je sa kooptimizacijom i iterativnom metodom odziva na cenu, sprovođenjem eksperimenata sa različitim veličinama problema i računarskom infrastrukturom.

2 PRAVNI OKVIR ZA FLEKSIBILNOST I REDISPEČING

2.1 Pravni okvir u Republici Srbiji

Pravni okvir za fleksibilnost i redispečing u Republici Srbiji čine Zakon o energetici, [18], Pravila o radu distributivnog sistema, [19], Pravila o radu prenosnog sistema, [20], Pravila o radu tržišta električne energije, [21] i Uredba o uspostavljanju smernica za balansnu električnu energiju, [22].

2.1.1 Propisi Republike Srbije koje treba revidirati. Da bi se regulatorni/legislativni okvir za fleksibilnost i redispečing u Republici Srbiji upodobio kako metodologijama i trendovima prikazanim u pregledu stručne literature tako i regulativi Evropske Unije (EU) u ovom domenu, neophodno je revidirati određene nacionalne propise. To su:

- Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, [23];
- Uredba o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom, [24];
- Pravila o promeni i kolektivnoj promeni snabdevača i agregatora, [25];
- Pravilnik o obavljanju energetske delatnosti i sertifikaciji, [26];
- Metodologija za određivanje cene pristupa sistemu za prenos električne energije, [27];
- Metodologija za određivanje cene pristupa sistemu za distribuciju električne energije, [28].

2.2 Pravni okvir EU

Paket čiste energije (*Clean Energy Package*, CEP) iz 2019. godine ugradio je fleksibilnost kao strukturnu komponentu dizajna tržišta u EU i upravljanja mrežom. Inače, ovaj se paket sastoji od osam zakonodavnih akata EU kao i drugih inicijativa i mera usmerenih na olakšavanje tranzicije ka čistoj energiji. Paket CEP postavlja temelje za uspostavljanje novog dizajna tržišta električne energije uvođenjem ažuriranih Direktive [29] i Uredbe o električnoj energiji, [30], nove Uredbe o spremnosti za rizike i revidirane Uredbe Agencije EU za saradnju energetskih regulatora (*EU Agency for the Cooperation of Energy Regulators*, ACER).

Direktiva o električnoj energiji (EU) 2019/944, [29], predviđa pravo krajnjih kupaca, agregatora i operatera skladištenja da direktno učestvuju na svim tržištima električne energije. Ona zahteva od OPS-ovâ i ODS-ovâ da konkurentno nabavljaju usluge fleksibilnosti kad god je to efikasnije od konvencionalnog pojačanja mreže.

Uredba o električnoj energiji (EU) 2019/943, [30], dopunjuje ove odredbe tako što uspostavlja nediskriminatorska balansirajuća tržišta i priznaje odgovor na strani potražnje i skladištenje kao resurse ravnopravne proizvodnji, u svim tržišnim procesima.

Dodatno unapređenje dizajna tržišta električne energije EU predviđeno je Uredbom [31] iz 2024. godine, kojom su u tom pogledu izmenjene direktiva [29] i uredba [30].

2.2.1 Mrežni kodeks o odgovoru potražnje (*Demand Response*). Paket predloga ACER-a u vezi sa Mrežnim kodeksom za odgovor potražnje, [32], uključuje predlog za novi mrežni kodeks za celu EU, koji ima za cilj integraciju resursa fleksibilnosti na strani potražnje u evropsko tržište električne energije. Stoga on predstavlja jedan od ključnih podsticaja za dekarbonizaciju EES-a i njegovu tranziciju ka EES-u sa nultim emisijama. Mrežni kodeks [32] uključuje dodatna zajednička pravila za olakšavanje agregacije resursa, odgovora potražnje i skladištenja energije u EU.

Agencija EU ACER podnela je svoj konačni predlog Evropskoj komisiji (EK) a koji pored mrežnog kodeksa [32] uključuje i izmene tri povezana propisa, [33]-[35], kako bi se osigurala doslednost u regulatornom okviru.

