Primjena neizrazitih sustava za inteligentnu obradu događaja pri određivanju primarnog kvara u prijenosnoj mreži

Krancpiler, Damir

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:200:539798

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij

PRIMJENA NEIZRAZITIH SUSTAVA ZA INTELIGENTNU OBRADU DOGAĐAJA PRI ODREĐIVANJU PRIMARNOG KVARA U PRIJENOSNOJ MREŽI

Diplomski rad

Damir Krancpiler

Osijek, 2018.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 20.09.2018.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Damir Krancpiler
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 894, 28.09.2017.
OIB studenta:	00293159783
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Sumentor:	Dr.sc. Ivica Petrović
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Barić
Član Povjerenstva:	Dr.sc. Ivica Petrović
Naslov diplomskog rada:	Primjena neizrazitih sustava za inteligentnu obradu događaja pri određivanju primarnog kvara u prijenosnoj mreži
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno odrediti mogućnost primjene neizrazitih sustava pri određivanju primarnog kvara u prijenosnoj mreži koji će biti zasnovan na sustavu SCADA i to na bazi mjerenja, djelovanja zaštite, položaja i stanja prekidača. Potrebno je modelirati sustav funkcionalnog djelovanja pomoću funkcija pripadnosti neizrazitim skupovima. Za ulazne podatke dijagnostičkog sustava treba koristi podatke o djelovanju zaštite i položaja ili stanja prekidača, te podacima o mjerenju napona i struja prije i poslije kvara iz sustava. Sumentor: dr. sc. Ivica Petrović, HEP Osijek
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	20.09.2018.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTIRADA

Osijek, 04.10.2018.

Ime i prezime studenta:	Damir Krancpiler
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 894, 28.09.2017.
Ephorus podudaranje [%]:	5%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Primjena neizrazitih sustava za inteligentnu obradu događaja pri određivanju primarnog kvara u prijenosnoj mreži**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš

i sumentora Dr.sc. Ivica Petrović

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD 2

1.1. Diplomski zadatak 2

2. NEIZRAZITA LOGIKA 3

2.1. Neizraziti skup i funkcija pripadnosti 4

2.2. Neizrazita pravila 6

2.3. Primjena neizrazite logike 8

3. PRIJENOSNE MREŽE 10

3.1. Električne energetske mreže 10

3.2. Tipovi električnih mreža 12

3.3. Pogonska stanja trofaznih električnih mreža 17

4.4. Kratki spoj u prijenosnoj mreži 19

4. SIMULACIJA NEIZRAZITOG SUSTAVA ZA ODREĐIVANJE PRIMARNOG KVARA U PRIJENOSNOJ MREŽI 22

4.1. Sinteza neizrazitog regulatora 23

4.2. Izrada modela neizrazitog sustava u MATLAB-u 29

4.3. Analiza podataka iz liste događaja i rješenja dobivenih simulacijom 38

5. ZAKLJUČAK 46

SAŽETAK 49

ABSTRACT 49

ŽIVOTOPIS 50

PRILOZI 51

1. UVOD

U ovome diplomskom radu je potrebno teoretski proučiti neizrazitu logiku i prijenosne mreže te upotrijebiti teoretsko znanje kako bi se mogao simulirati neizraziti sustav pomoću kojega se može otkriti primarni kvar u mreži na osnovu dobivenih podataka o kvaru u Ernestinovu iz 2015. godine.

U drugome poglavlju će ukratko biti teorijski razmotrena neizrazita logika, te definirano kako sastaviti i od čega se sastoji neizraziti sustav.

U trećem poglavlju su ukratko opisani osnovni pojmovi i tipovi električnih mreža, zahtjevi za kvalitetom električne energije te je opisana pojava kratkog spoja u prijenosnim mrežama.

U četvrtom poglavlju se ulazi u detalje vezane uz sve podatke potrebne za simulaciju traženog neizrazitog sustava. Definiraju se svi parametri od kojih se sastoji traženi neizraziti sustav, analiziraju se dobiveni podatci i podatci iz simulacije te se zaključuje za što je pogodan programski paket u kojemu je simulacija provedena.

U petom poglavlju se nalazi zaključak.

1.1. Diplomski zadatak

U radu je potrebno odrediti mogućnost primjene neizrazitih sustava pri određivanju primarnog kvara u prijenosnoj mreži koji će biti zasnovan na sustavu SCADA i to na bazi mjerenja, djelovanja zaštite, položaja i stanja prekidača. Potrebno je modelirati sustav funkcionalnog djelovanja pomoću funkcija pripadnosti neizrazitim skupovima. Za ulazne podatke dijagnostičkog sustava treba koristi podatke o djelovanju zaštite i položaja ili stanja prekidača, te podacima o mjerenju napona i struja prije i poslije kvara iz sustava.

2. NEIZRAZITA LOGIKA

Neizrazita logika (eng. fuzzy logic) se prvi puta spominje 1965. godine u radu profesora Lotfi A. Zadeha [1] gdje je postavljena i teorija o neizrazitim skupovima. 1978. godine je Danska tvrtka FLSmidth postigla upravljanje peći za sušenje, što je prva primjena neizrazite logike u industriji. Porast i zanimanje za neizrazitu logiku je bilo izraženo u Japanu tijekom osamdesetih godina gdje su se provodila i teoretska i praktična istraživanja, dok je krajem osamdesetih značajno porasla primjena neizrazite logike, kako u svakidašnjim produktima poput kamera ili strojeva za pranje rublja, tako i u industrijskoj primjeni poput ventilacijskih sistema, ili sistema za obradu vode. U današnjim vremenima se neizrazita logika primjenjuje u serijskoj i kontinuiranoj proizvodnji te u sustavima automatizacije kako bi se sistematiziralo empirijsko znanje s kojime je teško upravljati. Nalazi se i primjena u automatizaciji procesa kao što je pokretanje i podešavanje parametara budući da je prikladno implementirati neizrazitu logiku u aplikacije u realnom vremenu i omogućeno je prenošenje znanja od operatora i dizajnera u dinamične sustave upravljanja.

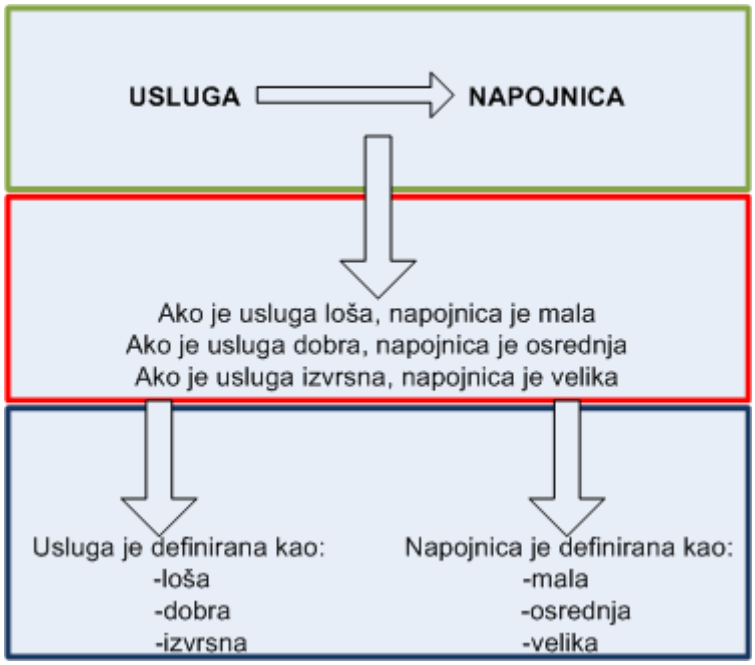
Neizrazita logika se temelji na nekoliko razmatranja:

- Ljudsko biće nema perfektno znanje o bilo kojoj situaciji što bi značilo da može biti nesigurno ili neprecizno
- Za potrebe rješavanja problema, ljudi koriste približne vrijednosti, odnosno podatke. Često preciznost nije potrebna; na primjer, da bi izabrao posao, čovjek može razmatrati plaću, smještaj, vrijeme obavljanja posla i slično, ali mu nije potrebno potpuno precizno znanje o tim informacijama
- Češće je korisnije modelirati ponašanje operatora koji upravlja sistemom nego modeliranje samoga sistema
- Operacije ili procesi se mogu opisati kvalitativno s pripadajućim kvantitetnim prijevodom, radi lakšeg razumijevanja samog operatera

Primjenom neizrazite logike se može zamijeniti kvalificirani operater za regulaciju procesa, za koje nije postojalo prikladnih konvencionalnih rješenja.

Glavna svrha neizrazite logike bi bilo povezivanje ulaza i izlaza. Glavno sredstvo za postizanje navedenoga bi bilo korištenje *if-then* (ako-tada) izjava, odnosno pravila. Pravila se

odnose na varijable i na pridjeve koji opisuju te varijable. Prije nego što se napravi sustav koji tumači pravila prvo je potrebno definirati sve pojmove ili varijable koje se planiraju koristiti i pridjeve koji ih opisuju; na primjer, da bi se za određeni objekt moglo reći da je lijep bilo bi potrebno razmotriti izgled u odnosu na druge objekte istoga tipa, ali bi također bilo potrebno i definirati značenje, odnosno poimanje ljepote. Na slici 2.1. je moguće vidjeti primjer neizrazitog zaključivanja gdje su u zelenom pravokutniku označeni objekti, odnosno ulaz (usluga) i izlaz (napojnica), u crvenom pravokutniku su postavljena pravila za objekte i u plavom pravokutniku su definirani pridjevi za objekte uz pomoć kojih se postavljaju pravila.



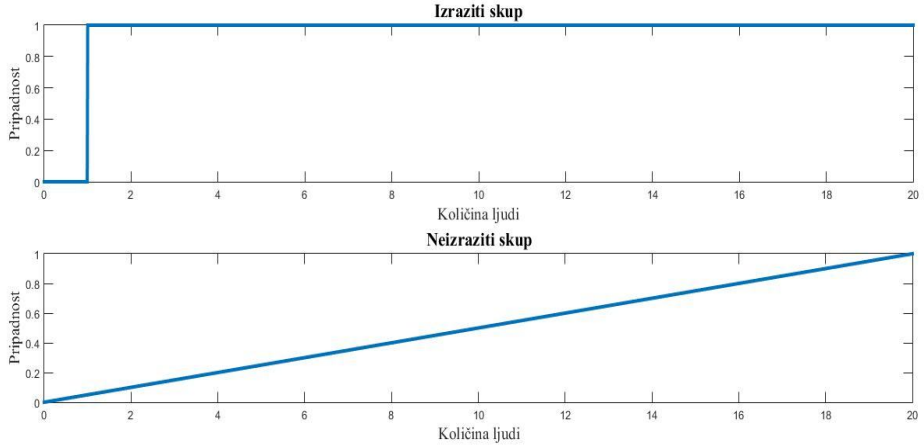
Slika 2.1. Primjer neizrazitog zaključivanja povezanošću napojnice i dobivene usluge

Neizrazita inferencija, ili neizrazito zaključivanje, bi bila metoda koja tumači vrijednosti ulaza i, s obzirom na zadana pravila, pridodaje vrijednost izlazu.

2.1. Neizraziti skup i funkcija pripadnosti

U teoriji skupova, skup je definiran kao kolekcija objekata koje dijele nekakvo zajedničko svojstvo. Objekt ili pripada ili ne pripada nekakvom skupu. Ako bi se pripadnost objekta x nekome skupu A željela izraziti funkcijski, funkcija pripadnosti bi imala samo dvije vrijednosti; 0 (kada je $x \notin$ A) i 1 (kada je $x \in$ A). Takvi skupovi se često nazivaju izraziti [2].

U određenim situacijama, pripadnost objekta skupu nije prikladno grubo podijeliti. Za primjer se može uzeti *količina ljudi* na nekom događanju. U ovoj situaciji bi funkcija pripadnosti za izraziti skup imala iznos 1 kada bi na događanju bila minimalno jedna osoba, a iznos 0 bi bio kada na tome događanju ne bi bilo posjetilaca. Kada bi se grupirala pripadnost s pogleda teorije neizrazitih skupova, pripadnost bi bila stupnjevita, gdje bi 0 također označavala da nema ljudi, a 1 bi označavalo popunjeni kapacitet posjetilaca. Može se uzeti za primjer da u izrazitom sustavu vrijednost 1, odnosno popunjeni kapacitet posjetilaca na događaju, čini 20 ljudi; funkcije pripadnosti za ovakav slučaj, za izraziti i neizraziti sustav, se mogu vidjeti na slici 2.2.



