

Metode optimizacije i primene veštačke inteligencije u efikasnoj integraciji vehicle-to-grid sistema

Luka Zoroje*, Doroteja Zarev*, Balša Čeranić*, Predrag Stefanov*, Jelena Stojković Terzić*, Leposava Ristić*,
Andrea Bonfiglio**

* Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

** Univerzitet u Đenovi, Fakultet za elektrotehniku, elektroniku, telekomunikacije i brodogradnju

Rezime - Tehnologija Vehicle-to-Grid (V2G) pojavila se kao perspektivno rešenje za unapređenje fleksibilnosti, pouzdanosti i održivosti savremenih elektroenergetskih sistema u uslovima brzog rasta broja električnih vozila i distribuiranih energetskih resursa. Efikasna primena V2G koncepta zahteva razvoj i primenu optimizacionih algoritama koji su u stanju da istovremeno obuhvate tehničke, ekonomske, ekološke i korisnički orijentisane ciljeve. Rezultati mnogih studija pokazuju da čak i primena jednostavnih algoritama može značajno smanjiti operativne troškove mreže u poređenju sa scenarijima bez ikakve intervencije. Ovaj rad pruža kratak pregled optimizacionih strategija za integraciju V2G sistema, sa fokusom na ključne ciljeve kao što su minimizacija gubitaka energije, upravljanje naponskim i tehničkim ograničenjima, smanjenje troškova punjenja, maksimizacija prihoda, ublažavanje emisija štetnih gasova i očuvanje stanja baterija. Determinističke, metaheurističke, višekriterijumske i tržišno orijentisane metode sistematski su razmotrene, uz isticanje njihove primenljivosti, prednosti i ograničenja u različitim operativnim uslovima. Posebna pažnja posvećena je sve većoj primeni veštačke inteligencije u V2G sistemima koja nudi moćne alate za upravljanje složenim interakcijama između električnih vozila, infrastrukture za punjenje i elektroenergetske mreže. Najzad, identifikovani su ključni izazovi optimizacije i upotrebe veštačke inteligencije, čime se ukazuju glavni pravci budućih istraživanja za primenu inteligentnih V2G sistema u velikom obimu.

Ključne reči - električna vozila, vehicle-to-grid, optimizacija, veštačka inteligencija, inteligentne mreže

I UVOD

Globalni energetski sektor prolazi kroz intenzivnu transformaciju uslovljenu dekarbonizacijom, digitalizacijom i decentralizacijom proizvodnje električne energije. Jedan od najznačajnijih pokretača ovih promena jeste ubrzana elektrifikacija transporta koja poslednjih godina rezultira eksponencijalnim rastom broja električnih vozila (EV). Prema podacima Međunarodne agencije za energiju, ukupan broj električnih automobila u svetu premašio je 40 miliona u 2023. godini, dok je samo te godine prodato skoro 14 miliona vozila [1]. Istovremeno infrastruktura za punjenje električnih vozila beleži snažan rast sa više od 5 miliona javnih punjača širom sveta.

Povećana upotreba električnih vozila ima značajne posledice po

elektroenergetski sistem, životnu sredinu i ekonomiju. Sa energetskog aspekta, električna vozila su u 2024. godini zamenila više od 1,3 miliona barela nafte dnevno, uz projekciju da će ta vrednost dostići 5,4 miliona barela dnevno do 2030. godine [1]. Sa stanovišta zaštite životne sredine baterijska električna vozila pokazuju najveći potencijal za smanjenje emisija gasova staklene bašte u sektoru drumskog saobraćaja [2]. Pored toga, razvoj industrije električnih vozila utiče na globalnu konkurentnost i geopolitičke odnose, posebno u kontekstu dominacije Kine u proizvodnji baterija i kritičnih minerala [3, 4].

U uslovima rasta broja električnih vozila, njihova nekoordinisana integracija može dovesti do značajnih problema u distributivnim mrežama, kao što su povećani gubici, preopterećenje transformatora i naponske nestabilnosti. V2G tehnologija se nameće kao rešenje koje omogućava fleksibilno upravljanje opterećenjem i bolju integraciju obnovljivih izvora energije. Brojne studije ukazuju na tehničke, ekonomske i ekološke koristi V2G koncepta [5-7].

Cilj ovog rada je da pruži sveobuhvatan pregled kontrolnih optimizacionih strategija za V2G sisteme, sa akcentom na metode optimizacije i primenu veštačke inteligencije u savremenim elektroenergetskim mrežama.

II OPTIMIZACIONI OKVIRI ZA EFIKASNU INTEGRACIJU V2G SISTEMA

Integracija V2G tehnologije u distributivne elektroenergetske sisteme zahteva razvoj kompleksnih optimizacionih okvira koji moraju da obuhvate veliki broj tehničkih ograničenja, ekonomskih parametara i ponašanje korisnika. Kako broj električnih vozila raste, uloga optimizacije postaje ključna za očuvanje pouzdanosti i efikasnosti sistema.

Značaj optimizacije u V2G sistemima jasno je ilustrovan u radu [8], gde je pokazano da čak i pojednostavljeni algoritmi mogu značajno smanjiti troškove rada sistema u odnosu na scenario bez upravljanja punjenjem i pražnjenjem. Ovi rezultati ukazuju na to da je optimizacija neophodan preduslov za praktičnu primenu V2G koncepta.

II-1 Ciljne funkcije i kriterijumi optimizacije

Optimizacioni problemi u V2G sistemima su po pravilu višeciljni jer uključuju interese različitih aktera, kao što su operatori distributivnih mreža, agregatori, vlasnici električnih vozila i kreatori energetskih politika [9, 10].

