

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.22](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.22)

C2.22

**PRIMENA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U UPRAVLJANJU, KONTROLI I
PLANIRANJU ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA – PREGLED I PERSPEKTIVE****APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN POWER SYSTEM OPERATION,
CONTROL, AND PLANNING – REVIEW AND PERSPECTIVES****Vladimir Bečejac*¹, Aleksandar Georgiev¹, Milan Trifunović¹, Damjan Ilić¹**

Kratak sadržaj: Veštačka inteligencija (AI) sve više nalazi primenu u elektroenergetskim sistemima, omogućavajući bržu i efikasniju analizu podataka, optimizaciju resursa i donošenje odluka u realnom vremenu. Ovaj rad pruža pregled savremenih AI tehnika koje se koriste u operativnom upravljanju, kontroli i planiranju elektroenergetskih mreža, sa posebnim osvrtom na neuronske mreže, optimizacione algoritme (genetski algoritam, optimizacija rojem čestica) i fuzzy logiku. Analiziraju se prednosti AI metoda u odnosu na konvencionalne pristupe, uključujući smanjenje vremena računanja, povećanje tačnosti predikcija i unapređenje stabilnosti sistema. Identifikovane su konkretne prepreke za širu implementaciju AI u elektroenergetskim sistemima, uključujući: ograničenu dostupnost kvalitetnih i označenih podataka za treniranje modela, složenost integracije AI rešenja u postojeće SCADA/EMS i DMS sisteme, nedovoljnu objašnjivost rezultata koje donose neuronske mreže, kao i regulatorne nejasnoće koje ograničavaju njihovu operativnu primenu. Rad pruža perspektivu budućeg razvoja i pravaca istraživanja, uključujući dalju integraciju AI u pametne mreže (smart grids), razvoj hibridnih modela za rešavanje složenih optimizacionih problema i primenu neuronskih mreža za predikciju lokalnih marginalnih cena (LMP).

Ključne reči: AI, optimizacija, kontrola, digitalizacija

Abstract: Artificial Intelligence (AI) is increasingly being applied in power systems, enabling faster and more efficient data analysis, resource optimization, and real-time decision-making. This paper provides an overview of modern AI techniques used in operational management, control, and planning of power grids, with a special focus on neural networks, optimization algorithms (genetic algorithm, particle swarm optimization), and fuzzy logic. The advantages of AI methods over conventional approaches are analyzed, including reduced computation time, improved prediction accuracy, and enhanced system stability. Specific challenges to broader AI implementation in power systems are identified, including limited availability of high-quality labeled data for model training, complexity of integrating AI solutions into existing SCADA/EMS and DMS systems, lack of explainability in neural network outputs, and regulatory uncertainties that limit operational deployment.

* Mašinski fakultet – Univerzitet u Beogradu

¹ AD Elektromreža Srbije

The paper offers perspectives for future development and research directions, including further integration of AI into smart grids, development of hybrid models for solving complex optimization problems, and the use of neural networks for local marginal price (LMP) prediction.

Keywords: AI, optimization, control, digitalization

1 UVOD

Brza digitalna transformacija elektroenergetskih sistema i rastuća složenost mreža su postavile potrebu za uvođenje inteligentnih i naprednih alata koji mogu da odgovore na nove izazove u realnom vremenu. Sa sve većom integracijom obnovljivih izvora energije, decentralizacijom proizvodnje i povećanim zahtevima za pouzdanošću i efikasnošću, tradicionalni metodi upravljanja i planiranja postaju ograničeni. Veštačka inteligencija (AI) nudi širok dijapazon rešenja za poboljšanje procesa donošenja odluka, predikcije i optimizacije u svim sektorima elektroenergetskih sistema – od operativnog upravljanja i kontrolisanja napona, preko ekonomskog raspoređivanja opterećenja i planiranja održavanja, pa sve do predviđanja kvarova i zaštite sistema.

Upotreba AI metoda kao što su veštačke neuronske mreže (ANN), fuzzy logika, genetski algoritmi (GA), optimizacija rojem čestica (PSO), duboko učenje i njihove hibridne kombinacije, postaje sve zastupljenija u elektroenergetici. Ove metode omogućavaju dinamičku adaptaciju sistemskih parametara, efikasno upravljanje velikim skupovima podataka i donošenje optimizovanih odluka čak i u uslovima nesigurnosti.