Slika 2.2. Funkcije pripadnosti za izraziti i neizraziti skup *količina ljudi*

Vrijednosti za objekt *broj ljudi* su u ovom slučaju pridjevi koji označavaju koliko ljudi se okupilo na događaju (ovisno o potrebama, mogu biti podjele na *nezamjetan, dovoljan, prevelik...*).

Pretvaranje stvarne vrijednosti (broja ljudi) u neizrazitu vrijednost se naziva fazifikacija (engl. fuzzification). Fazifikacija se sastoji od određivanja stupnja pripadnosti vrijednosti ili objekta neizrazitom skupu. Prema gornjem primjeru, kada ulaz ima vrijednost 8 (*broj ljudi*), stupanj pripadnosti bi imao iznos 0,4 što je rezultat fazifikacije.

Način određivanja funkcije pripadnosti ovisi o karakteru podataka ili objekata koji se grupiraju (brojivi, nebrojivi, diskretni ili kontinuirani), odnosno tipu domene (područja definicije) nad kojim se zadaju. Funkcije pripadnosti se zadaju preko funkcijskog izraza kada su brojive i kontinuirane, dok se za diskretne domene svakom podatku ili objektu pridružuje stupanj pripadnosti.

Operatori za neizrazite sustave se koriste za pisanje logičkih kombinacija između neizrazitih pojmova. Operatori za klasične, izrazite sustave su unija, presjek i komplement, što bi bilo slično operacijama disjunkcije, konjunkcije i negacije u binarnoj logici. Logični operator koji odgovara disjunkciji je "ILI", za konjunkciju je "I", a za negaciju "NE".

2.2. Neizrazita pravila

Svrha postavljanja neizrazitih pravila je formaliziranje i izvršavanje ljudske metode rasuđivanja. Kao takva, pravila bi se mogla klasificirati kao umjetna inteligencija. Pravila su obično postavljena kao: ako (engl. *If*) "*iskaz*" tada (eng. *Then*) „*zaključak*". Kada bi na slici 2.2. se uzelo da je popunjen prostor s 20 ljudi, moglo bi se postaviti pravilo ako "$y \geq 1$" tada "*nema daljnjeg puštanja ljudi*". Pravilo bi dakle bilo da preko 20 ljudi ne smije biti pušteno u taj prostor. Pravila se zasnivaju na ljudskoj stručnosti, jednako kao i pravila izrazitih skupova. Bez obzira na isti izvor pravila, postoji razlika u karakteristikama i procesiranju ljudskog znanja. U tablici 2.1. se mogu vidjeti razlike između osnova izrazitih i neizrazitih osnova za pravila.

Tablica 2.1. Osnova neizrazitih i izrazitih pravila

Osnova neizrazitih pravila	**Osnova izrazitih pravila**
Mala količina pravila	Velika količina pravila
Stupnjevito razlučivanje	Booleansko razlučivanje (istina/laž(1/0))
Ulančavanje je moguće ali se rijetko koristi	Pravila su često ulančana
Pravila razmatrana paralelno	Pravila razmatrana sekvencijalno
Interpolacija između pravila koja se mogu osporiti	Bez interpolacije i osporavanja

Mehanizmi za procjenjivanje se koriste kako bi se odredile izlazne vrijednosti uspoređivanjem ulaznih vrijednosti sa zadanim pravilima. Osnovni princip je uzimanje ulaznih vrijednosti, fazifikacija, usporedba tih vrijednosti s pravilima, defazifikacija i dobivanje izlazne veličine. Izlazna veličina se dobiva zaključivanjem, na primjer, kada bi imali ulaznu veličinu *količina vode*, izlaznu veličinu bi formirali po pravilima i uputama; neka izlazna veličina bude neka

otvaranje ventila za povećanje protoka vode. Ovisno o količini vode, odnosno o stupnju pripadnosti ulazne veličine, se formira izlazna veličina u smislu otvaranja ventila, s tim da je postotak otvorenosti ventila definiran pravilima i uputama. Kada postoji više ulaznih veličina, obično se zaključivanje provodi s logičkim operatorom I (npr. ako je struja puno veća od nazivne i napon puno manji od nazivne, isklopi zaštitu). ILI operator nije prikladan budući da unosi nesigurnost u odluku.

Najčešći mehanizam za procjenjivanje je Mamdanijev mehanizam. Koraci u provođenju takvog mehanizma su:

- fazifikacija
- određivanje stupnja aktivacije pravila uz pomoć logičkih kombinacija
- posljedica:

  - stupanj aktivacije pravila se koristi kako bi se odredio zaključak pravila kroz razne implikacijske operatore

  - najčešći operator je minimum operator; kao primjer se može uzeti temperatura zraka u prostoriji i vlažnost zraka kao ulazne veličine, te uspoređivanjem ulaznih stupnja pripadnosti uzimajući u obzir minimalno pravilo se pokreće ventilacija određene jakosti, što je posljedica ili implikacija

- sumiranje - izlazna neizrazita veličina je sastavljena od sumiranja svih pravila
- defazifikacija

Na kraju procjene je određen izlazni neizraziti skup, ali se ne može koristiti za pružanje preciznih informacija operatoru ili za aktivnu kontrolu izvršnog objekta. Zato je potrebno koristiti defazifikaciju kako bi se prenijela neizrazita veličina u potrebnu izlaznu, odnosno izrazitu. Postoje različite metode defazifikacije a najkorištenije su:

1) metoda težišta geometrijskog lika neizrazitog skupa nastalog nakon sumiranja pravila
2) metoda središta ukupne površine gdje je površina geometrijskog lika podijeljena na dva dijela, izlazna veličina je razdjelnik, a površina s oba dvije strane izlazne veličine mora biti jednaka
3) metoda središnje točke maksimuma - središnja vrijednost apscisa točaka u kojima stupanj pripadnosti izlaznog skupa dostiže maksimum

Drugi mehanizam procjenjivanja je takozvani Sugeno model, kojemu je glavna razlika što je funkcija pripadnosti za izlaznu veličinu linearna ili konstantna. Definirana je kao težinski prosjek svih pravila.

Prednosti Sugenovog modela su:

- Računalno je učinkovit, odnosno učinkovitija je obrada podataka
- Dobro radi s linearnim tehnikama, kao što je PID kontrola
- Dobro radi s optimizacijskim i adaptivnim tehnikama
- Jamči kontinuiranu površinu izlaza
- Prikladan je za matematičke analize

Prednosti Mamdanijevog modela su:

- Intuitivan je
- Generalno je prihvaćeniji
- Prikladan je za ljudski definirane ulaze, odnosno kada je ulaz razumljiv i za osobe koje nisu stručne u tom području

2.3. Primjena neizrazite logike

Glavna primjena neizrazite logike je u sustavima za regulaciju i upravljanje. Moguće je podijeliti primjenu prema načinu korištenja koncepta logike, pa se tako razlikuju dvije kategorije sustava:

- Sustavi u kojima se neizrazita logika primjenjuje za implementiranje znanja operatera u automatizirani regulacijski algoritam; tako se izražava izvorna ideja
- Sustavi gdje je neizrazita logika korištena za definiranje nelinearnog preslikavanja u prostoru ulaznih i izlaznih varijabli

Druga moguća podjela bi bila prema razinama u hijerarhijskoj strukturi sustava regulacije i vođenja gdje onda postoje tri podjele:

- Podređena regulacijska razina - procesna mjerenja su uspoređena s referentnim veličinama te je potrebno ukloniti odstupanja s izvršnim elementima

- Nadređena regulacijska razina - definiraju se referentne veličine podređenih regulacija, ovisno o statusu procesa
- Razina vođenja procesa

Na nižim razinama je regulacija brza i djeluje na lokalnoj razini, dok na višim razinama je proces regulacije većinom sporiji ali je djelovanje prošireno na širu ili globalnu razinu. Za potrebe podređene razine je potrebno definirati neizraziti regulator koji je zadan bazom pravila i funkcijama pripadnosti, te se preko postupaka pretvorbe i neizrazitog zaključivanja definira preslikavanje skupa ulaznih u skup izlaznih varijabli. Dinamičko ponašanje se može postići većim brojem ulaznih varijabli, što dovodi do više pravila te više mogućnosti i rezultata neizrazitog zaključivanja. Kako bi se ostvarilo dinamičko ponašanje većinom je potrebno koristiti trenutne i prijašnje vrijednosti, kao što se može vidjeti u četvrtom poglavlju gdje se uspoređuju vrijednosti prije kvara i poslije kvara.

Konkretni primjeri primjene su dijagnoza kvara u indukcijskom motoru, klasifikacija kvara u sustavima energetskog transformiranja, regulacija pneumatskih servosustava, otklanjanje preopterećenja putem neizrazite logike, što se može vidjeti u [13], [14], [15] i [16], te brojni znanstveni i istraživački radovi s raznim primjenama regulacije i kontrole.

3. PRIJENOSNE MREŽE

3.1. Električne energetske mreže

Pojam električne energetske mreže se može protumačiti kao elektroenergetski sustav koji sadrži sve elemente tog sustava, što bi bili svi povezani izvori, transformatori, vodovi i trošila. No pojam električne energetske mreže često reprezentira samo određeni dio elektroenergetskog sustava. Postoje razne podijele mreža; može se karakterizirati mreža prema veličini nazivnog napona na tom dijelu, kao niskonaponska, srednjenaponska ili visokonaponska mreža (ili vrlo-visokonaponska mreža). Osnovna podjela je s obzirom na vrstu struje koja se prenosi, odnosno istosmjerna ili izmjenična mreža. Uobičajena podjela mreža je na distribucijsku mrežu, prijenosnu mrežu i na izvore, odnosno podjela po fazama procesiranja električne energije. U izvore svrstavamo proizvođače električne energije, što bi bile elektrane. Podjelu između prijenosne i distribucijske mreže možemo napraviti po:

a) tehničkim karakteristikama - u prijenosnu mrežu pripadaju vodovi i postrojenja koji imaju nazivni napon veći ili jednak 110 kV, a sve ostalo pripada u distribucijsku mrežu
b) funkcionalnim karakteristikama - prijenosna mreža je dio sustava koji sudjeluje ili može sudjelovati u vođenju procesa, zajedno sa izvorima, dok oni dijelovi sustava koji ne mogu pripadaju distribucijskoj mreži, zanemarujući nazivni napon

U proračunu problema u električnim mrežama se gleda samo određeni dio mreže, dok se preostali dio mreže uzima u obzir putem poznatih i određenih podataka. Rješavanje problema u mreži kao cjelini bi bilo dugotrajno zbog velikih površina kojima se rasprostranjuje mreža (obično povezuje nekoliko država i/ili kontinenata).

Osnovni zadatak električnih energetskih mreža, odnosno sustava, je opskrbljivanje potrošača (trošila) električnom energijom u čemu sudjeluje svaki dio sustava. Glavni zadatak je da dovedena električna energija potrošačima mora biti kvalitetna. Kvaliteta ima tri mjerila:

1) Napon - zbog padova napona nikada nije u svim točkama mreže jednak nazivnom naponu. Primjenjivanjem sredstava za regulaciju te kvalitetnim dimenzioniranjem mreže se mora osigurati konstantan nazivan napon za potrošače. Kroz mrežu će napon

odstupati, na određenim dijelovima, od nazivnoga, no ne smije prekoračiti maksimalni pogonski napon. Kvalitetni trofazni napon ne smije imati brza kolebanja, te mora biti sinusoidnog oblika i simetričan po fazama

2) Frekvencija - mora biti konstantna. Odstupanja od nazivne vrijednosti moraju biti nezamjetna. Kroz određeno vremensko razdoblje frekvencija mora biti konstantna, tako da smije doći do nekakvih odstupanja, ali se ista moraju nadoknaditi. Ako postoje znatna odstupanja od nazivne vrijednosti, to je znak da postoji poremećaja u mreži.
3) Trajna raspoloživost - potrošač mora, u svako doba dana, imati mogućnost na svome mjestu priključka si uzimati potrebnu mu električnu energiju (u količini i u snazi)

Kvaliteta uvijek mora biti očuvana. Ako postoje nekakvi kvarovi u sustavu, ili planirani radovi na elementima sustava, mora postojati adekvatna rezerva za takve probleme. Iz navedenih mjerila proizlaze norme i pravila za dizajniranje i vođenje elektroenergetskog sustava.

Također je bitno da potrošač dobiva električnu energiju uz najnižu moguću cijenu. Prijenosna mreža igra važnu ulogu u održavanju kvalitete i cijene u prihvatljivoj razini zbog povezanosti i. međusobno "krpanje", odnosno nadopunu, kako sa strane proizvodnje, tako i sa strane potrošača. Stoga, prijenosna mreža omogućuje ekonomično vođenje elektroenergetskog sustava.