Sa tehničkog stanovišta ciljevi optimizacije obuhvataju minimizaciju gubitaka aktivne snage u mreži, sprečavanje termičkih preopterećenja elemenata mreže, održavanje napona u dozvoljenim granicama i poboljšanje kvaliteta električne energije. Ovi ciljevi su posebno značajni u niskonaponskim distributivnim mrežama, gde je uticaj električnih vozila najizraženiji.

Ekonomski ciljevi usmereni su na smanjenje troškova punjenja električnih vozila, maksimizaciju prihoda od učešća pomoćnim uslugama sistema i optimalno korišćenje dinamičkih tarifnih sistema.

Sa ekološkog aspekta, značajno je minimizovati emisije ugljen-dioksida kroz optimalno vremensko usaglašavanje punjenja sa periodima visoke proizvodnje iz obnovljivih izvora energije, kao i očuvati zadovoljavajuće stanje baterija kroz modelovanje degradacije [11-13].

Brojna istraživanja kombinuju navedene ciljeve u jednokriterijumske ili višekriterijumske optimizacione probleme, pokazujući da je moguće istovremeno unaprediti stabilnost mreže, ekonomsku isplativost i održivost sistema [14-16].

Mnogi optimizacioni algoritmi razmatraju stabilnost elektroenergetskog sistema, troškove punjenja i životni vek baterije zajedno kako bi se pronašla najbolja radna tačka sistema [17]. Rad [18] predstavlja zanimljivu korisnički orijentisanu i potpuno personalizovanu metodu optimizacije koja omogućava svakom vlasniku električnog vozila da sam odredi željeni balans između finansijske dobiti ostvarene prodajom električne energije mreži i degradacije baterije izazvane V2G ciklusima. U radu [19] autori nastoje da optimizuju tokove snaga u V2G sistemima, uz balansiranje troškova, stabilnosti mreže, prihoda, varijabilnosti obnovljivih izvora energije i stanja baterije. Njihov implementirani algoritam u poređenju sa postojećim kontrolerom BEIC (*Brain Emotional Intelligence Controller*) poboljšava optimizaciju reaktivne snage za 64,5 %.

III METODE OPTIMIZACIJE ZA UPRAVLJANJE V2G SISTEMIMA

Raznolikost ciljeva i ograničenja u V2G sistemima uslovlja je primenu širokog spektra optimizacionih metoda, koje se mogu klasifikovati u nekoliko osnovnih grupa.

III-1 Determinističke metode optimizacije

Determinističke metode optimizacije predstavljaju teorijsku i praktičnu osnovu velikog broja istraživanja u oblasti upravljanja i planiranja V2G sistema. Ove metode polaze od pretpostavke da su svi relevantni parametri sistema, kao što su cene električne energije, opterećenja i dostupnost električnog vozila i stanje napunjenosti baterija poznati ili pouzdano prognozirani u trenutku optimizacije. Iako ova pretpostavka ne odražava u potpunosti realne uslove rada, deterministički pristupi su izuzetno korisni za analizu sistema, dugoročno planiranje i procenu potencijalnih koristi V2G koncepta.

Linearno programiranje predstavlja jedan od najčešće korišćenih determinističkih pristupa u V2G optimizaciji, posebno u slučajevima kada se odnosi između promenljivih mogu adekvatno aproksimirati linearnim modelima. Modeli linearnog programiranja se uspešno koriste za optimizaciju rasporeda

punjenja i pražnjenja električnih vozila uz poštovanje ograničenja snage, energetskog bilansa i stanja napunjenosti baterija [20, 21]. Zahvaljujuću svojoj računarskoj efikasnosti, ovi modeli omogućavaju optimizaciju velikih flota električnih vozila.

Mešovito celobrojno linearno programiranje proširuje formulacije linearnog programiranja uvođenjem diskretnih promenljivih, što omogućava realističnije modelovanje V2G sistema. Na ovaj način mogu se opisati binarne odluke, kao što su uključanje ili isključenje punjača, izbor režima rada (punjenje, pražnjenje ili mirovanje), kao i učešće na tržištu pomoćnih usluga. Pristupi mešovitog celobrojnog linearnog programiranja su široko primenjeni u optimalnom upravljanju flotama električnih vozila, kao i u modelovanju degradacije baterija i ciklusnog starenja [22-24, 14].

U slučajevima kada ciljne funkcije ili ograničenja sadrže kvadratne članove, kao što su gubici u mreži, odstupanja napona ili aproksimacije degradacije baterija, koriste se kvadratno programiranje i mešovito celobrojno kvadratno programiranje. Ovi pristupi omogućavaju veću tačnost modela, ali uz povećanu računarsku složenost. Često se primenjuju u kombinaciji sa linearizovanim modelima distributivnih mreža ili konveksnim relaksacijama kako bi se obezbedila izvodljivost rešenja [25, 26].

Glavna prednost determinističkih metoda leži u njihovoj matematičkoj jasnoći, ponovljivosti, reproduktivnosti i mogućnosti dobijanja globalno optimalnih rešenja u okviru definisanog modela. Međutim, njihova osetljivost na neizvesnosti i ograničena sposobnost adaptacije u realnom vremenu predstavljaju značajan izazov za primenu u dinamičnim V2G sistemima.

III-2 Stohastičke metode

Stohastička optimizacija predstavlja značajni omogućavajući faktor za pouzdan i ekonomski efikasan rad V2G sistema jer su glavni ulazni parametri koji upravljaju planiranjem po svojoj prirodi neizvesti, uključujući vreme priključenja i isključenja sa mreže, početno stanje napunjenosti baterije pri dolasku, energetske potrebe vozača u trenutku polaska, aktivaciju regulacije i cene električne energije.

Modelovanjem ovih veličina kao slučajnih promenljivih V2G upravljački uređaji i agregatori mogu zajednički optimizovati odluke o punjenju i pražnjenju, kao i učešće na tržištu, uz eksplicitno balansiranje očekivanog priroda i rizika od neizvodljivosti ili kazni zbog neispunjenja obaveza.