Cilj ovog rada je da pruži sveobuhvatan pregled savremenih AI tehnika i njihove primene u upravljanju, kontroli i planiranju elektroenergetskih sistema. Poseban akcenat je stavljen na ekonomsko raspoređivanje opterećenja, planiranje održavanja, upravljanje naponom i stabilnošću, optimalni tok snage, kao i na izazove i ograničenja u implementaciji AI rešenja u realnim elektroenergetskim sistemima. Rad analizira i uporedne prednosti različitih algoritama, kao i perspektive za njihovu integraciju u buduće energetske mreže zasnovane na digitalnim i pametnim tehnologijama.

2 EKONOMSKO RASPOREĐIVANJE OPTEREĆENJA

Ekonomsko raspoređivanje opterećenja (ELD) je proces određivanja koliko će energije proizvesti svaka elektrana u sistemu, a sa ciljem da se ukupna potrošnja zadovolji na najisplativiji način. Suština ovog zadatka je da se smanje ukupni troškovi goriva, tj. proizvodnja električne energije, uz poštovanje maksimalne efikasnosti iskorišćenja raspoloživih resursa.

U bilo kom elektroenergetskom sistemu nekoliko generatora učestvuje zajednički u snabdevanju potrošača. Međutim, svaki od njih ima različite troškove proizvodnje, između ostalog i zbog različite udaljenosti od mesta potrošnje. Upravo zbog toga je potrebno pažljivo optimizovati učešće svakog generatora u ukupnoj proizvodnji.

Da bi se ovaj problem rešio, razvijene su brojne metode koje koriste veštačku inteligenciju. Genetski algoritam (GA) je inspirisan evolucijom (selekcija, ukrštanje i mutacija) i može značajno smanjiti ukupne troškove proizvodnje, iako u nekim slučajevima dovodi do povećane emisije štetnih gasova. S druge strane, rešenja koja donose veću cenu ponekad obezbeđuju niži nivo emisije.

Stoga je često potrebno pronaći prihvatljiv balans između ekonomije i ekologije. Ograničenja koja je GA pokazao se ogledaju u sporij konvergenciji u sistemima kada se odigravaju nagli skokovi potražnje.

Optimizacija rojem čestica (PSO) simulira kretanje roja čestica u prostoru rešenja. Svaka čestica prati sopstveno najbolje rešenje i globalno najbolje rešenje. Čestice kolektivno prilagođavaju putanju ka optimalnom rešenju, što omogućava brzu adaptaciju promenama (npr. fluktuacije energije iz obnovljivih izvora). U radu (Kumar et al. 2014) u problemu uključivanja generatora, PSO je smanjio vreme proračuna za 25% u odnosu na GA, uz istu tačnost.

U velikim i međusobno povezanim sistemima, gde su razdaljine značajne, gubici električne energije postaju bitan faktor koji utiče na raspodelu proizvodnje. U takvim slučajevima, korišćenjem evolutivnih algoritama moguće je poboljšati i profil napona i ukupnu efikasnost sistema.

Kada je reč o metodama koje koriste neuronske mreže (ANN), pokazalo se da one daju rezultate slične tradicionalnim metodama, ali uz značajno kraće vreme izvršavanja. Međutim, sa povećanjem broja generatora, dolazi do povećanih grešaka u predikciji zbog složenosti ulazno-izlaznih podataka koje mreža mora da nauči. ANN sa 15 generatora imao je grešku predviđanja od 8%, dok je kod 30 generatora greška porasla na 18% (Daniel et al., 2018).

3 PLANIRANJE ODRŽAVANJA GENERATORA

Planiranje održavanja generatora (GMS) predstavlja složen problem kombinatorne optimizacije za snabdevače električnom energijom. Tradicionalni matematički pristupi koriste se za rešavanje ovog problema, ali imaju ograničenja. Ponekad je neophodno uključivanje operatera kako bi se donele odluke o rasporedu održavanja. Osim toga, postoje nepredvidivi faktori poput kvarova opreme ili promena u potražnji koje matematički modeli ne mogu tačno da predvide.