Korištenjem prijenosa električne energije na veće udaljenosti pomoću mreža visokog ili vrlo visokog napona je omogućeno [6]:

I. korištenje proizvodnje velikih, ekonomičnih izvora (elektrana) u udaljenim potrošačkim središtima
II. povezivanje elektrana različitih svojstava i njihovo optimalno prilagođenje potrebama potrošnje
III. smanjenje potrebne rotirajuće i hladne rezerve u elektranama u odnosu na odvojeni rad manjih sustava
IV. smanjenje maksimalnog opterećenja izvora povezivanjem potrošača i potrošačkih područja različitih karakteristika

Ovakvim prikazom se ističe prijenosna mreža kao dio koji pridonosi skladnom, potrošnji prilagođenom i ekonomičnom funkcioniranju. Problem je slaba mogućnost skladištenja energije, pa je potrebno raditi uravnoteživanje proizvodnje i potrošnje.

Elektroenergetski sustav Hrvatske je trofazni sustav, nazivne frekvencije 50 Hz te obuhvaća izvore, vodove visokih napona, vrlo visokih napona, srednjih napona, niskih napona, transformatore i potrošače. Standardizirani nazivni linijski naponi za vodove srednjih i visokih napona su 3, 6, 10, 20, 35, 60, 110, 220 i 380 kV.

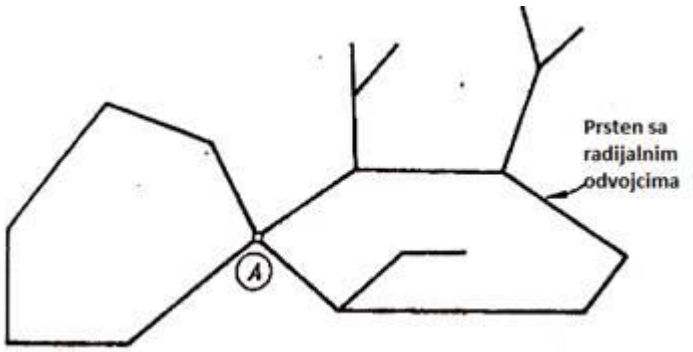
3.2. Tipovi električnih mreža

Topologija ili konfiguracija mreže je oblik i način prostorne povezanosti elemenata mreže. Način priključka izvora na mrežu ovisi o njihovoj snazi; elektrane većih snaga su obično priključene na mrežu višeg napona, a u zadnjih nekoliko godina su zamah dobili izvori priključeni na distribuiranu mrežu - distribuirani izvori energije, što su obično fotonaponske ćelije. Različite naponske razine unutar mreže su povezane transformatorima. Topologija mreže obično nije geometrijski pravilna zbog:

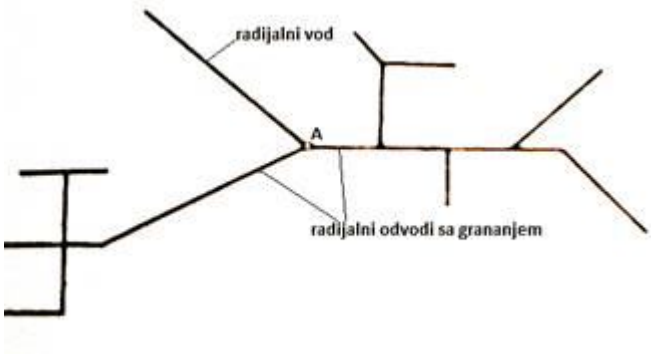
- neravnomjerne raspodjele potrošnje na promatranom području
- omjeri susjednih nazivnih napona nisu optimalni i uvijek jednaki
- lociranje izvora energije nije moguće napraviti idealno
- idealna konfiguracija je također poremećena zbog zahtjeva za rezervu

Dvije osnovne konfiguracije mreže, s obzirom na način napajanja, mogu biti:

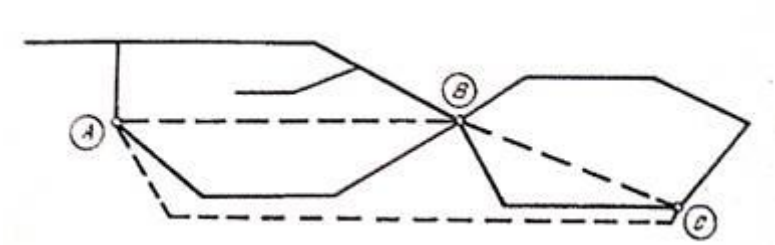
1) Mreža napajana iz jedne točke - moguća je prstenasta (Slika 3.1.) i radijalna mreža (Slika 3.2.)
2) Mreža napajana iz više točaka - može biti zatvorena (Slika 3.3.) ili zamkasta (Slika 3.4.)



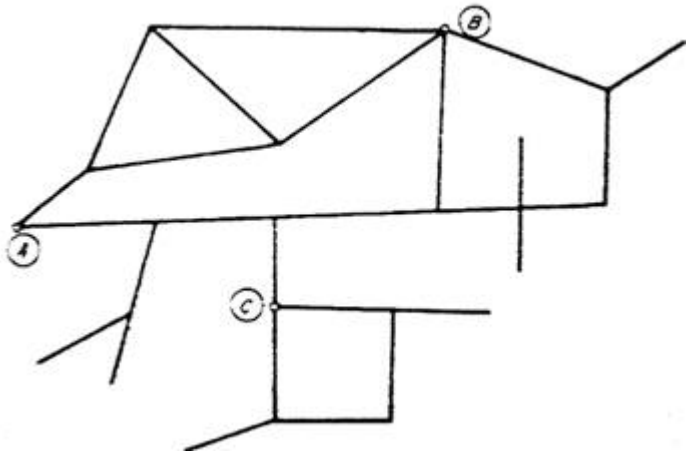
Slika 3.1. Prstenasta mreža s napojnom točkom A [7]



Slika 3.2. Radijalna mreža s napojnom točkom A [7]



Slika 3.3. Zatvorena mreža s napojnim točkama A, B i C [7]

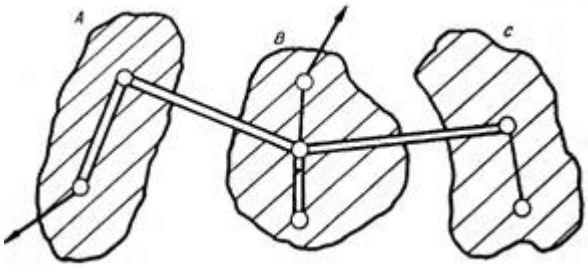


Slika 3.4. Zamkasta mreža s napojnim točkama A, B i C [7]

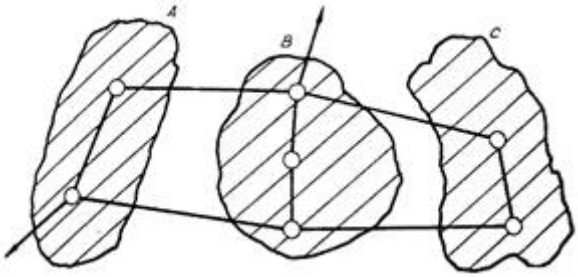
U radijalnoj mreži se potrošač napaja samo s jedne strane. Takav pristup onemogućava sigurnu opskrbu potrošača električnom energijom; veći su padovi napona i veći su gubitci u ovakvoj vrsti mreža. Prednost joj je što je pregledna. U prstenastoj mreži svaki potrošač ima mogućnost napajanja s dvije strane ali iz istog izvora, što dovodi do zaključka da ovaj oblik mreža ima stabilnije naponske prilike, i uz to manje gubitke. Prsten se može pretpostaviti kao dvostruko napajani vod gdje se na oba kraja nalazi napon jednak po iznosu i fazi. Zamkaste i zatvorene mreže zbog povezanosti potrošača s više izvora imaju veću stabilnost

napona, te su obično tako građene da se, u slučaju kvara ili planiranih radova, isključi samo mali dio mreže kako bi ostali potrošači imali neometanu opskrbu električne energije.

Prijenosna mreža je konfigurirana prema nekoliko faktora (geografski položaji potrošnje i proizvodnje, karakteristike istih i slično). Kada se pogleda shema hrvatskog elektroenergetskog sustava može se uočiti kako je na područjima veće urbaniziranosti gušća mreža nego na ruralnim područjima [8]. Postoje dva osnovna načela oblikovanja mreže najvišeg napona - oblik kičme (Slika 3.5.) i oblik prstena (slika 3.6.).

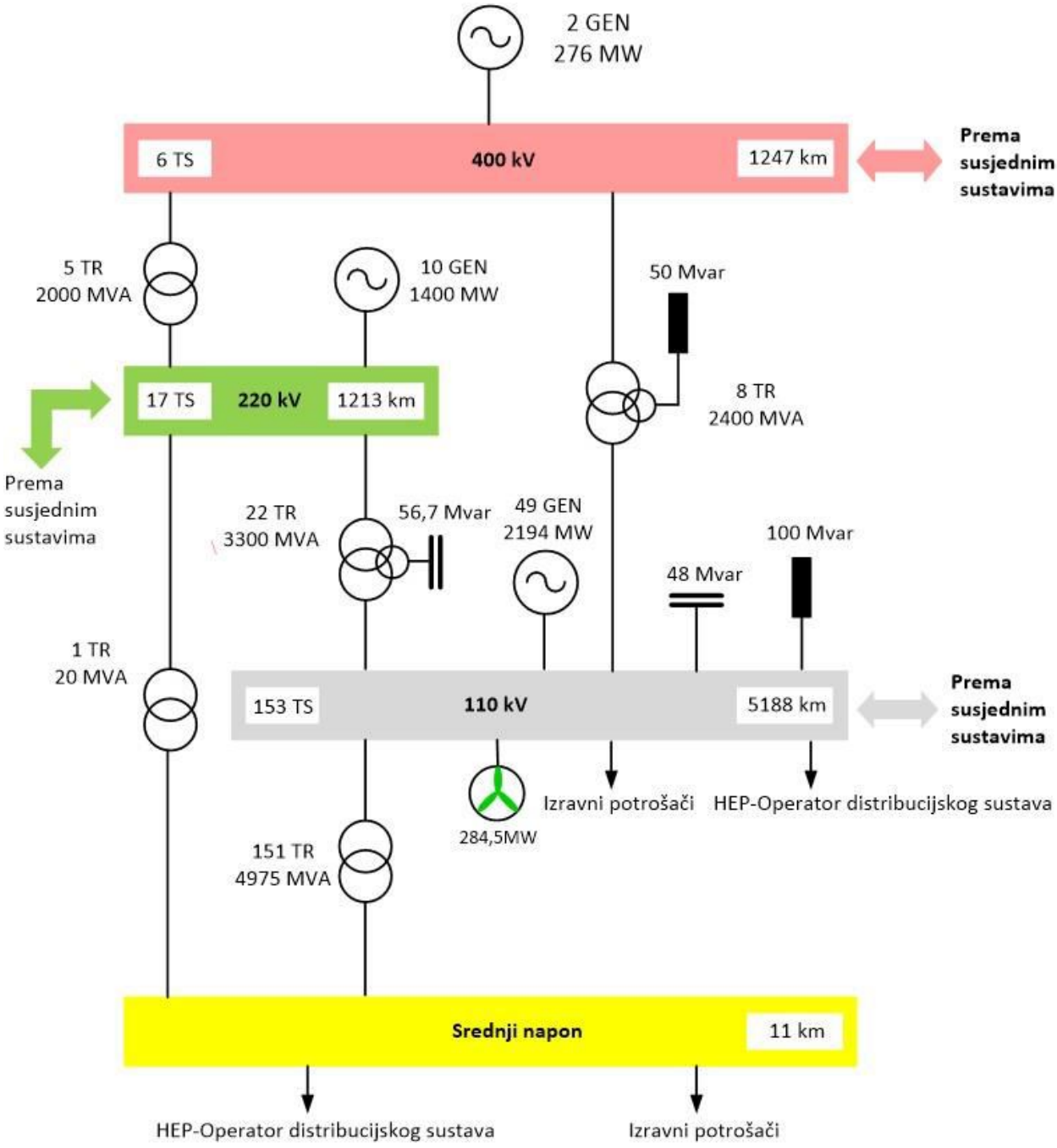


Slika 3.5. Povezivanje područja A, B i C mrežom najvišeg napona u obliku kičme [7]



Slika 3.6. Povezivanje područja A, B i C mrežom najvišeg napona u obliku prstena [7]

Na slici 3.7. je moguće vidjeti tehničke pokazatelje hrvatskog elektroenergetskog sustava po naponskim razinama u vlasništvu HOPS-a (Hrvatski operator prijenosnog sustava). Slika prikazuje stanje sustava iz 2016. godine. Na slici 3.8. se može vidjeti shema hrvatskog elektroenergetskog sustava s označenom razmjenom energije prema drugim državama za 2016., 2015. i 2014.-u godinu.