Uobičajene formulacije uključuju dvostepene stohastičke algoritme u kojima se, najpre, donose planovi za rad sistema dan unapred, pre nego što se neizvesnost dogodi, dok se naknadne korekcije u realnom vremenu koriste za prilagođavanje sistema nakon nastanka neizvesnosti [27, 28].

Takođe se koriste modeli sa ograničenjima verovatnoće (*chance-constrained*) koji obezbeđuju probabilističke garancije za određena ograničenja, uključujući frekvencijsku sigurnost [29]. Pored toga, primenjuju se i ciljne funkcije koje izbegavaju rizik (na primer CVaR), kako bi se ograničila izloženost događajima male verovatnoće i visokih troškova [29].

U poređenju sa determinističkim pristupima, stohastičke metode povećavaju otpornost na greške u prognozama, omogućavaju

sistematično kvantifikovanje pouzdanosti i podržavaju skalabilne strategije agregiranja koje obezbeđuju usluge mreži bez narušavanja potreba korisnika u pogledu mobilnosti.

III-3 Metaheurističke metode

Metaheurističke metode optimizacije razvijene su kao odgovor na ograničenja klasičnih determinističkih pristupa, posebno u slučajevima kada su V2G problemi vrlo nelinearni, nekonveksni ili uključuju veliki broj diskretnih promenljivih. Za razliku od determinističkih metoda, metaheurističke ne zahtevaju eksplicitnu matematičku formulu problema niti poznavanje gradijenta, što ih čini izuzetno fleksibilnim za primenu u realnim V2G scenarijima.

Jedan od najčešće korišćenih metaheurističkih metoda u V2G optimizaciji jeste optimizacija rojem čestica. Algoritmi bazirani na optimizaciji rojem čestica se široko primenjuju za optimizaciju rasporeda punjenja i pražnjenja električnih vozila u uslovima promenljivih cena, ograničenja mreže i integracije obnovljivih izvora energije. Njihova sposobnost da efikasno pretražuju prostor rešenja čini ih pogodnim za primenu u kompleksnim distributivnim sistemima [30-32].

Genetički algoritam predstavlja još jednu značajnu klasu metaheurističkih metoda, koji koriste principe prirodne selekcije, ukrštanja i mutacije kako bi postepeno unapređivali kvalitet rešenja. Genetički algoritmi su posebno pogodni za rešavanje problema koji uključuju veliki broj diskretnih odluka, kao što su izbor strategija učešća električnih vozila u V2G programima, raspoređivanje punjača ili optimizacija rada agregatora [33, 34].

Pored optimizacije rojem čestica i genetičkog algoritma u literaturi su zastupljene i druge metaheurističke tehnike, kao što su harmonijska pretraga, optimizacija kolonijama mrava i diferencijalna evolucija. Ovi algoritmi omogućavaju efikasno rešavanje višeciljnih problema i lako se kombinuju sa fazi logikom ili drugim inteligentnim tehnikama radi poboljšanja performansi sistema [35-37].

Ključna prednost metaheurističkih metoda leži u njihovoj sposobnosti da pronađu kvalitetna rešenja u složenim, realističnim uslovima rada, čak i u prisustvu neizvesnosti i nelinearnosti. Sa druge strane, ovi algoritmi ne garantuju globalni optimum i često zahtevaju pažljivo podešavanje parametara, što može uticati na stabilnost i reproduktivnost rezultata.

Tabela 1. Glavni ciljevi optimizacije i korišćene metode u V2G sistemima

Kategorija pristupa	Glavni cilj optimizacije	Glavne metode korišćene u literaturi	Literatura
Deterministička optimizacija	- Minimizacija troškova - Maksimizacija profita - Upravljanje vršnim opterećenjem - Minimizacija varijanse opterećenja - Maksimizacija prihoda agregatora	- Linearno programiranje - Mešovito celobrojno linearno programiranje - Mešovito celobrojno programiranje - Kvadratno programiranje	[14], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]
Stohastička optimizacija	- Upravljanje neizvesnostima - Maksimizacija profita	- Dvostepeno stohastičko programiranje - Distribuciono-robustna optimizacija - Dvostepena distribuciono-robustna optimizacija	[27],[28],[29]
Metaheuristička jednokriterijumska optimizacija	- Minimizacija troškova - Optimizacija punjenja - Koordinacija EV	- Optimizacija rojem čestica - Genetički algoritam - Diferencijalna evolucija - Optimizacija kolonijom mrava <i>Harmony Search</i> algoritam - Algoritam kita - Algoritam sivog vuka	[30],[32], [33], [34], [35], [36], [37]
Metaheuristička višekriterijumska optimizacija	Istovremena minimizacija troškova / emisija / opterećenja i maksimizacija profita / zadovoljstva korisnika	- Nedominirajuće sortiranje genetičkim algoritmom II - Binarna optimizacija - Kooperativna koevolucija - TOPSIS	[31], [38], [39], [40]
Teorija igara	- Optimalno formiranje V2G cena - Maksimizacija koristi agregatora i korisnika	<i>Stackelberg</i>-ova igra - Kooperativna igra	[42], [43], [44]

III-4 Višekriterijumska optimizacija

Višekriterijumska optimizacija ima centralnu ulogu u V2G sistemima jer se u njima istovremeno javljaju konflikti ciljevi različitih učesnika. Tipični primeri takvih sukoba uključuju minimizaciju troškova punjenja nasuprot očuvanju stanja baterije ili smanjenje gubitaka u mreži nasuprot maksimizaciji prihoda u pružanju pomoćnih usluga mreži. Upravo iz tog razloga višekriterijumski pristupi omogućavaju realističnije modelovanje

V2G sistema u odnosu na jednokriterijumske optimizacione formulacije.