Održavanje generatora predstavlja program preventivnih isključenja unutar određenog vremenskog horizonta u elektroenergetskom sistemu. Prisustvo različitih tipova generatora sa različitim karakteristikama i brojnim ograničenjima čini planiranje održavanja izuzetno složenim zadatkom. Planiranje održavanja se vrši za različite vremenske horizonte:

- Kratkoročni planovi (1 sat do 1 dan) su ključni za svakodnevno upravljanje i operativno planiranje u elektranama;
- Srednjoročno planiranje (1 dan do 1 godina) neophodno je za upravljanje resursima;
- Dugoročno planiranje (1 do 2 godine) je kritično za buduće planove razvoja.

U cilju rešavanja ovih problema, ispituju se različite metode veštačke inteligencije, uključujući simulirane razvoje, neuronske mreže i genetske algoritme. Primena genetskih algoritama u istraživanjima pokazuje da je neophodno pažljivo odabrati odgovarajuće parametre GA, kao i način kodiranja problema i razvojne funkcije. Korišćenje celobrojnog programiranja može smanjiti brzinu istraživanja genetskih metoda, jer algoritam mora da izvodi dodatne operacije za pretvaranje rešenja u cele brojeve, što može usporiti proces pretrage.

Planiranje proizvodnje energije ostaje izazovan optimizacioni problem. Glavni izazov leži u pronalaženju optimalne ravnoteže između troškova i efikasnosti, uzimajući u obzir faktore poput uticaja na životnu sredinu, pouzdanosti i bezbednosti snabdevanja električnom energijom. Pod rešenjem problema planiranja proizvodnje podrazumeva se određivanje optimalnog rasporeda uključivanja jedinica (unit commitment) u svakom planerskom periodu za svaki generator u sistemu. Proces rešavanja mora istovremeno da razmatra binarne odluke (uključivanje/isključivanje) i kontinualne promenljive (nivoi proizvodnje).

Pristupi optimizacije rojem čestica (PSO) korišćeni su za postizanje održivih rasporeda u određenom vremenskom okviru. Studija je pokazala da pristup zasnovan na PSO daje bolje rezultate u odnosu na genetske algoritme.

4 OPTIMALNO PLANIRANJE RADA ELEKTRANA (UNIT COMMITMENT)

Optimalno planiranje rada elektrana (Unit Commitment - UC) predstavlja ključni proces u upravljanju elektroenergetskim sistemom kojim se određuje optimalni raspored uključivanja/isključivanja generatora. Cilj je zadovoljiti brojna systemska ograničenja i minimizirati ukupne troškove goriva u svakom vremenskom intervalu, uz obezbeđivanje odgovarajuće obrtne (rezervne) snage.

Za uspešnu implementaciju UC-a, koristi se srednjoročna prognoza opterećenja pomoću neuronskih mreža (ANN). Mreža se trenira kroz proces učenja i optimizacije parametara, a kao kriterijum evaluacije koriste se ukupni operativni troškovi u periodu od 24 sata. Studija je pokazala da ANN modeli značajno poboljšavaju tačnost prognoze opterećenja u odnosu na tradicionalne metode poput linearne regresije i vremenskih serija, što direktno doprinosi smanjenju troškova raspoređivanja jer se smanjuje broj potrebnih generatora.

Poseban značaj ima uvažavanje nesigurnosti i varijabilnosti potražnje u planiranju UC-a. ANN modeli se pokazuju kao efikasno rešenje za postizanje pouzdanijeg i ekonomičnijeg upravljanja sistemom. Dodatno, istraživanja su pokazala da se neuronske mreže mogu koristiti i za procenu lokalnih marginalnih cena energije, što dovodi do novih pristupa u UC mehanizmima.

Za rešavanje problema UC-a primenjuje se i optimizacija rojem čestica (PSO). Međutim, sa povećanjem kompleksnosti sistema (broja generatora), vreme izvršavanja algoritma raste. Iako je problem planerskog karaktera, da bi se ubrzao proces, implementiraju se dodatne metode za poboljšanje konvergencije, što omogućava efikasnije pronalaženje optimalnog rešenja čak i u velikim elektroenergetskim sistemima.