Slika 3.7. Tehnički pokazatelji hrvatskog elektroenergetskog sustava po naponskim razinama u vlasništvu HOPS-a - stanje krajem 2016. godine [9]



Slika 3.8. Shema hrvatskog elektroenergetskog sustava s razmjenom energije prema susjednim državama [8]

Iz slike 3.8. je moguće vidjeti da je Hrvatska, u periodu od 2014.-2016., bila ovisna o uvozu električne energije, odnosno da ne postoji mogućnost samostalnog opskrbljivanja bez uvoza. Sa svakom godinom bi potreba za uvozom trebala biti sve manja zbog nedavnog procvata korištenja solarne energije u distribuiranim izvorima energije i također zbog demografskih čimbenika, kao što su iseljavanje stanovnika iz države što direktno vodi do smanjene potrošnje električne energije.

3.3. Pogonska stanja trofaznih električnih mreža

Promjena u režimu rada elektroenergetskog sustava utječe na njegovo trenutno stanje u cijelosti zbog potrebne ravnoteže između proizvodnje i potrošnje. Zbog raznih tromosti u sustavu, kao što su reaktivni elementi, mase rotora i generatora i slično, su posljedice obično trajnije od njihovog uzroka. Stoga je potrebno brzim zahvatima vratiti sustav u stabilno stanje. Najveće posljedice su obično na samome mjestu nastanka istih.

Dva osnovna pogonska stanja mreža su normalno, odnosno uravnoteženo i poremećeno, odnosno neuravnoteženo stanje.

U normalnom stanju nema naglih promjena te se one mogu kompenzirati bez posljedica za potrošače. Cilj rada normalnog pogonskog stanja je ekonomični rad i kvaliteta električne energije. Taj cilj se postiže regulacijom napona i djelatne snage.

Regulacija djelatne snage se vrši promjenom broja okretaja turbine u elektranama, s time da nemaju sve elektrane mogućnost regulacije broja okretaja. Kada bi promatrani dio mreže bio napajan od strane jednog izvora regulacija djelatne snage bi direktno utjecala na regulaciju frekvencije. U kompliciranijem sustavu se pojmovi regulacije frekvencije i djelatne snage odvajaju, tako da je cilj reguliranja frekvencije održati frekvencijsku razinu približnu nazivnoj, a zadatak reguliranja djelatne snage je ravnomjerna raspodjela snage na pojedine elektrane, s obzirom na njihove mogućnosti, te da se osigura razmjena snage između dva povezana sustava. U regulaciji snage imaju mogućnosti sudjelovanja i transformatori s poprečnom regulacijom napona.

Regulacija napona se provodi reguliranjem uzbude generatora i sinkronih kompenzatora i promjenom prijenosnog omjera transformator. Također sudjeluju i pasivni elementi za kompenziranje reaktivne snage (kondenzatori), ako imaju mogućnost reguliranja kapaciteta. U mrežama napajanih od strane više izvora regulacija napona je usko vezana s proizvodnjom i raspodjelom reaktivne snage. Potrošači uzimaju iz mreže potrebnu snagu s određenim faktorom snage, odnosno uzimaju i reaktivnu snagu. U većini slučajeva je trošilima potrebna induktivna snaga. Reaktivnu snagu proizvode generatori, te se raspodjela reaktivne snage odvija regulacijom uzbude po određenim pravilima. Često je potrebno proizvoditi dodatnu reaktivnu snagu uz pomoć sinkronih kompenzatora i kondenzatorskih baterija, te su, zbog povezanosti reaktivne snage s naponom, ovi elementi također sudionici u regulaciji napona. U mrežama nižeg i srednjeg napona je problem s manjkom induktivne reaktivne snage, a u

mrežama visokih napona postoji višak induktivne reaktivne snage, što se može riješiti prigušnicama.
Kao što je na prethodnoj stranici bilo navedeno, glavni cilj sustava je ekonomična proizvodnja i kvalitetna energija. Ako se sustav vodi tim ciljevima, može se reći da regulacija djelatne snage utječe na kvalitetu održavanjem frekvencije u propisanom omjeru, a na ekonomičnost utječe zbog raspodjele djelatne snage na izvore, dok regulacija reaktivne snage utječe na kvalitetu održavanjem naponskih prilika u mreži stabilnima, a na ekonomičnost utječe zbog reguliranja tokova reaktivnih snaga s ciljem minimalnih gubitaka u mreži.

Poremećeno stanje nastupa uslijed naglih promjena. Takve promjene su:

- naglo ukapčanje ili iskapčanje potrošača značajnijih snaga
- naglo iskapčanje izvora velikih snaga
- kvarovi na elementima mreže

Dok je pogon u poremećenom stanju može doći do trajnih posljedica radi drugačijih veličina, koja uzrokuju naprezanja, u mreži s obzirom na njezino normalno stanje. Iz tog razloga je potrebno što brže uspostaviti normalno stanje. Analiza oba pogonska stanja uzima u obzir jednaku fizikalnu sliku mreže dok su analitički postupci različiti za svako stanje.

S obzirom na zahtjeve oba pogonska stanja, zaključak je da je vođenje elektroenergetskog sustava složen posao. Osnova vođenja je prikupljanje, prijenos, prikazivanje, obrada i pohranjivanje podataka te njihovo korištenje. Dispečerska središta su središta odlučivanja tijekom vođenja, a podijeljena su u ovisnost o hijerarhijskoj razini; na ona odgovorna za dio sustava, ili na odgovorna za cijeli sustav. Glavni cilj u sadašnjosti i budućnosti vođenja elektroenergetskog sustava je automatizacija regulacijskih i kontrolnih procesa, što bi uvjetovalo najbržom mogućom reakcijom na poremećaje u sustavu eliminiranjem ljudske tromosti.

4.4. Kratki spoj u prijenosnoj mreži

Kratki spoj može biti kategoriziran prema broju zahvaćenih faza na sljedeće vrste:

1. Jednopolni kratki spoj - spoj jedne faze sa zemljom
2. Dvopolni kratki spoj - međusobni spoj dvije faze
3. Dvopolni kratki spoj sa spojem sa zemljom - spoj dvije faze i zemlje
4. Tropolni kratki spoj - međusobni spoj sve tri faze

Također je bitno razlikovati pojavu zemljospoja od kratkog spoja. Zemljospoj je pojava kada u mreži koja ima izolirano zvjezdište, ili spojeno zvjezdište sa zemljom putem Petersenove prigušnice, dođe do spoja jedne faze sa zemljom. Struja kvara je u tom slučaju u malim vrijednostima budući da se za račun impedancije strujnog kruga pridodaju dozemni kapaciteti vodova.
U slučaju kratkog spoja su struje višestruko jače od struja koje se pojavljuju u normalnom radu toga dijela mreže. U slučaju da kratki spoj nije izoliran kroz nekoliko sekundi, struje kratkog spoja se mogu razložiti po vrijednosti struje, budući da ona opada što dulje kratki spoj traje. Takve struje su:

1. Udarna struja - jednaka je početnoj struji kratkog spoja uvećanoj za vrijednost istosmjerne komponente. Ima najveću amplitudu pa se po njoj mogu dimenzionirati mehanička naprezanja elemenata mreže
2. Početna struja (subtranzijentna) - izmjenična komponenta struje u trenutku nastanka kratkog spoja. Bitan podatak za odabir prekidača
3. Prijelazna struja (tranzijentna) - niža je od početne i također može biti relevantan podatak za izbor prekidača
4. Rasklopna struja - struja u trenutku isključivanja prekidača. Uobičajeno je ovu struju poistovjetiti s prijelaznom strujom kratkoga spoja
5. Trajna struja - manja vrijednost struje od prijelazne struje te se primjenjuje za izračunavanje zagrijavanja elemenata mreže kod pojave kratkoga spoja

Elementi mreže se mogu podijeliti, prema načinu na koji utječu na pojavu kratkog spoja, na tri skupine. Prva skupina su aktivni elementi mreže koji generiraju elektromotornu silu sustava kojom dostižu struju kratkog spoja, što bi bili sinkroni generatori. U drugu skupinu bi pripadali elementi mreže koji mogu povećati struju kratkog spoja akumuliranim električnim nabojem, inercijom rotacije i slično. U treću skupinu pripadaju pasivni elementi mreže koji sa

svojim otporom ograničavaju struju kratkog spoja kao što su vodovi, kabeli, učinski transformatori i uzdužne prigušnice.

Budući da su pojedinačni fazni vodiči elemenata mreže na različitim potencijalima potrebno ih je izolirati međusobno i prema zemlji. Razina izolacije ovisi o nazivnom naponu, odnosno maksimalnom pogonskom naponu mreže, no potrebno je razmotriti i tehničke i ekonomske aspekte te prikladno dimenzionirati izolaciju. Zbog ekonomskog aspekta se izolacija ne dimenzionira da može izdržati bilo kakvo moguće električko naprezanje, pa se iz tog razloga događaju povremeno slomovi izolacije, odnosno dolazi do proboja. U tom slučaju se spajaju dva elementa različitih potencijala, odnosno dolazi do kratkog spoja. Do sloma izolacije može doći radi nekoliko uzroka od kojih su neki vrlo visoki prenapon, oslabljenost izolacije radi nečistoće, mehaničko oštećenje, starenje izolacije ili greška pri proizvodnji... Spoj između dvije točke različitog potencijala je obično ostvaren putem električnog luka, no postoje i mogućnosti galvanskog spoja.

Kroz mjesto kvara teče struja kratkog spoja koja je ovisna o impedanciji strujnog kruga i elektromotornoj sili izvora. Te struje su višestruko veće od pogonske, no postoje i sustavi koji su dimenzionirani s velikom impedancijom strujnog kruga te se u takvim krugovima struje kratkih spojeva mogu smanjiti na red veličina pogonskih struja. Takva pojava je moguća i u regularnim električnim mrežama preko noći, kada je određeni broj generatora isključen radi niskih opterećenja. Kratki spoj će trajati sve dok se ne prekine napajanje mjesta kratkog spoja. Posljedica kratkog spoja je termičko naprezanje elemenata u okolini kvara. Termičko naprezanje je najviše izraženo u mjestima koja neposredno vode k mjestu kvara. Naprezanja ovise o trajanju pojave i o jačini struje. Najveće posljedice će se osjetiti na elementima koji imaju ograničenu mogućnost akumuliranja topline, a nemaju kvalitetno dimenzionirane uvjete hlađenja ili ih nije moguće ostvariti. U tu skupinu bi spadali kabeli, strojevi i strujni transformatori. Daljnje posljedice su mehanička naprezanja koja su isto najviše izražena u okolini mjesta kvara. Takva naprezanja mogu dovesti do devastacije konstrukcijskih dijelova što bi uzrokovalo daljnje kvarove. Ovoj vrsti naprezanja su najviše izloženi namoti transformatora, glave namota generatora i rasklopna postrojenja.
Na mjestu kvara se događaju razorne posljedice usred djelovanja električnoga luka radi visoke temperature. Primjer se može vidjeti na slici 3.9., što se dogodilo na promatranome kvaru u idućem poglavlju.



Slika 3.9. Dio mreže uništen visokom temperaturom električnog luka na sabirnicama u Ernestinovu

Uz promjenu struje se događa i promjena napona koja je također znatna. Naponi kratkog spoja su uobičajeno u veličinama oko 10% nazivnog napona na samome mjestu spoja. Posljedice pada napona se obično osjete i na udaljenim dijelovima mreže.

Većina navedenih posljedica se pojačava po intenzitetu što kratki spoj ima duže trajanje pa je dio mreže kojega je zahvatio kvar što prije potrebno dovesti u beznaponsko stanje. Dakle potrebno je isključiti sve grane koje dovode napon od izvora do mjesta kvara. Zbog ovakvih isključenja jedan dio potrošača može osjetiti privremeni prekid dobave električne energije, što ovisi o sposobnosti rezervnog napajanja toga dijela mreže i o samome trajanju popravka kvara. Ako je mreža dobro dimenzionirana drugi elementi mreže će pokriti opskrbljivanje potrošača uz povećano opterećenje takvih elemenata do popravka kvara. Navedene posljedice također mogu ugroziti stabilnost sustava budući da je poremećena ravnoteža proizvodnje i potrošnje energije. U najgorem slučaju može doći do ispada pojedinih generatora iz pogona te lančano dovesti do raspada sustava. Mjere za smanjenje negativnih posljedica se odrađuju smanjenjem trajanja kratkog spoja i smanjenjem struje kratkoga spoja.