Jedan od najčešće korišćenih algoritama u ovoj oblasti je NSGA-II (*Non dominated Sorting Genetic Algorithm II*), koji omogućava generisanje skupa Pareto-fronta sa optimalnim rešenjima. U literaturi je NSGA-II algoritam uspešno primenjen za analizu kompromisa između troškova i esmije ugljen-dioksida, gubitaka u mreži i degradacije baterija, kao i profita

agregatora i zadovoljstva korisnika [38-40].

Pored evolucionih algoritama, višekriterijumska optimizacija često se kombinuje sa fazi logikom, posebno u slučajevima kada ciljevi ili ograničenja ne mogu biti precizno kvantifikovani. Fazi pristupi omogućavaju modelovanje subjektivnih preferencija korisnika, kao što su tolerancija na degradaciju baterije ili sklonost ka finansijskoj dobiti, što je posebno važno u rezidencijalnim V2G primenama [41].

Višekriterijumski pristupi su od ključnog značaja za projektovanje V2G sistema koji su tehnički izvodljivi, ekonomski održivi i društveno prihvatljivi jer omogućavaju transparentan uvid u posledice različitih strategija upravljanja.

III-5 Tržišno orijentisane metode i metode teorije igara

Kako V2G sistemi sve češće učestvuju u tržištima električne energije i pomoćnih usluga, neophodno je eksplicitno modelovati ekonomske interakcije između različitih aktera. Tržišno orijentisani pristupi imaju za cilj da optimizuju ponašanje V2G učesnika u uslovima dinamičkih cena, ograničenih resursa i konkurentnog okruženja.

Teorija igara predstavlja jedan od najznačajnijih alata za analizu ovih interakcija. Kroz konkurentne, kooperativne i hijerarhijske modele moguće je opisati ponašanje električnih vozila, agregatora i operatora sistema. Posebno su značajni *Stackelberg* modeli u kojima agregator deluje kao lider koji definiše cenovne signale ili strategije, dok električna vozila reaguju u skladu sa svojim ograničenjima i preferencijama [42-44].

Ovi modeli omogućavaju dizajn efikasnih tarifnih mehanizama i podsticaja koji podstiču aktivno učešće korisnika u V2G programima, istovremeno obezbeđujući ekonomsku isplativost i stabilnost elektroenergetskog sistema.

U tabeli 1 prikazan je pregled glavnih ciljeva optimizacije i glavnih optimizacionih metoda korišćenim u V2G sistemima.

IV PRIMENA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U V2G SISTEMIMA

Integracija veštačke inteligencije u V2G sisteme predstavlja jedan od najznačajnijih savremenih trendova u oblasti inteligentnih elektroenergetskih mreža. Zbog visoke dinamičnosti, decentralizovane prirode i prisustva neizvesnosti, klasični algoritmi često nisu dovoljni za efikasno upravljanje V2G sistemima u realnom vremenu. Pristupi koji uključuju korišćenje veštačke inteligencije omogućavaju adaptivno donošenje odluka, učenje iz podataka i poboljšavanje performansi sistema tokom vremena.

IV-1 Prognoza potrošnje i ponašanje korisnika

Precizna prognoza potrošnje električne energije predstavlja osnovu za efikasno upravljanje elektroenergetskim sistemima. U V2G kontekstu, ovaj zadatak je dodatno usložen zbog varijabilnosti ponašanja korisnika, vremena dolaska i odlaska vozila, kao i stanja napunjenosti baterija. Modeli mašinskog dubokog učenja, kao što su veštačke neuralne mreže, rekurentne neuralne mreže i arhitekture duge kratkoročne memorije, omogućavaju znatno tačnije prognoze u poređenju sa klasičnim statističkim metodama [45-47].

IV-2 Stabilnost mreže i pomoćne usluge

Algoritmi veštačke inteligencije igraju značajnu ulogu u procedurama obezbeđivanja stabilnosti elektroenergetskog sistema kroz pružanje pomoćnih usluga. Njihovom primenom moguće je dinamički prilagođavati snagu punjenja i pražnjenja električnih vozila radi regulacije frekvencije i napona [48-50].

Pored toga, veštačka inteligencija omogućava realizaciju naprednih programa upravljanja potrošnjom i odgovora na potražnju, gde električna vozila kolektivno deluju kao fleksibilan resurs za ublažavanje vršnih opterećenja [51].

IV-3 Optimalan dispečering energije

Optimalan dispečering energije u V2G sistemima podrazumeva određivanje trenutka i količine energije koju električna vozila treba da razmenjuju sa mrežom. Algoritmi veštačke inteligencije omogućavaju kontinuirano prilagođavanje strategija na osnovu dinamičkih cena, stanja mreže i stanja baterija [52-54].

IV-4 Minimizacija troškova i ekonomska optimizacija

Sistemi veštačke inteligencije omogućavaju inteligentno donošenje odluka koje minimizuju troškove rada sistema i korisnika. Integracija podataka o cenama električne energije, stanju mreže i dostupnosti električnih vozila omogućeno je punjenje u periodima niskih cena i pražnjenje u periodima povećane potražnje energije [55, 56].

IV-5 Upravljanje stanja baterija

Očuvanje stanja baterija predstavlja jedan od ključnih izazova V2G sistema. Modeli veštačke inteligencije koriste se za predikciju degradacije baterija i integraciju ovih informacija u optimizacione algoritme, čime se obezbeđuje dugoročna održivost sistema [57-60].

IV-6 Prediktivna podrška upravljanju flotom i infrastrukturom za punjenje

Sa porastom penetracije električnih vozila, upravljanje velikim brojem korisnika infrastrukturom za punjenje postaje sve složenije i zahteva napredne prediktivne metode. Veštačka inteligencija omogućava preciznu procenu vremena dolaska i odlaska vozila, trajanja punjenja i potrebne energije, čime se smanjuje neizvesnost u planiranju opterećenja i unapređuje efikasnost *scheduling* strategija. Prediktivni modeli zasnovani na nadgledanom učenju doprinose boljoj koordinaciji između vozila i mreže, pružajući pouzdane ulazne podatke za buduće V2G optimizacione algoritme [61, 62].