5 OPTIMAL POWER FLOW

Optimalni tok snage (OPF) predstavlja ključnu tehniku u elektroenergetskim sistemima koja omogućava određivanje optimalnih parametara upravljanja kako bi se postiglo maksimiziranje ili minimiziranje ciljne funkcije uz zadovoljenje brojnih systemskih ograničenja. Ova metoda je od vitalnog značaja kako za projektovanje tako i za eksploataciju elektroenergetskih mreža.

Posebna pažnja se posvećuje problemu optimalnog upravljanja naponom i reaktivnom snagom (OPD), koji predstavlja podskup OPF problema. Cilj OPD-a je smanjenje ukupnih gubitaka u prenosnoj mreži kroz optimalnu raspodelu reaktivne snage, a uticajem na generatore i promenu pozicije regulacionih sklopki transformatora.

Što se tiče ANN, do sada je implementiran je pristup gde se skup ANN mreža trenira offline na osnovu specifičnih sistemskih veličina kako bi se rešavao opšti OPF problem. Za izbor odgovarajućih ulaza u ANN korišćena je K-sredina (K-means) tehnika klasterizacije. Pravilno obučene neuronske mreže mogu sa velikom preciznošću da predvide povezane rezultate.

Do sada je razvijen i adaptivni neuro-fuzzy interferentni sistem (ANFIS) koja razvija fuzzy-inferentni sistem (FIS) za ulazno-izlazne podatke. ANFIS podešava parametre pripadnosti koristeći algoritme propagacije unazad ili metode najmanjih kvadrata. Validacija ANFIS pristupa vršena je na IEEE 39 čvornom test sistemu uz korišćenje Power World simulatora. Rezultati pokazuju da ANFIS nudi rešenja koja su podjednako tačna kao i konvencionalne metode, ali sa znatno kraćim vremenom izračunavanja.

Ovi rezultati potvrđuju efikasnost primene veštačke inteligencije u rešavanju kompleksnih problema u elektroenergetskim sistemima, posebno u domenu optimalnog upravljanja tokom snage i reaktivnom snagom. Kombinacija različitih AI tehnika omogućava postizanje preciznih rezultata uz smanjene računске zahteve u odnosu na tradicionalne pristupe.

6 UPRAVLJANJE NAPONOM

Glavni cilj sistema za kontrolu napona u elektroenergetskim sistemima je održavanje naponskog profila unutar definisanih granica, čime se postiže minimizacija gubitaka u prenosu i sprečava pojava naponske nestabilnosti. Sistem upravljanja naponom ima hijerarhijsku strukturu koja se sastoji od tri nivoa:

- Automatski regulator napona (AVR) - lokalno upravlja naponom na sabirnicama koje imaju izvore reaktivne snage (sinhroni generatori, STATCOM, SVC uređaji)
- Sekundarna kontrola napona (SecVC) - prati napon na referentnim sabirnicama i identifikuje kontrolne regione;
- Tercijarna kontrola napona (TerVC) - određuje optimalne referentne vrednosti napona sa ciljem minimizacije gubitaka i optimizacije reaktivne snage.

SecVC nivo radi sa manjom brzinom od AVR i mora biti dovoljno fleksibilan da prilagodi kontrolne regione promenljivim uslovima u mreži. TerVC se obično ažurira svakih 30 minuta do 1 sat.

Za analizu naponske stabilnosti koriste se napredne metode poput:

- Algoritma propagacije greške unazad za obuku višeslojnih perceptrona;
- Metode minimalne singularne vrednosti za analizu statičkog kolapsa napona;
- Kombinacije neuronskih mreža i ekspertnih sistema za monitoring naponske stabilnosti.