4. SIMULACIJA NEIZRAZITOG SUSTAVA ZA ODREĐIVANJE PRIMARNOG KVARA U PRIJENOSNOJ MREŽI

Simulacija neizrazitog sustava je odrađena u programskom paketu MATLAB koji u sebi sadrži grafičko sučelje za pojednostavljeno formatiranje funkcija pripadnosti za ulaze i izlaze, postavljanje pravila, te jednostavni pregled izlazne funkcije s obzirom na mijenjanje parametara ulaza [11].

Kvar se dogodio u transformatorskoj stanici Ernestinovo 14.11.2015. te se podatci sastoje od liste događaja u trenutku kvara i slika prijenosne mreže dvije minute prije i dvije minute poslije kvara, koje će se mogu vidjeti u prilogu. U listi događaja se nalazi lista alarma i reakcija zaštite poredane po kronološkom redoslijedu, te se iz te liste uzimaju relevantni podatci za obradu događaja.

Najčešći uzrok kvara u mreži je kratki spoj, koji je opisan u prethodnom poglavlju, a njegovi efekti bitni za ovu analizu su znatno povećana struja i veoma nizak napon na elementu kojega je zahvatio kvar. Posljedice kvara mogu negativno utjecati i na druge elemente u mreži, što se definira kao sekundarni ili tercijarni kvar, a samo mjesto nastanka kvara je primarni kvar. U praksi se, odmah nakon nastanka kvara, određuje mjesto nastanka na osnovu kronologije, liste alarma i prorada zaštite, te podataka o struji i naponu koji su preuzeti iz SCADA sustava. Gotovo sve vrste kvarova u mreži se mogu odrediti sa stanjem ova četiri parametra:

- Promjena stanja prekidača (na prijenosnom vodu, generatoru ili transformatorskom polju)
- Promjena toka snage ili struje na elementima mreže i promjena smjera struje
- Promjena napona na elementima mreže
- Aktivacija alarma ili zaštitnog uređaja

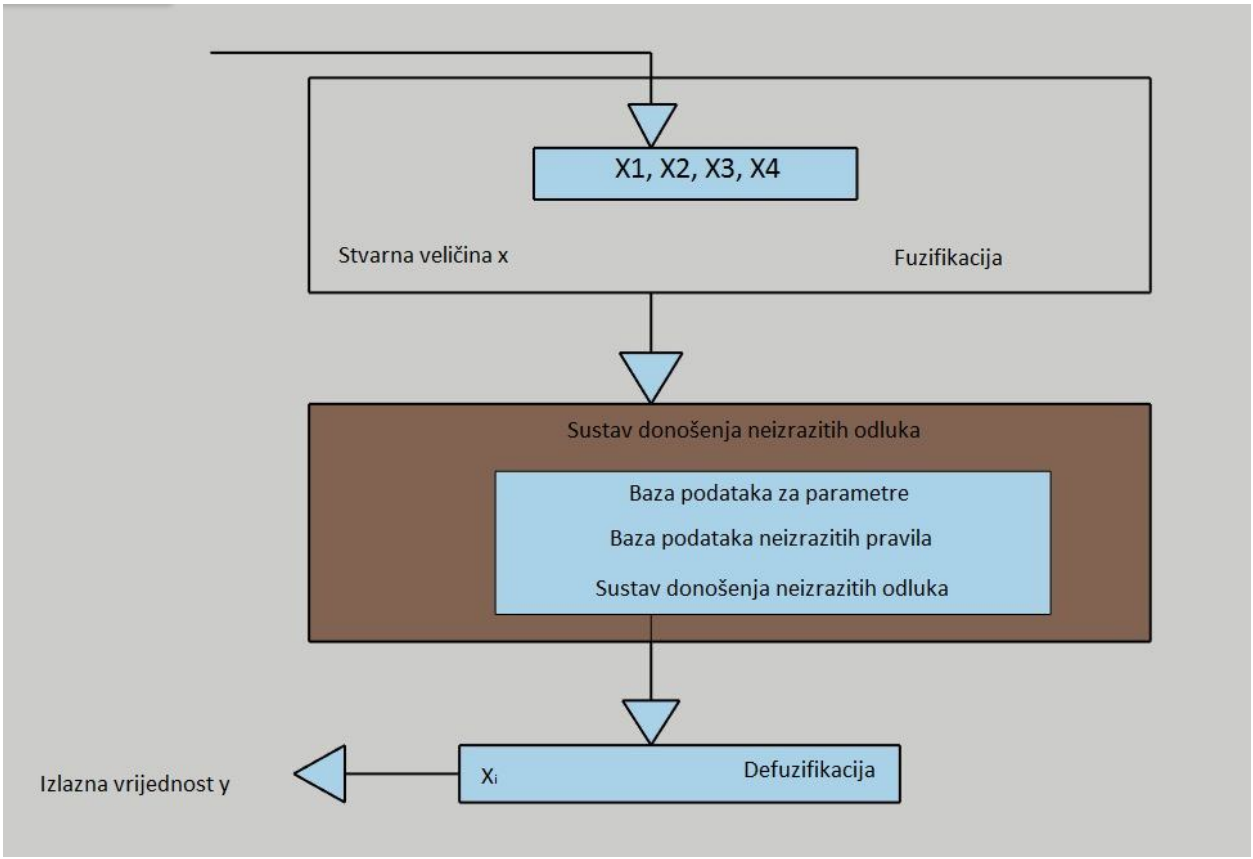
Iz ovih podataka se mogu odrediti i trenutni i trajni kvarovi. Kako bi to bilo moguće, podatci se moraju prikupiti za generatore, prijenosne vodove, sabirnice i trošila. Neizravnim regulatorom se iz ovih podataka može doći do primarnog kvara.
U promatranome djelu mreže u kojemu se dogodio kvar u Ernestinovu nema nikakvih generatora u blizini tako da se njih, u ovome razmatranju, ne uzima u obzir, kao što nema niti podataka o stanju trošila, što će se moći vidjeti kasnije u ovome poglavlju.

4.1. Sinteza neizrazitog regulatora

Tijekom sinteze se moraju objasniti pravila za promjenu izlaza s obzirom na promjenu ulaza. Neizrazita pravila su uvijek uvjetovane izjave u kojima uzročni dio predstavlja stanje domene nad kojom se postavljaju pravila, a posljedični dio predstavlja kontrolu sustava. Na prethodnoj stranici je spomenuto da se kvarovi u mreži mogu otkriti koristeći četiri parametra, koja su u ovome slučaju ulazne veličine. Te veličine će se imenovati kao [12]:

1) ALARM - aktivacija alarma ili prorada elementa zaštite (veličina X1)
2) PREKIDAC - promjena stanja prekidača (veličina X2)
3) STRUJA - promjena struje na elementu mreže (veličina X3)
4) NAPON - promjena napona na elementu mreže (veličina X4)

Na slici 4.1. se može vidjeti kako bi izgledao blok dijagram neizrazitog regulatora s ove 4 ulazne varijable.



Slika 4.1. Blok dijagram neizrazitog regulatora

Parametri X1 i X2 mogu imati samo dvije veličine u neizrazitom sustavu; 0 ili 1. I njihove funkcije pripadnosti također mogu imati samo dvije vrijednosti. Parametri X3 i X4 mogu imati nekoliko veličina u neizrazitom sustavu. Ovisno o potrebi se za parametre X3 i X4 može definirati i veći broj funkcija pripadnosti.

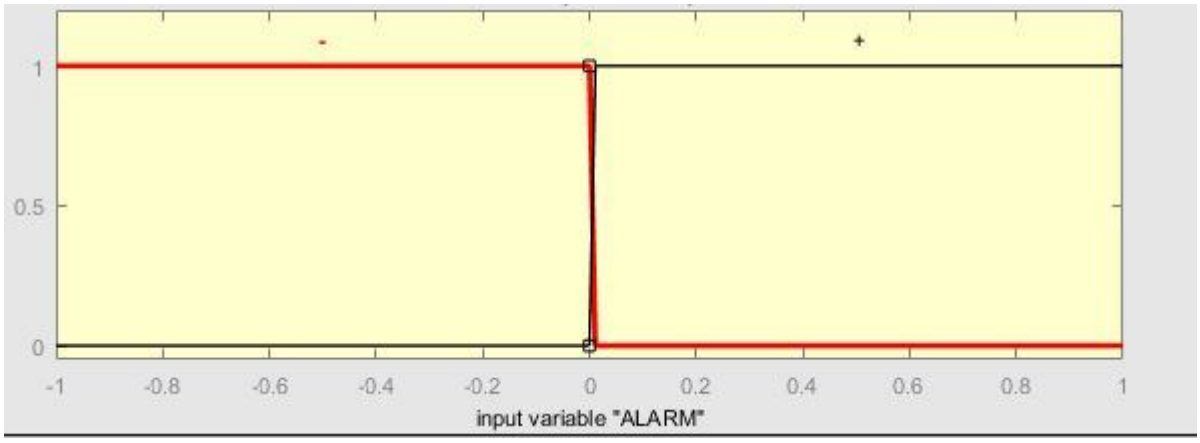
Kako bi se u potpunosti razumjelo sastavljanje i zaključivanje neizrazitog sustava potrebno je opisati sve varijable i njihove funkcije pripadnosti.

ALARM - aktivacija alarma ili prorada elementa zaštite

Prva varijabla ALARM daje vrijednost s obzirom na stanje zaštitnog elementa ili aktivacije alarma. Postoje dva moguća stanja:

- Mirno stanje - nema aktivacije alarma niti aktivacije zaštite
- Promijenjeno stanje - aktivacija zaštite ili aktivacija alarma

Na slici 4.2. je moguće vidjeti funkcije pripadnosti za veličinu ALARM. Funkcija pripadnosti označena sa "+" označava aktiviranost alarma ili zaštite (vrijednost 1), a funkcija pripadnosti imena "-" označava mirno stanje (vrijednost 0).



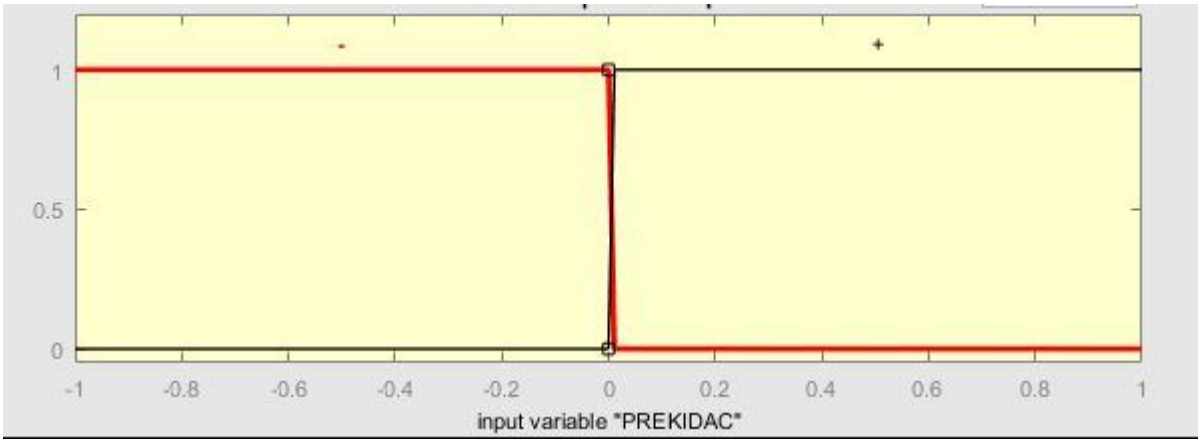
Slika 4.2. Funkcije pripadnosti za ulaznu vrijednost ALARM

PREKIDAC - promjena stanja prekidača

Druga varijabla PREKIDAC daje vrijednost s obzirom na stanje prekidača. Za ovu varijablu također postoje dva moguća stanja:

- Mirno stanje - nema promjene na prekidaču
- Promijenjeno stanje - aktivacija prekidača

Graf funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu PREKIDAC je jednak kao i za prethodnu varijablu ALARM; graf je moguće vidjeti na slici 4.3.