U Tabeli 2 za svaku oblast primene veštačke inteligencije prikazane su glavne metode koje se koriste, tip učenja i njihova integracija sa optimizacijom u V2G sistemima.

IV-7 Izazovi primene veštačke inteligencije u V2G sistemima

Uprkos brojnim prednostima, primena veštačke inteligencije u V2G sistemima suočava se sa značajnim izazovima. Nedostatak standardizovanih i kvalitetnih podataka, visoki računarski zahtevi, problem interpretabilnosti modela, kao i pitanja sajber bezbednosti i regulatornih okvira predstavljaju ključne prepreke široj primeni ovih tehnologija.

Tabela 2. Glavne oblasti primene veštačke inteligencije, metode koje koriste, njihov tip učenja i integracija sa optimizacijom

Oblast primene	AI metode korišćene u literaturi	Tip učenja	Integracija sa optimizacijom	Literatura
Proгноza opterećenja i potrošnje energije	• Veštačke neuralne mreže • Random Forest • XGBoost • Linearna i polinomijalna regresija • Wavelet neuralna mreža	Nadgledano učenje	Ulaz u optimizacioni problem (podrška prognozi)	[45], [46], [47], [55], [56]
Regulacija frekvencije	• Veštačka neuralna mreža • Duga kratkoročna memorija • Veštačke neuralne mreže zasnovane na optimizaciji rojem čestica • Mreže tipa akter-kritičar	Nadgledano učenje i učenje podsticanjem	Hibridni AI-optimizacioni model ili direktna optimalna kontrola	[48], [49], [50]
Pametno punjenje i V2G raspored	• Duboke neuralne mreže • Duboko učenje podsticanjem • Višeagentsko duboko učenje podsticanjem	Nadgledano učenje i duboko učenje podsticanjem	Direktna optimalna kontrola ili raspored zasnovan na dubokom učenju podsticanjem	[52], [53], [54]
Procena stanja baterije (SOH) i integracija sistema za upravljanje baterijom	• Veštačke neuralne mreže • Duga kratkoročna memorija • Transfer učenje	Nadgledano učenje	Indirektna integracija (ulaz za sistem upravljanja baterijom i V2G optimizaciju)	[57], [58], [59], [60]
Predikcija ponašanja korisnika i obrazaca punjenja	• Random Forest • Metoda nosećih vektora • XGBoost • Duboke veštačke neuralne mreže + ansambl modeli	Nadgledano učenje	Indirektna - model kao ulaz za buduće optimizacione probleme	[61], [62]

V ZAKLJUČAK

V2G tehnologija predstavlja jedan od ključnih kocepata budućih inteligentnih elektroenergetskih sistema, omogućavajući aktivnu ulogu električnih vozila u upravljanju mrežom. U radu je dat detaljan pregled upravljačkih i optimizacionih strategija V2G sistema, sa posebnim osvrtom na različite klase optimizacionih metoda i primenu veštačke inteligencije.

Analiza pokazuje da uspešna implementacija V2G koncepta zahteva integrisani pristup koji obuhvata tehničke, ekonomske i regulatorne aspekte, kao i aktivno učešće svih relevantnih aktera. Buduća istraživanja treba usmeriti ka razvoju robusnih, interpretabilnih i skalabilnih rešenja koja će omogućiti široku primenu V2G tehnologije u realnim distributivnim elektroenergetskim sistemima.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je deo projekta E-COSMOS koji predstavlja bilateralnu saradnju izmedju Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu i Fakulteta za elektrotehniku, elektroniku, telekomunikacije i brodogradnju Univerziteta u Đenovi.

LITERATURA

[1] IEA (2024), Global EV Outlook 2024, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> [pristupljeno 15.01.2026]

[2] Negri, M., Bieker, G. Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: a 2025 update and key factors to consider, The International Council on clean transportation, 2025, <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/> [pristupljeno 15.01.2026]

[3] BloombergNEF, Electric Vehicle Outlook 2026, <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/> [pristupljeno 15.01.2026]

[4] IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025, <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025> [pristupljeno 15.01.2026]

[5] Kumar, P., Channi, H.K., Kumar, R., Rajiv, A., Kumari, B., Singh, G., Singh, S., Dyab, I.F., Lozanović, J. A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future, Energy Conversion and Management: X, Vol. 25, 100864, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100864>

[6] Chen, G., Zhang, Z. Control strategies, economic benefits, and challenges of vehicle-to-grid applications: recent trends research, World Electric Vehicles Journals, Vol. 15, No. 5, pp. 190, 2024. <https://doi.org/10.3390/wevj15050190>

[7] Biswas, P., Rashid, A., Habib, A.K.M.A., Mahmud, M., Motakabber, S.M.A., Hossain, S., Rokonzaman, M., Molla, A.H., Harun, Z., Khan, M.M.H., Cheng, W., Lei, T.M.T. Vehicle to grid: technology, charging station, power transmission, communication standards, techno-economic analysis, challenges, and recommendations. World Electric Vehicle Journal, Vol. 16, No. 3, pp. 142, 2025. <https://doi.org/10.3390/wevj16030142>

[8] Escoto, M., Guerrero, A., Ghorbani, E., Juan, A.A. Optimization challenges in vehicle-to-grid (v2g) systems and artificial intelligence solving methods,