Primena genetskih algoritama (GA) u upravljanju naponom podrazumeva iterativni optimizacioni proces koji radi sa populacijom kandidata za rešenje. Ključni koraci u GA su:

- Definisanje načina kodiranja problema;
- Određivanje funkcije dobrote (fitness function);
- Selekcija roditelja za reprodukciju;
- Primena operatora ukrštanja (crossover) i mutacije;
- Generisanje nove populacije;

Za početnu inicijalizaciju PSO algoritma koristi se ANN sa:

- kontrolne promenljive na ulazu;
- neuroni sa pristrasnostima u skrivenom sloju;
- izlazne ciljne vrednosti

Proces optimizacije obuhvata sledeće korake:

- Nasumična primena težinskih vrednosti u ANN
- Aktivacija skrivenog sloja sigmoidnom funkcijom
- Linearna aktivacija izlaznog sloja
- Korišćenje optimalnih vrednosti PSO za inicijalizaciju TVNLPSO algoritma

Ova kombinacija neprednih tehnika omogućava da se na efikasan način upravlja naponskim uslovima u kompleksnim sistemima. Takođe, zahtevi za stabilnošću i ekonomskom efikasnošću moraju biti zadovoljeni.

7 STABILNOST ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA I PRIMENA FUZZY LOGIKE

Stabilnost elektroenergetskog sistema predstavlja njegovu sposobnost da održi ravnotežu u normalnim radnim uslovima i da se povrati u prihvatljivo stanje nakon poremećaja. Tokom poslednjih godina uočava se globalni trend smanjenja margina stabilnosti, što je posledica nekoliko ključnih faktora:

- Ekonomska i ekološka ograničenja - Ograničeni kapaciteti za izgradnju novih dalekovoda i postrojenja prisiljavaju sisteme da rade sa užim sigurnosnim marginama.
- Restrukturiranje elektroenergetske industrije - Proces deregulacije dovodi do smanjene kooperacije između podsistema, što negativno utiče na stabilnost.
- Povećana kompleksnost sistema - Savremeni sistemi karakterišu se nelinearnim oscilacijama, frekventnim razlikama između slabije povezanih oblasti i interakcijama sa zasićenim uređajima.

Fuzzy logika se pokazala kao efikasan alat za rešavanje problema stabilnosti, posebno kod sistema koji su teški za modelovanje. Najveći napredak postignut je kombinacijom fuzzy kontrolera sa PID regulatorima, gde fuzzy logika dinamički prilagođava pojačanja PID regulatora u zavisnosti od stanja sistema.

Osnovni delovi fuzzy kontrolera su:

- Fuzzifikacija - prevođenje ulaznih vrednosti u fuzzy skupove
- Baza fuzzy pravila - skup if-then pravila zasnovan na ekspertskom znanju
- Fuzzy inferencija - proces donošenja zaključaka
- Defuzzifikacija - konverzija fuzzy rezultata u konkretne izlazne vrednosti

Od FACTS uređaja, unified power flow controller (UPFC) se ističe kao najperspektivniji za poboljšanje stabilnosti. UPFC omogućava kontrolu tri ključna parametra i to napona na sabirnicama, reaktivne snage u dalekovodima i faznog ugla između čvorova.

Ova fleksibilnost omogućava redistribuciju tokova snage uz održavanje stabilnog stanja sistema, kao i povećanje prigušenja niskofrekventnih oscilacija. Integracija UPFC sa inteligentnim kontrolnim algoritmima, posebno fuzzy logikom, predstavlja perspektivan pravac razvoja savremenih elektroenergetskih sistema.

8 OPTIMIZACIJA REAKTIVNE SNAGE I NAPREDNE KONTROLNE STRATEGIJE

Porast potražnje za električnom energijom i izgradnja novih dalekovoda dovode do promena u dinamici tokova snage i povećanih zahteva za efikasnom kontrolom reaktivne snage. Kompenzacija reaktivne snage igra bitnu ulogu u poboljšanju naponskog profila, smanjenju gubitaka energije i povećanju stabilnosti sistema, posebno u čvorovima sa slabim naponskim karakteristikama. Složenost savremenih elektroenergetskih sistema, uz stalno povećano opterećenje mrežnih komponenti, često rezultira nestandardnim radnim uslovima, što zahteva robustne mehanizme za upravljanje reaktivnom snagom i naponom.

Inteligentne metode za kontrolu reaktivne snage može biti kombinacija fuzzy logike i neuronskih mreža (ANN) koja se koristi za određivanje strategije upravljanja regulacionih transformatora i kondenzatorima. Ova sinergija omogućava adaptivno prilagođavanje promenljivim uslovima, ali suočava se sa izazovima zbog velikog broja kontrolnih parametara.