Slika 4.3. Funkcije pripadnosti za ulaznu varijablu PREKIDAC

STRUJA - promjena struje na elementu mreže

Kako bi se odredila promjena struje kroz element mreže potrebno je definirati osjetljivost na promjenu struje na elementima mreže. Za analizu kvara u Ernestinovu je najprikladnije indeks osjetljivosti definirati kao:

$$\Delta \mathrm{I} = \left|\frac{I_t}{I_n}\right| \tag{4-1}$$

Gdje veličina I_t predstavlja vrijednost struje nakon događaja, a veličina I_n predstavlja vrijednost struje prije događaja. Ako omjer struje nakon i prije događaja ima vrijednost

$$\Delta \mathrm{I} = \left|\frac{I_t}{I_n}\right| > 1 \tag{4-2}$$

tada je vrijednost struje kroz element mreže nakon događaja porasla. Ako omjer ima vrijednost

$$\Delta \mathrm{I} = \left|\frac{I_t}{I_n}\right| < 1 \tag{4-3}$$

tada je vrijednost struje kroz element nakon događaja opala. Ako omjer ima vrijednost

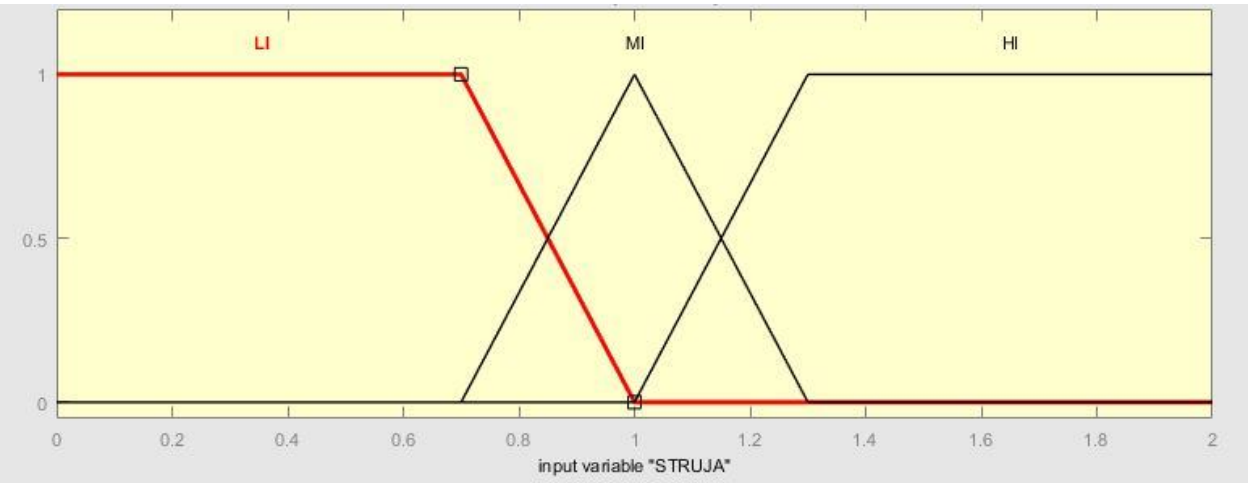
$$\Delta \mathrm{I} = \left|\frac{I_t}{I_n}\right| \approx 1 \tag{4-4}$$

tada nema značajne promjene vrijednosti struje odnosno, u dozvoljenim je granicama za detekciju kvara.

Pripadajuće funkcije pripadnosti se mogu vidjeti na slici 4.4. gdje funkcija imena LI predstavlja smanjenje struje nakon kvara, MI predstavlja neznatne promjene struje, a HI predstavlja povećanje struje nakon kvara.

Odabrane vrijednosti za osjetljivost promjene struje su:

- Ako je vrijednost osjetljivosti promjene struje u rasponu od 0 do 0,85, indeks osjetljivosti je označen s LI
- Ako je vrijednost osjetljivosti promjene struje u rasponu od 0,85 do 1,15, indeks osjetljivosti je označen s MI
- Ako je vrijednost osjetljivosti promjene struje veća od 1,15 tada je indeks osjetljivosti označen s HI



Slika 4.4. Funkcije pripadnosti za ulaznu varijablu STRUJA

NAPON - promjena napona na elementu mreže

Za četvrtu ulaznu varijablu NAPON, slično kao i za varijablu STRUJA, je prvo potrebno odrediti i definirati indeks osjetljivosti kako bi se odredila promjena napona na tom elementu. Pa se tako indeks osjetljivosti može definirati kao:

$$\Delta U = |\frac{U_t}{U_n}| \tag{4-5}$$

Gdje U_t predstavlja vrijednost napona nakon događaja, a U_n predstavlja vrijednost napona prije događaja. Ako omjer ima vrijednost

$$\Delta U = |\frac{U_t}{U_n}| > 1 \tag{4-6}$$

Tada je na tom elementu porast napona nakon kvara. Ako indeks osjetljivosti ima vrijednost

$$\Delta U = |\frac{U_t}{U_n}| < 1 \tag{4-7}$$

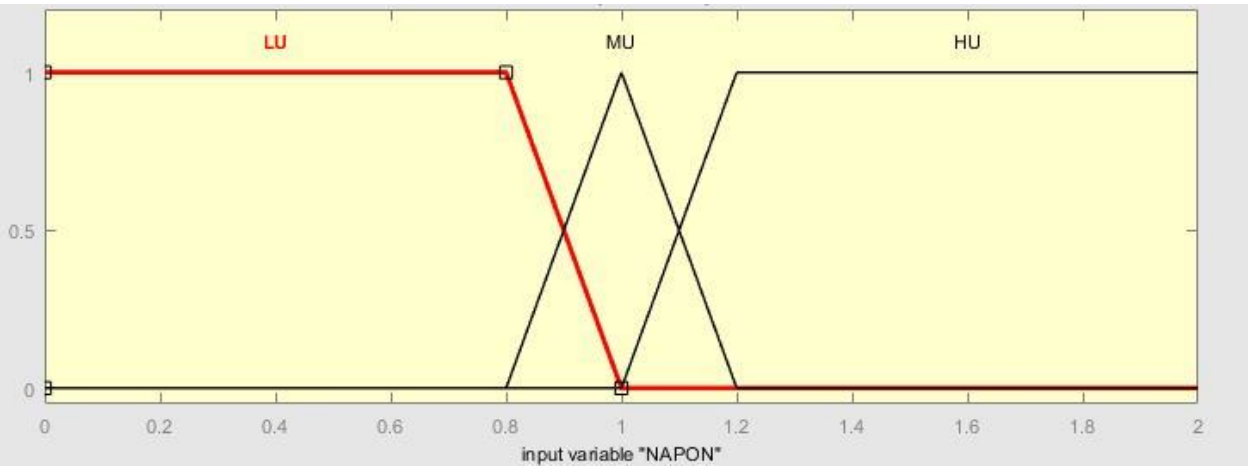
Tada se na tom elementu dogodio pad napona nakon kvara. Ako indeks osjetljivosti ipak ima vrijednost

$$\Delta U = |\frac{U_t}{U_n}| \approx 1 \tag{4-8}$$

Tada na tom elementu nema značajne promjene vrijednosti napona ili je promjena premala. Pripadajuće funkcije pripadnosti se mogu vidjeti na slici 4.5. gdje indeks osjetljivosti LU definira pad napona nakon događaja, MU definira neznatnu promjenu napona, a HU definira porast napona nakon događaja.

Odabrane vrijednosti za osjetljivost promjene napona su:

- Ako je vrijednost osjetljivosti promjene napona od 0 do 0,9, indeks osjetljivosti je označen s LU
- Ako je vrijednost osjetljivosti promjene napona od 0,9 do 1,1, indeks osjetljivosti je označen s MU
- Ako je vrijednost osjetljivosti promjene napona veći od 1,1, indeks osjetljivosti je označen s HU



Slika 4.5. Funkcije pripadnosti za ulaznu varijablu NAPON

Nakon definiranja svih ulaznih varijabli, potrebno je definirati neizrazita pravila koja će povezivati ulazne varijable s izlaznom varijablom. Izlazna varijabla će imati tri moguće neizrazite vrijednosti u ovoj simulaciji:

- PK - označava element mreže na kojemu se dogodio primarni kvar
- SK - označava element mreže koji je zbog posljedice primarnog kvara imao sekundarni ili tercijarni kvar
- NK - označava element mreže na kojem nema nikakvog kvara niti posljedica zbog nastalog primarnog kvara

Na početku ovog poglavlja je spomenuto da se podatci moraju prikupiti za generatore, trošila, sabirnice i prijenosne vodove. Pa je tako potrebno definirati i pravila za donošenje odluka za navedene elemente u mreži.

A. Pravila za donošenje odluke o mjestu kvara za prijenosne vodove

- Nema struje, prekidači su otvoreni, preopterećenje nije registrirano - kvar na prijenosnom vodu
- Nema struje, prekidači su otvoreni, preopterećenje je registrirano - isključenje zbog preopterećenja
- Nema struje, prekidači su zatvoreni - kolaps napona
- Preveliki tok snage - preopterećenje

B. Pravila za donošenje odluke o mjestu kvara na sabirnici

- Svi rastavljači u čvoru su otvoreni, nema toka snage, napon je jednak nuli - kvar na sabirnicama

C. Pravila za donošenje odluke o mjestu kvara na generatoru

- Nema struje, zatvoreni prekidači - interna greška na generatoru
- Nema struje, otvoreni prekidači - isklop uzrokovan greškom u mreži

D. Pravila za donošenje odluke o mjestu kvara na trošilu

- Nema struje, zatvoreni prekidači - interna greška na teretu
- Nema struje, otvoreni prekidači - isklop uzrokovan greškom u mreži

Neizrazita pravila je potrebno definirati posebno za svaku grupu elemenata u mreži; dakle jedan set pravila za trošilo, drugi za generator, treći za prijenosni vod i četvrti za sabirnicu. Svaki set pravila će u sebi sadržavati 36 pravila budući da imamo četiri ulazne varijable od kojih dvije varijable imaju dva stanja i druge dvije varijable imaju 3 stanja ($3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 36$). Nakon analiziranja pravila i donošenja odluke o izlaznoj vrijednosti, izlazna vrijednost bi trebala proći defazifikaciju. Pa bi se tako mogla napraviti jednostavna defazifikacija po prioritetu; jedina vrijednost izlazne varijable PK bi imala prioritet (izrazitu vrijednost) 1, vrijednosti izlazne varijable SK bi imale prioritet 2, a vrijednosti izlazne varijable NK bi imale prioritet 3.

4.2. Izrada modela neizrazitog sustava u MATLAB-u

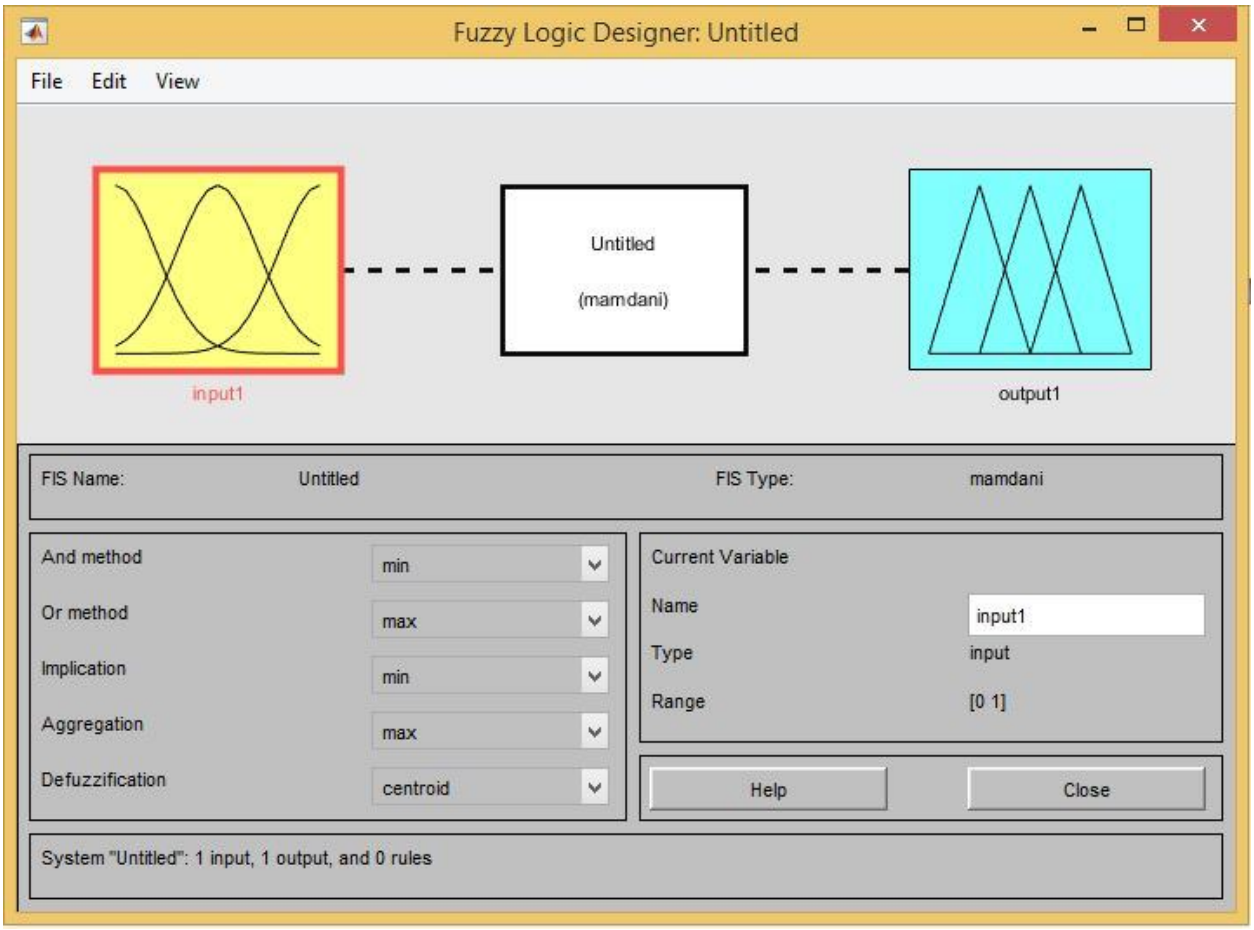
MATLAB je programski paket koji je korišten od strane inženjera i znanstvenika za analiziranje i dizajniranje sustava i proizvoda koji transformiraju svijet. Nalazi se u međuplanetarnim letjelicama, uređajima za nadzor zdravlja, pametnim električnim mrežama i LTE mobilnim mrežama. Koristi se za učenje strojeva, procesiranje signala, procesiranje slika, komunikacije, računske financije, dizajniranje kontrole, robotici i u još mnogo toga. MATLAB je optimiziran za rješavanje inženjerskih i znanstvenih problema. MATLAB koristi jezik koji je baziran na matricama, što je najprirodniji način izražavanja i prikaza računalne matematike. U MATLAB-u je ugrađeno i grafičko sučelje koje pojednostavlja vizualizaciju i uvid u podatke te ima mnogo ugrađenih alata koji olakšavaju rad s raznim algoritmima.[11]

