

# NEIZRAZITA (FUZZY) LOGIKA I NJENA PRIMJENA U ELEKTROENERGETICI

Sonja Tomasić-Škevin, Zagreb

UDK 621.31:51  
PREGLEDNI ČLANAK

Elektroenergetski sustavi spadaju među najkompleksnije sustave naše civilizacije. Uz mnoštvo faktora pomoću kojih se može opisati rad tog sustava postoje i razni vanjski utjecaji koji više ili manje utječu na ponašanje promatranog sustava. Zakonitosti po kojima se vladaju takvi sustavi počesto nisu linearni niti do kraja određeni. Zbog složenosti a ponekad i neodređenosti i zbog potrebe korištenje znanja eksperta na određenom području neizrazita (engl. fuzzy) logika našla je primjenu kod rješavanja problema u elektroenergetici. Neizrazita logika sa svojim svojstvom korištenja neizrazitih varijabli može uhvatiti razne neodređenosti i biti kao pomoćni alat inženjerima u mnogim dijelovima elektroprivrede.

**Ključne riječi:** neizrazita logika, neodređenost, elektroenergetski sustav.

## 1. UVOD

Matematičar Lotfi A. Zadeh 1965. godine uvodi pojam fuzzy skupa kao matematički opis neodređenosti koje se javljaju u lingvistici. Fuzzy skupovi mogu se promatrati kao generalizacija klasične teorije skupova [1].

Zadehov princip nekompatibilnosti kaže da se s porastom kompleksnosti sustava smanjuje naša sposobnost donošenja točnih i vrijednih zaključaka o ponašanju tog sustava. Proces se nastavlja sve do dostizanja praga nakon kojeg točnost i značajnost (ili relevantnost) postaju karakteristike koje gotovo u potpunosti isključuju jedna drugu. Iz toga se može izvesti zaključak o povezanosti kompleksnosti i dvosmislenosti (netočnosti):

“Što bliže pogledamo problem stvarnog svijeta, njegovo rješenje postaje nejasnije”. [Zadeh] [1]

Način na koji ljudi misle rješavajući probleme uključuje kompleksnost i dvosmislenost na subjektivan način. Kad čovjek proučava kompleksni sustav, on zaključuje približno o njegovom ponašanju (sposobnost koju računalo nema) i tako zadržava samo generičku sliku problema. Za razumijevanje kompleksnih sustava dovoljna je ta općenitost i dvosmislenost.

Što se više bavimo nekim sustavom njegova kompleksnost se smanjuje a raste naše razumijevanje sustava. Preciznost koju pri modeliranju dobivamo računalnim metodama postaje sve korisnija. Za manje kompleksne sustave, koji stoga imaju malu nesigurnost, matematički izrazi nude precizan opis ponašanja sustava. Kod sustava koji su samo malo kompleksniji,

ali za koje postoje karakteristični podaci, metode umjetne inteligencije predstavljaju moćna i efikasna sredstva za smanjenje nesigurnosti pomoću učenja zasnovanog na uzorcima koji se nalaze u bazi podataka.

Ne postoji problem za koji bi se moglo reći da su poznate apsolutno sve informacije o njemu, tj. bez nepoznatog, bez nejasnog, bez nepreciznog ili bez elemenata slučajnog. Nesigurna informacija može imati mnogo različitih oblika. Postoji nesigurnost koja proizlazi iz kompleksnosti, npr. kompleksnost procjene pouzdanosti distribucije u energetici. Postoji nesigurnost koja proizlazi iz ignorancije, iz slučajnosti, iz nepreciznosti, iz nesposobnosti da se izvedu adekvatna mjerenja, iz nedostatka znanja, iz neodređenosti, kao i neodređenost koja proizlazi iz našeg govornog jezika.

Prije odabira prikladne metode za izražavanje nesigurnosti sustava potrebno je proučiti prirodu nesigurnosti sustava. Neizrazita logika pomaže pri razumijevanju ponašanja vrlo kompleksnih sustava za koje postoji malo numeričkih podataka, a raspoloživi podaci su dvosmisleni ili neprecizni na takav način da dozvoljava interpolaciju između promatrane ulazne i izlazne situacije. Fuzzy modelima se općenito može obuhvatiti vrlo velika nepreciznost.

Neizrazita logika je zasnovana na načinu na koji ljudski mozak procesira neprecizne informacije. Neizraziti sustavi spajaju neizrazite skupove s neizrazitim pravilima kako bi dobili sveukupno kompleksno nelinearno ponašanje sustava. Oni počinju od vrlo formalnog uvida u strukturu kategorija koje nalazimo u stvarnom svijetu i tada daju neizrazita IF-THEN pravila. Kako su neizraziti sustavi zapravo strukturirani numerički esti-

matori, oni omogućavaju bolju analizu sustava pri njegovu radu s nesigurnim ili nepreciznim informacijama ili u uvjetima punim smetnji.

Prilikom razvoja modela fizičkog procesa neke informacije se mogu učiniti kao instinktivna reakcija projektanta fizičkog procesa, radije nego određena kvantitativna informacija. Neizrazita logika omogućava uvođenje intuicije u rješavanje problema. Ona je moćan alat koji omogućava izražavanje informacije na našem vlastitom sredstvu komunikacije: ljudskom jeziku. Po svojoj prirodi ljudski je jezik dvosmislen i neprecizan. Ipak, on je najjači oblik komunikacije i razmjene informacija među ljudima. Usprkos neodređenosti ljudskog jezika, ljudi imaju vrlo malo problema u razumijevanju tuđih ideja i zamisli. Takovo razumijevanje nije moguće postići u komunikaciji s računalom jer ono zahtijeva veliku preciznost prilikom korištenja.