3 PRUŽAOCI USLUGA FLEKSIBILNOSTI U DSEE SRBIJE

U skladu sa čl. 137a st. 1. Zakona o energetici, [18], operator distributivnog sistema (ODS, PD Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, skr. EDS) dužan je da nabavlja usluge fleksibilnosti u skladu sa transparentnim, nediskriminatornim i tržišnim principima od učesnika na tržištu:

- koji nude energiju iz obnovljivih izvora energije;
- koji se bave upravljanjem potrošnjom, odnosno proizvodnjom;
- koji se bave skladištenjem energije;
- proizvođača;
- agregatora;
- aktivnih kupaca (krajnjih kupaca).

Ovi akteri na tržištu mogu doprineti optimizaciji upravljanja DSEE-om, njegovoj pouzdanosti, pouzdanosti EES-a kao celine i sigurnosti napajanja krajnjih kupaca. Imajući u vidu raznolikosti ovde navedenih pružalaca usluge fleksibilnosti, kao i tehnologijâ koje oni koriste, jasno je da ODS mora da deluje kao neutralan posrednik na tržištu. Time bi se obezbedila jednaka konkurencija između različitih tehnologija i rešenja prilikom nabavke fleksibilnih resursa. U nastavku će posebno biti ukazano na dve (pod)kategorije učesnika na tržištu, uvedene najnovijom legislativom u Srbiji.

3.1 Energetska zajednica građana

Energetska zajednica građana učestvuje na tržištu električne energije bilo direktno ili putem agregiranja, na nediskriminatoran i proporcionalan način. Ona ima prava i obaveze u skladu sa ulogama na tržištu, kao što su prava i obaveze krajnjih kupaca, proizvođača, snabdevača, ili agregatora, prava i obaveze kao aktivni kupac u pogledu potrošnje električne energije koju on sam proizvede, i pravo da u okviru energetske zajednice građana organizuje raspodelu električne energije koju proizvode u objektima za proizvodnju koji su u vlasništvu energetske zajednice građana, uz ispunjenje uslova isporuke i snabdevanja električnom energijom. Osim toga, energetska zajednica građana je dužna da uredi svoju balansnu odgovornost.

3.2 Prozjumeri (kupci-proizvođači) i aktivni kupci

Izmenama i dopunama [18], usvojenim krajem 2024, propisano je da pravna lica od 1. januara 2026. godine više ne mogu sticati status kupca-proizvođača (prozjumera), već moraju ispuniti uslove za status aktivnog kupca. Krajnji kupac koji status kupca-proizvođača u kategoriji domaćinstvo stekne nakon tog datuma, zaključuje ugovor o potpunom snabdevanju sa neto obračunom, shodno čl. 131 (s3) zakona [18].

Kao aktivni kupac, krajnji kupac podleže tarifnim stavovima utvrđenim metodologijom za određivanje cene pristupa prenosnom i distributivnom sistemu a koji odražavaju troškove koji su transparentni i nediskriminatorni, pri čemu se posebno obračunava električna energija koja se predaje u mrežu, odnosno preuzima iz mreže, čime se obezbeđuje uravnotežen doprinos raspodeli ukupnih troškova sistema (čl. 210g, st. 3. [18]).

3.3 Fleksibilnost na distributivnom i na prenosnom nivou

Da bi postupak nabavke usluge fleksibilnosti bio efikasan i tržišno zasnovan, ključni preduslovi su opservabilnost i upravljivost. Opservabilnost podrazumeva mogućnost praćenja stanja DSEE-a / EES-a kao celine, odnosno informacijâ ODS-a/OPS-a o poznatom i prognoziranom stanju mreže/sistema. Upravljivost je neophodna radi pravilne aktivacije fleksibilnosti od strane korisnikâ sistema. U slučaju distributivnog nivoa reč je o korisnicima DSEE-a. Time će fleksibilnost postati resurs ODS-a i njegova prednost u optimizaciji upravljanja DSEE-om i u obezbeđivanju pouzdanosti i efikasnosti sistema.

