

Projektiranje i analiza naprednih mreža

Šimić, Željko

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:436595>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-13**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

PROJEKTIRANJE I ANALIZA
NAPREDNIH MREŽA

Diplomski rad

Željko Šimić

Osijek, 2017

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Zadatak diplomskog rada	1
2. ARHITEKTURA NAPREDNIH MREŽA	2
2.1 Decentralizirana proizvodnje energije	3
2.2 Optimizacija distribucije	4
2.3 Arhitektura napredne mreže	5
2.3.1 Ključne tehnologije napredne mreže	5
2.3.2 Periferne tehnologije napredne mreže	7
3. ALATI ZA ANALIZU NAPREDNIH MREŽA	14
3.1 Uvod u proračune tokova snaga	15
3.2 Izazovi za proračun tokova snaga u naprednim mrežama i nedostaci postojećih metoda ..	16
3.3 Metode proračuna tokova snaga	17
3.3.1 Gauss Siedelova metoda	17
3.3.2 Newton-Raphsonova metoda	18
3.3.3 Brza Newton Raphsonova metoda	18
3.3.4. Metode za distribucijske sustave	19
3.4 Upravljanje zagušenjima	22
3.5 Dinamički stohastički proračun optimalnih tokova snaga – DSOPF	23
3.6 Statička procjena sigurnosti	25
3.7 Analiza sigurnosti N-1	30
4. PRORAČUNSKI ALATI ZA NAPREDNE MREŽE	31
4.1 Alati za podršku pri odlučivanju	31
4.1.1 Analitički hijerarhijski proces	32
4.2 Operacijska istraživanja	34
4.2.1 Linearno programiranje	36
4.2.2 Nelinearno programiranje	38
4.2.3 Dinamičko programiranje	39
4.3 Heurističke metode optimizacije	41
4.3.1 Umjetne neuronske mreže	42
4.3.2 Ekspertni sustavi	44
4.4 Evolucijske računalne tehnike	45
5. EDUKACIJSKI KURIKULUM O NAPREDNIM MREŽAMA	51
6. ZAKLJUČAK	55
SAŽETAK	56
LITERATURA	57
ŽIVOTOPIS	60

1. UVOD

Tradicionalne elektroenergetske mreže od svog nastanka neprestano se razvijaju i moderniziraju primjenom novih tehnologija i korištenjem modernije opreme. Sa stalno rastućom potražnjom za električnom energijom i pojavom novih tehnologija poput korištenja elektrana na obnovljive izvore, postojeću mrežu je potrebno prilagoditi, odnosno nadograditi kako bi se mogla nositi s novim zahtjevima, i kako bi se osigurao optimalan rad elektroenergetskog sustava. Kao relativno nov pojam pojavio se termin napredne mreže, koja se može nositi s navedenim problemima i omogućiti bolje upravljanje mrežom. Ona je zasnovana na novim tehnologijama i metodama upravljanja koje se trenutno intenzivno razvijaju i usavršavaju kako bi se omogućila njihova široka primjena. Iako još ne postoji općeprihvaćena definicija napredne mreže, u ovom diplomskom radu nastoji se pojasniti taj pojam te razlike između tradicionalne i nove, napredne mreže.

U drugom poglavlju opisana je arhitektura naprednih mreža, te pojedini dijelovi i tehnologije koje sačinjavaju naprednu mrežu. Budući da se proračun tokova snaga smatra jednim od osnovnih alata za analizu elektroenergetskih sustava, u trećem poglavlju opisane su najčešće korištene metode za proračun tokova snaga u tradicionalnim mrežama, te njihova prilagodba za korištenje u naprednim mrežama. U četvrtom poglavlju opisani su proračunski alati za napredne mreže, koji su još uvijek u fazi istraživanja i razvoja i zasad se primjenjuju samo eksperimentalno. Kako su napredne mreže nov pojam te nema mnogo stručnjaka za područje njihovog projektiranja niti rada, u petom poglavlju je dan pregled jednog predloženog nastavnog programa za edukaciju stručnog osoblja za ta područja.

1.1 Zadatak diplomskog rada

Diplomski rad treba opisati i objasniti pojam napredne mreže, te dati uvid u tehnološke aspekte koje je potrebno poznavati kako bi se razumio njihov rad. Opisati metode analize i proračuna korištene u naprednim mrežama, kao i mogućnosti njihove primjene.

2. ARHITEKTURA NAPREDNIH MREŽA

Napredna mreža je električna distribucijska mreža koja može pratiti tok energije unutar same mreže, te se zbog toga može prilagoditi stalno promjenjivim okolnostima. [1] Prilagodba je moguća pomoću automatske rekonfiguracije mreže i/ili kontroliranjem spojenih proizvođača i potrošača električne energije. Da bi razumjeli zašto su napredne mreže potrebne moramo prvo razumjeti kako se električna energija danas koristi. Danas koristimo električnu energiju po potrebi, kada god želimo, a kako je električnu energiju teško uskladištiti, fleksibilnost potrebna da se izađe u susret takvoj promjenjivoj potražnji je omogućena korištenjem malog broja velikih generatora koji mijenjaju svoju proizvodnju da se prilagode trenutnim potrebama. Iako takav sustav radi dovoljno dobro za većinu korisnika, nameće se potreba za moderniziranjem, najviše utemeljena na klimatskim promjenama i potrebi prelaska na obnovljive izvore energije.

Električna energija se danas velikim dijelom proizvodi iz izvora bogatih ugljikom poput nafte i plina. Opće je mišljenje da se emisije ugljika moraju smanjiti kako bi se suočili s globalnim zatopljenjem. To predstavlja izazov jer su izvori električne energije koji imaju manje emisije ugljika poput nuklearne energije i energije iz obnovljivih izvora manje fleksibilni od primjerice plinske elektrane koja može relativno brzo kontrolirati svoju proizvodnju električne energije. S obnovljivim izvorima je dodatan problem što su uz nefleksibilnost također i nepredvidivi.

Prelazak na takve, ekološki prihvatljivije izvore energije će zahtijevati promjenu osnovnih načina na koje koristimo i skladištimo električnu energiju. Tehnologije za skladištenje električne energije trebaju još mnogo vremena za razvoj, pa gledano kratkoročno, moramo oblikovati potrošnju tako da bude bolje prilagođena dostupnosti proizvedene električne energije iz održivih izvora. Kako bi to bilo moguće potrošači moraju znati kada je energija dostupna, te moći organizirati svoju potrošnju prema tome. Ukratko, potrošači moraju postati puno uključeniji u električnu industriju nego su dosad bili.

U isto vrijeme sa osnovnom promjenom načina na koji koristimo električnu energiju suočeni smo sa velikim povećanjem količine električne energije koja se koristi. Najveći porast iskorištene električne energije se očekuje u kućanstvima za grijanje/hlađenje, te za napajanje električnih vozila, djelatnostima koje danas koriste izvore energije bogate ugljikom. Iako postoje alternative koje koriste izvore s manjim udjelom ugljika, poput biometana, vodika, gorivnih ćelija i biodizela, te tehnologije treba dodatno usavršiti prije nego budu komercijalno dostupne, a u međuvremenu je električna energija najizglednija praktična alternativa. Kako bismo smanjili emisije ugljika u atmosferu moramo zamijeniti klasične sustave grijanja/hlađenja električnim sustavima, te povećati korištenje električnih vozila, što će zahtijevati proizvodnju većih količina električne energije (naravno, iz ekološki prihvatljivijih izvora). To ujedno znači i veće opterećenje na distributivne mreže.

2.1 Decentralizirana proizvodnje energije

Dok se prije električna energija proizvodila samo u velikim količinama, centralizirano u velikim elektranama, danas se sve više javljaju mali proizvođači električne energije, obično iz elektrana koje koriste obnovljive izvore energije. Obnovljiva proizvodnja električne energije dolazi u svim veličinama, od velikih priobalnih vjetroelektrana do fotonaponskih panela postavljenih na krovove kuća. Proizvodnju malih količina električne energije nazivamo mikrogeneracijom. Proizvodnja električne energije blizu mjesta gdje se ona koristi smanjuje neizbježne gubitke koji nastaju pri prijenosu električne energije, kroz prijenosne i distribucijske mreže. To danas prepoznaju mnoge države te potiču mikrogeneraciju kroz financijske potpore. Krajnji korisnici električne energije koji su također i proizvođači imaju koristi od te proizvodnje jer mogu koristiti proizvedenu energiju za dio svojih potreba te tako izbjeći kupovanje te energije. Također, plaćena im je energija koju proizvedu, a ne mogu potrošiti, te je isporuču u mrežu. Problem je što je ograničen broj takvih korisnika koji se može spojiti na distribucijsku mrežu bez da uzrokuje probleme pri njenom radu, a s tim ograničenjem emisije ugljikova dioksida u atmosferu se neće dovoljno smanjiti.

Korisnici električne energije koji također proizvode električnu energiju predstavljaju izazov za tradicionalne distributivne mreže koje su napravljene za prijenos energije u jednom smjeru, od prijenosne mreže do krajnjih korisnika. Tokovi snaga sada mogu biti dvosmjerni i manje predvidivi. To ima velik utjecaj na distribucijsku mrežu i stvara potrebu za prikupljanjem informacija o mreži u stvarnom vremenu. Takvi korisnici, koji osim korištenja također i proizvode električnu energiju, također mogu funkcionirati kao zajednica koja dijeli energiju iz kogeneracijskog postrojenja srednje veličine, vjetroelektrane ili hidroelektrane. Takve zajednice mogu tvoriti "distribucijske otoke" unutar mreže, koji su barem djelomično samodostatni, ali također razmjenjuju energiju sa većom mrežom kada se unutar otoka pojavi manjak ili višak energije.

Napredne mreže omogućuju dobru preglednost mreže, što omogućuje distributerima da brže lociraju i riješe eventualne probleme s opskrbom korisnika. To također omogućuje bolje upravljanje mrežom, što rezultira većom kvalitetom opskrbe (manje padova napona, manje flikera, manje smetnje u komunikacijskim i drugim elektroničkim sustavima). Sposobnost maksimiziranja korištenja postojećeg kapaciteta mreže također može smanjiti vrijeme potrebno za spajanje novih korisnika. [1]

2.2 Optimizacija distribucije

Napredne mreže omogućuju bolje nadgledanje imovine (opreme) i optimizaciju mreže, što omogućuje distributerima da bolje koriste postojeću opremu i maksimiziraju korist od investicija u postojeću mrežu. Distributeri mogu prijeći na održavanje temeljeno na stanju opreme, odnosno raditi servise kada se za to javi potreba, a ne prema unaprijed određenom fiksnom rasporedu. Takav oblik održavanja može smanjiti radne troškove održavanja jer smanjuje broj nepotrebnih servisa, te produžiti radni vijek opreme. Napredne mreže također omogućuju pametne investicijske strategije. Bolja vidljivost tokova snaga u mreži daje distributerima bolji uvid u to gdje se u mreži javljaju gubici, što omogućuje bolje usmjeravanje investicija u mrežu. Mogućnost spajanja novih korisnika na mrežu bez potrebe za kopanjem i postavljanjem novih kabela za distributere stvara mogućnost ostvarivanja većih prihoda uz manje investicije.

2.3 Arhitektura napredne mreže

U ovom dijelu bit će opisane ključne i periferne tehnologije koje sačinjavaju naprednu mrežu. Većina naprednih mreža se ne izgrađuje kao novi sustav, nego nastaje dodavanjem opreme za prikupljanje i dojavljivanje informacija (engl. *Information and Communication Technology - ICT*) u postojeće mreže. Još ne postoji općeprihvaćena definicija napredne mreže koja bi jasno razdijelila tehnologije koje su njen ključni dio od tehnologija koje se javljaju kao njena posljedica. Dijelom napredne mreže se može smatrati samo imovina i oprema koja je u vlasništvu distributera. No takva pojednostavljena definicija može isključivati puno važnih dijelova napredne mreže. Zato je ovo potpoglavlje podijeljeno u dva dijela: prvi pokriva tehnologije koje su ključne za naprednu mrežu, a drugi dio pokriva tehnologije koje su periferne, ali ipak imaju važnu ulogu u svakoj naprednoj mreži.

2.3.1 Ključne tehnologije napredne mreže

Aktivno upravljanje mrežom

Aktivno upravljanje mrežom (engl. *Active Network Management - ANM*) je skupni naziv za tehnologije koje omogućuju napredno praćenje mreže kako bi se moglo automatski upravljati funkcijama poput upravljanja naponom, razine kvara i ponovnog uključenja. Optimiziranje mreže pomoću aktivnog upravljanja također omogućuje distributerima da spoje više distribuirane proizvodnje, što je potencijalno jeftin način ojačavanja mreže. Osnovni dio aktivnog upravljanja je brza i pouzdana komunikacijska infrastruktura između distribucijskih trafostanica u mreži i centralnog sustava za upravljanje distribucijom, softverskog paketa koji podržava rad električnih sustava.

Već postoji softver za optimizaciju automatiziranih proizvodnih procesa, koji je primjenjiv na vrlo kompleksne proizvodne sustave (primjer je *Analytical Event Processing* ili skraćeno AEP softver tvrtke Starview Tehnology's). Takav softver bi se mogao prilagoditi za automatsko upravljanje i optimizaciju električnih mreža. Primjena takvog softvera bi omogućila samooporavak, učinkovitije uravnotežavanje proizvodnje i potrošnje električne energije, te optimizaciju tokova snaga gotovo u stvarnom vremenu.

Automatska kontrola napona (engl. *Automatic Voltage Control - AVC*)

Napon nema istu vrijednost kroz cijelu mrežu nego se mijenja ovisno o tome gdje su korisnici spojeni i koliko energije koriste. Što je veća potrošnja, veći će biti i pad napona između trafostanice i korisnika. Distribucijski sustavi su obično dizajnirani tako da dopuštaju da se nivo napona mijenja unutar dopuštenih granica zajedno sa promjenom opterećenja. Iznos napona pada na najnižu propisanu vrijednost kada je opterećenje maksimalno, a pri minimalnom opterećenju ima najvišu propisima dozvoljenu vrijednost. Poželjno je da ta odstupanja napona od nazivne vrijednosti budu što manja. Sustav za automatsku kontrolu napona nadzire iznos napona unutar niskonaponske mreže, te automatski upravlja opremom za održavanje napona unutar zadanih granica. To stvara mogućnost poboljšavanja učinkovitosti distribucijske mreže, te kvalitete električne energije. Nekim od dosad razvijenih sustava za kontrolu napona problem stvaraju dvosmjerni tokovi snaga koji se javljaju u mrežama u kojima su spojeni izvori distribuirane proizvodnje.

Dinamički proračun opterećenja vodova (engl. *Dynamic Line Rating - DLR*)

Konvencionalni pristup planiranju pri normalnom radu distribucijskog sustava je korištenje vodova u distribucijskoj mreži tako da je tok snage uvijek unutar istih, ili u najboljem slučaju sezonski zadanih vrijednosti. U stvarnosti je maksimalna struja koja može sigurno teći vodom vrijednost koja se neprestano mijenja ovisno o vremenskim uvjetima. Dinamičko parametrisanje vodova služi tome da se što više iskoriste prijenosni kapaciteti postojeće mrežne infrastrukture pomoću nadzora mreže u realnom vremenu. Na primjer, jak vjetar odvođenjem topline hladi vodove i time im povećava prijenosni kapacitet. Mjerenjem parametara vodova i vremenskih uvjeta DLR može odrediti prijenosni kapacitet pojedinih dijelova mreže u bilo kojem danom trenutku, te iskoristiti te podatke kako bi omogućio mreži da radi sa najvećom učinkovitošću.

Fazorske mjerne jedinice (engl. *Phasor Measurement Unit - PMU*)

Ovi uređaji služe za mjerenje vrijednosti napona i struje velikom brzinom (tipično 48 uzoraka u sekundi) na određenoj lokaciji u mreži. [2] To operatoru distribucijskog sustava daje uvid u ponašanje sustava gotovo u realnom vremenu.

Kompenzacija jalove snage

Jalova snaga je nepoželjna komponenta pri prijenosu snage. Prijenos jalove snage vodovima uzrokuje neželjene gubitke i povećava opterećenje voda. Uređajima za kompenzaciju jalove snage se ti gubici smanjuju, te se povećava dostupni prijenosni kapacitet voda, odnosno omogućuje veći tok radne snage kroz vod.

2.3.2 Periferne tehnologije napredne mreže

Distribuirana proizvodnja (engl. *Distributed Generation* - DG)

Distribuirani proizvođači su obično proizvođači male snage spojeni na distribucijsku mrežu. Do nedavno se energija proizvodila u centralnoj elektrani i dovodila do korisnika prijenosnim i distribucijskim sustavom, dok su kod distribuirane proizvodnje izvori električne energije smješteni blizu korisnika, čime se smanjuju ukupni gubici mreže koji se neizbježno javljaju pri prijenosu i distribuciji. Distribuirana proizvodnja uključuje različite izvore električne energije, poput obnovljivih izvora energije (vjetroelektrane, fotonaponski paneli, hidroelektrane), i kogeneracijskih elektrana. Na najmanjoj skali, distribuirana proizvodnja može uključivati mikrogeneraciju.