Primjena fuzzy sustava je pokazala da je pomoću njih moguće modelirati kompleksne nelinearne procese do određenog stupnja točnosti. Broj i raznolikost primjena fuzzy sustava je u porastu, od industrijskih procesa preko medicinskih instrumenata do informacijskog sustava i analize odlučivanja.

## 2. NEIZRAZITI (FUZZY) SKUPOVI

Osnovna ideja neizrazitog skupa je vrlo jednostavna. Kod konvencionalnih skupova element ili pripada ili ne pripada tom skupu tj. pripadnost je kruta. Neizraziti skup je uopćenje običnog skupa na način da dozvoljava mjeru pripadnosti (eng. membership degree) za svaki element posebno u nekom rasponu. Tako funkcija pripadnosti neizrazitog skupa pridružuje svakom elementu skupa mjeru pripadnosti.

Teoretski, neizraziti skup  $F$  na promatranom skupu vrijednosti (referentnom skupu)  $X = \{x\}$  je definiran kao funkcija,  $f(x) : X \rightarrow [0, 1]$  kojom se svakom  $x$ -u pridružuje broj iz intervala  $[0, 1]$  prikazujući do koje mjere  $x$  ima atribut  $F$ .  $f(x)$  se zove funkcija pripadnosti ili mjera (stupanj) članstva. Nakon normaliziranja imamo  $f(x) : X \rightarrow [0, 1]$ . Neizrazita logika se tada naziva normalizirana [2]. Funkcija pripadnosti ima najčešće trokutast, trapezoidan ili oblik razlomljene linearne funkcije. Ponekad se koristi i oblik Gauss-ove funkcije. Odabir oblika funkcije pripadnosti je proizvoljan i najčešće ovisi o iskustvu korisnika. Broj funkcija pripadnosti ovisi također o korisniku. Korištenjem više funkcija pripadnosti dobivaju se kvalitetnija rješenja, ali to povećava kompleksnost računanja.

Neizrazita vrijednost varijable može biti iskazana ne samo brojem već i atributom. U tom slučaju neizrazita varijabla se naziva lingvistička varijabla, a njena vrijednost lingvistička vrijednost. Zbog te svoje sposobnosti neizrazita logika se koristi za kvalitativno modeliranje ljudskog razmišljanja. Kao u ljudskom jeziku tako u neizrazitoj logici postoje razni modifikatori za naglašava-

vanje značenja izraza ili općenito neizrazitog skupa. Postoji li neizraziti skup koji se zove "stabilan sustav", tada se korištenjem raznih modifikatora dobije *vrlo stabilan sustav, ne tako stabilan sustav, nešto malo manje stabilan sustav, slabo stabilan sustav* itd. Modifikatori se mogu smatrati operatorima koji djeluju na funkciju pripadnosti neizrazitog skupa kako bi je modificirali. Modifikatori koji se najčešće koriste su:

*koncentratori* (lingvistički: vrlo) kojima je cilj smanjenje vrijednosti onih elemenata neizrazitog skupa koji imaju malu vrijednost funkcije pripadnosti;

*rastezači* (lingvistički: prilično) kojima je cilj rastezanje neizrazitog skupa povećavanjem vrijednosti funkcije pripadnosti onim elementima koji imaju malu vrijednost za veću vrijednost nego onim elementima koji imaju veću vrijednost.

Isto kao i kod konvencionalne teorije skupova i kod teorije neizrazitih skupova koristi se logika "i" (unija), "ili" (presjek) i "ne" (komplement). Bilo koji odnos dva skupa može biti prikazan pomoću tih operatora. U neizrazitoj logici se unija, presjek i komplement izražavaju pomoću funkcije pripadnosti.

Pretpostavimo li da su  $A$  i  $B$  neizraziti skupovi opisani pomoću svojih funkcija pripadnosti  $A(x)$  i  $B(x)$ , tada vrijedi:

$$\text{unija: } A \cup B(x) = A(x) \cup B(x) = \max(A(x), B(x)); \quad (1)$$

$$\text{presjek: } A \cap B(x) = A(x) \cap B(x) = \min(A(x), B(x)); \quad (2)$$

$$\text{komplement: } \neg B(x) = 1 - B(x) \quad (3)$$

Neizrazita relacija  $R$  iz neizrazitog skupa  $A$  prema neizrazitom skupu  $B$  može biti označena funkcijom pripadnosti  $R(x,y)$  koja zadovoljava pravilo kompozicije koje glasi:

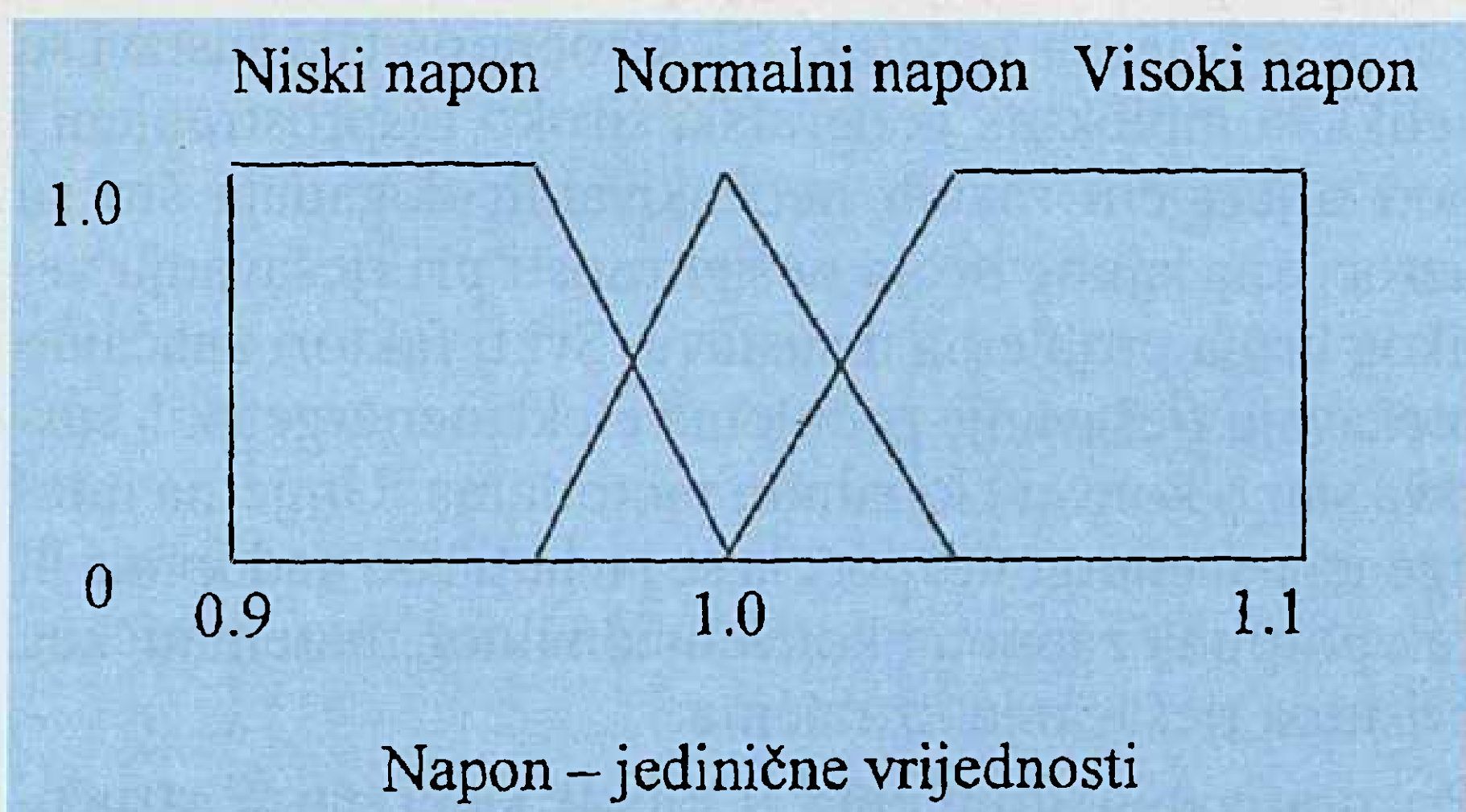
$$B(y) = \max(\min(R(x,y), A(x))) \quad (4)$$

Logika kojom se dobije izrazita (eng. crisp) vrijednost iz neizrazitog ulaza naziva se neizrazita logika. Kako bi se izrazila distribucija istinitosti oko varijable potrebno je definirati relaciju. Na primjer, "malo" je definirano kao distribucija oko vrijednosti  $x$ . To znači da bilo koja vrijednost unutar distribucije može biti označena kao "malo", ali s različitim stupnjem istinitosti (pripadnosti, važnosti).

Teorija neizrazitih skupova ne bavi se kreiranjem distribuirane vjerojatnosti oko vrijednosti varijabli, već se bavi pravilima za računanje kombinirane vjerojatnosti izraza koji sadrže neizrazite varijable.

Jedna od osnovnih karakteristika neizrazite teorije je dopuštanje nesigurnosti pri formulaciji problema. Na slici 1 prikazana su tri neizrazita skupa: jedinične vrijednosti (p. u. – *per unite*) napona na sabirnicama koje su definirane kao niska vrijednost napona, normalna vrijednost napona i visoka vrijednost napona. Pojmovi *niski*, *normalni* i *visoki napon* su neprecizni i subjektivni, ali su ipak način prezentiranja prosudbe vrijednosti koja može biti izražena s određenim stup-

njem sigurnosti. Na slici 1 0% je sigurno da je 0,92 p. u. napon normalna vrijednost i 100% je sigurno da je taj nivo napon nizak [3].



Slika 1. Neizraziti prikaz napona

Ako napon u predloženom primjeru nije "normalan", on je tada ili nizak ili visok. Između 0.95 p. u. i 1.0 p. u., npr. 0.97 p. u., za napon se može reći da je niski sa sigurnošću od 0.6 ili normalan sa sigurnošću 0.4. Skupovi poput ovih nazivaju se komplementarnim skupovima jer su niski i visoki naponi komplementarni normalnom naponu i obrnuto. Prema definiciji stupanj pripadnosti komplementarnih skupova jednak je jedinici, ali skupovi koji se preklapaju ne moraju biti komplementarni budući da mogu sadržavati pripadnost atributa koji nisu komplementarne prirode.