Aktiviranje resursa fleksibilnosti od strane ODS-a i njegovih korisnika, međutim, ne mora uvek biti kompatibilno potrebama celog EES-a za fleksibilnošću. Ono se može preklapati sa tim potrebama ili, ponekad, čak pogoršati uslove za njihovo namirenje, npr. u kontekstu obezbeđivanja balansnih usluga. Zbog toga koordinacija između OPS-a i ODS-a postaje suštinski važna prilikom planiranja i angažovanja resursa fleksibilnosti od strane korisnika mreže. Uspostavljanje adekvatne razmene podataka o raspoloživoj i aktiviranoj fleksibilnosti predstavlja temeljni preduslov za ovakvu koordinaciju.

3.4 Analiza trenutnog stanja u EDS-u u 2026. godini – pružaoci fleksibilnosti, opservabilnost, upravljivost i pilot-projekti

U 2026. godini elektrodistributivni sistem Republike Srbije nalazi se u fazi ubrzane transformacije, koja je uslovljena porastom broja distribuiranih OIE, razvojem novih kategorija učesnika na tržištu električne energije i postupnim usklađivanjem nacionalnog regulatornog okvira sa pravnim tekovinama Evropske unije. Ovi procesi direktno utiču na raspoloživost, strukturu i mogućnosti aktiviranja resursa fleksibilnosti u okviru EDS-a.

3.4.1. Pružaoci fleksibilnosti u EDS-u. Dominantni potencijal fleksibilnosti na distributivnom nivou u 2026. godini dolazi iz kategorija učesnika opisanih u nastavku.

- **Kupci-proizvođači (prozjumeri – domaćinstva)** sa malim fotonaponskim postrojenjima, čiji se uticaj na mrežu značajno povećava na pojedinim niskonaponskim i srednjenaponskim izvodima. Njihova fleksibilnost je uglavnom pasivnog karaktera i svodi se na tehničke mogućnosti smanjenja injektiranja snage ili pomeranja potrošnje.
- **Aktivni kupci (pretežno pravna lica)** sa kombinacijom proizvodnje, potrošnje i – u pojedinim slučajevima – skladištenja energije. Ova grupa predstavlja najkvalitetniji izvor fleksibilnosti za ODS, ali je njihovo angažovanje još uvek ograničeno na pilot-aranžmane.
- **Distribuirani proizvođači električne energije**, pre svega solarne i male hidroelektrane, kod kojih postoji tehnička mogućnost redispečinga, ali bez sistemski razvijenog tržišnog mehanizma.
- **Skladišta električne energije**, čija primena u EDS-u raste sporo, ali kontinuirano, prvenstveno u demonstracionim projektima i lokalnim rešenjima.
- **Agregatori**, koji se u 2026. godini pojavljuju u pilot-projektima, ali još uvek nemaju masovno operativno učešće u upravljanju fleksibilnošću na distributivnom nivou.

3.4.2 Pilot-projekti fleksibilnosti i redispečinga. U cilju testiranja tehničkih i organizacionih modela upravljanja fleksibilnošću, u EDS-u je, u koordinaciji sa međunarodnim partnerima,

realizovan veći broj pilot-projekata, koji predstavljaju važan korak ka budućoj operativnoj primeni.

Jedna grupa pilot-projekata fokusirana je na **ograničenje proizvodnje iz distribuiranih fotonaponskih elektrana** na srednjem naponu u uslovima lokalnih zagušenja. Ovi projekti su pokazali da je tehnički moguće daljinsko upravljanje aktivnom snagom proizvodnih jedinica, ali su istovremeno ukazali na potrebu za jasnim ugovornim osnovom, pravilima nadoknade i preciznim mernim podacima.

Druga grupa pilot-projekata obuhvatila je **upravljanje potrošnjom kod industrijskih i komercijalnih korisnika**, gde su tokom određenih vremenskih intervala testirana privremena smanjenja opterećenja radi rasterećenja mrežnih elemenata. Ovi projekti su potvrdili da fleksibilnost potrošnje može biti pouzdan resurs, ali samo uz unapred definisane tehničke i tržišne uslove.