U situacijama kada se vreme regulacije modeluje kao kazneni član (penalty factor) u kriterijumskoj funkciji, GA se pokazuje kao dobar izbor.

Optimizacija rojem čestica (PSO) i diferencijalna evolucija (DE) se koriste za smanjenje troškova goriva generatora i upravljanje reaktivnom snagom u povezanim sistemima.

Hibridni pristup DE-PSO kombinuje prednosti DE i PSO za prevazilaženje ograničenja pri maksimalnom opterećenju.

Postoje i inovativni pristupi bazirani na fuzzy logici koji su efikasno minimizirali gubitke aktivne snage i maksimizirali marginu naponske stabilnosti. Što se tiče integracije fuzzy sistema sa GA i PSO, ona se koristi za optimalno pozicioniranje i dimenzionisanje FACTS uređaja.

Takođe, razvijeni su algoritmi zasnovani na dinamici fluida za upravljanje reaktivnom snagom i naponom, sa ciljem redukcije stvarnih gubitaka snage u mreži. Ovi pristupi istražuju interakciju između hidrodinamičkih principa i električnih parametara.

Ovi napredni metodi čine osnovu za projektovanje adaptivnih, samo-organizujućih sistema koji mogu efikasno da odgovore na dinamičke promene u modernim elektroenergetskim mrežama, obezbeđujući ekonomsku efikasnost i visok nivo pouzdanosti.

9 IZAZOVI I OGRANIČENJA U PRIMENI VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Uprkos dokazanoj efikasnosti veštačke inteligencije u brojnim studijama i simulacijama, njena šira primena u elektroenergetskim sistemima nailazi na određene izazove. Jedan od značajnih problema je dostupnost i kvalitet podataka. Naime, AI algoritmi zahtevaju prilično velike količine pouzdanih, dobro indeksiranih podataka za obuku, što u realnim sistemima često nije slučaj.

Drugi izazov odnosi se na objašnjivost modela (explainability). U slučaju pogrešne odluke AI sistema, neophodno je da operator razume osnovu odluke, što je kod kompleksnih neuronskih mreža često otežano.

Integracija sa postojećim SCADA/EMS i SCADA/DMS sistemima takođe predstavlja tehnički izazov, jer većina postojećih infrastruktura nije dizajnirana za integraciju sa naprednim AI modulima. Potrebno je uraditi detaljnu tehno-ekonomsku analizu. Pored toga, uvođenje AI u realno vreme zahteva nisku latenciju i visoku pouzdanost, što dodatno komplikuje implementaciju i iziskuje velike novčane troškove.

Na kraju, potrebno je spomenuti i regulatorne i standardizacione aspekte, jer mnoge AI metode još uvek nisu dovoljno normirane da bi bile pouzdano uključene u operativni deo sistema.

U tabeli 1 su prikazane određene tehnike, njihove primene u EES-u, kao i prednosti i mane.

Tabela 1: AI tehnike sa primenama, prednostima i manama

AI Tehnika	Primena u EES	Prednosti	Mane
ANN (Veštačke neuronske mreže)	Predikcija opterećenja, stabilnost, klasifikacija kvarova	Visoka tačnost, učenje iz podataka, dobra generalizacija	Zahteva velike količine podataka za obuku
Fuzzy logika	Upravljanje naponom, odlučivanje pri nesigurnim uslovima	Otporna na neizvesnost, interpretabilna pravila	Potrebna stručnost pri definisanju pravila
Genetski algoritmi (GA)	Optimizacija planiranja, ekonomski dispečing	Efikasna u velikim prostornim pretragama, fleksibilna	Može doći do lokalnog optimuma, sporije konvergira
Optimizacija rojem čestica (PSO)	Optimizacija mrežnih parametara i tokova snage	Brza konvergencija, jednostavna implementacija	Zavisi od inicijalnih parametara
Duboko učenje (Deep Learning)	Analiza vremenskih serija, otkrivanje anomalija	Sposobnost obrade kompleksnih obrazaca i nelinearnosti	Potreban hardver visokih performansi
SVM (Support Vector Machine)	Klasifikacija i detekcija kvarova	Dobra klasifikacija uz manji broj podataka	Osetljiv na izbor kernela i parametara
Hibridne metode (npr. Fuzzy-GA, ANN-PSO)	Adaptivne metode za kontrolu i zaštitu sistema	Kombinuju snage različitih AI metoda, poboljšane performanse	Kompleksnost modela i veća računarska zahtevnost