### Dobivanje konačnog rezultata

Dobivanje konačnog rezultata (defuzzyfikacija; engl. defuzzification) jedan je vrlo važan korak. Vrlo često, na osnovi funkcija pripadnosti i raznih pravila moguće je pronaći više od jednog odgovora na zadani problem. Općenito, proces dobivanja konačnog rezultata je proces pronalaska jednog odgovora, iz više vrijednosti funkcije pripadnosti, koji najbolje prezentira izlaz. To je konačna (izrazita) vrijednost izlaznog područja vrijednosti. Dva načina koja su najčešće u uporabi za dobivanje te vrijednosti su

1) *maksimiziranje*, koja uzima maksimalnu vrijednost mogućih izlaza

$a = \max_{x_i \in X} \mu_A(x_i)$  gdje je  $a$  vrijednost koja najbolje izražava izlaznu vrijednost, a  $X$  je skup referentnih vrijednosti

- Postoji li više maksimalnih vrijednosti, najčešće se uzima njihova srednja vrijednost.

2) *centroidna metoda*, koja pronalazi centar mase izlaznog signala što se može izraziti kao

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)} \quad (5)$$

gdje je  $a$  vrijednost koja najbolje izražava izlaznu vrijednost. Ovdje se zapravo računa moment funkcije pripadnosti neizrazitog skupa koji treba podijeliti s površinom funkcije pripadnosti.

Postoji još i metoda koja uzima *težinski prosjek*, tj. prosjek težinskih faktora mogućih izlaza.

### Neizrazitost i vjerojatnost

Stupanj pripadnosti nije vjerojatnost, ali ga se često zamjenjuje s vjerojatnošću. Vjerojatnost je mjera nečega što se može desiti ili ne, a stupanj pripadnosti neizrazitog skupa pokazuje mjeru do kojeg će se nešto desiti ili će neki uvjet postojati. Onome tko se prvi put susretne s teorijom neizrazitih skupova može se učiniti kako je to samo kamufliran oblik teorije vjerojatnosti. Teorija neizrazitih skupova nam omogućava prezentaciju nesigurnosti. Teorija vjerojatnosti je do sada bila osnovni alat opisa nesigurnosti u matematičkim modelima. Kao rezultat toga, sve nesigurnosti su imale karakteristiku slučajne nesigurnosti. Osnova statističke analize bazira se na teoriji vjerojatnosti ili slučajnim stacionarnim procesima. Većina rezultata eksperimenata sadržava i slučajne (tipičan primjer je smetnja) i ne-slučajne procese. Bilo koja klasa slučajnih stacionarnih procesa pokazuje sljedeće tri karakteristike:

- prostor uzoraka na kojem je definiran proces ne može se mijenjati od eksperimenta do eksperimenta, što znači da se i prostor rezultata ne može mijenjati;
- frekvencija slučajne pojave, ili vjerojatnost, nekog događaja unutar prostora uzoraka je konstantna i ne može se mijenjati od eksperimenta do eksperimenta;
- rezultati se moraju moći ponoviti od eksperimenta do eksperimenta. Rezultat jednog pokusa ne utječe na rezultate prijašnjih niti budućih pokusa.

Neizraziti skupovi nemaju takve karakteristike.

Rezultati nekog određenog slučajnog procesa su strogo pitanje slučaja; a predskazivanje slijeda događaja nije moguće. Za slučajni proces moguće je dati samo precizan opis njegove dugoročne srednje vrijednosti.

Nije sva nesigurnost slučajna. Neki oblici nesigurnosti nisu slučajni i zbog toga nisu prikladni za opis pomoću teorije vjerojatnosti. Čak se može reći da velika većina nesigurnosti povezanih s kompleksnim sustavima zapravo nije slučajnog karaktera. Teorija neizrazitih skupova je odličan alat za opis takvih oblika nesigurnosti povezanih s neodređenošću, s nepreciznošću, i/ili s nedostatkom podataka u svezi s određenim promatranim problemom.

Osnovna razlika između neizrazite logike i vjerojatnosti je korištenje **neizrazitosti** za izražavanje determinističke vjerojatnosti dok se **vjerojatnost** koristi kod nedeterminističkih slučajeva, stohastičkih događaja.

U slučajevima u kojima je preciznost jasno definirana, bolje je koristiti precizne algoritme nego neizrazite sustave. Zahtijevana preciznost dovodi do većih troškova i duljeg vremena razvoja i proizvodnje modela ili proizvoda. U sustavima koji nisu jako mali, troškovi su

proporcionalni preciznosti: veća preciznost zahtijeva i veće troškove. Inženjer koji počne koristiti neizrazitu logiku mora biti svjestan da se mora tolerirati nepreciznost. Tražena velika preciznost rezultira problemom gubitka određene gipkosti pristupa problemu. Neizraziti sustavi rješavaju probleme usredotočivši se na njihovu nepreciznost. Situacije pri kojima je prikladno formulirati probleme u sustavu pomoću neizrazitih skupova su:

- u procesima koji uključuju interakciju (ljudsko opisanje ili intuitivno razmišljanje);
- kada je raspoloživ ekspert koji može odrediti pravila koja stoje iza ponašanja sustava i neizrazite skupove koji predstavljaju karakteristike svake varijable;
- kada matematički model sustava ne postoji, ili postoji ali je prekomplikiran za programiranje ili je previše kompleksan da bi bio primjenjiv za rad u stvarnom vremenu ili je memorijski vrlo zahtjevan;
- u procesima s kontinuiranim promjenama (jedna ili više varijabli su kontinuirane) koje nije lako podijeliti na manje diskretnih segmenata;
- kada se mora uzeti u obzir visok stupanj smetnji ili se ne mogu koristiti skupi senzori.