Distribuirana proizvodnja distributerima predstavlja i priliku i izazov. Zbog problema sa predviđanjem proizvodnje iz obnovljivih izvora je njome teško upravljati, što može uzrokovati probleme sa naponskim nivoima i tokovima snaga u mreži, no ako se njome dobro upravlja može služiti kao odličan alat za balansiranje proizvodnje i potrošnje energije. Napredne mreže omogućuju bolje upravljanje distribuiranom proizvodnjom, te time potiču korištenje obnovljivih izvora.

Dinamička potražnja (engl. *dynamic demand*)

Korištenje naprednih električnih kućanskih uređaja (engl. *smart appliances*) koji nemaju vremenski fiksne zahtjeve za električnom energijom (poput na primjer hladnjaka, perilica, sušilica rublja) može pridonijeti održavanju sustava u ravnoteži. Održavanje ravnoteže između proizvedene i potrošene električne energije je važno za pravilan rad sustava i odgovornost je operatora prijenosnog sustava. Neravnoteža između proizvedene i potrošene radne snage dovodi do neželjenih odstupanja frekvencije od zadane vrijednosti, dok su uz ravnotežu proizvedene i potrošene jalove snage usko vezani iznosi napona u mreži.

Napredni kućanski uređaji automatski prilagođavaju svoj radni ciklus (vrijeme u kojem povlače energiju iz mreže) ovisno o promjenama frekvencije mreže. Njihov rad je automatiziran i trenutačan, te bi pružio operatorima prijenosnog sustava vrijedan alat za održavanje ravnoteže. Kućanski uređaji poput hladnjaka, zamrzivača, perilica rublja ili posuđa kojima može daljinski upravljati vlasnik, napredna kuća ili treća strana (opskrbljivač električnom energijom) mogu biti korisni i za njihovog vlasnika i za elektroenergetski sustav. Ako se njima upravlja tako da rade u vrijeme kada je potražnja za električnom energijom mala, a u vrijeme velike potražnje budu neaktivni, može se smanjiti vršna opterećenja u sustavu, te ravnomjernije rasporediti potražnju za energijom tokom dana. To bi od korisnika zahtijevalo promjene u navikama korištenja kućanskih uređaja, u zamjenu za niže tarife po kojima bi plaćali električnu energiju. Europska komisija kroz projekt "*Smart Domestic Appliances in Sustainable Energy Systems (Smart-A)*" provodi studije kako bi se utvrdilo koliko su korisnici spremni na takve promjene. [3]

Danas se operatori prijenosnog sustava za održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje oslanjaju na velike elektrane, koje često moraju raditi u neefikasnom stanju pripravnosti, za slučaj da se dogodi nepredviđeni manjak proizvodnje. Takav način rada je skup, pa bi uvođenje ovakvih uređaja u sustav u velikim količinama imalo potencijal da smanji potrebu za rezervama u proizvodnji, što bi smanjilo troškove rada elektrana koje tu rezervu osiguravaju, te njihove emisije ugljika.

Pohrana energije u mreži

Električnu energiju je teško pohranjivati u velikim količinama, te se zato proizvodnja i potrošnja energije moraju uravnotežavati u realnom vremenu. Predviđeni porast proizvodnje iz nepredvidivih obnovljivih izvora poput vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana će dodatno otežati održavanje ravnoteže. Jedno od mogućih rješenja, koje se već koristi, su reverzibilne hidroelektrane, koje pumpama pune svoje akumulacijske spremnike dok u mreži postoji višak proizvedene električne energije, a kada se javi manjak proizvodnje ispuštaju tu vodu iz akumulacije kroz turbine i proizvode električnu energiju. Problem je što je izgradnja takvih elektrana skupa i zahtjeva prikladnu lokaciju, primjerice u planinama, što je često daleko od velikih centara potrošnje. Zato se kontinuirano istražuju i usavršavaju tehnologije za pohranu električne energije poput:

- Baterija, čija je proizvodnja i održavanje skupo, te imaju ograničen životni vijek.

- Komprimirani zrak, koji zahtjeva slična velika postrojenja kao reverzibilne elektrane.
- Zamašnjaka, koji su dobri samo za pohranu malih količina energije.
- Vodika, koji se može proizvoditi korištenjem viškova u proizvodnji električne energije, te miješati s kisikom i koristiti za proizvodnju energije za vrijeme vršnih opterećenja. Problem je mala učinkovitost, niža od baterija i reverzibilnih elektrana.
- Supravodljiva magnetska pohrana energije (engl. *Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES*), tehnologija koja pohranjuje energiju u magnetskom polju koje stvara istosmjerna struja dok teče kriogeno ohlađenom supravodljivom zavojnicom. Prikladna je samo za male količine energije.

Tehnologija za pohranu električne energije još nije dovoljno razvijena kako bi se mogla primijeniti u praksi u značajnim količinama.

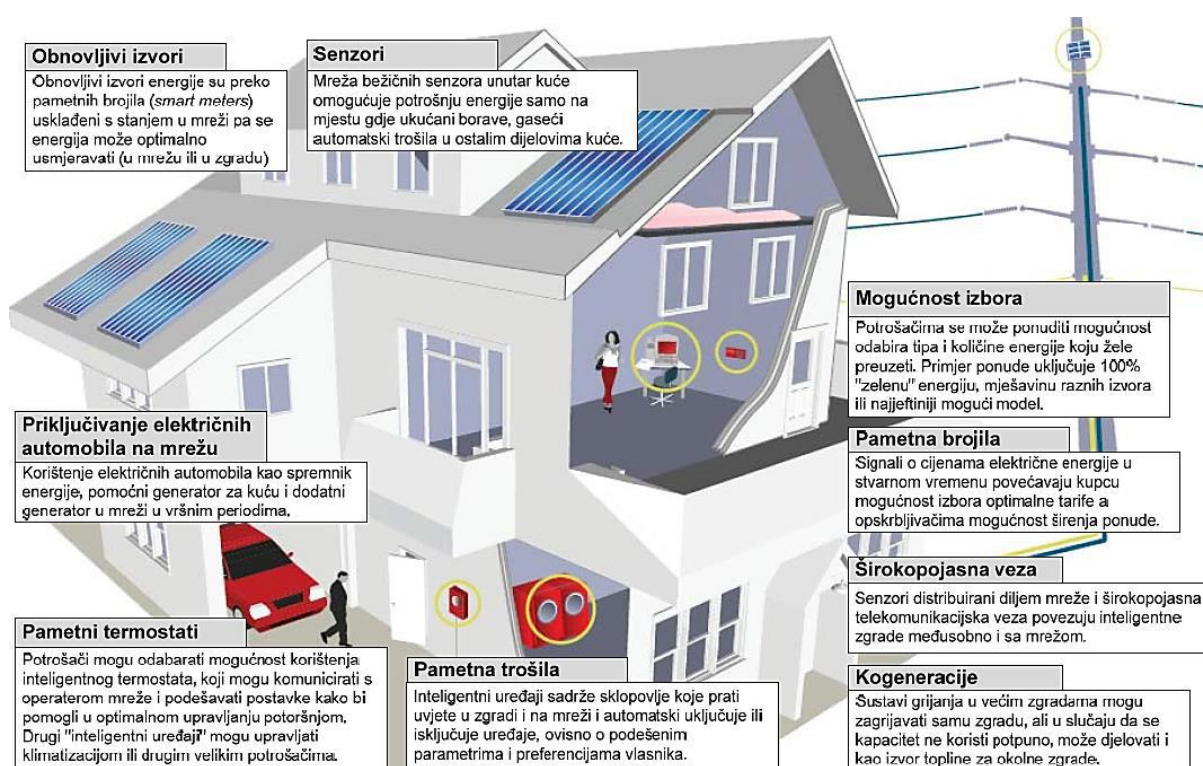
Mikroproizvodnja

Može se raspravljati o tome je li mikroproizvodnja nužan dio napredne mreže ili jedan od novih faktora u elektroenergetskom sustavu kojeg treba uzeti u obzir pri planiranju naprednih mreža, no svakako je valja spomenuti. Još ne postoji općeprihvaćena definicija mikroproizvodnje, no pod tim pojmom se obično misli na proizvodnju električne energije u vrlo malim količinama, primjerice za potrebe jednog kućanstva. Primjeri takvih, mikroizvora, su fotonaponski paneli, male vjetroturbine, te plinske kogeneracijske jedinice, koje uz električnu energiju proizvode i toplinu za potrebe kućanstva (topla voda, grijanje).

Implementacija mikroproizvodnje stvara nove probleme u distribucijskoj mreži, jer može uzrokovati neravnotežu napona u trofaznim sustavima ako nije ravnomjerno raspodijeljena na sve tri faze, te suprotne tokove snaga. U klasičnoj distribucijskoj mreži tok snage je uvijek bio od prijenosnog sustava prema potrošačima, no s povećanjem implementacije mikroproizvodnje može se dogoditi da mali proizvođači generiraju više energije nego je troše, što bi uzrokovalo tokove snaga od distribucijskog prema prijenosnom sustavu.

Napredne kuće

Pojam napredne zgrade (prvotno pametna kuća, od engl. *smart home*) prvi put se javio sedamdesetih godina prošlog stoljeća, kada se naprednom kućom smatrala ona zgrada koja je sagrađena tako da ima što veću energetska učinkovitost. Osamdesetih godina se pod istim nazivom smatrala kuća u kojoj se svime moglo upravljati pomoću računala. Uz sve prijašnje koncepte, naprednom kućom se danas smatra zgrada opremljena raznim senzorima, te pametnim uređajima bežično povezanim sa središnjom jedinicom kuće. Na slici 2.1 prikazane su funkcionalnosti napredne kuće. [4]



Slika 2.1 Funkcionalnost napredne zgrade, aktivnog sudionika mreže [4]

Osim optimiziranja uvjeta unutar kuće, napredne zgrade opremljene prikladnim brojilima imaju sposobnost komuniciranja sa okolinom (razdjelnom mrežom ili drugim naprednim kućama), te prilagodbe svog ponašanja prema trenutnim prilikama u mreži. Povezivanjem više naprednih zgrada, stvaraju se aktivne mikromreže, koje osim potrošnje mogu uključivati i male obnovljive i klasične izvore energije. Izgradnja naprednih zgrada i njihovo umrežavanje stvoriti će lokalnu mrežu aktivnih potrošača, a međusobno povezivanje takvih lokalnih mreža stvorit će naprednu mrežu. [4]

Napredna brojila

Okosnicu naprednih mreža čini napredna infrastruktura mjernih sustava (engl. *Advanced Metering Infrastructure - AMI*) koja se sastoji od naprednih brojila i prateće informatičko komunikacijske infrastrukture. Naprednim brojilima se smatraju brojila potrošnje električne energije koja mjere i pohranjuju mjerne podatke, te koja mogu operatoru daljinski dojavljivati trenutnu potrošnju na mjestu na kojem su instalirane putem dvosmjernog komunikacijskog kanala. Napredno brojilo prikazano je na slici 2.2. Danas operatori imaju uvid u tokove snaga samo do distribucijskih trafostanica, dok bi uvođenje naprednih brojila omogućilo uvid u tokove snaga sve do krajnjih korisnika. Također, napredna brojila trebaju omogućiti korisniku utjecati na svoju potrošnju s obzirom na trenutne cijene električne energije, te pratiti i kontrolirati potrošnju energije u kućanstvu. [5]



Slika 2.2 Napredno brojilo [6]

U Hrvatskoj je za korisnike kategorije kućanstvo trenutno u uporabi način očitavanja i obračuna električne energije sa polugodišnjim izmjerenim potroškom, na temelju kojeg se generiraju i korigiraju akontacije za sljedeće obračunsko razdoblje, što pojedinom kupcu ne pruža dovoljno informacija o vlastitoj potrošnji električne energije. Kupcu električne energije trebaju biti dostupni podaci o potrošnji električne energije za što kraća vremenska razdoblja (dnevna, satna i sl.), kako bi na istu mogao utjecati. [5]

Uvođenje brojila s daljinskim očitanjem u Hrvatskoj je regulirano Općim uvjetima za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom, koje je donijela HERA (Hrvatska energetska regulatorna agencija) 2015. godine. Prema [7], operator distribucijskog sustava (HEP ODS), je obavezan zamijeniti postojeća brojila brojilima s daljinskim očitanjem. Zakonom definirani rokovi za zamjenu brojila razlikuju se ovisno o vrsti krajnjeg korisnika:

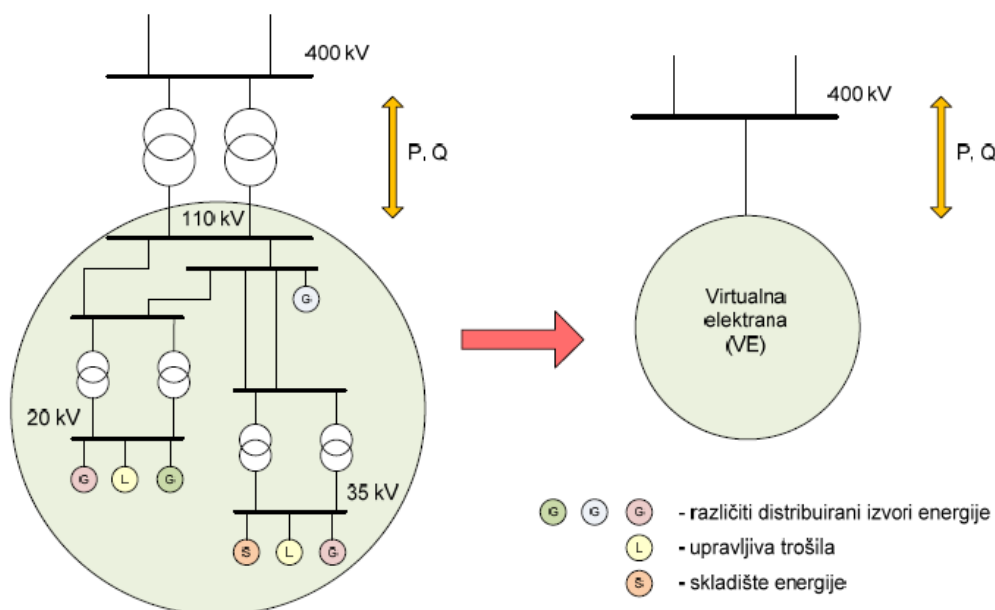
- svim korisnicima koji imaju priključnu snagu veću od 20 kW do 2020. godine
- svim korisnicima kategorije poduzetništvo do 2025. godine
- svim korisnicima kategorije kućanstvo do 2030. godine.

Troškove nabave i ugradnje brojila snositi će operator distribucijskog sustava. [7]

Virtualne elektrane

Za razvoj naprednih mreža, potrebno je aktivno upravljanje distribuiranom proizvodnjom kao i distribucijskom mrežom. Jedno od rješenja aktivnog upravljanja je primjena virtualnih elektrana (engl. *virtual power plant* - VPP). Virtualne elektrane predstavljaju agregaciju distribuiranih izvora energije te sustava za pohranu energije koji se na tržištu kao cjelina mogu javljati u obliku jedne konvencionalne elektrane s definiranom ukupnom vremenskom proizvodnjom, te ostalim parametrima koji čine jednu elektranu. Ukupna proizvodnja optimalno je raspoređena među distribuiranim izvorima. Osim distribuiranih izvora, mogu sadržavati i jedinice za potrošnju električne energije. Distribuirani izvori mogu biti male hidroelektrane ili vjetroelektrane, dok potrošači mogu biti npr. staklenici, pumpe, skladišta i sl. Između jedinica za potrošnju i za proizvodnju električne energije nalaze se sustavi za spremanje energije, kao npr. električni automobili ili baterije, koji mogu biti potrošači (punjenje) i proizvođači (pražnjenje) energije. Virtualna elektrana mora upravljati distribuiranim izvorima na način da podržavaju sustav kada potrošnja i proizvodnja nisu uravnoteženi. [8]

Trenutno distribuirani izvori ne sudjeluju u upravljanju elektroenergetskim sustavom i ne sudjeluju na tržištu električne energije, budući da su premali da bi pojedinačno bili vidljivi operatoru. Objedinjavanjem više distribuiranih izvora u virtualnu elektranu, oni postaju vidljivi i konkurentniji na tržištu. Virtualne elektrane nisu predviđene za otočni rad, sve jedinice u sklopu virtualne elektrane ne moraju nužno biti smještene blizu jedna drugoj. Koncept virtualne elektrane prikazan je na slici 2.3. [8]



Slika 2.3 Koncept virtualne elektrane [8]

Postoje dva tipa virtualnih elektrana, komercijalne i tehničke. Glavna razlika između ta dva tipa je što je komercijalnim virtualnim elektranama glavni cilj maksimiziranje financijske dobiti od proizvodnje iz distribuiranih izvora, dok tehničkim virtualnim elektranama najčešće upravlja operator prijenosnog sustava i cilj im je pomoći pri optimizaciji i aktivnom upravljanju distribucijskom mrežom.