Poseban značaj imaju pilot-projekti u kojima je testirana **uloga agregatora**, kao posrednika između velikog broja malih resursa i ODS-a. U ovim slučajevima, fleksibilnost prozjumera i manjih komercijalnih objekata objedinjavana je i nuđena kao jedinstveni resurs, čime su identifikovani ključni zahtevi za ICT platforme, standardizaciju podataka i koordinaciju sa OPS-om.

Dodatno, kroz međunarodne projekte i regionalne inicijative testirana je primena **lokalnih tržišta fleksibilnosti (LFMs)** na distributivnom nivou, gde ODS dobija mogućnost da, pre primene investiranja u mrežu ili restriktivnih mera, pribavi fleksibilnost kao alternativno rešenje za upravljanje zagušenjima.

3.4.3 Opservabilnost distributivnog sistema. Sa aspekta opservabilnosti, stanje EDS-a u 2026. godini ostaje neujednačeno. Na višim naponskim nivoima obezbeđen je relativno dobar uvid u stanje mreže putem SCADA/DMS sistema i merenja u transformatorskim stanicama.

Pilot-projekti koji integrišu podatke iz naprednih brojila, lokalnih senzora i prognoza proizvodnje iz V-OIE pokazali su da je moguće značajno unaprediti opservabilnost i prediktivne sposobnosti ODS-a. Međutim, ovakva rešenja još uvek nisu primenjena sistemski na celoj distributivnoj mreži.

3.4.4 Upravljivost i aktiviranje fleksibilnosti. Rezultati pilot-projekata jasno ukazuju da tehnička mogućnost upravljanja fleksibilnošću postoji, ali da je puna operativna primena ograničena:

- nedovoljnom standardizacijom proizvoda fleksibilnosti;
- ograničenom integracijom ICT sistema;
- nedostatkom formalnih tržišnih mehanizama na distributivnom nivou.

Trenutna praksa se uglavnom oslanja na preventivne i administrativne mere, dok tržišno zasnovani redispečing ostaje u domenu demonstracionih projekata.

3.4.5 Opšta ocena stanja. U 2026. godini EDS raspolaže značajnim, ali nedovoljno aktiviranim potencijalom fleksibilnosti. Pilot-projekti predstavljaju ključni most između postojećeg operativnog modela i budućeg koncepta aktivnog distributivnog sistema, u kome fleksibilnost zauzima centralno mesto kao alternativa klasičnim mrežnim investicijama i ograničenjima.

5 ZAKLJUČAK

U ovom radu je dat uvid u noviju naučnu i stručnu literaturu iz oblasti fleksibilnosti i redispečinga. Potom je razmotreno ko su u Srbiji pružaoci usluga fleksibilnosti na elektrodistributivnom nivou. Oni mogu doprineti optimizaciji upravljanja DSEE-om, njegovoj pouzdanosti, pouzdanosti EES-a kao celine i sigurnosti napajanja krajnjih kupaca. U radu su analizirani neophodni pravni okvir i uslovi za obezbeđivanje usluga fleksibilnosti. Zaključeno je da ODS mora da deluje kao neutralan posrednik na tržištu kako bi se obezbedila jednaka konkurencija između različitih tehnologija i rešenja prilikom nabavke fleksibilnih resursa. Da bi postupak ove nabavke bio efikasan i tržišno zasnovan, ključni preduslovi su opservabilnost i upravljivost, čime će fleksibilnost postati resurs ODS-a i njegova prednost u optimizaciji upravljanja DSEE-om i u obezbeđivanju pouzdanosti i efikasnosti sistema.

Aktiviranje resursa fleksibilnosti od strane ODS-a i njegovih korisnika ne mora uvek biti kompatibilno potrebama celog EES-a za fleksibilnošću. Zbog toga uspostavljanje adekvatne razmene podataka o raspoloživoj i aktiviranoj fleksibilnosti na prenosnom i distributivnom nivou predstavlja preduslov za uspešnu koordinaciju između OPS-a i ODS-a prilikom planiranja i angažovanja resursa fleksibilnosti od strane korisnika mreže.