Mnoga se područja mogu "fuzzyficirati" pa tako možemo imati fuzzy neuronske mreže, fuzzy prepoznavanje uzoraka, fuzzy matematičko programiranje. Kod korištenja neizrazitosti prednost je veća općenitost, veća moć izražavanja i poboljšana sposobnost modeliranja problema stvarnog svijeta.

### Primjena neizrazitih sustava

U mnogim područjima neizrazitost je istisnuo konvencionalne načine rješavanja problema. Najčešće se koristi u kontroli raznih sustava, prepoznavanje uzoraka (slike, audio, procesiranje signala), kod kvantitativne analize (operativna istraživanja, upravljanje), pri zaključivanju (ekspertni sustavi za dijagnozu; inteligentni roboti; softverski inženjering), i pri radu s podacima (baze podataka).

Sustav neizrazite logike je osnovni tip aplikacija temeljenih na teoriji neizrazitih skupa. Kao dodatak postoje još i :

- neizrazita nelinearna simulacija;
- neizrazito odlučivanje;
- neizrazita klasifikacija;
- neizrazito prepoznavanje uzoraka;
- neizrazito programiranje.

### 3. PRIMJENA NEIZRAZITE (FUZZY) TEORIJE U ELEKTROENERGETICI

Teorija neizrazitih skupa je uvedena u rješavanje problema u elektroenergetici prvi put sedamdesetih godina, ali se tek dvadesetak godina kasnije pojavio veći interes za njezinu primjenu. Rješavanje problema elektroenergetskog sustava, njegovog planiranja i

upravljanja pomoću konvencionalnih analitičkih metoda nailazi na teškoće zbog pretpostavki bez kojih te metode ne bi radile, a koje ograničavaju problem. Čak uz te pretpostavke, rješavanje problema velikih sustava vrlo je zahtjevan zadatak. Elektroenergetski sustavi su veliki, kompleksni, geografski široko rasprostranjeni i pod utjecajem raznih neočekivanih događaja što su uzroci značajnog broja nesigurnosti pri rješavanju velikog broja problema u sustavu. Svi ti faktori značajno otežavaju rješavanje problema elektroenergetskih sustava samo konvencionalnim metodama. Umjetna inteligencija u energetici počela se javljati kao nadopuna ili čak potpuna zamjena konvencionalnog matematičkog pristupa rješavanju problema.

Pri opisivanju problema u elektroenergetici, stručnjak/ekspert svoje empiričko znanje izražava dvosmislenim ili fuzzy opisima. U tom slučaju klasična Boelova algebra nije od velike pomoći, pa se neizrazita logika nameće kao prirodni odabir.

Dosadašnja postignuća u primjeni teorije neizrazitih skupova u elektroenergetici su obećavajuća, iako njezina primjena nije široko prihvaćena. Razlozi njezine smanjene prisutnosti na tom polju su:

- nerazumijevanje koncepta;
- prenaplašene izjave nekih stručnjaka (istraživača);
- nepostojanje instaliranih, implementiranih i raspoloživih sustava;
- (njezin) status "nove" i eksperimentalne teorije.

Neočekivani događaji i nesigurnost njihove pojave prikazuju se pomoću vjerojatnosti. Priroda nekih faktora nesigurnosti je doista neizrazita pa ih je teško opisati probabilistički. U elektroenergetici postoje problemi koji imaju kontradiktorne zahtjeve, primjerice ekonomičnost nasuprot sigurnosti ili maksimalno zadovoljenje potrošača električnom energijom nasuprot minimalnim troškovima proizvodnje. Tradicionalni pristup rješavanju ovakvih problema sastoji se u korištenju težinskih faktora dok se korištenjem neizrazitih skupova dobivaju bolji rezultati i može se udovoljiti suprotstavljenim zahtjevima postavljenim u sustavu/problemu. Teorija neizrazitih skupova u odnosu na tradicionalne metode ima sljedeće prednosti:

- omogućava alternative za mnoge attribute odabranih ciljeva;
- ukida suprotstavljenost ciljeva pridajući željene težine svakom pojedinom cilju;
- može se koristiti dvosmislenošću dijagnostike koja uključuje i simptome i uzroke. [1]

Komponente elektroenergetskog sustava imaju svoja fizikalna i radna ograničenja koja su najčešće iskazana nejednakostima pri matematičkoj formulaciji problema. Mala narušavanja tih ograničenja (praktično još uvijek prihvatljiva) znatno opterećuju rad upravljačkog računala i smanjuju njegovu efikasnost pa čak mogu i spriječiti pronalaženje mogućeg rješenja. U praksi su takva mala odstupanja od zadanih ograničenja dozvo-

ljena. To znači, da ustvari nema čvrstih ograničenja i da te granice mogu biti mekane (neizrazite). Taj problem se tradicionalno rješava ili modificiranjem funkcije cilja ili provođenjem iterativnog postupka. Implementacija "fuzzy-a" olakšava taj problem zato što su u prirodi neizrazitih skupova mekane granice.