- Applied Sciences, Vol. 14, No. 12, 5211, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14125211>
- [9] Huang, Z., Fang, B., Deng, J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system, *Protection and Control of Modern Power Systems*, Vol. 5, No.7, 2020. <https://doi.org/10.1186/s41601-020-0154-0>
- [10] Habib, H.U.R., Subramaniam, U., Waqar, A., Farhan, B.S., Kotb, K.M., Wang, S. Energy Cost Optimization of Hybrid Renewables Based V2G Microgrid Considering Multi Objective Function by Using Artificial Bee Colony Optimization, in *Proc. IEEE Access*, Vol. 8, pp. 62076-62093, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984537>
- [11] Xu, J., Chen, J., Wei, H., Zhao, Y., Tian, B., Wen, Y., Jiang, H., Zhang, N., Zhang, S., Wu, Y. Emissions reduction potential and feasibility of vehicle-to-grid for Beijing's future electric vehicles, *Cell Reports Physical Science*, Vol. 6, No. 6, 102616, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102616>
- [12] Yu, B., Lei, X., Shao, Z., Jian, L. V2G Carbon Accounting and Revenue Allocation: Balancing EV Contributions in Distribution Systems, *Electronics*, Vol. 13, No. 6, 1063, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13061063>
- [13] Lee, C.F., Bjurek, K., Hagman, V., Li, Y., Zou, C. Vehicle-to-Grid Optimization Considering Battery Aging, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 56, No. 2, pp. 6624-6629, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.362>
- [14] Principe, L.P., van Essen, J.T., Caggiani, L., Ottomanelli, M., Correia, G.H. A mathematical programming model for optimal fleet management of electric car-sharing systems with Vehicle-to-Grid operations, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 368, 133147, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133147>
- [15] Jadoun, V.K., Sharma, N., Jha, P., Jayalakshimi, S.N., Malik, H., Garcia Márquez, F.P. Optimal Scheduling of Dynamic Pricing Based V2G and G2V Operation in Microgrid Using Improved Elephant Herding Optimization, *Sustainability*, Vol. 13, No. 14, pp. 7551, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13147551>
- [16] Aurangzeb, M., Wang, Y., Iqbal, S., Shafiullah, M., Alghamdi, S., Ullah, Z. A Novel Multiobjective Optimization Approach for EV Charging and Vehicle-to-Grid Scheduling Strategy, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 1192925, 2025. <https://doi.org/10.1155/etep/1192925>
- [17] He, C., Peng, J., Jiang, W., Wang, J., Du, L., Zhang, J. Vehicle-To-Grid (V2G) Charging and Discharging Strategies of an Integrated Supply-Demand Mechanism and User Behavior: A Recurrent Proximal Policy Optimization Approach, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 15, No. 11, pp. 514, 2024. <https://doi.org/10.3390/wevj15110514>
- [18] Mallick, A., Pantazis, G., Khosravi, M., Esfahani, P.M., Grammatico, S. User-centric Vehicle-to-Grid Optimization with an Input Convex Neural Network-based Battery Degradation Model, 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.11047>
- [19] Finecomess, S.A., Gebresenbet, G., Zada, W.Y., Mulugeta, Y., Addisie, A. Optimization of Vehicle-to-Grid, Grid-to-Vehicle, and Vehicle-to-Everything Systems Using Artificial Bee Colony Optimization, *Energies*, Vol. 18, No. 8, pp. 2046, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18082046>
- [20] Sortomme, E., El-Sharkawi, M.A. Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 351-359, 2012. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2164099>
- [21] Luo, T., Huang, F., Zhou, H., Xie, G. Multi-Objective Rolling Linear-Programming-Model-Based Predictive Control for V2G-Enabled Electric Vehicle Scheduling in Industrial Park Microgrids, *Processes*, Vol. 13, No. 11, pp. 3421, 2025. <https://doi.org/10.3390/pr13113421>
- [22] Rafique, S., Nizami, M.S.H., Irshad, U.B., Hossain, M.J., Mukhopadhyay, S.C. EV Scheduling Framework for Peak Demand Management in LV Residential Networks, *IEEE System Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 1520-1528, 2022. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3068004>
- [23] Triviño-Cabrera, A., Aguado, J.A., de la Torre, S. Joint routing and scheduling for electric vehicles in smart grids with V2G, *Energy*, Vol. 175, pp. 113-122, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.184>
- [24] Khezri, R., Steen, D., Wikner, E., Tuan, L.A. Optimal V2G Scheduling of an EV With Calendar and Cycle Aging of Battery: An MILP Approach, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 10, No. 4, pp. 10497-10507, 2024. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3384293>
- [25] Secchi, M., Barchi, G., Macii, D., Petri, D. Smart electric vehicles charging with centralised vehicle-to-grid capability for net-load variance minimisation under increasing EV and PV penetration levels, *Sustainable Energy Grids Network*, Vol. 35, 101120, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101120>
- [26] Han, S., Han, S., Sezaki, K. Optimal control of the plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation using quadratic programming, in *Proc. ISGT 2011*, Anaheim, CA, USA, pp. 1-6, 2011. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2011.5759172>
- [27] Lu, S., Han, B., Xue, F., Jiang, L., Feng, X. Stochastic bidding strategy of electric vehicles and energy storage systems in uncertain reserve market, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 14, No. 18, pp. 3653-3661, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0121>
- [28] Zhan, S., Zhou, Y., Feng, D., Fang, C., Wang, H., Dou, S., Chen, L. V2G-enhanced operation optimization strategy for EV charging station with photovoltaic and energy storage integration, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 171, 111002, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111002>
- [29] Liu, Y., Zeng, W., Chen, M., He, Z., Yuan, Y., Ding, T. Chance-constrained scheduling considering frequency support from electric vehicles under multiple uncertainties, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 18, No. S1, pp. 4348-4359, 2024. <https://doi.org/10.1049/rpg2.13171>
- [30] Saber, A.Y., Venayagamoorthy, G.K. V2G Scheduling - A Modern Approach to Unit Commitment with Vehicle-to-Grid using Particle Swarm Optimization, *IFAC Proceeding Volumes*, Vol. 42, No. 9, pp. 261-266, 2009. <https://doi.org/10.3182/20090705-4-SF-2005.00047>
- [31] Liu, L., Xie, F., Huang, Z., Wang, M. Multi-Objective Coordinated Optimal Allocation of DG and EVCs Based on the V2G Mode, *Processes*, Vol. 9, No. 1, pp. 18, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9010018>
- [32] Shaheen, H.I., Rashed, G.I., Yang, B., Yang, J. Optimal electric vehicle charging and discharging scheduling using metaheuristic algorithms: V2G approach for cost reduction and grid support, *Journal of Energy Storage*, Vol. 90, Part A, 111816, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111816>
- [33] Elkholy, A.M., Rozhkov, A.N., Badalyan, A.V., Cherdintsev, I.A. Adaptive genetic algorithms enhance EV charging infrastructure resilience through multi-constraint optimization of grid resources and traffic dynamics, *Electric Power Systems Research*, Vol. 250, 112045, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2025.112045>
- [34] Jordán, J., Palanca, J., Martí, P., Julian, V. Electric vehicle charging stations emplacement using genetic algorithms and agent-based simulation, *Expert Systems with Applications*, Vol. 197, 116739, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116739>
- [35] Kamarposhti, M., Shokouhandeh, H., Ahmed, E., Zaki, Z., Colak, I., Barhoumi, E.M., Eguchi, K. Cost-Effective Optimization of Sizing and Charging Profiles for PHEV Parking Lots in Smart Microgrids Using Harmony Search Algorithm, *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 79053-79069, 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3564841>
- [36] Shindhuja, M., Mary, S.M.J., Punitha, K. Ant Colony Optimization of Charging Coordination of Electric Vehicles Considering Vehicle-to-Grid (V2G) Technology in Multi Micro Grid Power System, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 6, No. S1, 2017. https://www.ijareeie.com/upload/2017/ncirest/4_Ant%20Colony%20Optimization%20Of%20Charging%20Coordination%20of%20Electric%20Vehicle%20Considering%20Vehicle%20to%20Grid%20V2G%20Technology%20in%20Multi%20Micro%20Grid%20Power%20System.pdf [pristupljeno 16.01.2026]
- [37] da Silva, L.G., de Andrade, N.D., Godoy, R.B., de Brito, M.A.G., Maddalena, E.T. Differential Evolution and Fuzzy-Logic-Based Predictive Algorithm for V2G Charging Stations, *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 10, pp. 5921, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13105921>
- [38] Niu, M., Yang, D., Ji, R., Miah, M.S. A Two-stage Optimal Dispatch Strategy of Microgrid Considering Electric Vehicles in V2G Mode, in *Proc. 2025 7th International Conference on Energy Systems and Electrical Power (ICESEP)*, Wuhan, China, pp. 806-810, 2025. <https://doi.org/10.1109/ICESEP66633.2025.11155769>
- [39] Blazek, V., Vantuch, T., Slanina, Z., Vysocky, J., Prokop, L., Misak, S., Piecha, M., Walendziuk, W. A novel approach to utilization vehicle to grid technology in microgrid environment, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 158, 109921, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109921>
- [40] Alden, R.E., Timilsina, A., Silvestri, S., Ionel, D.M. V2G Optimization for Dispatchable Residential Load Operation and Minimal Utility Cost, in *Proc. 2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*,