3. ALATI ZA ANALIZU NAPREDNIH MREŽA

Izraz napredna mreža definira mrežu koja se sama oporavlja, a opremljena je dinamičkim tehnikama optimizacije koje koriste mjerenja u stvarnom vremenu kako bi minimalizirale mrežne gubitke, održale naponske nivoe, povećale pouzdanost, te poboljšale upravljanje opremom. Podaci o radu koje napredna mreža i njeni podsustavi prikupe će omogućiti operatorima sustava da brzo odrede najbolju strategiju zaštite od napada ili slabosti koje se mogu javiti u raznim situacijama. Napredna mreža isprva ovisi o identificiranju i istraživanju ključnih mjera učinka, dizajniranju i testiranju prikladnih alata, te razvoju prikladnog edukacijskog kurikulumu kojim bi se postojeće i buduće osoblje opremilo potrebnim znanjima i vještinama potrebnim za implementaciju ovog vrlo naprednog sustava. [9]

U daljnjem tekstu bit će opisane osnove rada, alati za projektiranje, trenutna istraživanja i kritični problemi pri razvoju i implementaciji napredne mreže. Ovo poglavlje raspravlja o optimizacijskim alatima prikladnim za prilagodbu nasumičnosti i adaptivnom karakteru mreže, te problemima vezanim za predviđanja budućeg ponašanja. Opisan je proračun optimalnih tokova snaga (engl. *Optimal Power Flow - OPF*) namijenjen za opću primjenu, koji koristi prednosti algoritama strojnog učenja (engl. *machine learning*) i može riješiti optimizacijsku shemu potrebnu za proizvodnju, prijenos, distribuciju, odziv na potrošnju, rekonfiguraciju i automatizacijske funkcije temeljeno na vrijednostima izmjerenim u stvarnom vremenu.

Današnja električna mreža je dizajnirana da radi kao vertikalna struktura koja se sastoji od proizvodnje, prijenosa i distribucije, te je podržana uređajima za održavanje pouzdanosti, stabilnosti i učinkovitosti. No danas su operatori sustava suočeni s novim izazovima poput proboja obnovljivih izvora u tradicionalni sustav, brze promjene tehnologije, te različitim tipovima tržišnih sudionika i krajnjih korisnika. Sljedeći korak razvoja, napredna mreža, će biti opremljena metodama komunikacije i mjerenja u stvarnom vremenu kako bi se poboljšalo pouzdanost sustava i predviđanja, te također kako bi se omogućila zaštita od internih i eksternih prijetnji. [9]

Okvirni dizajn napredne mreže temeljen je na razdvajanju i restrukturiranju energetskog sektora i optimizaciji njegovih dijelova. Nova mreža će moći:

- nositi se s nesigurnostima u rasporedu prijenosa energije između regija
- bolje implementirati obnovljive izvore energije
- optimizirati prijenosnu moć prijenosnih i distribucijskih mreža, te omogućiti zahtijevano povećanje kvalitete i pouzdanost opskrbe
- bolje upravljati i rješavati nepredvidive probleme i nesigurnosti u radu i planiranju

3.1 Uvod u proračune tokova snaga

Proračuni tokova snaga su ključni za planiranje i rad sustava. Na primjer, podaci o vršnim opterećenjima pomažu pri dimenzioniranju komponenti (vodiča, transformatora, prigušnica, kondenzatorskih baterija), planiranju proširenja mreže, poput smještaja proizvodnje i prijenosnog sustava, te planiranja interkonekcija sa susjednim sustavima kako bi se zadovoljili predviđeni zahtjevi u pogledu pouzdanosti opskrbe električnom energijom. Proračun tokova snaga daje uvid u opterećenje vodova i napone sabirnica koji su van zadanih raspona, neprimjereno velike fazne kutove sabirnica (koji mogu uzrokovati probleme sa stabilnošću), blizinu graničnoj reaktivnoj snazi na generatorskim sabirnicama, te druge parametre koji potencijalno mogu uzrokovati teškoće u radu. Proračuni tokova snaga pri srednjem i minimalnom opterećenju su također korisni jer se u slučaju minimalnog opterećenja mogu pojaviti neželjena povišenja napona kojih nema za vrijeme vršnog opterećenja. Proračuni tokova snaga također pomažu operatorima sustava da odrede ekonomski najopravdaniju razinu snage za svaku proizvodnu jedinicu, analiziraju ispade i koordiniraju rad sustava. Najčešće se proračuni tokova snaga koriste za procjenu radnih performansi sustava u određenim uvjetima. [9]

3.2 Izazovi za proračun tokova snaga u naprednim mrežama i nedostaci postojećih metoda

Metode koje se danas koriste za proračun tokova snaga imaju nedostatke koje treba popraviti prije njihove upotrebe u analiziranju rada naprednih mreža. Treba odgovoriti na četiri temeljna pitanja:

1. Koje su posebne značajke napredne mreže u odnosu na stari sustav?
2. Koji su proračuni potrebni u slučaju napredne mreže?
3. U kojem smjeru treba ići razvoj novih metoda proračuna tokova snaga?
4. Koje nove značajke metoda proračuna tokova snaga čine takav proračun prikladnim za analizu naprednih mreža?

Ostale značajke koje treba uzeti u obzir pri razvoju novih metoda proračuna su:

1. Mogućnost prilagodbe uvjetima pri prijenosu i distribuciji sa tokovima snaga iz obnovljivih izvora
2. Samoprilagođavanje kako bi se osigurala pravilna koordinacija
3. Napredni analitički alati zbog nasumičnosti i nesigurnosti u distribucijskoj mreži
4. Korištenje fleksibilnih izmjeničnih prijenosnih sustava (engl. *Flexible AC Transmission System - FACTS*)

Postojeće metode proračuna tokova snaga je potrebno poboljšati kako bi ih se moglo koristiti u naprednim mrežama. Proces proračuna tokova snaga u naprednoj mreži se sastoji od sljedećih koraka:

1. Prikupljanje podataka iz radijalne ili zamkaste mreže
2. Povezivanje svih prikupljenih podataka
3. Formiranje matrice admitancija za predstavljanje međupovezanosti sustava za kojeg se vrši proračun i određivanje početnih uvjeta
4. Određivanje neravnoteže radnih i jalovih snaga i provjera rješenja prilagodbom početnih uvjeta
5. Iz podataka o potražnji snage (radne i jalove), određivanje optimalnih uvjeta za smanjenje neravnoteže

Postupak se odvija kao iterativna simulacija rada elektroenergetskog sustava predstavljenog njegovim matematičkim modelom. Računanje se ponavlja dok se ne postigne konvergencija u računanju napona, kutova, tokova, gubitaka i minimalno potrebne injekcije snage za održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje. [9]

3.3 Metode proračuna tokova snaga

Za proračun tokova snaga u distribucijskim sustavima karakteristično je: [9]

1. Distribucijske mreže su radijalne ili slabo upetljane zamkaste topologije
2. Visok omjer R/X vodova
3. Program za proračun tokova snaga rukuje opterećenjima pojedinih faza, odnosno svaka faza se razmatra zasebno
4. Distribuirana proizvodnja i/ili kogeneracijska postrojenja su instalirana relativno blizu mjesta potrošnje
5. Distribucijski sustavi često imaju mnogo kratkih vodova, od kojih većina ima male impedancije

Za potrebe proračuna tokova snaga potrebno je izraditi mrežni model sabirnica povezanih vodovima. Na sabirnice su spojeni modeli generatora i opterećenja (radnog i jalovog).

Klasične metode proračuna tokova snaga su: [9]

1. Gauss-Seidelova metoda
2. Newton-Raphsonova metoda
3. Brza Newton-Raphsonova metoda

U nastavku je ukratko opisana svaka od metoda.

3.3.1 Gauss Seidelova metoda

Ova metoda koristi Kirchhoffov zakon za struje. Ako je $I_{inj(j)}$ injektirana struja na sabirnici j, a I_{ji} struja od j-te sabirnice do i-te sabirnice, vrijedi: [9]

$$I_{inj(j)} = \sum_{i=1}^n I_{ji} \quad (3-1)$$

Također vrijedi $I_{inj(j)} = Y V$ gdje je Y matrica admitancija. Ako sumiramo ukupnu snagu sabirnice dobijemo izraz: [9]

$$S_{inj-k} = P_g + jQ_g - (P_{LD} + jQ_{LD}) \quad (3-2)$$

$$= V_k \left(\sum_{j=1}^n Y_{kj} V_j \right) \quad (3-3)$$

Ova jednačba se rješava iterativnim postupkom kako bi se dobile vrijednosti V_j ako su P i Q poznati.

Također vrijedi:

$$V_i^{(k+j)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_L^{sch} - jQ_L^{sch}}{V_L^{*(k)}} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^k \right) \quad (3-4)$$

gdje su Y_{ij} elementi matrice admitancija, a P_i^{sch} i Q_i^{sch} su rasporedom predviđene P i Q svake sabirnice.

Nakon što je napon sabirnice određen unutar iteracije, nova vrijednost se koristi u preostalim jednadžbama te iteracije, te također u sljedećim iteracijama. Ako su početne vrijednosti napona blizu stvarnoj vrijednosti, iterativni proces konvergira linearno. Ova metoda je nepovoljna za korištenje kod radijalnih distribucijskih sustava zbog manjka međupovezanosti među sabirnicama. [9]

3.3.2 Newton-Raphsonova metoda

Newton-Raphsonova metoda pretpostavlja početne vrijednost napona pri računanju neslaganja između izračunate i stvarne vrijednosti snage ΔS :

$$P_i = |V_i| \sum |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \quad (3-5)$$

$$Q_i = |V_i| \sum |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \psi_{ij}) \quad (3-6)$$

Kriterij konvergencije je $\Delta S \leq \varepsilon$, gdje je ε zadana tolerancija.

Ova metoda je dobra za velike sustave, ali ne iskorištava radijalnu strukturu distribucijskog sustava, te je stoga neefikasna za korištenje. Javljaju se problemi kada je Jakobijeva matrica jedinična, te kada je omjer X/R mali. [9]

3.3.3 Brza Newton Raphsonova metoda

Ova metoda pojednostavljuje Jakobijevu matricu koristeći približne vrijednosti malih kutova kako bi se eliminirali relativno mali elementi matrice. Ovo je jedna od efektivnih metoda koje se koriste za analizu elektroenergetskih sustava. Loše konvergira u slučaju sustava sa velikim omjerom X/R. [9]

3.3.4. Metode za distribucijske sustave

Zbog ograničenja brze Newton-Rhapsonove metode pri rješavanju sustava sa visokim omjerom R/X , za proračun tokova snaga u distribucijskim mrežama potrebne su drukčije metode. U daljnjem tekstu su ukratko opisane najčešće korištene.

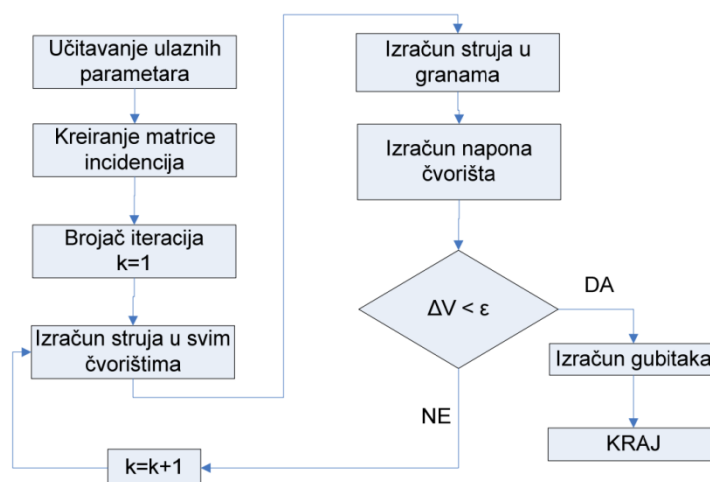
Metoda 1 - Iterativna metoda naprijed - natrag (engl. *forward - backward sweep*)

U ovoj metodi se distribucijski sustav modelira kao mreža s topologijom oblika stabla. Za korijen stabla se uzima referentna sabirnica. Slabo umrežene mreže se transformiraju u radijalne prekidanjem petlji i računanjem injektiranih struja.

Prvi korak iterativnog postupka je kreiranje matrice incidencija i učitavanje ulaznih parametara, nakon čega se računaju struje u svim čvorištima kao zbroj struja tereta, proizvodnje i kapacitivnih struja.

Struje svih grana se računaju zbrajanjem struje u izlaznom čvorištu grane i sume struja svih grana vezanih na izlazno čvorište. Metoda se zove "metoda natrag" jer postupak kreće od posljednjeg čvorišta prema pojnog.

Koristeći već izračunate rezultate pristupa se računanju napona u svim čvorištima, od pojnog prema krajnjim čvorištima, što se naziva "metoda naprijed". Na kraju svake iteracije se provjerava razlika svih dobivenih vrijednosti napona u odnosu na prošlu iteraciju, sve dok se razlika ne svede na vrijednost manju od tražene točnosti, kada iterativni postupak završava. Kada su dobiveni podaci za sve napone čvorišta i struje u granama mogu se izračunati gubici u promatranoj mreži kao zbroj gubitaka u svim granama i gubitaka u poprečnim admitancijama. Na slici 3.1 prikazan je dijagram toka za proračun tokova snaga metodom naprijed natrag, preuzet iz [10].

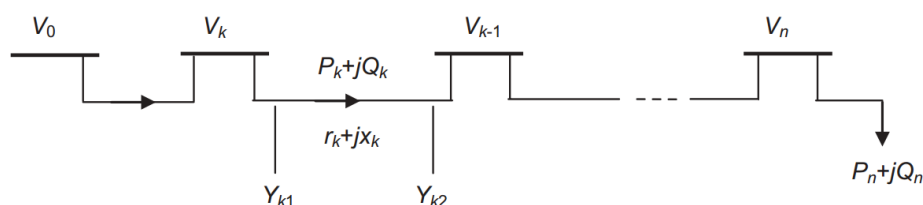


Slika 3.1 Dijagram toka za proračun tokova snaga metodom naprijed natrag

Metoda 2 - Proračun tokova snaga temeljen na matrici osjetljivosti za računanje nepodudaranja

Ovo je poboljšana naprijed-natrag metoda koja pri računanju koristi matricu koeficijenata naponske osjetljivosti za kompenzaciju nepodudaranja između snage koju injektira referentna sabirnica i tokova snage kroz vodove i poprečne grane. [9]

Razmotrimo jedan vod, kako je prikazan na slici 3.2:



Slika 3.2 Prikazivanje jednim vodom [9]

Koraci za provođenje metode su:

1. Uzeti korijenski čvor za referentnu sabirnicu
2. pretpostaviti da su P_0 i Q_0 injektirani iz referentne sabirnice jednaki sumi svih opterećenja u sustavu
3. tokovi snaga u svakoj grani su jednaki sumi svih sljedećih spojenih opterećenja. U k -toj iteraciji kreće se od korijenskog čvora s poznatim naponom referentne sabirnice
4. izračunati nove V^k , P_{ij}^k , Q_{ij}^k (napone i tokove)
5. pomoću dobivenih napona i tokova izračunati gubitke snage
6. pomoću dobivenih gubitaka izračunati isporučene snage P_{ji} , Q_{ji} , te V_j

7. isporučena snaga se umanjuje za iznos snaga tereta i poprečnih grana, te se ostatak proslijeđuje sljedećem vodu
8. kada se dobije ΔP_L , $\Delta Q_L = 0$, ako je nepodudaranje tokova snaga manje od zadane tolerancije ε , proračun je konvergirao
9. ažurirati snagu referentne sabirnice iz matrice osjetljivosti

Metoda 3 - Matrica impedancija

Ova metoda koristi matricu impedancija i ekvivalentnu injektiranu struju kako bi se došlo do rješenja mrežnih jednadžbi u distribucijskom sustavu. Nakon određivanja napona referentne sabirnice, računanjem promjene ΔV zbog struje injektirane u mrežu, određuju se naponi svih ostalih sabirnica. Koraci su: [9]

1. Prepostavi neopterećen sustav
2. postaviti početne vrijednosti napona čvorova s opterećenjem koristeći vrijednost napona referentnog čvora
3. ponovno izračunati napone čvorova prema tokovima struja koje su funkcije spojenih opterećenja
4. ponovno izračunati injektiranu struju u k-toj iteraciji prema novim vrijednostima napona
5. izračunati ekvivalentne injektirane struje
6. izračunati vektor razlike napona ΔV pomoću matrice impedancija
7. odrediti nove vrijednosti napona sabirnica
8. provjeriti nepodudaranje zadane i izračunate snage u svim čvorovima s opterećenjem. Ako je nepodudaranje manje od zadane tolerancije ε proračun je konvergirao, u suprotnom se postupak ponavlja od trećeg koraka

Metode za proračun tokova snaga u prijenosnim i distribucijskim sustavima same po sebi nisu dovoljne za proračun tokova snaga u naprednim mrežama, ali se mogu poboljšati i implementirati uz primjenu metoda koje koriste rijetke matrice (engl. *sparse matrix techniques*), implicitnih matričnih metoda, ili računalnih metoda proračuna. [9]