Jedan od alata, koji se koristi za simuliranje neizrazite logike, je *Fuzzy Logic Designer* koji se može vidjeti na slici 4.6. Koristi se za rukovanje visokorazrednim pitanjima; koliko ima ulaznih i izlaznih varijabli u sustavu i kako se zovu, te se iz njega otvaraju druge stavke ili alati kao što su:

- *Membership Function Editor* - za definiranje oblika svih funkcija pripadnosti za sve varijable
- *Rule Editor* - za editiranje liste pravila koja povezuju ulazne i izlazne varijable
- *Rule Viewer* - za pregled neizrazitog zaključivanja
- *Surface Viewer* - za pogled na ovisnost izlaza o bilo kojem ulazu - generira i crta izlaznu mapu u obliku površinskog trodimenzionalnog prostora

Sva navedena sučelja su dinamički povezana - svaka promjena neizrazitog sustava na jednom od njih će utjecati na promjene u svim drugim otvorenim sučeljima.

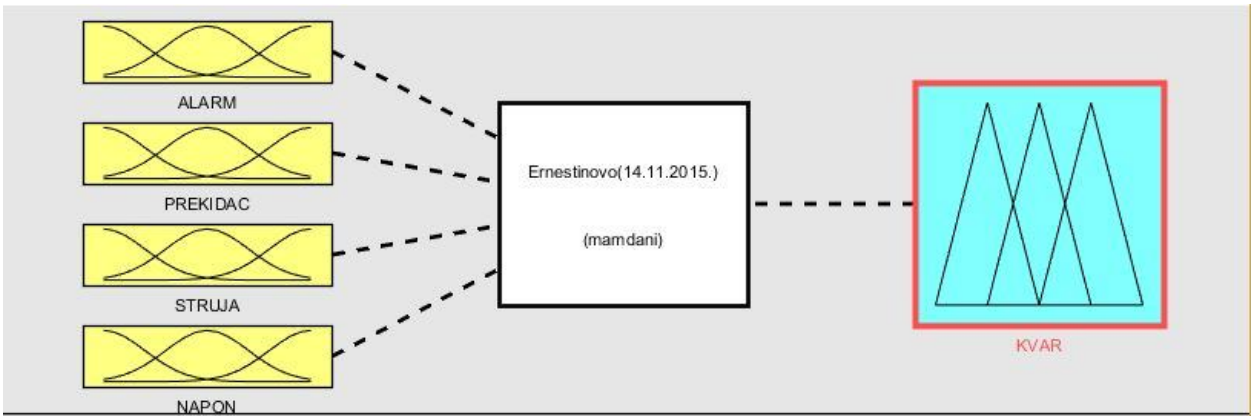
Kako bi upalili alat *Fuzzy Logic Designer* (skraćeno *FLD* u nastavku teksta), nakon pokretanja MATLAB-a potrebno je u *Command Window*-u, koji je osnovni dio za pisanje naredbi u MATLAB-u, upisati riječ *Fuzzy*, nakon čega se otvara prozor koji se može vidjeti na slici 4.6.



Slika 4.6. Prikaz sučelja za alat *Fuzzy Logic Designer*

Moguće je vidjeti da kao početne stavke imamo definiranu jednu ulaznu veličinu, jednu izlaznu veličinu i Mamdanijev proces zaključivanja. *FLD* nudi mogućnost definiranja svojih metoda zaključivanja pravila. Prva stvar koju je potrebno napraviti je dodati potreban broj ulaznih varijabli, što je u ovom slučaju 4. Varijable se dodaju klikom na tipku *Edit*, te na otvorenom padajućem izborniku se odabire *Add Variable...* i odabire se *Input*. Na istom mjestu se dodaju i varijable za izlaznu veličinu, jedino se u zadnjem koraku odabire *Output.* Nakon dodavanja još dodatne tri ulazne varijable, potrebno je svaku od varijabla imenovati radi lakšeg snalaženja u simulaciji, što je moguće napraviti u donjem desnom dijelu sučelja, gdje na slici 4.6. stoji napisano *input1*. Pa je tako prva ulazna veličina nazvana, prema definiranim imenima u prethodnom potpoglavlju, ALARM, druga će se zvati PREKIDAC, treća STRUJA i četvrta NAPON, dok će se izlazna veličina nazvati KVAR. Također će se promijeniti naziv same simulacije; na slici 4.6. je moguće vidjeti da piše *Untitled* u procesnom sustavu neizrazite logike, klikom na tipku *File* u gornjem izborniku, te odabirom *Export -> To File* se imenuje simulacija i također snima progres u simulaciji. Odabrani naziv

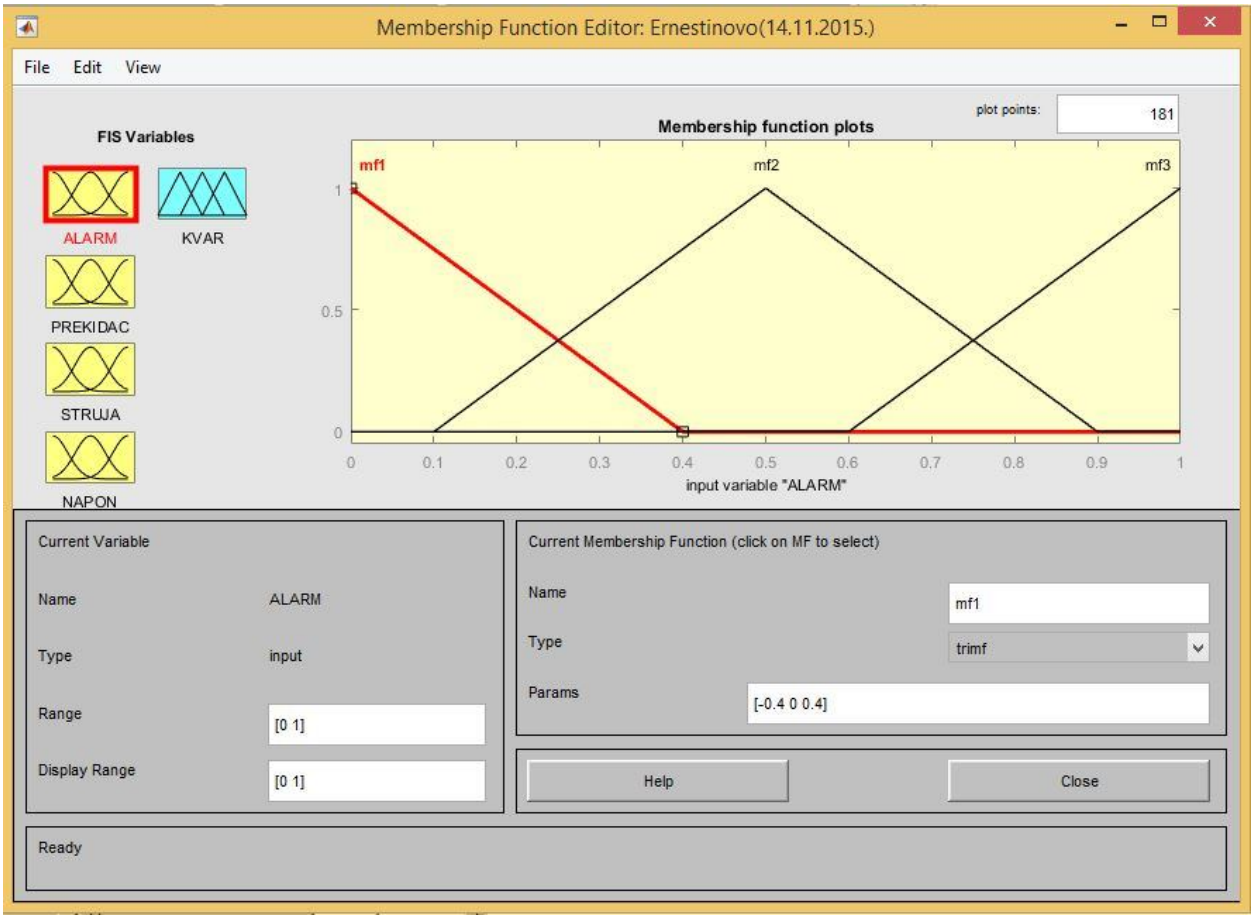
će biti *Ernestinovo(14.11.2015.)*, što je mjesto i datum događanja kvara. Tako imenovane varijable i sustav zaključivanja se mogu vidjeti na slici 4.7.



Slika 4.7. Dodane i imenovane sve potrebne varijable i sustav zaključivanja

Nakon toga je u *FLD*-u sve napravljeno te je idući korak definiranje funkcija pripadnosti za svaku od varijabli. Dvoklikom na bilo koju od varijabli, ili odabirom u gornjem izborniku na *Edit->Membership Functions* se otvara sučelje *Membership Function Editor* kojeg se može vidjeti na slici 4.8. Na slici je početna odabrana varijabla ALARM i može se vidjeti da su unaprijed definirane funkcije pripadnosti, odnosno početne funkcije pripadnosti za bilo koju varijablu, trokutnog oblika. U donjem lijevom dijelu je opisana varijabla imenom i vrstom te je moguće podesiti domet x-osi u polju *Range*. U desnom dijelu sučelja je moguće vidjeti ime funkcije u polju *Name*, vrstu odabranog oblika funkcije u polju *Type* (*trimf* označava trokutni oblik) i parametre te funkcije - u slučaju trokutaste funkcije imamo tri parametra: Gdje funkcija počinje rasti po *y* osi je prvi parametar, vrh funkcije u kojoj dostiže vrijednost 1 po *y* osi je drugi parametar, i povratak funkcije na vrijednost 0 po *y* osi što je treći parametar. Kako bi dobili funkciju pripadnosti za varijablu ALARM, koja se može vidjeti na slici 4.2., potrebno je izbrisati sve dodijeljene funkcije pripadnosti odabirom u gornjem izborniku na *Edit->Remove all MFs*, te nakon toga dodati svoje dvije funkcije. U ovom procesu je moguće izabrati niz funkcija koje će zadovoljiti potrebu za dva osnovna stanja, 0 i 1, kojima je definirana varijabla ALARM. Također je moguće i napraviti vlastitu funkciju u skripti u MATLAB-u i unijeti je u *Membership Function Editor*. Za ovu simulaciju je odabrano rješenje s funkcijama imena *trapmf* odnosno s dvije funkcije trapeznog oblika koje se u simulaciju mogu dodati putem gornjeg izbornika na *Edit->Add MFs...* nakon čega se izbacuje prozor za odabir tipa funkcije i količini funkcija koje će se dodati. Funkcije trapeznog oblika su definirane s 4 parametra; prvi parametar definira gdje funkcija započinje po osi *x*, odnosno na kojoj vrijednosti *x* se diže od vrijednosti 0 po *y* osi prema vrijednosti 1, a drugi parametar

označava u kojoj točki na osi *x* dostiže vrijednost 1 po *y* osi. Treći parametar tada definira početak opadanja funkcije prema vrijednosti 0 po *y* osi, a četvrti parametar definira točku na osi *x* gdje je vrijednost funkcije ponovno pala na 0 po y osi. Kako ova varijabla može imati samo vrijednost 0 i 1, prve dvije koordinate za prvu funkciju nisu relevantne (u ovoj simulaciji su odabrane početne koordinate -2,8 i -1,2), a druge dvije koordinate će biti 0 i 0, odnosno prva trapezna funkcija će definirati indeks osjetljivosti - (minus), kada zaštita nije proradila. Druga trapezna funkcija će pak prve koordinate imati 0,000001 i 0,00001, dok su druge dvije proizvoljne, ali moraju biti veče od 1 (u ovom slučaju su 1.2 i 2.8) te ona definira indeks osjetljivosti + (plus). Na ovaj način su definirane funkcije pripadnosti za varijablu ALARM, te se na identičan način definiraju funkcije pripadnosti za varijablu PREKIDAC. Funkcije pripadnosti za varijablu PREKIDAC su prikazane na slici 4.3.