- Detroit, MI, USA, pp. 1-4, 2023, <https://doi.org/10.1109/ITEC55900.2023.10186955>
- [41] Faddel, S., Aldeek, A., Al-Awami, A.T., Sortomme, E., Al-Hamouz, Z. Ancillary Services Bidding for Uncertain Bidirectional V2G Using Fuzzy Linear Programming, *Energy*, Vol. 160, pp. 986-995, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.091>
- [42] Chen, P., Han, L., Xin, G., Zhang, A., Ren, H., Wang, F. Game Theory Based Optimal Pricing Strategy for V2G Participating in Demand Response, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 59, No. 4, pp. 4673-4683, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3273209>
- [43] Ma, Y., Lu, Y., Yin, Y., Lei, Y. Pricing strategy of V2G demand response for industrial and commercial enterprises based on cooperative game, *International Journal of Electric Power Energy Systems*, Vol. 160, 110051, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110051>
- [44] Wang, Z., Yue, D., Liu, J., Xu, Z. A Stackelberg Game Modelling Approach for Aggregator Pricing and Electric Vehicle Charging, in *Proc. 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 2209-2213, 2019. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2019.8781294>
- [45] Román-Portabales, A., López-Nores, M., Pazos-Arias, J.J. Systematic Review of Electricity Demand Forecast Using ANN-Based Machine Learning Algorithms, *Sensors*, Vol. 21, No. 13, pp. 4544, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21134544>
- [46] Salem, K.M., Rey-Martínez, F.J., Elgharib, A.O., Rey-Hernández, J.M. Energy Demand Forecasting Scenarios for Buildings Using Six AI Models, *Applied Science*, Vol. 15, No. 15, pp. 8238, 2025. <https://doi.org/10.3390/app15158238>
- [47] Kamoona, A., Song, H., Keshavarzian, K., Levy, K., Jalili, M., Wilkinson, R., Yu, X., McGrath, B., Meegahapola, L. Machine learning based energy demand prediction, *Energy Reports*, Vol. 9, No. S12, pp. 171-176, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.151>
- [48] Safari, A., Babaei, F., Farrokhifar, M. A load frequency control using a PSO-based ANN for micro-grids in the presence of electric vehicles, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 42, No. 6, pp. 688-700, 2019. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1563811>
- [49] Sundararajan, G., Sivakumar, P., LSTM Recurrent Neural Network-Based Frequency Control Enhancement of the Power System with Electric Vehicles and Demand Management, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 1281248, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1281248>
- [50] Song, X., Sun, J., Tan, S., Ling, R., Chai, Y., Guerrero, J.M. Cooperative grid frequency control under asymmetric V2G capacity via switched integral reinforcement learning, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 155, Part B, 109679, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109679>
- [51] Mahmud, K., Morsalin, S., Hossain, M.J., Town, G.E. Domestic peak-load management including vehicle-to-grid and battery storage unit using an artificial neural network, in *Proc. 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON, Canada, pp. 586-591, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2017.7915424>
- [52] Xiao, Q., Zhang, R., Wang, Y., Shi, P., Wang, X., Chen, B., Fan, C., Chen, G. A deep reinforcement learning based charging and discharging scheduling strategy for electric vehicles, *Energy Reports*, Vol. 12, pp. 4854-4863, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.10.056>
- [53] Wang, Y., Qiu, D., He, Y., Zhou, Q., Strbac, G. Multi-agent reinforcement learning for electric vehicle decarbonized routing and scheduling, *Energy*, Vol. 284, 129335, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129335>
- [54] Alfaverh, F., Denai, M., Sun, Y. Electrical vehicle grid integration for demand response in distribution networks using reinforcement learning, *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 11, No. 4, pp. 348-361, 2021. <https://doi.org/10.1049/els2.12030>
- [55] López, K.L., Gagné, C., Gardner, M.-A. Demand-Side Management Using Deep Learning for Smart Charging of Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, No. 3, pp. 2683-2691, 2019. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2808247>
- [56] Gao, Y., Guo, S., Ren, J., Zhao, Z., Ehsan, A., Zheng, Y. An Electric Bus Power Consumption Model and Optimization of Charging Scheduling Concerning Multi-External Factors, *Energies*, Vol. 11, No. 8, pp. 2060, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11082060>
- [57] Naha, A., Han, S., Agarwal, S. et al. An Incremental Voltage Difference Based Technique for Online State of Health Estimation of Li-ion Batteries. *Scientific Report*, Vol.10, pp. 9526, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66424-9>
- [58] Li, W., Sengupta, N., Dechent, P., Howey, D., Annaswamy, A., Sauer, D.U. Online capacity estimation of lithium-ion batteries with deep long short-term memory networks, *Journal of Power Sources*, Vol. 482, 228863, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228863>
- [59] Tan, Y., Zhao, G. Transfer Learning With Long Short-Term Memory Network for State-of-Health Prediction of Lithium-Ion Batteries, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, No. 10, pp. 8723-8731, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2946551>
- [60] Wu, Y., Xue, Q., Shen, J., Lei, Z., Chen, Z., Liu, Y. State of Health Estimation for Lithium-Ion Batteries Based on Healthy Features and Long Short-Term Memory, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 28533-28547, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972344>
- [61] Boulakhbar, M., Farag, M., Benabdelaziz, K., Zazi, M., Maaroufi, M., Kousksou, T. Electric Vehicles Arrival and Departure Time Prediction Based on Deep Learning: The Case of Morocco, in *Proc. 2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, Meknes, Morocco, pp. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1109/IRASET52964.2022.9738115>
- [62] Shahriar, S., Al-Ali, A.R., Osman, A. H., Dhou, S., Nijim, M. Prediction of EV Charging Behavior Using Machine Learning, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 111576-111586, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103119>