### Nesigurnost i nepreciznost

U inženjerskim problemima postoje i nesigurnosti i nepreciznosti. Općenito, kompleksnost nastaje zbog nesigurnosti izražene dvosmislenostima. Primjeri nekih nesigurnosti i nepreciznosti u elektroenergetskom sustavu su sljedeći:

- promjena uvjeta rada sustava, poput promjene opterećenja ili promjene proizvodnje, te promjena topologije sustava;
- razne karakteristike komponenata sustava;
- različiti uvjeti poremećaja ili kvarova, određivanje početka kvara, lokaciju kvara, tip kvara;
- nepreciznosti uzrokovane naponskim i strujnim oscilacijama ili SCADA mjerenjima i procjenama stanja, te smetnje uzrokovane elektromagnetskim inferencijama;
- nesigurnost zbog tržišta električne energije ili deregulacije;
- nepreciznost informacija koje daje inženjer koji se bavi planiranjem, upravljanjem ili kontrolom elektroenergetskog sustava.

Postoje mnogi pojmovi u elektroenergetskom sustavu povezani s navedenim nesigurnostima. Primjerice, stabilnost elektroenergetskog sustava je vrlo važno pitanje. Sustav ili je ili nije stabilan; tu ne postoji nikakva "fuzzy" podjela. Ako je sustav u stanju nestabilnosti, ona se može opisati kao mala (lagana), dinamička, tranzijentna ili naponska, iz čega slijedi da je pojam (ne)stabilnost prilično "fuzzy".

### Područja primjene neizrazitih skupova u elektroenergetici

#### *Planiranje razvoja*

Vrlo važno mjesto pri donošenju odluka o razvoju sustava imaju odluke koje su bazirane na iskustvu i mišljenju eksperata. Vrlo je teško deterministički odrediti faktore koji imaju presudan utjecaj na takvu odluku, poput iznosa potrošnje potrošača, lokacije novih proizvodnih postrojenja, utjecaj na okolinu i sl.. Osim toga su i ciljevi i ograničenja planiranja razvoja elektroenergetskog sustava nesigurni ili su međusobno konkurentni. Proces razvoja elektroenergetskog sustava u velikoj mjeri je kvalitativan pa je korištenje koncepta neizrazitih skupova kod tog procesa intuitivno.

#### *Dugoročno-srednjoročno planiranje*

U grupu dugoročno-srednjoročnih planova spadaju godišnji raspored održavanja, sezonski raspored dobave goriva i srednjoročni raspored proizvodnje. Te

planove karakterizira mnoštvo nesigurnosti i mogućnost raznih komplikacija zbog čega je pri tome korištenje konvencionalnih metoda optimizacije neefikasno i komplicirano. Prisutna ograničenja lakše se prikazuju mekano nego kruto. Kombinacije konvencionalnih i neizrazitih metoda predstavljaju najbolji način rješavanja problema.

#### *Procjena dinamičke sigurnosti*

Procjena dinamičke sigurnosti jedna je od najvažnijih funkcija u radu elektroenergetskog sustava. Nivo sigurnosti sustava varira u skladu s inženjersko-ekonomskim razmatranjima, pouzdanošću zaštitnih releja i kvalitetom korištenih modela. Pri korištenju konvencionalne binarne logike, a zbog mogućnosti pojavljivanja različitih pogrešaka, ne može se sa sigurnošću reći je li sustav siguran ili ne. Današnja je praksa da se rade "off-line" razmatranja stanja sustava za njegova različita stanja i konfiguracije mreže. Kod analize u realnom vremenu (on-line) primijenjeni rezultati "off-line" proračuna nisu direktno raspoloživi, ali operateri se oslanjaju na svoje vlastite procjene i znanja prikupljena u "off-line" studijama i iskustvu prikupljenom tijekom dužeg vremenskog razdoblja. Teorija neizrazitih skupova može se koristiti pri izradi ekspertnog sustava za procjenu dinamičke sigurnosti baziranog na empiričkom znanju operatera.

#### *Prognoza opterećenja*

Na opterećenje u elektroenergetskom sustavu utječe mnogo faktora kao što su vrijeme, ekonomske i socijalne aktivnosti, te različite komponente opterećenja (kućanstvo, industrija, trgovina itd.). Vrlo je teško dobiti kvalitetnu prognozu samo iz analize povijesnih podataka o opterećenju. Relacije između opterećenja i nezavisnih varijabli su kompleksne te nije uvijek moguće podesiti krivulju opterećenja koristeći statističke modele. I tu je ekspertni pristup rješavanju problema dao bolje rezultate nego konvencionalne metode. Korištenje neizrazite metodologije pokazuje se prikladno zbog numeričkog aspekta i nesigurnosti prognoze opterećenja.

#### *Regulatori temeljeni na neizrazitoj logici*

Najpopularnije područje korištenja neizrazitih skupova je za rješavanje problema upravljanja elektroenergetskim sustavom. Pri tradicionalnom projektiranju regulatora prvo se konstruirao model sustava čijom se analizom potom dolazilo do zakona upravljanja. Zbog nelinearnog ponašanja karakteristika sustava potrebno je linearizirati njegov model; potom dobiveni linearni regulatori koriste se za upravljanje nelinearnim sustavom. Jedna od prednosti korištenja neizrazite logike u odnosu na ostale regulatore bazirane na znanju leži u činjenici da su pravila upotrebljena za "fuzzy" regulator interpolativne naravi. Najčešće korišteni neizraziti regulatori služe za

reguliranje uzbude. Pravilo preklapanja kod neizrazitih skupova osigurava prijelaz između upravljačkih akcija različitih pravila. Zbog te mogućnosti interpolacije, regulatori temeljeni na neizrazitoj logici zahtijevaju mnogo manje pravila nego drugi regulatori temeljeni na znanju. U posljednje vrijeme sve se više obraća pozornost na neizrazite regulatore jer su neovisni o modelu, pokazuju veliku robustnost i prilagodljivi su.