3.4 Upravljanje zagušenjima

Zagušenje je definirano kao situacija u kojoj tokovi snaga dovedu sustav do granica normalnog rada, bilo da se radi o maksimalnom termičkom opterećenju, naponskoj stabilnosti ili N-1 kriteriju. U umreženom sustavu varijacije razmijenjene snage između dva područja utječu na tokove snaga preko granice tih područja, te su važan faktor u određivanju prijenosnih kapaciteta. [9]

Zbog velikog broja povezanih jednadžbi koje opisuju stvarnu električnu mrežu, koriste se numeričke metode za određivanje tokova snaga i napona čvorova. Obično se koriste osnovna ili brza Newton-Raphsonova metoda. Za korištenje brze metode pretpostavlja se da su impedancije vodova induktivnog karaktera, što je prihvatljiva pretpostavka u slučaju visokonaponskih prijenosnih vodova. Može se koristiti i istosmjerni model tokova snaga. U toj metodi se zanemaruju ohmski otpori, a vodove smatra čisto induktivnima. Injekcija reaktivne snage se pretpostavlja dovoljnom da održi naponski profil u mreži na konstantnom, nazivnom nivou. Iterativni algoritam za rješavanje izmjeničnog modela tokova snaga se tako svodi na sustav linernih jednadžbi. Dobiveni sustav se koristi za provedbu simulacija kojima je cilj odrediti utjecaj injekcija snage na tokove snaga u prijenosnoj mreži.

$$\begin{bmatrix} ISF_{1,1} & \dots & ISF_{1,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ISF_{n,1} & \dots & ISF_{n,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{nj_1} \\ \vdots \\ I_{nj_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} flow_1 \\ \vdots \\ flow_n \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

Injekcija u čvoru i je proizvedena snaga umanjena za iznos opterećenja spojenog na čvor i . ISF (engl. *Injection Shift Factor*) predstavlja udio snage injektirane u čvoru k koja teče prijenosnim vodom n . Razlika između dva ISF-a daje linearni distribucijski faktor (engl. *Power Transfer Distribution Factor - PTDF*), što je faktor koji predstavlja udio razmjene snage između dva čvora koji teče određenim vodom. [9]

3.5 Dinamički stohastički proračun optimalnih tokova snaga – DSOPF

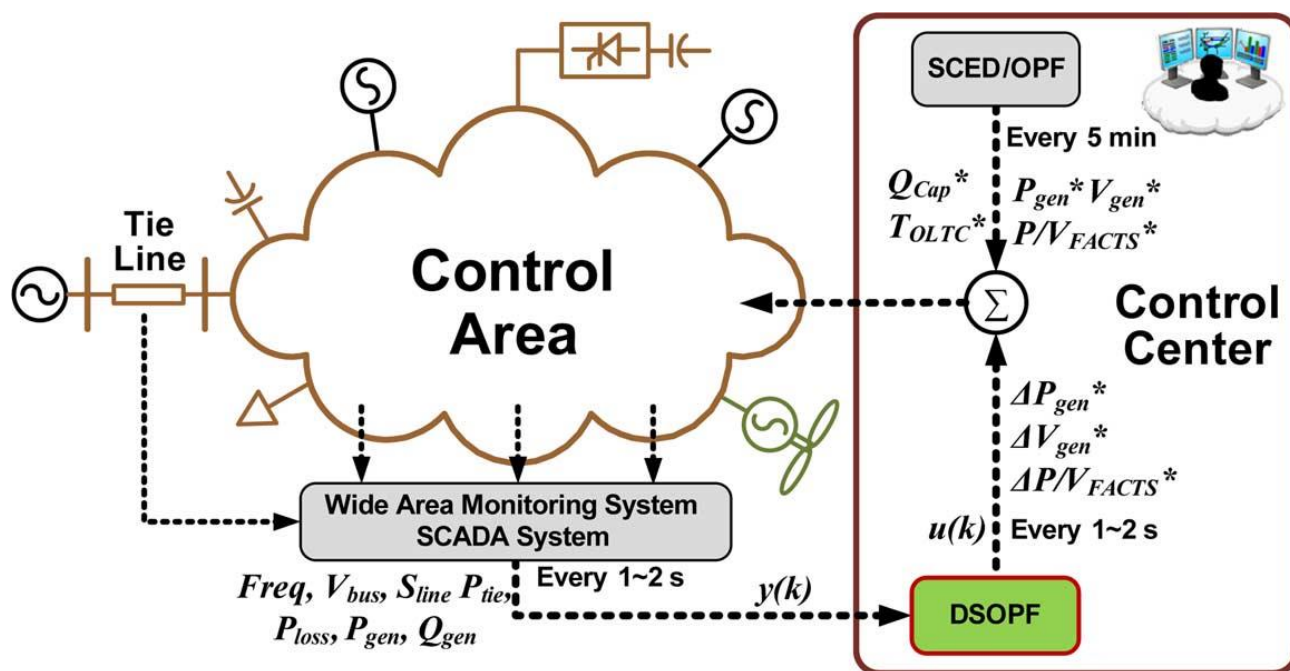
Proračun tokova snaga u naprednoj mreži zahtijevat će razvoj i primjenu nove metodologije i algoritama. Kako bi se elektrane na obnovljive izvore energije mogle priključiti u elektroenergetski sustav u većim količinama, upravljanje sustavom mora biti prilagođeno njihovoj karakterističnoj promjenjivosti i nepredvidivosti. Stabilnost i pouzdanost sustava mora biti osigurana u dinamičnim uvjetima, sa kontinuiranom promjenom radnog stanja sustava. [9]

Sa povećanjem količine implementiranih elektrana na OIE, u elektroenergetskom sustavu se javlja sve više promjenjivosti i nesigurnosti. Problem pouzdanog i učinkovitog upravljanja takvim sustavom se nastoji riješiti implementacijom naprednih mreža. Sa modernim prognozama brzina vjetra, prognoza za sat vremena unaprijed za pojedinu vjetroelektranu ima pogrešku od 10-15 %, što je mnogo više od pogreške pri prognozama opterećenja. Zato se zbog sigurnosnih razloga pri upravljanju sustavom koriste konzervativne procjene proizvodnje vjetroelektrana. Predviđa se da će vjetroelektrana proizvesti manje energije od prognozirane vrijednosti, kako ne bi došlo do manjka proizvodnje u slučaju netočnosti prognoze. To dovodi do nepotpunog iskorištavanja potencijalne proizvodnje vjetroelektrane jer nije moguće garantirati siguran rad sustava u slučaju da vjetroelektrane daju u mrežu veće količine energije od predviđene. [11]

U tradicionalnom sustavu koji koristi optimizacijski algoritam za proračun optimalnih tokova snaga, optimizacija se vrši za stacionarno stanje temeljeno na prognozama. Dispečerske naredbe obično kontroliraju rad sustava u intervalima od 5 minuta. Odstupanje potrošnje energije i/ili proizvodnje iz elektrana na obnovljive izvore energije od predviđenih vrijednosti između dispečerskih promjena rješava automatika. Za uravnoteženje proizvedene i potrošene radne snage u realnom vremenu obično se koristi automatsko upravljanje proizvodnjom PI regulatorima. Za uravnoteženje jalovih snaga koriste se lokalno kontrolirani izvori jalove snage, poput velikih generatora opremljenih automatskim regulatorima napona, kondenzatorske baterije ili prigušnice, ili mrežni transformatori s mogućnošću uzdužne regulacije pod opterećenjem. [11]

Za sistemski nadzor rada elektroenergetskog sustava važno je korištenje fazorskih mjernih jedinica (engl. *PMU – Phasor Measurement Unit*). Primjena PMU-a znatno poboljšava uvid u rad sustava, te znatno smanjuje vrijeme između dvije procjene globalnog stanja sustava, sa intervala od nekoliko minuta do djelića sekunde. Time se omogućava uvid u rad i optimizacija sustava kao cjeline. Konceptualni okvir načina na koji bi se objedinio napredan sustav mjerenja s predviđenim podacima o radu sustava predložili su G. K. Venayagamoorthy, te J. Momoh, no detaljni planovi još su u razvojnoj fazi. Predložena metoda naziva se dinamički stohastički proračun optimalnih tokova snaga (engl. *Dynamic Stochastic Optimal Power Flow-DSOPF*). [11]

Koristeći podatke koje prikuplja SCADA i ažurira u kratkim vremenskim intervalima (1-2 sekunde), DSOPF kontroler treba kontinuirano podešavati naredbe za reguliranje tokova snaga na takav način da se osigura optimalan rad sustava, kako je prikazano na slici 3.3. Kako bi se osiguralo optimalno upravljanje sustavom u realnom vremenu, istovremeno se regulira radne i reaktivne tokove snaga.



Slika 3.3 Općeniti okvir DSOPF upravljanja (P_{gen} i V_{gen} su naredbe proizvodnim jedinicama, P/V_{FACTS} su naredbe FACTS uređajima, Q_{Cap} su naredbe kondenzatorskim baterijama, T_{OLTC} su naredbe transformatorima za uzdužnu regulaciju pod opterećenjem (engl. *OLTC - on-load tap changing*) [11]

DSOPF kontroler se mora moći prilagoditi dinamičnosti električne mreže, promjeni tokova snaga s vremenom, te mogućim promjenama same topologije mreže. [11]

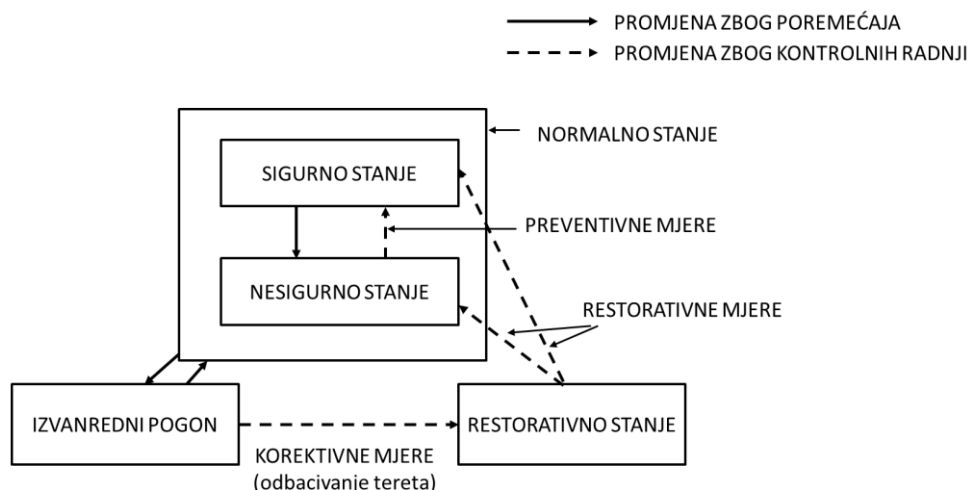
3.6 Statička procjena sigurnosti

Pod pojmom sigurnosti sustava smatramo njegovu sposobnost da u slučaju mogućih poremećaja nastavi raditi uz minimalne prekide opskrbe. U operativnom okruženju, procjena sigurnosti uključuje predviđanje ranjivosti sustava na moguće poremećaje u realnom vremenu. Procjena sigurnosti je uz procjenu stanja elektroenergetskog sustava osnovni proračun na temelju kojeg dispečer upravlja EES-om.

Radna stanja sustava: [12]

- Normalno - osigurana opskrba svih opterećenja i pogonske veličine unutar dozvoljenih ograničenja. Može biti sigurno ili nesigurno.
- Izvanredni pogon - prekoračene granične vrijednosti pogonskih veličina (primjerice preopterećeni vodovi) i postoji rizik od širenja poremećaja.
- Restorativno - pogonske veličine unutar dozvoljenih ograničenja, ali nije osigurana opskrba za sva opterećenja

Stvarni radni uvjeti se stalno mijenjaju zbog potrebe za održavanjem, prisilnih zastoja i promjena opterećenja. Nesigurna stanja moguće je poboljšati pokretanjem dostupnih proizvodnih jedinica, promjenom rasporeda proizvodnje, ili traženjem pomoći od susjednog sustava. Na slici 3.4 prikazan je DyLiaccov dijagram stanja sigurnosti sustava, koji prikazuje glavna pogonska stanja.

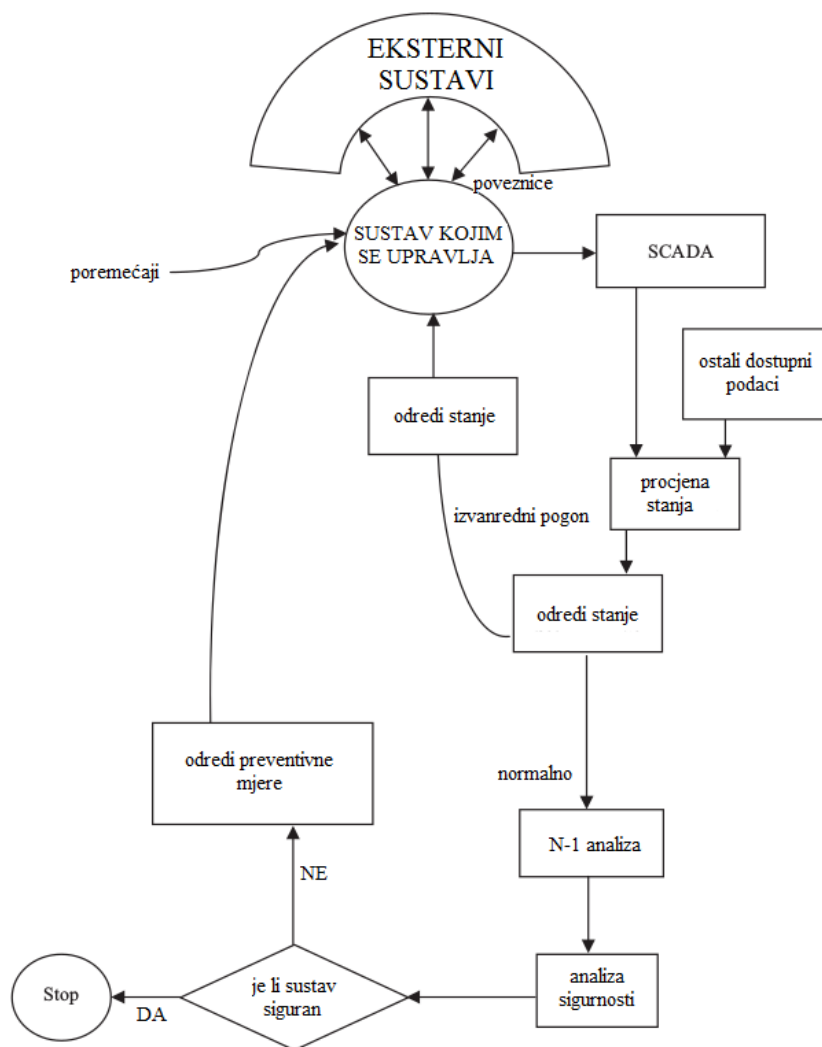


Slika 3.4 DyLiaccov dijagram stanja sigurnosti sustava [12]

Pretpostavimo da se na prijenosnom vodu dogodi kvar, što rezultira njegovim ispadom. To će uzrokovati redistribuciju tokova snaga i promjene napona u sustavu. Ako nakon te promjene sustav ostane u normalnom pogonskom stanju, to znači da je prije ispada voda bio u normalnom i sigurnom stanju u odnosu na ovu situaciju. Ako sustav nakon ispada prijeđe u izvanredno pogonsko stanje, to znači da je prije ispada voda bio u normalnom, ali nesigurnom stanju. Sustav u izvanrednom pogonu se korektivnim mjerama nastoji vratiti u normalno pogonsko stanje. Ovisno o razmjeru poremećaja, moguće je javljanje potrebe za odbacivanjem tereta (engl. *load shedding*), kako bi se izbjegla veća katastrofa, što dovodi sustav do djelomično normalnog, restorativnog stanja. U restorativnom stanju se nastoji omogućiti opskrbu svim isključenim opterećenjima kako bi se sustav vratio u normalno pogonsko stanje. [9]

Sigurnost u stacionarnom stanju uključuje situacije u kojima su tranzijentne pojave nakon poremećaja završile, ali neke pogonske veličine su veće od dozvoljenih. Ispad prijenosnog voda na primjer, nakon završetka tranzijentnih pojava, može rezultirati preopterećenjem vodova, ili pojavom prenapona u mreži. Moguće je da sustav može tolerirati takvo stanje u kratkom vremenskom periodu, za vrijeme kojeg treba poduzeti korektivne mjere. Ako nije moguće poduzeti korektivne mjere, to znači da je sustav prije poremećaja bio u nesigurnom stanju u kojem su trebale biti poduzete preventivne mjere. Alati za analizu takvih slučajeva razmatraju stacionarna radna stanja sustava koristeći proračun tokova snaga i srodne metode analize. [9]