Da bi se u uslovima povećanja udela V-OIE u proizvodnom miksu ostvarili uslovi za uspešno obezbeđivanje fleksibilnosti EES-a, pa i DSEE-a, neophodno je stvaranje kako tehničko-tehnoloških uslova, tako i odgovarajućeg regulatornog okvira. U pogledu ovog potonjeg, u Srbiji je potrebno prilagođavanje nacionalne legislative tj. njeno usaglašavanje sa već usvojenim, kao i najavljenim, aktima EU koji tretiraju ovu oblast. U takvom okruženju i uz obezbeđene neophodne resurse i performanse, biće moguća i primena savremenih optimizacionih tehnika i metoda u oblastima fleksibilnosti i redispečinga.

LITERATURA

[1] A. Segura, J. Meléndez, „Requirements and Constraints of Forecasting Algorithms Required in Local Flexibility Markets”, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2025;145(1), p.p. 649-672, Doi:10.32604/cmes.2025.070954

[2] J. Cui, Y. Guo, C. Wu, „Multi-Period Adaptive Robust Scheduling of Flexibility Providers With Diverse Response Delays”, *Power Systems*, IEEE Transactions on, 2025, PP(99):1-13, DOI: 10.1109/TPWRS.2025.3631373

[3] P. Kaur, K. T. Chaturvedi and M. L. Kolhe, „Economic Power Dispatching from Distributed Generations: Review of Optimization Techniques”, Energy Engineering, 2024, vol.121, no.3, p.p. 558-579, DOI: 10.32604/ee.2024.043159

[4] L. Yan, S. Yucheng, M. Kailin, „Application and Performance Analysis of Deep Learning Models in Power Dispatching Automation”, *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1) (2024) 1-13, https://doi.org/10.2478/amns-2024-1484

[5] X. Cao, H. Li, D. Chen, et al., „A Low-Carbon and Economic Optimal Dispatching Strategy for Virtual Power Plants Considering the Aggregation of Diverse Flexible and Adjustable Resources with the Integration of Wind and Solar Power”, *Processes*, 2025, 13, 2361, https://doi.org/10.3390/pr13082361

[6] Y. Chen, „Research on Power Grid Dispatching Based on Particle Swarm Optimization”, Proceedings of the 3rd International Conference on Software Engineering and Machine Learning, p.p. 75-81, DOI: 10.54254/2755-2721/151/2025.22848

[7] Y. Chai, B. Zhang, M. Wang, Z. Zhao, „Research on power dispatching model based on knowledge graph entity extraction task", *Energy Informatics* (2025) 8:106, https://doi.org/10.1186/s42162-025-00559-9

[8] Y. Li, D. Wang, Z. Zhang, B. Gao, „Research on Dispatching Strategy for Power Systems Without Conventional Power Sources Considering Power Forecast Errors", *Journal of Electrical Engineering and Technology* 20(8), July 2025, DOI: 10.1007/s42835-025-02349-5

[9] G. Liu, Y. Tang, W. Guo, J. Dang, „Redesigning Power Grid Dispatching Automation Systems by Integrating LLMs, KGs, and AI Agents", CSEE *Journal of Power and Energy Systems* 11(6):2610-2622, November 2025, DOI: 10.17775/cseejpes.2025.03480

[10] J. Ming, Z. Xie, H. Teng, „Optimization of a Comprehensive Dispatching System Based on Ant Colony Algorithm and Dynamic Weight Power Dispatching Strategy", *Nature*, Scientific Reports, (2025) 15:39441, https://doi.org/10.1038/s41598-025-22913-3

[11] C. Wang, Y. Niu, L. Zuo, et. al., „Decision-Making Method for County Power Grid Dispatching with High Proportion of Renewable Energy", *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, September 2025, DOI: 10.13052/dgaej2156-3306.4042