### Dijagnoza

Eksperti igraju glavnu ulogu u rješavanju problema i analizi pogrešaka u radu sustava. U elektroenergetskim sustavim potrebno je dijagnosticirati krivi rad opreme jednako kao i poremećaje u radu sustava. Informacije potrebne za dijagnozu kvarova opreme su veći dio vremena nepotpune. Uvjeti koji uzrokuju pogreške mogu se mijenjati s vremenom. Pri otkrivanju i analizi kvarova ekspertni sustavi su se pokazali korisnima jer je tu nužno korištenje subjektivnih pretpostavki baziranih na iskustvu. Neizraziti skupovi se mogu koristiti pri prezentaciji znanja i pri gradnji ekspertnih sustava.

### Neizrazita logika pri upravljanju sustavom

Neizrazito upravljanje sustavom naziva se upravljanje sustavom koje se temelji na uporabi neizrazitih skupova za modeliranje upravljačkih odluka. Neizraziti skupovi povezani su u pravila kako bi se predočilo znanje koje se treba koristiti pri procesu odlučivanja. Takav skup pravila poznat je pod imenom neizraziti ekspertni sustav. Osnovna ideja se sastoji u pronalaženju načina korištenja ljudskog znanja i iskustva pri projektiranju automatskog upravljanja sustavom. Iz skupa lingvističkih pravila koje opisuju operaterovu strategiju upravljanja konstruira se upravljački algoritam u kojem su riječi definirane kao neizraziti skupovi. Osnovna prednost ovakvog pristupa je mogućnost implementiranja praktičnih iskustava, intuicije i heuristike te činjenica da nije potreban stvarni model procesa.

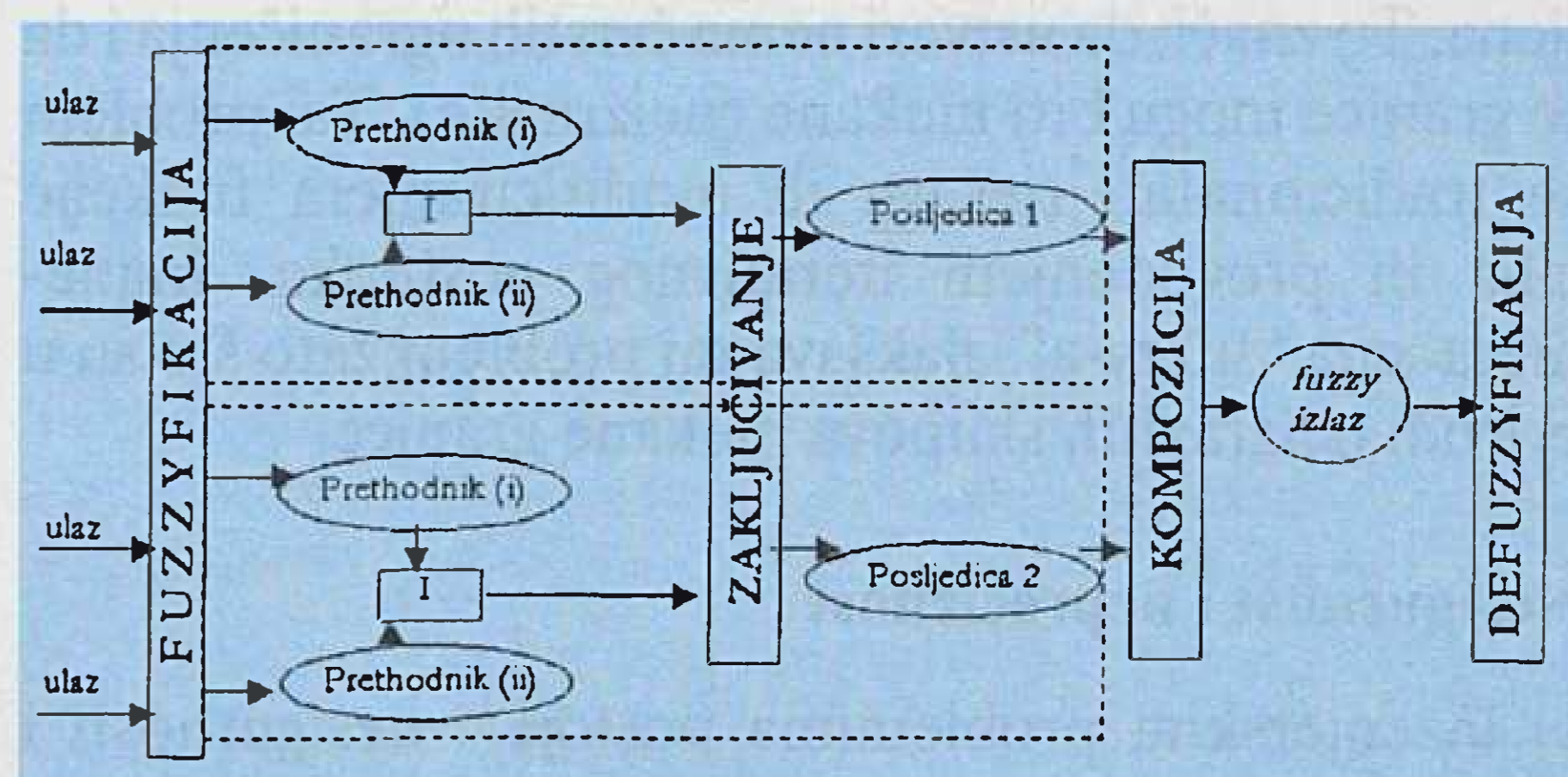
Prednosti neizrazitog ekspertnog sustava pred klasičnim ekspertnim sustavom su sljedeće:

- neizraziti skupovi vrlo dobro predstavljaju jezične pojmove koje koriste eksperti; kako znanje obuhvaćeno IF-THEN pravilima najčešće nije samo istina ili laž, neizraziti skupovi omogućavaju prezentaciju znanja pomoću manjeg broja pravila;
- neizrazita pravila mogu biti uključena ili isključena;
- moguće je dobiti glatku korespondenciju između ulaza i izlaza.