Na slici 3.5 blok dijagram prikazuje funkcije vezane s analizom sigurnosti. Izlaz estimatora stanja se može direktno koristiti kako bi se odredilo sigurnosno stanje (normalno ili izvanredni pogon). Za izvanredni pogon, sljedeći korak je odrediti potrebnu korektivnu radnju, te ju primijeniti dok nije prekasno. Za normalno stanje obično nije poznato hoće li pretpostavljeni poremećaj dovesti do izvanrednog pogona ili ne. Zbog toga se provodi analiza sigurnosti N-1 (engl. *contingency analysis*), koristeći tri izvora podataka: stanje prije ispada, model eksternog sustava, te popis ispada jedinica prema listi. Rezultati tako provedenih analiza se ponovno evaluiraju kako bi se odredio stupanj sigurnosti sustava, što se naziva sigurnosnom analizom. Rezultati sigurnosne analize određuju što je potrebno učiniti sljedeće. Ako se pokaže da je sustav siguran, ne treba ništa poduzimati do idućeg ciklusa analize (pola sata ili sat vremena kasnije). Ako se sustav pokaže nesigurnim, procjenjuje se opravdanost provođenja preventivnih mjera. U takvom slučaju operator sustava treba odlučiti treba li provesti preventivne mjere ili ne, budući da bi njihovo provođenje dovelo do ekonomski nepovoljnijeg rada sustava. [9]



Slika 3.5 Sigurnost sustava i povezane funkcije [9]

Pri izvođenju analize za slučaj ispada prijenosnog voda ili transformatora pretpostavlja se da su priključena radna i reaktivna opterećenja, te proizvodnja radne snage i naponi generatorskih sabirnica konstantni prije i poslije ispada. To je aproksimativan model, jer će ispad važnog prijenosnog voda neizbježno uzrokovati promjene napona i tokova snaga. Provođenje analize se može unaprijediti uvođenjem adekvatnih modela opterećenja svake sabirnice. [9]

Slučaj ispada generatora je kompliciraniji iz više razloga. Ostatak proizvodnog sustava ne može povećanjem svoje proizvodnje, odmah nakon ispada (prvih nekoliko sekundi), odgovoriti na nastalu neravnotežu proizvodnje i potrošnje povećavanjem svoje proizvodnje. Mrežna frekvencija će se smanjiti, što će smanjiti opterećenje u cijelom sustavu budući da su opterećenja ovisna o frekvenciji. Planirana razmjena električne energije sa susjednim sustavima će također biti narušena, pa će se zbog normaliziranja razmjene i vraćanja

frekvencije na nazivnu vrijednost proizvodnjom preostalih generatora automatski upravljati. Novo stacionarno stanje će se postići za nekoliko minuta. [9]

Sustav kojim se upravlja obično je povezan s drugim sustavima. Ispad u jednom od međupovezanih sustava će obično imati najveće posljedice u tom sustavu, no može se dogoditi da taj ispad ima velik utjecaj na povezane sustave, primjerice ispad velike proizvodne jedinice. Problemi u predviđanju utjecaja takvih događaja na sustav se javljaju jer se eksterni sustavi ne nadziru detaljno kao interni sustav. Za interni sustav su kroz estimaciju stanja poznati svi iznosu i kutovi napona, tokovi snaga, proizvodnja, opterećenje i topologija mreže. Za eksterni sustav, dostupne informacije su ograničene na tokove snage kroz međupovezne vodove, te status važnih vodova i generatora. [9]

Kod povezanog rada više sustava važno je poznavanje ATC-a (*engl. Additional Transfer Capability*). ATC je maksimalni iznos dodatnog prijenosa između dva dijela elektroenergetskog sustava izražen u MW. Dodatni znači da se postojeći prijenos uzima kao bazna vrijednost i nije uključen u ATC. Računa se prema: [9]

$$ATC = TTC - \sum (ETC, TRM, CBM) \quad (3-8)$$

gdje je TTC (*engl. Total Transfer Capability*) maksimalni prijenos snage koji je moguć uz zadovoljavanje svih sigurnosnih uvjeta, ETC (*engl. Existing Transfer Commitments*) su postojeće obveze prijenosa, TRM (*engl. Transfer Reliability Margin*) je sigurnosna margina koja je potrebna zbog nesigurnosti pri radu prijenosnog sustava, a CBM (*engl. Capacity Benefit Margin*) je margina potrebna za održavanje pouzdanosti opskrbe.

ATC je važan jer daje uvid u odnos pouzdanosti sustava i učinkovitost razmjene energije na električnom tržištu, te je stoga bitan za sve tržišne sudionike. [9]

3.7 Analiza sigurnosti N-1

Analiza sigurnosti N-1 radi predviđanja pogonskog stanja elektroenergetskog sustava, odnosno tokove snaga i napone sabirnica, koji bi nastali u slučaju ispada vodova, transformatora ili generatora.

Ispad prijenosnih vodova ili transformatora se može dogoditi iz mnogo razloga. Najjednostavniji razlog je isključenje zbog planiranog održavanja. Također je moguće da ih je potrebno isključiti zbog sklopnih operacija kojima se kontroliraju tokovi snaga u mreži ili problemi s naponom. U oba navedena slučaja se radi o isključenju zbog izvođenja dispečerskog upravljanja. Postoje i prisilni ispadi, na primjer pojava trajnog kvara na vodu, u kojem slučaju prekidači automatski stavljaju vod u beznaponsko stanje, te se provode isključenja preopterećenih vodova ili transformatora kako bi ih se zaštitilo od oštećenja. U bilo kojem od navedenih slučaja operator mora znati kako će ispad utjecati na tokove snaga i naponske uvjete u sustavu kako bi poduzeo preventivne mjere prije nego se ispad dogodi. U slučaju planiranog održavanja operatoru će biti potreban proračun tokova snaga za vrijeme planiranog ispada. U slučaju sklopnih operacija kojima se kontroliraju tokovi i napon, operatoru je potreban proračun tokova snaga za trenutno stanje, prije isključenja. [9]

Prisilni ispadi se obično događaju zbog lošeg vremena. Najčešće se radi o ispadu jednog voda, no povremeno dođe i do ispada više vodova u slučaju jako loših vremenskih uvjeta. Ispadi generatora se događaju iz sličnih razloga kao i ispadi transformatora. Elektrane se povremeno isključuju zbog održavanja, a mogući su i prisilni ispadi zbog kvarova na opremi ili na vodovima blizu generatora.

Sve opisane analize kojima je cilj osigurati siguran rad sustava u slučaju planiranih i prisilnih ispada, te provođenje analiza za slučaj višestrukih ispada ($N - 1$, $N - 2$, $N - 3$, ...), mogu se potencijalno unaprijediti pomoću tehnologija koje su sastavni dio naprednih mreža, no potreban je daljnji razvoj proračunskih algoritama kojima bi se to ostvarilo. [9]

4. PRORAČUNSKI ALATI ZA NAPREDNE MREŽE

Važna osobina naprednih mreža je njihova sposobnost automatskog optimiranja rada sustava. Način na koji se to može postići je razvijanjem računalnih algoritama temeljenih na već razvijenim metodama matematičke optimizacije koji bi određivale optimalne uvjete rada puno brže i točnije nego što to može čovjek. Matematička optimizacija se odnosi na odabir najboljih elemenata iz seta dostupnih alternativa. Optimizacijski problemi imaju tri komponente: varijable odlučivanja, ciljeve i ograničenja. Problemi optimizacije se javljaju i pri planiranju novih mreža ili modernizaciji postojećih, kada je potrebno rasporediti dostupna sredstva tako da se ostvari tehno-ekonomski optimum.

Klasični alati za optimizaciju koji su trenutno u uporabi nisu dovoljni za omogućavanje prilagodljivosti i nošenje sa stohastičnošću napredne mreže. Potrebni alati i metode su definirani kao platforma za procjenu, koordinaciju, upravljanje i planiranje napredne mreže u različitim okolnostima. Potrebno je definirati takve alate koji se mogu nositi s neadekvatnim modelima stvarnog svijeta, te kompleksnosti i ogromnoj veličini problema koji onemogućavaju korištenje računalnih alata za proračun. [9]

4.1 Alati za podršku pri odlučivanju

Operator sustava donosi odluke koje se ne mogu izraziti algoritmom ili u matematičkom obliku, obično temeljene na iskustvenoj procjeni. Alati za podršku pri odlučivanju (engl. *Decision Support System - DSS*) koji kombiniraju teoriju igara, sustave za podršku pri odlučivanju i analitičke hijerarhijske procese (engl. *Analytical Hierarchical Process - AHP*) se koriste pri višekriterijskom odlučivanju i procjeni rizika tijekom planiranja i rada naprednih mreža. Analiza odluke (engl. *Decision Analysis - DA*) je moćan alat koji omogućuje donošenje racionalnih odluka temeljenih na probalističkim vrijednostima ulaznih parametara, te usporedbi rezultata. [9]

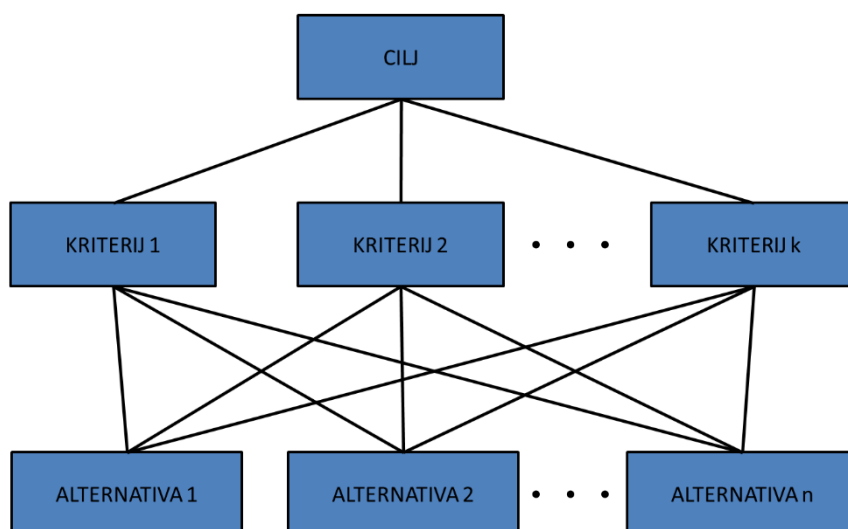
Važno je da se proces oslanja na informacije o alternativama. Kvaliteta dostupnih informacija varira od sigurnih podataka do subjektivnih interpretacija, te od sigurnih ishoda određene odluke (temeljenih na determinističkim podacima) do nesigurnih ishoda predstavljenih vjerojatnostima. Zbog takve raznolikosti vrsta i kvalitete informacija potrebnih za donošenje odluka javlja se potreba za novim metodama i tehnikama za obradu podataka.

Analiza odlučivanja uključuje mnoge procedure, metode i alate za identificiranje, jasnu reprezentaciju i formalnu procjenu važnih aspekata situacije o kojoj treba donijeti odluku. Analitički hijerarhijski proces (AHP) je jedan od oblika višekriterijskog odlučivanja (engl. *multi-criteria decision analysis - MCDA*).

4.1.1 Analitički hijerarhijski proces

Pojam višekriterijsko odlučivanje (engl. *Multiple Criteria Decision Making – MCDM*) odnosi se na donošenje odluka u prisustvu mnogih, često konfliktnih kriterija. Javlja se problem ispravne procijene važnost tih faktora, te kako izvesti sustav prioriteta koji može dovesti do dobre odluke o izboru najbolje alternative. Jedna od najpoznatijih metoda za podršku pri odlučivanju je analitički hijerarhijski proces koji je 1980. godine utemeljio Thomas L. Saaty. AHP predstavlja jednu od najpoznatijih metoda stručne analize scenarija i donošenja odluka konzistentnim ocjenjivanjem hijerarhija koje se sastoje od ciljeva, scenarija, kriterija i alternativa. [13]

AHP najprije omogućuje interaktivno strukturiranje (oblikovanje hijerarhije) problema kao pripremu scenarija odlučivanja, a zatim ocjenjivanje u parovima elemenata hijerarhije (ciljeva, kriterija i alternativa). Na kraju se vrši analiza svih ocjenjivanja i po strogo utvrđenom matematičkom modelu određuju se težinski faktori svih elemenata hijerarhije. Vrijednost ove metode je tome što se kroz postupak izvodi zaključak i sintetiziraju informacije od donosioca odluke i drugih sudionika koji posjeduju znanja o problemu, da bi se identificirao problem i da se usuglase stavovi o njegovoj strukturi. Ova metoda uzima u obzir činjenicu da se i najsloženiji problemi mogu razgraditi na hijerarhiju i to na način da se u analizu uključe kvantitativni i kvalitativni aspekti problema. AHP povezuje i drži povezane sve dijelove hijerarhije, pa je lako moguće uočiti na koji način promjena jednog kriterija utječe na ostale kriterije i alternative. Hijerarhijski strukturiran model odlučivanja sastoji se od cilja, kriterija, nekoliko mogućih nivoa podkriterija i alternativa kako je prikazano na slici 4.1, preuzeto iz [13].



Slika 4.1 Osnovni AHP model s ciljevima, kriterijima i alternativama [13]

Cilj je uvijek na vrhu i nije ga moguće uspoređivati s niti jednim drugim elementom. U prvom nivou imamo k kriterija koji se u parovima svaki sa svakim uspoređuju u odnosu na prvi nadređeni element na višem nivou, ovdje je to cilj na nultom nivou. Potrebno je $\frac{k(k-1)}{2}$ usporedbi. Ova se procedura primjenjuje kroz hijerarhiju prema dolje.

Za procjenu vrijednosti omjera težina kriterija i važnosti alternativa koristi se Saatyeva skala prikazana tablicom 4.1. Ona nam pomaže procijeniti omjere važnosti dvaju kriterija kada se njihove vrijednosti izražavaju kvantitativno, kvalitativno i u različitim mjernim jedinicama. Saatyeva skala je omjerna skala koja ima pet stupnjeva intenziteta i četiri međustupnja, a svakom od njih odgovara vrijednosni sud o tome koliko puta je jedan kriterij važniji od drugog. [13]

Tablica 4.1 Saatyeva skala [13]

Intenzitet važnosti	Definicija	Objašnjenje
1	Jednako važno	Dva kriterija ili alternative jednako doprinose cilju
3	Umjereno važnije	Na temelju iskustva i procjena daje se umjerena prednost jednom kriteriju ili alternativu u odnosu na drugi
5	Strogo važnije	Na temelju iskustva i procjena strogo se favorizira jedan kriterij ili alternativa u odnosu na drugi
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Jedan kriterij ili alternativa izrazito se favorizira u odnosu na drugi; njegova dominacija dokazuje se u praksi
9	Ekstremna važnost	Dokazi na temelju kojih se favorizira jedan kriterij ili alternativa u odnosu na drugi potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću
2, 4, 6, 8	Međuvrijednosti	

Ista skala koristi se i kod uspoređivanja dviju alternativa, ali u tom slučaju se vrijednosti sa skale interpretiraju kao prosudbe koliko puta veća prednost (prioritet) se daje jednoj alternativu u odnosu na drugu.

Primjenu analitičkog hijerarhijskog procesa možemo promatrati kroz četiri koraka:

1. Razvije se hijerarhijski model problema odlučivanja s ciljem na vrhu, kriterijima i podkriterijima na nižim razinama, te alternativama na dnu modela.
2. U svakom čvoru hijerarhijske strukture pomoću Saatyve skale u parovima se međusobno uspoređuju elementi tog čvora koji se nalaze neposredno ispod njega i izračunaju se njihove lokalne težine. Pritom se kriteriji međusobno uspoređuju u parovima u odnosu na to koliko puta je jedan od njih važniji za mjerenje postizanja cilja od drugog. Alternative se međusobno uspoređuju u parovima po svakom od kriterija procjenjujući u kojoj mjeri se po tom kriteriju jednoj od njih daje prednost u odnosu na drugu.
3. Iz procjena relativnih važnosti elemenata odgovarajuće razine hijerarhijske strukture problema izračunaju se lokalne težine kriterija i podkriterija, a na posljednjoj razini prioriteti alternativa. Ukupni prioriteti alternativa izračunaju se tako da se njihovi lokalni prioriteti ponderiraju s težinama svih čvorova kojima pripadaju gledajući od najniže razine u hijerarhijskom modelu prema najvišoj i zatim zbroje.
4. Provodi se analiza osjetljivosti.