[12] C. Hang, Z. Yang, F. Wang, et al., „Construction of Provincial Dispatching Automation System for Power Grids Assisted by Homogeneous and Heterogeneous Modes", *Renewable Energy and Power Quality Journal*, Vol. 23, No. 4, 2025, p.p. 13-28

[13] J. Zhang, C. Lu, C. Y. Chung, et. al, „Online Re-Dispatching of Power Systems Based on Modal Sensitivity Identification", *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, Vol. 9, Iss. 12, pp. 1352–1360, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0873

[14] J. Kiehle, T. J. Lindroos, J.-N. Louis, E. Pongrácz, „The impact of environmental flow constraints and energy storage on system performance and revenues in cascade hydropower", *Energy, Ecology and Environment*, Online, Sept. 2025, https://doi.org/10.1007/s40974-025-00385-5

[15] J. Liang, J. Miao, L. Sun, et al., „Supply–Demand Dynamics Quantification and Distributionally Robust Scheduling for Renewable-Integrated Power Systems with Flexibility Constraints", Energies 2025, 18, 1181, https://doi.org/10.3390/en18051181

[16] V. M. Zavala, „Exploiting Spatio-Temporal Interdependencies between Electrochemical Manufacturing and the Power Grid to Optimize Flexibility, Economics, and Sustainability", ECS Meeting 2025, Abstracts, MA2025-02(28):1527-1527

[17] C. D. Dinga , S. van Rijn , L. J. de Vries , M. Cvetkovic, „On the Smart Coordination of Flexibility Scheduling in Multi-carrier Integrated Energy Systems", Cornell University, https://arxiv.org/abs/2509.03126v1

[18] Zakon o energetici („Sl. glasnik RS", br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon, 62/2023, 94/2024 i 109/2025 - dr. zakoni)

[19] Odluka Saveta Agencije o davanju saglasnost na Pravila o radu distributivnog sistema („Sl.glasnik RS", br.71/017,014/19 i 71/17)

[20] Odluka o davanju saglasnosti na Pravila o radu prenosnog sistema („Sl.glasnik RS", br.118/25)

[21] Odluka o davanju saglasnosti na Pravila o radu tržišta („Sl.glasnik RS", br.118/25)

[22] Uredba o uspostavljanju smernica za balansnu električnu energiju, („Sl.glasnik RS", br.74/2025)

[23] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije („Sl.glasnik RS", br.40/21, 35/23 i 94/24)

[24] Uredba o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom („Sl.glasnik RS”, br.84/23, 58/25 i 67/25)

[25] Pravila o promeni i kolektivnoj promeni snabdevača („Sl.glasnik RS”, br.65/15 i 10/17)

[26] Pravilnik o obavljanju energetske delatnosti i sertifikaciji („Sl.glasnik RS”, br.87/15, 44/18 i 83/21)

[27] Metodologija za određivanje cene pristupa sistemu za prenos električne energije („Sl.glasnik RS”, br. 93/12, 123/12, 116/14, 109/15, 98/16, 99/18, 4/19, 158/20, 71/21, 130/22, 141/22, 5/23, 70/24)

[28] Metodologija za određivanje cene pristupa sistemu za distribuciju električne energije („Sl.glasnik RS”, br. 105/12, 84/13, 87/13, 143/14, 65/15, 109/15, 98/16, 99/18, 158/20, 71/21, 141/22, 101/24, 74/25)

[29] Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity, https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0944

[30] Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity, https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0943

[31] Regulation (EU) 2024/1747 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 amending Regulations (EU) 2019/942 and (EU) 2019/943 as regards improving the Union’s electricity market design

[32] Recommendation No 01/2025 of the European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators of 7 March 2025 on reasoned proposal for the establishment of the Network Code on Demand Response according to Article 59(1)(e) of Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity (recast)

[33] Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing (Text with EEA relevance)

[34] Commission Regulation (EU) 2017/1485 of 2 August 2017 establishing a guideline on electricity transmission system operation

[35] Commission Regulation (EU) 2016/1388 of 17 August 2016 establishing a Network Code on Demand Connection