AUTORI

Luka Zoroje - asistent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, zoroje@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0005-9163-765X](https://orcid.org/0009-0005-9163-765X)

Doroteja Zarev - asistent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, doroteja.zarev@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0005-4066-9344](https://orcid.org/0009-0005-4066-9344)

Balša Čeranić - asistent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, ceranic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0004-6649-6632](https://orcid.org/0009-0004-6649-6632)

Predrag Stefanov - redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, stefanov@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-4054-2202](https://orcid.org/0000-0003-4054-2202)

Jelena Stojković Terzić - docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, jstojkovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-6948-3755](https://orcid.org/0000-0002-6948-3755)

Leposava Ristić - vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, lela@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-4474-8486](https://orcid.org/0000-0003-4474-8486)

Andrea Bonfiglio - vanredni profesor, Univerzitet u Đenovi, Fakultet za elektrotehniku, elektroniku, telekomunikacije i brodogradnju, a.bonfiglio@unige.it, ORCID [0000-0003-3142-8598](https://orcid.org/0000-0003-3142-8598)

Optimization Frameworks and Artificial Intelligence Applications for Efficient Vehicle-To-Grid Integration

Abstract – Vehicle-to-Grid (V2G) technology has emerged as a promising solution for enhancing the flexibility, reliability, and sustainability of modern power systems in the context of the rapid growth of electric vehicles and distributed energy resources. Effective implementation of the V2G concept requires advanced optimization algorithms capable of simultaneously addressing technical, economic, environmental, and user-oriented objectives. The results of numerous studies indicate that even the application of simple algorithms can significantly reduce grid operating costs

compared to scenarios without any intervention. This paper provides a brief overview of optimization strategies for the integration of V2G systems, focusing on key objectives such as minimizing power losses, managing voltage and technical constraints, reducing charging costs, maximizing revenue, mitigating gas emissions, and preserving battery health. Deterministic, metaheuristic, multi-objective, and market-oriented methods are systematically reviewed, highlighting their applicability, advantages, and limitations under different operating conditions. Special attention is devoted to the increasing use of artificial intelligence in V2G systems, which offers powerful tools for managing complex interactions between electric vehicles, charging infrastructure, and the power grid. Finally, key challenges related to optimization and the use of artificial intelligence are identified, outlining the main directions for future research toward the large-scale deployment of intelligent V2G systems.

Index terms – *Electric vehicles, Vehicle-To-Grid, Optimization, Artificial intelligence, Smart grids*