Najveća vrijednost AHP-a u definiranju modela za donošenje odluka je u uključenosti većeg broja stručnjaka u definiranje modela, transparentnosti postupka određivanja kriterija, te mogućnosti daljnjeg razvoja modela. [13]

4.2 Operacijska istraživanja

Problemima optimizacije procesa i donošenja boljih odluka bavi se stručna i znanstvena disciplina nazvana operacijska istraživanja (engl. *Operation research*). Metode operacijskih istraživanja prvi su se put javile tijekom Drugog svjetskog rata u Istraživačkom odjelu Ministarstva zrakoplovstva Velike Britanije, gdje su korištene za optimizaciju vojnih operacija (raspored radara, osiguranje konvoja, bombardiranje). Nakon rata je nastavljeno njihovo korištenje i razvoj, sa primjenom u raznim industrijama. Danas su operacijska istraživanja znanstvena disciplina koja razvija i primjenjuje na matematici utemeljene metode,

formalizirane postupke pronalaženja optimalnih rješenja problema u složenim sustavima, koja služe kao podloga za donošenje tehnološki i ekonomski opravdanih odluka o provedbi inženjerskih pothvata. Za primjenu metoda operacijskih istraživanja prvo je potrebno postaviti adekvatan matematički model problema kojeg je potrebno riješiti, što podrazumijeva postavljanje funkcije cilja i funkcija ograničenja, te matematički opisati njihovu ovisnost o relevantnim varijablama. Tipične funkcije cilja su maksimalizacija (dobiti, prihoda, korištenja postojećih kapaciteta, proizvedene količine) ili minimalizacija (cijena, gubitaka, troškova proizvodnje). [14]

Funkcije ograničenja su matematički izrazi kojima se ograničavaju vrijednosti veličina (financijskih sredstava, korištenih resursa, zakonska ograničenja). Svi problemi kojima se bave operacijska istraživanja imaju nekakva ograničenja jer u slučaju neograničenih resursa ne bi bilo potrebe za optimizacijom. Problemi optimizacije mogu se razlikovati prema različitim parametrima, te nije moguće pristupiti svakom problemu na isti način. Tablica 4.2 prikazuje klasifikacije metoda operacijskih istraživanja ovisno o vrsti problema. [14]

Tablica 4.2 Klasifikacija metoda operacijskih istraživanja

Klasifikacija	Odnosi se na ...
Linearno vs. nelinearno programiranje	tip funkcije cilja i/ili ograničenja
Diskretno vs. kontinuirano programiranje	tip varijabli
Stohastičko vs. determinističko programiranje	prirodu parametara u ograničenjima ili funkciji cilja
Konačno vs. beskonačno programiranje	broj varijabli odluke
Ograničeno vs. neograničeno	činjenicu jesu li ograničenja definirana ili ne

Optimizacija je traganje za načinom rada sustava koji zadovoljava postavljene ciljeve na najbolji način uz pridržavanje određenih ograničenja [15]. Riječ programiranje, koja se u literaturi obično navodi vezano uz ovo područje, nije nužno povezana sa kompjutorskim programiranjem, već se upotrebljava u smislu planiranje.

4.2.1 Linearno programiranje

Linearno programiranje (ili linearna optimizacija) koristi matematički model za opisivanje problema kod kojih su i funkcija cilja i ograničenja linearni. Standardni oblik takvih problema je:

$$\begin{array}{ll} \text{maksimiziraj} & ax \\ \text{uz ograničenja} & Bx = c \\ & x_i \geq 0 \forall i \in \{1, n\} \end{array}$$

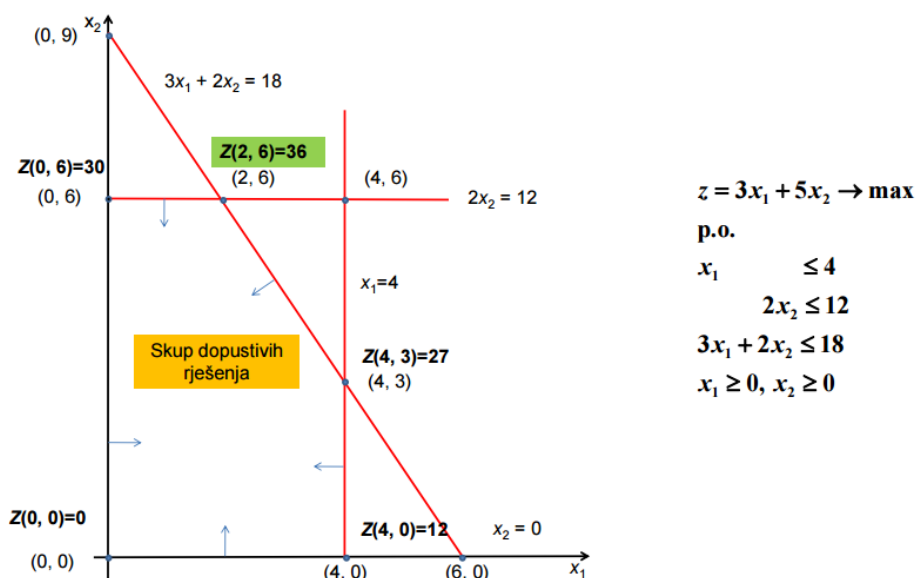
gdje je x vektor varijabli za koje treba riješiti problem, B je matrica poznatih koeficijenata, dok su a i c vektori poznatih koeficijenata. [9]

Najpoznatija i najčešće korištena metoda za rješavanje problema linearnog programiranja je simpleks metoda koju je razvio George Dantzig 1947. godine. Simpleks metoda spada u kategoriju numeričkih iterativnih metoda. Pri rješavanju problema se polazi od početnog rješenja koje mora biti dopustivo. Početno rješenje se poboljšava kroz niz koraka (iteracija) dok se ne postigne optimalno rješenje u skladu s postavljenim ciljem. Algoritam simpleks metode se sastoji od dva koraka: određivanja početnog dopustivog rješenja i poboljšanja dobivenog bazičnog rješenja kroz konačan broj iteracija. [16]

Procedura simpleks metode kojom se dolazi do rješenja bit će opisana na jednostavnom primjeru: [16]

$$\begin{array}{ll} \text{maksimiziraj} & z = 3x_1 + 5x_2 \\ \text{uz ograničenja} & x_1 \leq 4 \\ & 2x_2 \leq 12 \\ & 3x_1 + 2x_2 \leq 18 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{array}$$

Geometrijsko rješenje problema prikazano je na slici 4.2.



Slika 4.2 Geometrijsko rješenje zadanog problema [16]

1. Kad god je moguće, simpleks metoda bira koordinatni početak kao početno dopustivo kutno rješenje (sve varijable odlučivanja su jednake nuli). Odabir koordinatnog početka kao početnog dopustivog kutnog rješenja moguće je kad sve varijable odlučivanja imaju ograničenje nenegativnosti pošto presjek tih ograničenja daje koordinatni početak kao kutno rješenje (engl. *corner point solution*). Ako to rješenje nije moguće, potrebna je specijalna procedura za nalaženje početnog dopustivog kutnog rješenja.
2. Svaki put kad simpleks metoda radi jednu iteraciju krećući se od jednog dopustivog kutnog rješenja prema boljem, ona uvijek bira kutno dopustivo rješenje koje je susjedno tom rješenju. Ostala kutna dopustiva rješenja se ne razmatraju. Potrebno je identificirati stopu poboljšanja z koja bi se dogodila krećući se duž ruba. Bira se rub s najvećom pozitivnom stopom poboljšanja te se provodi test optimalnosti na kutnom dopustivom rješenju koje se nalazi na tom rubu. U našem primjeru početno dopustivo kutno rješenje je $(0, 0)$, a možemo se kretati rubom x_1 (stopa poboljšanja z je 3) ili rubom x_2 (stopa poboljšanja z je 5). Bираmo rub x_2 jer ima veću stopu poboljšanja z .
4. Test optimalnosti sadrži jednostavnu provjeru daje li bilo koji rub pozitivnu stopu poboljšanja z . Ako kutna moguća točka nema susjednu moguću kutnu točku koja je bolja (mjereno prema z), onda ona mora biti optimalno rješenje. Postupak se iterativno ponavlja dok ne dođemo do takve točke, u danom primjeru to je točka $(2, 6)$, u kojoj je z maksimalan pod danim ograničenjima. [16]

Poseban slučaj linearnog programiranja su metode čistog cjelobrojnog programiranja (engl. *integer programming*), i mješovito-cjelobrojnog programiranja (engl. *mixed integer programming*). Kod čistog cjelobrojnog programiranja su sve varijable odlučivanja diskretne cjelobrojne vrijednosti, primjerice ako su vrijednosti ograničene na nulu ili jedan, čime bi bila predstavljena da/ne odluka. Kod mješovito-cjelobrojnog programiranja su samo neke od varijabli diskretne cjelobrojne vrijednosti, dok su ostale kontinuirane varijable. U linearnom programiranju postoji ili beskonačno mnogo mogućih rješenja ili nijedno, dok kod čistog cjelobrojnog linearnog programiranja postoji konačan broj mogućih rješenja. [15]

Metodu linearnog programiranja potrebno je unaprijediti kako bi se omogućila njena primjena u naprednim mrežama, uzimajući u obzir stohastičnost, prediktivnost, prilagodljivost i nasumičnost napredne mreže. Tradicionalna linearna metoda je ograničena na statičke probleme, te je stoga neučinkovita za upotrebu u naprednim mrežama. [9]

4.2.2 Nelinearno programiranje

Postoje brojni problemi u praksi kod kojih veza između varijabli u funkciji cilja i funkcijama ograničenja nije linearna. Takve probleme nije moguće riješiti klasičnom simpleks metodom, te je za njihovo rješavanje razvijena posebna grana optimiranja, nazvana nelinearno programiranje. [9]

U realnim problemima nelinearnog programiranja mogu se javiti tri slučaja:

1. Linearna funkcija cilja s nelinearnim ograničenjima
2. Nelinearna funkcija cilja s linearnim ograničenjima
3. Nelinearna funkcija cilja s nelinearnim ograničenjima

Kod praktične primjene nelinearnog programiranja potrebno je provesti sljedeće korake: [17]

1. Definirati funkciju cilja (npr. maksimalni profit)
2. Odrediti potrebne resurse i utvrditi njihovu količinu
3. Odrediti ovisnost varijabli o resursima (utrošak resursa po pojedinoj varijabli)
4. Matematički opisati ovisnost funkcije cilja o varijablama
5. Matematički opisati ovisnost funkcije ograničenja o varijablama
6. Odabrati povoljnu metodu nelinearnog programiranja za rješavanje
7. Rješavanje problema
8. Praktična primjena rješenja

Kada je matematički model postavljen tada je relativno jednostavno doći do rješenja upotrebom jednog od brojnih programskih paketa za rješavanje problema nelinearnog programiranja. U načelu se svi problemi mogu riješiti bez računala upotrebom metoda za nelinearno programiranje, no složenije probleme nelinearnog programiranja neophodno je rješavati na računalu primjenom odgovarajućih programskih paketa zbog uštede vremena i smanjenja mogućnosti pogreške. Današnji softver može rješavati probleme sa nekoliko desetaka tisuća do nekoliko milijuna ograničenja i varijabli što je u praksi neizvediv posao za čovjeka. Također valja napomenuti da većina programskih paketa za nelinearno programiranje automatski izabire metodu koja je najpovoljnija za rješavanje zadanog problema. [17]

Ponovno, kao i kod linearnog programiranja, metode nelinearne optimizacije također nisu prikladne za primjenu kada su potrebni uvažavanje promjenjivosti i prediktivnost. Potreban je dodatni razvoj postojećih metoda kako bi se omogućila njihova implementacija u naprednu mrežu. [9]

4.2.3 Dinamičko programiranje

Dinamičko programiranje obuhvaća grupu formalnih postupaka optimizacije kod kojih se veliki ili teško obradivi problemi rastavljaju na više lako obradivih problema te se rješenja svakog potproblema koriste za dobivanje rješenja početnog problema. Rješenja se dobivaju koračnim postupkom, pri čemu se u svakom koraku optimizacije (k) uzimaju u obzir optimalna rješenja prethodnog koraka ($k-1$): [18]

$$f^*_{k,j} = \underset{x_j}{opt} \left\{ \varphi \left(f_{k,i}, f^*_{(k-1),(j-1)} \right) \right\} \quad (4-1)$$

gdje je:

$f^*_{k,j}$ - optimalna vrijednost funkcije cilja u k -tom koraku za $x = x_j$

$f_{k,i}$ - vrijednost funkcije k -tom koraku za $x = x_i$

$f^*_{(k-1),(j-1)}$ - optimalna vrijednost dobivena u prethodnom koraku ($k-1$) za $x = x_{(j-1)}$

Temelj za rješavanje problema dinamičkim programiranjem je rekurzija funkcije f_i : [18]

1. određuje se vrijednosti f_0 – „temeljni slučaj“
2. izračunava se vrijednost f_1 , uz korištenje prethodno izračunate vrijednosti f_0 – „pravilo rekurzije“
3. ponavlja se korak 2. (izračunavajući f_k uz korištenje f_{k-1}) do dostizanja određenog kraja $k = k_{max}$.

Ukoliko imamo dobro napravljenu rekurziju tada se korištenjem memoizacije može lako doći do rješenja. Memoizacija je tehnika optimizacije koja se u računalnom programiranju često koristi za ubrzavanje izvedbe programskog koda pohranom rezultata funkcija zahtjevnih za računanje i njihovim povlačenjem iz memorije kada se jave isti ulazni parametri [19]. Koristi se činjenica da su mnogi od potproblema na koje je osnovni problem rastavljen zapravo isti, te se stoga rješenje svakog potproblema računa samo jednom, čime se izbjegava ponovno računanje numeričkih karakteristika istog stanja, čime se za više redova veličine ubrzava izvođenje optimizacije.

Navedene metode daju osnovni uvid u tehnike matematičke optimizacije koje bi implementirane kao računalni algoritmi mogle omogućiti optimalan rad cijelog elektroenergetskog sustava u svakom trenutku, što je jedna od ključnih osobina napredne mreže. Opisane metode još nisu spremne za implementaciju, ali se radi na njihovom razvoju i testiranju. Trenutni razvoj omogućuje upravljanje manjim sustavima, ali još nije dovoljno razvijen da bi se mogao nositi s nasumičnošću koja se javlja u stvarnoj elektroenergetskoj mreži, niti omogućiti prediktivnost. [9]

4.3 Heurističke metode optimizacije

Postoji mnogo problema koji su prekompleksni (neizračunljivi) da bi ih se egzaktno riješilo u prihvatljivom vremenskom okviru. U praksi je često zadovoljavajuće „dovoljno dobro“ rješenje, koje nije nužno optimalno, ali ga možemo brzo pronaći. Metode kojima se dolazi do takvih rješenja nazivaju se heurističkim metodama. Heurističke metode i tehnike rješavanja problema, učenja i otkrivanja, bazirane su na iskustvu i koriste se da ubrzaju proces pronalaženja dovoljno dobrog rješenja kada detaljno istraživanje nije praktično.

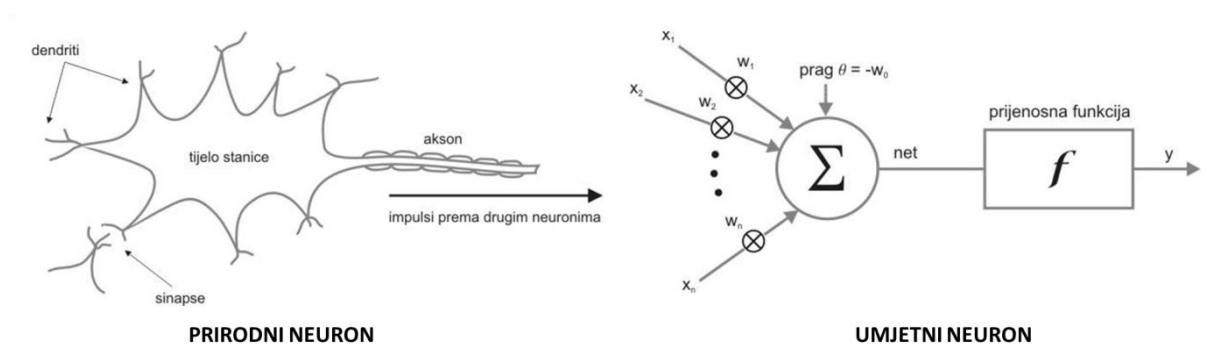
Osnovna karakteristika heurističkih algoritama je da ne garantiraju je li dobiveno rješenje optimalno, niti definiraju koliko je ono blizu optimalnog. Ipak se u praksi pokazalo da heuristički algoritmi s visokom vjerojatnošću daju optimalno rješenje ili rješenje blisko optimalnom. [14]

Iz heurističkih metoda koje su razvijene iz ranijih iskustava sa sličnim problemima, te su pogodne samo za rješavanje problema za koje su osmišljene, razvijene su metaheuristike kao metode više razine apstrakcije. Metaheuristike se može smatrati općenitim predlošcima koji se koriste kao vodilja pri dizajnu heuristika za specifične probleme, te ih je moguće primijeniti na bilo koji optimizacijski problem. Često oponašaju prirodne fenomene: [14]

- evolucija – *Genetic algorithms (GA)*
- pamćenje – *Tabu Search (TS)*
- mravi – *Ant Colony Optimization (ACO)*
- pčele, ose, imunološki sustav...