10 ZAKLJUČAK

Veštačka inteligencija je nova paradigma u modernom upravljanju elektroenergetskih sistema. AI pristup se razlikuje od klasičnih metoda po tome što dovodi do preciznijeg odlučivanja u realnom vremenu, pomaže u smanjenju operativnih troškova, predviđanju kvarova, poboljšanju stabilnosti sistema itd. Metode poput neuronskih mreža, fuzzy logike, genetskih algoritama, optimizacije rojem čestica i njihovih hibridnih kombinacija sve više nalaze primenu u rešavanju veoma kompleksnih problema kao što su ekonomsko raspoređivanje opterećenja, planiranje održavanja, optimalni tok snage i upravljanje naponom.

Velika je upotreba AI kada se radi o velikim elektronskim sistemima, posebno kad su oni izloženi velikim učešćem obnovljivih izvora energije ili naglim promenama u potrošnji električne energije. Kada se ove metode ubace u već postojeće SCADA/EMS i DMS sisteme, pravi se korak napred u pogledu boljih performansi i sigurnosti elektroenergetskih mreža. Međutim, da bi AI pristup bio u potpunosti usvojen, potrebno je prevazići probleme koji se javljaju u oblasti podataka, transparentnosti algoritama, regulatornih okvira, zaštite od hakerskih napada itd.

Pored navedenih generalnih prednosti primene veštačke inteligencije u elektroenergetskim sistemima, važno je posebno istaći i konkretne tehničke koristi od pojedinačnih AI tehnika. Na primer, fuzzy logika se uspešno koristi za unapređenje naponske stabilnosti, posebno u čvorovima sa niskim naponskim marginama. Genetski algoritmi se primenjuju za optimizaciju planiranja održavanja i ekonomskog raspoređivanja opterećenja, omogućavajući efikasniju upotrebu resursa uz minimizaciju operativnih troškova. Takođe, optimizacija rojem čestica (PSO) pruža odlične rezultate u optimizaciji tokova snage (OPF) i raspodeli reaktivne snage, čime se smanjuju gubici u mreži i poboljšava naponski profil. Ovi konkretni primeri potvrđuju visok potencijal AI metoda u rešavanju kompleksnih problema savremenih elektroenergetskih mreža.

Na osnovu uporednih studija navedenih u radu, jasno je da primenom AI metoda dobijamo merljive koristi. Na primer, optimizacija rojem čestica (PSO) smanjuje vreme proračuna za ekonomsko raspoređivanje opterećenja za oko 25% u poređenju sa genetskim algoritmom, uz zadržavanje iste tačnosti rešenja. Takođe, neuronske mreže postižu do 20% manju grešku predikcije opterećenja u odnosu na tradicionalne metode kao što je linearna regresija. Ovi rezultati samo potvrđuju da AI ne samo da omogućava pametnije upravljanje, već i donosi konkretne operativne koristi izražene kroz uštedu vremena i novca.

Kako se digitalizacija i koncepti pametnih mreža razvijaju to će tako i tehnologije AI napredovati u narednim godinama i mi ćemo definitivno biti svedoci toga.

11 LITERATURA

- [1] Yousuf, Hana, et al. "Artificial intelligence models in power system analysis." *Artificial intelligence for sustainable development: Theory, practice and future applications*. Cham: Springer International Publishing, 2020. 231-242.
- [2] Madan, S., and K. E. Bollinger. "Applications of artificial intelligence in power systems." *Electric Power Systems Research* 41.2 (1997): 117-131.
- [3] Pandey, Utkarsh, et al. "Applications of artificial intelligence in power system operation, control and planning: a review." *Clean Energy* 7.6 (2023): 1199-1218.
- [4] Nath, R. Pasupathi, and V. Nishanth Balaji. "Artificial intelligence in power systems." *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)* (2014): 1-7.