Neizraziti ekspertni sustav izvršava niz pravila ili kondicionalnih izjava u obliku

IF  $x$  je malo AND  $y$  je visoko THEN  $z$  je srednje

Kako su ulazi u neizraziti sustav upravljanja izrazite vrijednosti, a i na izlazu su tražene izrazite vrijednosti, takav sustav radi u četiri koraka prikazana na slici 2 [3]:



Slika 2.

- “fuzzyfikacija”: od vrijednosti varijable na ulazu (koja nije fuzzy) i njene funkcije pripadnosti dobiva se stupanj istinitosti premisa;
- zaključivanje: računa se istinita vrijednost za svaku premisu u pravilu i pridružuje se zaključnom dijelu pravila;
- kompozicija: svi neizraziti podskupovi (funkcije pripadnosti) pridružene svakoj izlaznoj varijabli združuju se kako bi stvorili jedinstven podskup ili funkciju pripadnosti za svaku izlaznu varijablu;
- “defuzzyfikacija”: konvertira neizraziti skup u izrazite vrijednosti.

### Primjena u elektroenergetskim sustavima

Neizrazite metode mogu naći raznoliku i raznovrsnu primjenu u elektroenergetskim sustavima, ali do sada su zabilježeni sljedeći slučajevi njihovog korištenja u svrhe:

- modeliranja i upravljanja, te kontrole stabilnosti sustava;
- prepoznavanja uzoraka i predviđanja, procjene sigurnosti sustava, dijagnoze kvarova, prognoze opterećenja i zaštite sustava;
- optimiranja i planiranja sustava, te kod izbora termoagregata i ekonomične raspodjele opterećenja.

Iako je većina do sada objavljenih radova u fazi istraživanja i razvoja, testiranja na stvarnim sustavima pokazuju obećavajuće rezultate. U tablici 1 prikazane su primjene neizrazite logike u elektroenergetskom sustavu [3].

Tablica 1

Područje	Problemi
Planiranje	planiranje, pouzdanost
Proizvodnja	procjena stabilnosti, prognoza opterećenja, upravljanje opterećenjem, izbor termoagregata, ekonomična raspodjela opterećenja, procjena stanja, kontrola napona
Upravljanje	stabilizatori sustava, upravljanje generatorima, upravljanje frekvencijom
Zaštita i dijagnoza	mreža, strojevi, zaštita prijenosnih linija, lociranje kvara

## LITERATURA

- [1] "Electric Power Application in Power Systems" edited by Tharam S. Dillon, Dagmar Neibur, CRL Publishing
- [2] "Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic", Stamatios V. Kartalopoulos, IEEE Press
- [3] "Artificial Intelligence Technique in Power Systems" edited by Kevin Warwick, Arthur Ekwve and Raj Aggarwal IEE Power Engineering Series 22

## FUZZY LOGIC AND ITS APPLICATION IN ELECTRIC POWER SECTOR OR SYSTEM

Electric power systems are one of the most complex in our civilisation. Aside from many factors describing the operation of the system there are different external influences that more or less influence the behaviour of the observed system. Laws describing these systems are often neither linear nor finally defined. Because of its complexity, sometimes even non-defined as well as for the need of expert knowledge in a certain field fuzzy logic has found application in solving problems of an electric power sector. Fuzzy logic with its application of fuzzy variables can catch different non-determination and be an auxiliary tool to engineers in many parts of an electric power company.

## VERWICKELTE (FUZZY) LOGIK UND IHRE ANWENDUNG IN DER ELEKTROTECHNIK

Elektroenergetische Systeme gehören den am meisten zusammengesetzten Systemen unserer Zivilisation. Zu den zahlreichen Einflussgrößen, mit deren Hilfe das Wirken dieses Systems beschrieben werden kann, bestehen auch verschiedene äussere Einflüsse, welche mehr oder weniger

das Verhalten des betrachteten Systems mitbestimmen. Die in diesen Systemen herrschenden Gesetzmässigkeiten sind oft nicht linear und nicht ausführlich bestimmt. Der Verwickeltheit, manchmal auch der Unbestimmtheit wegen, sowohl auch wegen der Notwendigkeit der Spezialkenntnisse von Sachkundigen eines Gebietes, hat diese Art der Logik (engl. Termin "Fuzzy") beim Lösen der Fragen in der Elektroenergetik Anwendung gefunden. Durch ihre Eigenart der Nutzung verwickelter Abhängigkeiten kann diese Logik verschiedene Unbestimmtheiten erfassen und als Hilfswerkzeug den Ingenieuren in vielen Zweigen der Elektrizitätswirtschaft dienen.

Naslov pisca:

**Mr. sc. Sonja Tomašić-Škevin**  
**Hrvatska elektroprivreda d.d.**  
**Ulica grada Vukovara 37**  
**10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:  
2000-11-23.