4.3.1 Umjetne neuronske mreže

Umjetna neuronska mreža (engl. *Artificial Neural Network* - ANN) je skup međusobno povezanih jednostavnih procesnih elemenata koji su međusobno povezani i interaktivni kroz operacije obrade signala, čija se funkcionalnost temelji na biološkom neuronu. Zamišljena je kao umjetna replika ljudskog mozga kojom se nastoji simulirati postupak učenja. Analogija s pravim biološkim uzorom zapravo je dosta klimava jer uz mnoga pojednostavljenja postoje i mnogi fenomeni živčanog sustava koji nisu modelirani umjetnim neuronskim mrežama, te karakteristike umjetnih neuronskih mreža koje se ne slažu s onima bioloških sustava. Funkcionalnost biološkog neurona imitira McCulloch-Pitts model umjetnog neurona, tzv. *Threshold Logic Unit* - TLU. Model koristi slijedeću analogiju: signali su opisani numeričkim iznosom i na ulazu u neuron množe se težinskim faktorom koji opisuje jakost sinapse; signali pomnoženi težinskim faktorima zatim se sumiraju analogno sumiranju potencijala u tijelu stanice; ako je dobiveni iznos iznad definirana praga, neuron daje izlazni signal. [20]



Slika 4.3 Prirodni i umjetni neuron [20]

Imaju sposobnost klasifikacije i prepoznavanja uzoraka u velikim količinama podataka kroz treniranje i ugođavanje algoritma. Ključni element umjetnih neuronskih mreža je nova struktura sustava za obradu podataka, koja je sastavljena od velikog broja jako umreženih elemenata za procesiranje (neurona) koji zajedno rade na rješavanju specifičnih problema. Umjetne neuronske mreže imaju sposobnost učenja kroz primjere. Koriste se za specifične primjene, poput prepoznavanja uzoraka ili probleme klasifikacije i predviđanja, odnosno općenito sve probleme kod kojih postoji odnos između prediktorskih (ulaznih) i zavisnih (izlaznih) varijabli, bez obzira na visoku složenost te veze (nelinearnost).[9, 21]

Umjetne neuronske mreže sa svojom sposobnošću pronalaska smisla iz kompliciranih ili nepreciznih podataka se mogu koristiti za pronalaženje uzoraka i otkrivanje trendova koji su prekompleksni da bi ih primijetili ljudski stručnjaci ili druge računalne metode. Mogu se smatrati ekspertima za kategoriju informacija za čiju analizu su dizajnirane. Mogu davati projekcije mogućih scenarija za situacije koje su zanimljive za proučavanje u određenom području. Prednosti umjetnih neuronskih mreža: [9]

1. Adaptivno učenje: sposobnost učenja kako obaviti zadatak na temelju informacija iz rješavanja ranijih primjera
2. Samo-organizacija: same organiziraju informacije koje dobiju tijekom perioda učenja
3. Rad u stvarnom vremenu: računske operacije se mogu izvoditi paralelno, posebne hardverske komponente se dizajniraju i izrađuju kako bi se što bolje iskoristila ova sposobnost
4. Tolerancija kvara redundantnim informacijskim kodiranjem

Moguće primjene u elektroenergetskom sustavu uključuju:

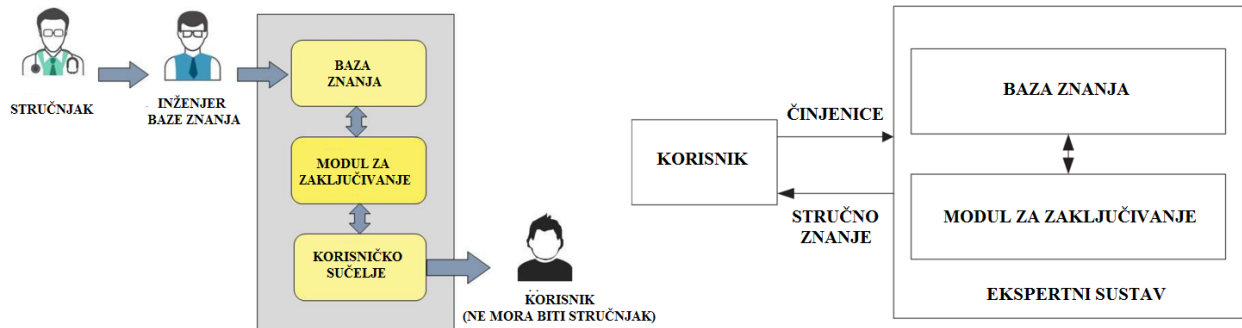
1. adaptivno upravljanje
2. detekcija i klasifikacija kvara
3. rekonfiguracija mreže
4. procjena stabilnosti napona
5. procjena tranzijentne stabilnosti

Ove funkcije za nadzor i upravljanje zahtijevaju pristup podacima izmjerenim u sustavu u realnom vremenu. Implementacija umjetnih neuronskih mreža kao računalne platforme će omogućiti procjenu performansi naprednih mreža za svaku od navedenih funkcija. [9]

4.3.2 Ekspertni sustavi

Ekspertni sustavi (engl. *Expert Systems - ES*) su računalni programi koji sadrže određena specifična znanja iz jednog ili više određenih područja znanosti, te koriste to znanje za pomoć pri donošenju odluka. Kao najzastupljenije područje umjetne inteligencije definiraju se na različite načine, a jedna od najjednostavnijih definicija je: Ekspertni sustavi su sustavi koji oponašaju znanje eksperta. Sastoje se od baze znanja, modula zaključivanja i komunikacijskih međusklopova. U bazi znanja je sadržano sve što je poznato o problemu kojega je potrebno riješiti, modul za zaključivanje služi za rješavanje zadatka izvođenjem algoritama koji povezuju poznate podatke o problemu iz baze znanja, a komunikacijski međusklopovi omogućuju korisniku interaktivan rad sa sustavom, te mu pružaju uvid u tijek donošenja zaključka. [22]

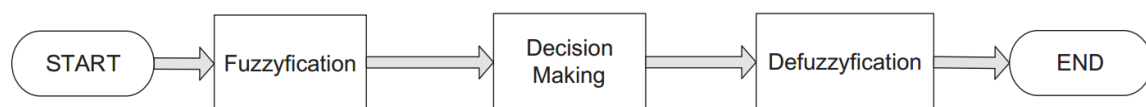
Koriste se kao metoda optimizacije koja se oslanja na heuristiku donošenja odluka na temelju pravila. Nekada se koriste za dijagnozu kvara s prijedlogom za korektivne radnje. Ekspertni sustavi obavljaju zadatke koje bi inače radio čovjek, no njihova pouzdanost je ograničena njihovom bazom znanja. Osnovni ideja i dijelovi ekspertnog sustava prikazani su na slici 4.4.



Slika 4.4 Osnovna ideja i dijelovi ekspertnog sustava [9, 21]

Ekspertni sustavi imaju nekoliko prednosti u odnosu na ljudske stručnjake, uključujući: veću dostupnost i pouzdanost, nižu cijenu i vrijeme reagiranja, veće povjerenje u sposobnost donošenja odluke zbog davanja jasnog obrazloženja za dani odgovor. Njihove primjene u elektroenergetskom sustavu uključuju optimalno odbacivanje tereta (engl. *load shedding*), alokaciju resursa, ekonomično vođenje. Funkcije napredne mreže u kojima sudjeluje operator će biti poboljšanje korištenjem ovakvih sustava temeljenih na velikim bazama znanja. [9]

Ekspertni sustavi su se pojavili sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća, te su s vremenom usavršavani dodavanjem novih tehnika. Jedna od važnih tehnika je korištenje neizrazite logike (engl. *fuzzy logic*). Neizrazita logika je nadskup konvencionalne logike koji je proširen tako da uključuje koncept parcijalne istine, koji se odnosi na vrijednosti istinitosti između "potpuno istina" i "potpuno laž". Nesigurnost u podacima se korištenjem funkcija članstva predstavlja neizrazitim brojevima (engl. *fuzzyfication*), koji predstavljaju skup mogućih vrijednosti, te se tako dobije oblik pogodan za provođenje analize. Svakoj vrijednosti skupa funkcija članstva dodjeljuje stupanj pripadnosti, zadan realnom vrijednošću između 0 i 1, te predstavlja vjerojatnost njegove točnosti (istinitosti). Slika 4.5 prikazuje pojednostavljeni blok dijagram pristupa neizrazite logike.

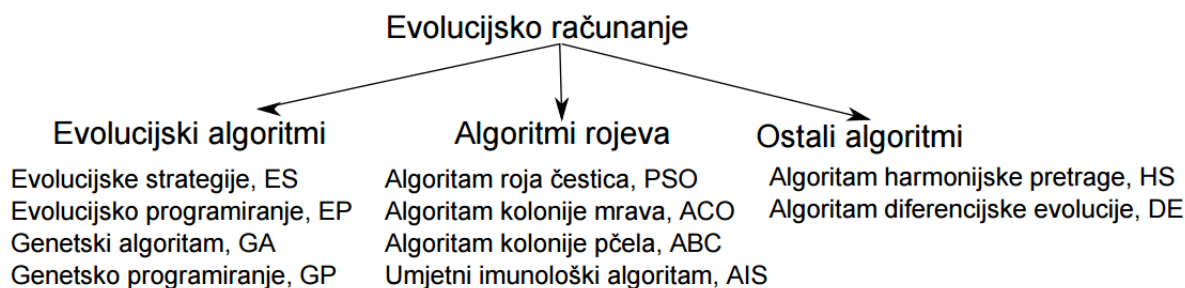


Slika 4.5 Pojednostavljeni blok dijagram pristupa neizrazite logike [9]

Sustavi neizrazite logike se primjenjuju na kompleksne probleme s nelinearnim karakteristikama. U dizajniranju naprednih mreža primjenjivi su kod dizajniranja automatskog upravljanja proizvodnjom, statičke procjene sigurnosti i estimacije stanja. [9]

4.4 Evolucijske računalne tehnike

Evolucijsko računanje je područje računalne znanosti koje razmatra algoritme koji simuliraju evolucijski razvoj vrsta, život i ponašanje jedinke u društvu ili pak simuliraju različite aspekte umjetnog života. Najveći dio algoritama evolucijskog računanja nastao je modeliranjem procesa koji su opaženi u prirodi, tj. imaju jaku biološku motivaciju. Zajednička obilježja većine algoritama ovog područja je prikladnost za rješavanje optimizacijskih problema. Uporabom prikladnih algoritama evolucijskog računanja moguće je rješavanje vrlo teških optimizacijskih problema, koje je u praksi nemoguće riješiti iscrpnom pretragom (engl. *brute-force method*). Razvoj ovog područja započeo je šezdesetih godina prošlog stoljeća. Danas se dijeli u tri velike skupine prikazane slikom 4.6, preuzeto iz [23].



Slika 4.6 Evolucijsko računanje [23]

Evolucijski algoritmi definiraju se kao postupci optimiranja, učenja i modeliranja, koji se temelje na mehanizmu evolucije u prirodi. Nastali su kroz pokušaje primjene načela evolucije pri rješavanju problema. Ideja evolucijskih algoritama je da rade s populacijom rješenja nad kojima se primjenjuju evolucijski operatori (selekcija, križanje, mutacija) čime populacija iz generacije u generaciju (iterativnim postupkom) postaje sve bolja i bolja.

Algoritmi zasnovani na inteligenciji roja definiraju se na sličan način kao evolucijski algoritmi, ali temelje se na sociološko-psihološkim principima i pružaju uvid u sociološka ponašanja. Baziraju se na populaciji rješenja. U odnosu na evolucijske algoritme, ne postoji mehanizam stvaranja nove generacije iz postojeće, tj. ne postoje evolucijski operatori, već se modeliraju individualni i socijalni faktori, čime se stvara novo znanje i nova informacija. [23]

Genetski algoritam

Genetski algoritam (GA) je heuristička metoda slučajnog i usmjerenog pretraživanja prostora rješenja koja imitira prirodni evolucijski proces. Koristi se za rješavanje teških optimizacijskih problema, za koje ne postoji egzaktna matematička metoda rješavanja. Nakon što se generira početna populacija, genetski algoritam ciklički obavlja selekciju boljih jedinki koje potom sudjeluju u reprodukciji, sve dok nije zadovoljen uvjet završetka evolucijskog procesa. Pseudokod genetskog algoritma: [23]

Pseudokod genetskog algoritma

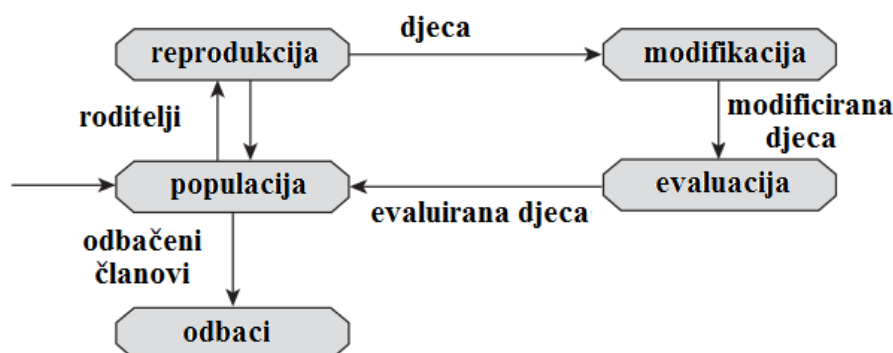
while nije zadovoljen uvjet završetka evolucijskog procesa **do**

 selektiraj bolje jedinke za reprodukciju

 reprodukcijom generiraj novu populaciju

end while

Reprodukcija stvara nove jedinke uz pomoć genetskih operatora križanja i mutacije. Križanje prenosi svojstva roditelja na djecu, a mutacija slučajno mijenja svojstva jedinke. Genetski algoritam ne specificira kako se križanjem prenose svojstva roditelja na djecu, kako se slučajno mijenjaju svojstva jedinki, kako se selektiraju bolje jedinke za reprodukciju, niti kako se generira početna populacija. Upravo je ta sloboda u odabiru vrste križanja, mutacije, selekcije i inicijalizacije otežavajuća okolnost u procesu izgradnje genetskog algoritma za rješavanje specifičnog optimizacijskog problema. Naime, pokazuje se da ne postoji takav skup genetskih operatora za koji bi GA, ako se primjeni za rješavanje proizvoljnog skupa optimizacijskih problema, davao superiorne rezultate u odnosu na GA s nekim drugim operatorima. Slika 4.7 prikazuje tipični ciklus GA. [23]



Slika 4.7 Tipični ciklus genetskog algoritma [9]

Algoritam roja čestica

Algoritam roja čestica (engl. *Particle Swarm Optimization*) je računalna metoda koja provodi optimizaciju problema tako što iterativno pokušava poboljšati rješenje uzimajući u obzir zadane kriterije uspješnosti. Otkriven je slučajno devedesetih godina dvadesetog stoljeća, pri pokušaju da se na računalu simulira kretanje jata ptica. C. W. Reynolds u svom radu promatra jato ptica kao sustav čestica, gdje svaka čestica (tj. ptica) svoj let ravna prema sljedećim pravilima: [24]

1. izbjegavanje kolizija s bliskim pticama
2. usklađivanje brzine leta s bliskim pticama te
3. pokušaj ostanka u blizini drugih ptica

Inspirirani ovim i sličnim radovima, R. C. Eberhart i J. Kennedy su 1995. godine shvatili da se takav sustav može koristiti kao optimizator, te svoje ideje objavili u dva temeljna rada, nakon čega 1996. godine Eberhart, Simpson i Dobbins izdaju knjiga o uporabi algoritma roja čestica kao univerzalnog optimizacijskog alata. Tako je, primjerice, u knjizi opisana vrlo uspješna primjena algoritma roja čestica za treniranje umjetne neuronske mreže. Konačno, 1997. godine Eberhart i Kennedy objavljuju rad o prilagodbi algoritma za rad nad diskretnim domenama. Sam algoritam u određenoj mjeri inspiriran je i sociološkim interakcijama između pojedinaca u populaciji, gdje svaki pojedinac pamti svoje do tada pronađeno najbolje rješenje problema, te ima uvid u najbolje pronađeno rješenje svojih susjeda, te pretraživanje usmjerava uzimajući u obzir obje komponente. [24]

Algoritam roja čestica je populacijski algoritam. Populacija se sastoji od niza jedinki (čestica) koje pretražuju višedimenzijski prostor rješenja i pri tome svoj položaj mijenjaju temeljeno na vlastitom iskustvu i iskustvu bliskih susjeda, čime se modelira socijalna interakcija jedinki u jatu. Pri promjenama kretanja pojedina jedinka za određivanje novog smjera uzima u obzir svoja prijašnja iskustva (do tad pronađeno najbolje rješenje), te iskustva svojih bliskih susjeda. Na ovaj način sam algoritam kombinira globalno pretraživanje prostora stanja (socijalni faktor) i lokalnu pretragu (individualni faktor) kojom se obavlja fino podešavanje rješenja. [24]

Algoritam započinje inicijalizacijom populacije. Svaka se čestica smješta na neku slučajno odabranu poziciju, i dodjeljuje joj se neka slučajno odabrana brzina. Koraci glavnog dijela algoritma koji se ponavlja tako dugo dok se ne ispuni uvjet zaustavljanja (pronazak dovoljno dobrog rješenja ili dostizanje maksimalnog broja iteracija): [24]

1. Za svaku se česticu izračuna vrijednost funkcije u točki koju čestica predstavlja.
2. Za svaku se česticu provjeri njeno do tada zapamćeno najbolje rješenje i njeno novo pronađeno rješenje. Ako je novo bolje, pamti se kao novo najbolje rješenje te čestice. Potrebno je pamtit i vrijednost funkcije u tom rješenju.
3. U čitavoj populaciji se pronađe najbolje rješenje, i ako je prethodno zapamćeno globalno rješenje lošije, ažurira se na novo pronađeno. Potrebno je pamtit i vrijednost funkcije u tom rješenju.
4. Za svaku česticu se obavlja ažuriranje trenutne brzine a potom i položaja.

Optimizacija kolonijom mrava

Optimizacija kolonijom mrava (engl. *ant colony optimization algorithm* - ACO) je probabilistička tehnika za rješavanje problema koji se mogu svesti na problem traženja najbržeg puta kroz graf. Metaheuristike za optimizaciju kolonijom mrava prvi je predložio Marco Dorigo devedesetih godina dvadesetog stoljeća. Ideja o mravljem algoritmu proizašla je iz promatranja mrava u potrazi za hranom, jer mravi, bića ograničenih kognitivnih sposobnosti uspijevaju korištenjem kolektivnog ponašanja ostvariti teške zadatke poput pronalaska najkraćeg puta između izvora hrane i gnijezda. Mravi su poluslijepi životinje te prilikom kretanja ne koriste osjetilo vida, već je njihovo kretanje uvjetovano socijalnom interakcijom među jedinkama. Dok se kreću, mravi koriste okoliš kao medij za komunikaciju, ostavljajući za sobom hormonski trag, feromone, te na indirektan način izmjenjuju informacije (stigmetrija). Takav, nehijerarhijski i indirektan tok komunikacije čini sve jedinke u mravljoj koloniji visoko povezanom mrežom jer sve jedinke mogu komunicirati sa svim ostalima putem okoline. Ukoliko neki mravi pronađu put prema izvoru hrane ispuštati će feromone koje će ostali moći slijediti. Što više mrava pronađe hranu, to je trag feromona jači. Nakon nekog vremena trag feromona će izblijediti i time će se smanjivati privlačnost feromona drugim mravima. [25]

Tijek ponašanja kolonije pri kretanju do izvora hrane: [25]

1. Prvi mrav pronalazi izvor hrane nasumično birajući put kojim će se kretati, vraća se u gnijezdo, ostavljajući za sobom trag feromona
2. Mravi neselektivno slijede sve moguće puteve, no sve jači trag feromona na najkraćem putu sve ih više privlači
3. Svi mravi kreću se najkraćim putem, ostale, duže staze postepeno gube trag feromona

Pseudokod osnovnog toka algoritma optimiranja kolonijom mrava: [25]

Pseudokod ACO

while nije zadovoljen uvjet završetka **do**

for za svakog mrava **do**

 stvari rješenje

 vrednuj rješenje

 položi feromonski trag

end for

 Odaberi drugu skupinu mrava

for ponovi za sve mrave u drugoj skupini **do**

 Ažuriraj feromonske tragove

end for

 Ispari feromonske tragove

end while

Optimizacija kolonijom mrava je primjenjiva u mnogo područja kombinatoričke optimizacije, a najčešće se koristi za pronalazak najbržeg puta kroz graf. U elektroenergetskom sustavu može se koristiti za probleme s rekonfiguracijom mreže ili planiranju proširenja mreže. [9]

5. EDUKACIJSKI KURIKULUM O NAPREDNIM MREŽAMA

Stvaranje profesionalnog edukacijskog kurikuluma je od iznimne važnosti za budućnost elektroenergetskih sustava. Potrebno je periodično uvoditi nova područja proučavanja, kao i nove načine njihove prezentacije studentima, te profesionalno usmjeravati osposobljavanje studenata za karijere u novim područjima. Razvoj takvih obrazovnih sustava zahtjeva infrastrukturu koja će omogućiti njihov rad, poput velikih internetskih (lako dostupnih) baza znanja, te međunarodnu razmjenu stečenih znanja i pomoć pri edukaciji stručnog osoblja za nova radna mjesta. U nastavku će biti opisan edukacijski kurikulum o naprednim mrežama, kojega za izvođenje na studijima elektrotehnike u [9] predlaže James Momoh.

Program edukacije o osnovama naprednih mreža obuhvaćat će definicije, arhitekturu, parametre rada, raspravu o razvoju alata za analizu i odlučivanje, te obnovljive izvore energije. Edukacija o dizajniranju naprednih mreža morat će kombinirati znanja o komunikacijskim mrežama, optimizaciji, vođenju EES-a, ograničenjima mreže zbog društvenog utjecaja i utjecaja na okoliš i dinamičkih tehnika optimizacije. [9]

Konvencionalni programi za edukaciju inženjera elektrotehnike su usmjereni na razvoj inženjera za poslove vezane s radom električnih distribucijskih sustava i telekomunikacijske infrastrukture, dizajnom komunikacijskih sustava i razvojem elektroničkih sklopova za upravljanje sustavom. Takav kurikulum daje uvod u teoriju i praktičan rad navedenih sustava s fokusom na: [9]

- korištenje električne energije
- primjenu novih tehnologija važnih za kvalitetu električne energije
- primjenu energetske elektronike u visokonaponskim uvjetima

Dijelovi edukacijskog kurikuluma koje je potrebno dodati postojećem kako bi se olakšala edukacija inženjera o naprednim mrežama mora obuhvaćati sljedeće teme: [9]

- direktno digitalno upravljanje
- uloga operatora sustava
- dinamičnost i stabilnost elektroenergetskog sustava
- kvaliteta električne energije
- novi koncepti u zaštiti elektroenergetskog sustava
- zakonske regulative i utjecaj na okoliš
- pouzdanost i procjena rizika
- ekonomska analiza, tržišta električnom energijom, planiranje

Predlaže se da kolegiji koji obuhvaćaju navedene teme budu uvedeni na završnim godinama preddiplomskih studija ili na diplomskom studiju. Izvan akademskih krugova, poželjno je da opisani edukacijski kurikulum bude lako dostupan tehničkom osoblju koje se brine za rad EES-a. Novi kurikulum treba dati uvide o: [9]

- utjecaju nesigurnosti na planiranje i rad EES-a,
- korištenju mjerenja u realnom vremenu za analizu stabilnosti, pouzdanosti i učinkovitosti
- korištenju obnovljivih izvora energije i metoda skladištenja električne energije
- razvoju novih optimizacijskih tehnika

Prema [9], u nastavku je predložen nastavni plan za kolegij koji bi dao osnovna znanja o naprednim mrežama, podijeljen u više nastavnih jedinica (modula):

Modul 1: Uvod

- što je napredna mreža
- radne definicije i povezani pojmovi
- funkcije naprednih mreža

Ovaj modul treba dati osnovna znanja o naprednim mrežama, njihov povijesni razvoj, te pregled ključnih doprinosa za njihov razvoj i implementaciju. Također treba dati pregled važnih definicija dijelova napredne mreže i njihovih karakteristika.

Modul 2: Arhitektura

- dijelovi i arhitektura naprednih mreža

Ovaj modul treba dati pregled i usporedbu predložene arhitekture. Osnovne komponente pri dizajniranju naprednih mreža će uključivati: automatizaciju prijenosa, koordinaciju rada sustava, procjenu stanja, sustavne operacije, automatizaciju distribucije, integraciju obnovljivih izvora energije, energetske učinkovitost, distribuiranu proizvodnju i pohranu električne energije, aktivnosti krajnjih korisnika električne energije (napredne kuće, napredni kućanski uređaji)

Modul 3: Funkcije

- pregled funkcija napredne mreže
- procjena komponenata: proizvodnja, prijenos, distribucija, krajnji korisnik

Ovaj modul treba podijeliti naprednu mrežu u dijelove prema funkciji svakog dijela mreže. Prema takvoj podjeli treba dati pregled i usporedbu korištenih i novih alata za pojedine funkcije, s osvrtom na energetske učinkovitost i održivost različitih opisanih tehnologija.

Modul 4: Alati i metode

- računalne metode
- analitičke metode (alati za potporu donošenju odluka, statičke i dinamičke optimizacijske metode)

Ovaj modul treba dati pregled klasičnih metoda optimizacije, te uvod u nove metode globalne optimizacije, te računalnu tehnologiju koja treba omogućiti predviđanja ponašanja, prilagodljivost i sigurnost rada naprednih mreža. Treba sadržavati usporedbu najnovijih metoda i metoda koje su još u razvoju, i potrebno ga je stalno nadopunjavati.

Modul 5: Smjernice pri dizajnu naprednih mreža

- kriteriji odabira metoda koje će se koristiti
- automatizacija proizvodnje, prijenosa, distribucije, te potrošnje električne energije

Ovaj modul treba opisati primjenu naprednih metoda optimizacije za automatizaciju svih dijelova elektroenergetskog sustava.

Modul 6: Obnovljivi izvori energije

- uvod o obnovljivim izvorima
- tehnologije za pohranu električne energije
- električna i hibridna vozila
- utjecaj na okoliš i klimatske promjene
- ekonomski aspekti korištenja obnovljivih izvora

Ovaj modul treba dati uvod o tehnologijama koje koriste obnovljive izvore energije, te tehnologijama za pohranu električne energije i električnim vozilima. Treba dati pregled karakteristika, prednosti i mana različitih tehnologija, te njihovog utjecaja na okoliš i ekonomskih aspekata njihove primjene.

Modul 7: Komunikacijske tehnologije

- uvod u topologiju mreža
- nadzor šireg područja (engl. *WAM - Wide Area Monitoring*)
- napredna mjerna infrastruktura (engl. *AMI - Advanced Metering Infrastructure*)

Ovaj modul treba sadržavati raspravu o komunikacijskim tehnologijama potrebnim za integraciju naprednih mjernih i zaštitnih uređaja, te načinima njihovog povezivanja sa centrima za upravljanje sustavom.

Modul 8: Standardi, interoperabilnost i sigurnost od računalnih napada

Budući da su napredne mreže nov pojam, ovaj modul treba dati pregled studija razvoja standarda, mogućnosti razmjene podataka između dijelova sustava (interoperabilnosti), te načina zaštite napredne mreže od računalnih napada.

Modul 9: Primjeri iz prakse (engl. *case study*)

Ovaj modul treba predstaviti nove primjere iz prakse provedene za sustave proizvodnje električne energije, te njenog prijenosa i distribucije. Treba sadržavati studije provedene u industriji i u akademskim istraživanjima. Poželjno je da sadržavaju upute za dodatno učenje izvan predavaonice, kroz učenje na projektima, te provođenje studija slučaja i eksperimenata.

6. ZAKLJUČAK

Napredne mreže pojavile su se kao neizbježan odgovor na probleme s kojima se moderni elektroenergetski sustavi suočavaju zbog stalno rastućih potreba za električnom energijom, te potrebe za boljim načinima integracije elektrana na obnovljive izvore energije u postojeću mrežu. U tradicionalnim mrežama su krajnji potrošači samo koristili električnu energiju koja im je bila isporučena preko prijenosnog i distribucijskog sustava, no danas se s pojavom distribuirane proizvodnje i mikrogeneracije sve češće susreće slučaj korisnika koji su ujedno i potrošači i proizvođači. Pojava takvih korisnika ima potencijal za bolje korištenje postojeće distribucijske infrastrukture ako se njima dobro upravlja. Tehnologije i tehnološke metode opisane u ovom diplomskom radu trebaju omogućiti što lakšu integraciju takvih korisnika, te optimalan rad cijelog sustava kao cjeline. Metode optimizacije opisane u radu koje će biti korištene za automatsko upravljanje naprednim mrežama imaju potencijal poboljšanja sigurnosti i stabilnosti elektroenergetskog sustava, njegov pouzdaniji rad, povećanje kvalitete električne energije isporučene krajnjim korisnicima, te smanjivanje troškova održavanja i upravljanja elektroenergetskim sustavom. Te metode su utemeljene na poznatim metodama iz područja matematike i znanstvene discipline operacijskih istraživanja, no još uvijek nedovoljno prilagođene, ili nedovoljno razvijene za upotrebu na velikim sustavima. Tehnologije nužne za implementaciju naprednih mreža danas se intenzivno proučavaju, teorijski, te u praksi provođenjem studija na eksperimentalnim sustavima. Budući da su napredne mreže relativno nov pojam, koji se uz to neprekidno poboljšava, problem njihove implementaciji predstavlja i mali broj stručnjaka specijaliziranih u području razvoja i implementacije naprednih mreža, što ograničava korištenje neupitnih prednosti naprednih mreža u odnosu na tradicionalne. Zato je potrebno uvesti edukacijske programe o naprednim mrežama pri obrazovanju novih inženjera, kako bi se omogućio njihov brži razvoj i lakša implementacija, te korištenje svih opisanih prednosti naprednih mreža u odnosu na tradicionalne elektroenergetske sustave.

SAŽETAK

U ovome radu opisane su osnove naprednih mreža. Poblje je opisana arhitektura naprednih mreža i tehnologija koje je sačinjavaju, te metode analize tokova snaga u mreži, neophodne za upravljanje u naprednim mrežama. Također su opisani moderni alati za dizajniranje naprednih mreža, te neke od novih metoda optimizacije koje su još u intenzivnom razvoju.

Ključne riječi:

napredna mreža, distribuirana proizvodnja, optimalni tokovi snaga, procjena sigurnosti, metode optimizacije

ABSTRACT

This paper describes the fundamentals of smart grids. The architecture of smart grids and the technologies that make a smart grid are described, as well as methods for analysing power flows in a grid which are necessary for controlling the smart grid. Also, modern tools for design of smart grids are described, together with new optimization methods which are still being researched and developed.

Keywords:

smart grid, distributed generation, optimal power flow, security analysis, optimization methods

LITERATURA

- [1] C. Beard: Smart grid for dummies
John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, 2010.
- [2] web stranica, https://en.wikipedia.org/wiki/Phasor_measurement_unit, pristup ostvaren: 10.04.2017.
- [3] web stranica, <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/smart-0>, pristup ostvaren: 29.09.2017.
- [4] Z. Morvaj, L. Lugarić, B. Morvaj: "Pametni gradovi, zgrade i razdjelne mreže - perspektive i značaj za održivu opskrbu energijom", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Umag, 2010.
- [5] D. Jelenčić, I. Ivšinović: "Kućni terminali i njihova uloga u učinkovitoj uporabi energije", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Umag, 2010.
- [6] web stranica, https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_meter, pristup ostvaren: 13.04.2017.
- [7] Opći uvjeti za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom, web stranica, http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_08_85_1666.html, pristup ostvaren: 17.04.2017.
- [8] J. Tošić: "Komercijalne i tehničke virtualne elektrane kao dio EES-a", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Trogir/Seget Donji, 2014.
- [9] J. Momoh: Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis,
John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2012.

- [10] T. Alinjak, K. Trupinić, I. Pavić: "Model trofaznog proračuna tokova snaga za potrebe računanja tehničkih gubitaka u distribucijskoj mreži", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Osijek, 2016.
- [11] J. Liang, Ganesh K. Venayagamoorthy, R.G. Harley: Wide-Area Measurement Based Dynamic Stochastic Optimal Power Flow Control for Smart Grids With High Variability and Uncertainty, IEEE Transactions on Smart Grid, srpanj 2012.
- [12] Chen-Ching Liu, Analysis of Power Systems, prezentacije uz predavanja, Washington State University, 2012.
- [13] D. Sokač, A. Tunjić, K. Ugarković: "Primjena analitičkog hijerarhijskog procesa u određivanju prioriteta investicijskih ulaganja uz pomoć programskog paketa Expert Choice", Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Šibenik, 2008.
- [14] Nina Skorin-Kapov, Heurističke metode optimizacije, prezentacije uz predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva - Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [15] Ž. Tomšić, I. Rajšl, M. Filipović, Energetsko ekonomski modeli izgradnje EES-a, prezentacije uz predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva - Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [16] T. Perić, Operacijska istraživanja, prezentacije uz predavanja, Ekonomski fakultet - Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [17] I. Šimić: Sistematizacija metoda nelinearnog programiranja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje - Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [18] Z. Kolumbić, Kvantitativne metode, prezentacije uz predavanja, Strojarski fakultet - Slavonski Brod, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2011
- [19] web stranica, <https://en.wikipedia.org/wiki/Memoization>, pristup ostvaren: 28.04.2017.

- [20] prof.dr.sc. B. Dalbelo Bašić, M. Čupić, J. Šnajder: Umjetne neuronske mreže, Fakultet elektrotehnike i računarstva - Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [21] S. Ribarić, A. Jović: Ekspertni sustavi, prezentacije uz predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva - Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [22] web stranica, https://hr.wikipedia.org/wiki/Ekspertni_sustavi, pristup ostvaren: 03.05.2017.
- [23] K. Knežević: Evolucijski algoritmi temeljeni na vjerojatnosnim razdiobama, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva - Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [24] M. Čupić: Prirodom inspirirani optimizacijski algoritmi, skripta za kolegij Umjetna inteligencija, Fakultet elektrotehnike i računarstva - Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [25] I. Lukić: Osnovni algoritam optimiranja kolonijom mrava, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje - Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.

ŽIVOTOPIS

Željko Šimić rođen je 13.09.1991. u Brčkom, Bosna i Hercegovina. Osnovnu školu završio je 2006. godine u Privlaci, te upisao Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer elektrotehničar. Nakon završetka srednje škole, 2010. godine upisuje stručni studij elektrotehnike, smjera elektroenergetika, na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Po završetku studija 2013. godine upisuje razlikovnu godinu za diplomski studij u trajanju jedne godine. Nakon razlikovne godine, 2014. upisuje diplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.