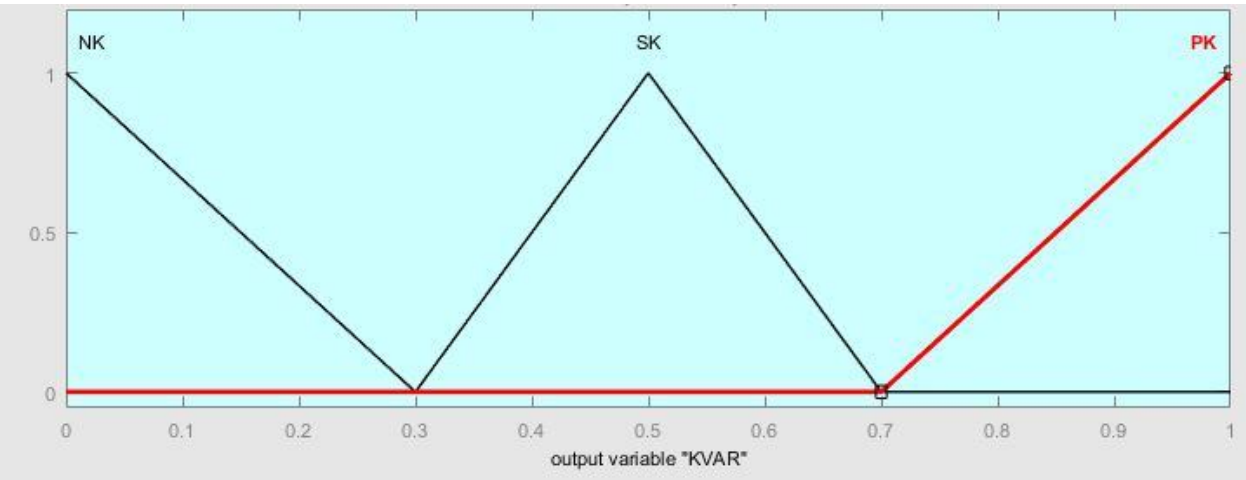
Slika 4.8. Sučelje za alat *Membership Function Editor*

Za definiranje treće varijable STRUJA će biti potrebno napraviti tri funkcije pripadnosti, jedna trokutastog oblika i dvije trapeznog oblika, odnosno jedna funkcija *trimf* i dvije funkcije *trapf*.

Prva funkcija trapeznog oblika će definirati indeks osjetljivosti LI, odnosno područje smanjenja struje, kao što je definirano u prethodnom poglavlju. Prva dva parametra za prvu trapeznu funkciju su 0 i 0 dok su druga dva parametra 0,7 i 1. Druga trapezna funkcija definira indeks osjetljivosti HI i ima prva dva parametra 1 i 1,3 dok će druga dva parametra biti proizvoljna; u ovom slučaju 800 i 800 kako bi osigurali da simulacija omogućava korištenje do 800 puta veće struje kratkog spoja od normalne vrijednosti - jedino se po potrebi mora podesiti domet same varijable kako bi se mogle postaviti takve vrijednosti. Funkcija u obliku trokuta definira indeks osjetljivosti MI te će imati parametre (0,7; 1 i 1,3). Navedene funkcije pripadnosti se mogu vidjeti na slici 4.6.

Posljednja ulazna veličina koju treba definirati je NAPON. Za definiranje ovih funkcija pripadnosti je potrebno, kao i za prethodnu varijablu STRUJA, dvije trapezne funkcije i jedna trokutastog oblika. Prva funkcija trapeznog oblika definira indeks osjetljivosti LU te su joj prva dva parametra 0 i 0, a druga dva 0,8 i 1. Druga trapezna funkcija definira indeks osjetljivosti HU te su joj prva dva parametra 1 i 1,2, a druga dva 10 i 10 (opet proizvoljna vrijednost - koliko puta veći napon od nazivnog se želi detektirati). Trokutasta funkcija definira indeks osjetljivosti MU te ima parametre (0,8; 1 i 1,2). Navedene funkcije pripadnosti se mogu vidjeti na slici 4.5.

Od varijabli je još potrebno definirati funkcije pripadnosti za izlaznu veličinu KVAR. Izlazna funkcija se može definirati na više načina s obzirom na kakav izlaz želimo; najjednostavniji izbor je ostaviti tri trokutaste funkcije koje MATLAB sam ponudi pri kreiranju varijable, ali ih podesiti tako da nema preklapanja između rezultata. Prva trokutasta funkcija se tako može definirati s parametrima (-0,3; 0 i 0,3) te će označavati indeks NK. Druga trokutasta funkcija će se definirati s parametrima (0,3; 0,5 i 0,7) te će ta funkcija označavati indeks SK. Treća funkcija će se definirati s parametrima (0,7; 1 i 1,3) te će ona označavati PK. To će značiti da vrijednost izlaza u rasponu od 0 do 0,3 će biti NK, odnosno neće biti kvara za takvu simulaciju; u rasponu od 0,3 do 0,7 će biti SK, odnosno da se dogodio sekundarni ili tercijarni kvar na promatranom elementu; u rasponu od 0,7 do 1 će biti PK, odnosno na promatranom elementu se dogodio primarni kvar. Definirane funkcije pripadnosti za izlaz se mogu vidjeti na slici 4.9.



Slika 4.9. Funkcije pripadnosti izlazne varijable KVAR

Nakon definiranja varijabli je potrebno definirati pravila za svaki od mogućih elemenata mreže. Budući da u listi događaja djela mreže, čiji se dio može vidjeti na slikama 4.10., 4.11., 4.12. i 4.13., na kojemu se desio kvar nema nikakvih podataka vezanih uz trošila ili generatore, takva pravila nije potrebno definirati za simulaciju, već samo pravila za sabirnice i prijenosne vodove.

Book	Sheet	Name	Cell	Value
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B71	ERNEST 110 PRIGUŠNICA PREKIDAČ Q0 ISKLJUČEN
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B81	ERNEST 110 SP W123 PREKIDAČ Q0 ISKLJUČEN
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B89	ERNEST 110 NAŠICE PREKIDAČ Q0 ISKLJUČEN
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B92	ERNEST 110 ĐAKOVO 3 PREKIDAČ Q0 ISKLJUČEN
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B94	ERNEST 110 OSIJEK2/1 PREKIDAČ Q0 ISKLJUČEN
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B96	ERNEST 110 TP2 PREKIDAČ Q0 ISKLJUČEN
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B115	ERNEST 400 TP2 PREKIDAČ Q0 ISKLJUČEN

Slika 4.10. Popis svih aktivacija prekidača iz liste događaja

Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B135	OSIJEK1 110 TP1	STRUJA	U LIM4HI zoni	165.00 A
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B136	OSIJEK1 35 TP1	STRUJA	U LIM3HI zoni	480.00 A
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B260	OSIJEK1 110 TP1	STRUJA	Normalno	132.00 A
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B261	OSIJEK1 35 TP1	STRUJA	Normalno	480.00 A
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B372	ĐAKOVO 110 ĐAKOVO 3	STRUJA	U LIM4HI zoni	645.00 A
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B388	OSIJEK1 110 ERNESTIN/2	STRUJA	U LIM3HI zoni	320.00 A
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B426	ĐAKOVO 110 ĐAKOVO 3	STRUJA	Normalno	516.00 A
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek	B520	OSIJEK1 110 ERNESTIN/2	STRUJA	Normalno	320.00 A

Slika 4.11. Detektirane promjene struje iz liste događaja

Book	Sheet	Name	Cell	Value	Formula
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B134	ĐAKOVO 110 D ANDRIJEV NAPON U LIM3LO zoni 99.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B137	OSIJEK1 35 TP1 NAPON U LIM4LO zoni 32.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B158	NIJEMCI 35 TP2 NAPON U LIM4LO zoni 32.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B170	OSIJEK1 35 TP1 NAPON Normalno 33.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B180	VINKOV 35 TP1 NAPON U LIM4LO zoni 32.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B181	VINKOV 35 TP2 NAPON U LIM4LO zoni 32.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B185	ĐAKOVO 110 ĐAKOVO 3 NAPON U LIM4LO zoni 94.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B225	NIJEMCI 35 TP2 NAPON Normalno 33.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B318	VINKOV 35 TP1 NAPON Normalno 33.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B319	VINKOV 35 TP2 NAPON Normalno 33.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B373	ĐAKOVO 110 D ANDRIJEV NAPON Normalno 99.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B415	ĐAKOVO 110 ĐAKOVO 3 NAPON Normalno 99.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B457	ERNEST 400 MP NAPON SAB W2 U LIM3HI zoni 420.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B458	ERNEST 110 MP SEK A NAPON SAB W1 Ulazak u nul zonu 0.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B459	ERNEST 110 MP SEK B NAPON SAB W1 Ulazak u nul zonu 0.00 KV	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B460	ERNEST 110 TP2 NAPON Ulazak u nul zonu 0.00 KV	

Slika 4.12. Detektirane promjene napona iz liste događaja

2015-11-14	08:32:56	D MIHOL	110	VALPOVO ZAŠ REL DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	D MIHOL	110	VALPOVO ZAŠ REL DIST ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	D MIHOL	110	VALPOVO ZAŠ REL DIST FAZA L1 POT	-
2015-11-14	08:32:56	D MIHOL	110	VALPOVO ZAŠ REL DIST ZEMLJA E POT	-
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO	110	ERNESTIN/2 ZAŠ REL DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO	110	ERNESTIN/2 ZAŠ REL DIST ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO	110	VINKOVCI ZAŠ REL DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO	110	VINKOVCI ZAŠ REL DIST ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	OSIJEK4	110	ERNESTIN ZAŠ REL ZEMSP TK SL POT	+
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO	110	ERNESTIN/2 ZAŠ REL DIST FAZA L2 POT	+
2015-11-14	08:32:56	OSIJEK4	110	OSIJEK3 ZAŠ RED ZS TK SLANJE POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	NAŠICE ZAŠ 7SA FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	NAŠICE ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	NAŠICE ZAŠ 7SA DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	NAŠICE ZAŠ 7SA DIST SUP SMJER POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	NAŠICE ZAŠ 7SA DIST SUP SMJER POT	-
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	NAŠICE ZAŠ 7SA DIST ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	VINKOV	110	ERNESTIN ZAŠ REL DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	OSIJEK4	110	ERNESTIN ZAŠ REL DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO3	110	ERNESTIN ZAŠ RED DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	400	UGLJEVIK ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	OSIJEK1/2 ZAŠ 7SA FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	OSIJEK1/2 ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	ĐAKOVO/2 ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	ĐAKOVO/2 ZAŠ 7SA FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	OSIJEK2/1 ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO	110	ĐAKOVO 3 ZAŠ RED DIST FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ĐAKOVO	110	ĐAKOVO 3 ZAŠ RED ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	OSIJEK2/2 ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	OSIJEK4 ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	VINKOVCI ZAŠ 7SA FAZA L1 POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	110	VINKOVCI ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+
2015-11-14	08:32:56	D ANDRI	110	ĐAKOVO ZAŠ REL ZEMSP TK SL POT	+
2015-11-14	08:32:56	ERNEST	400	S MITROV2 ZAŠ 7SA ZEMLJA E POT	+

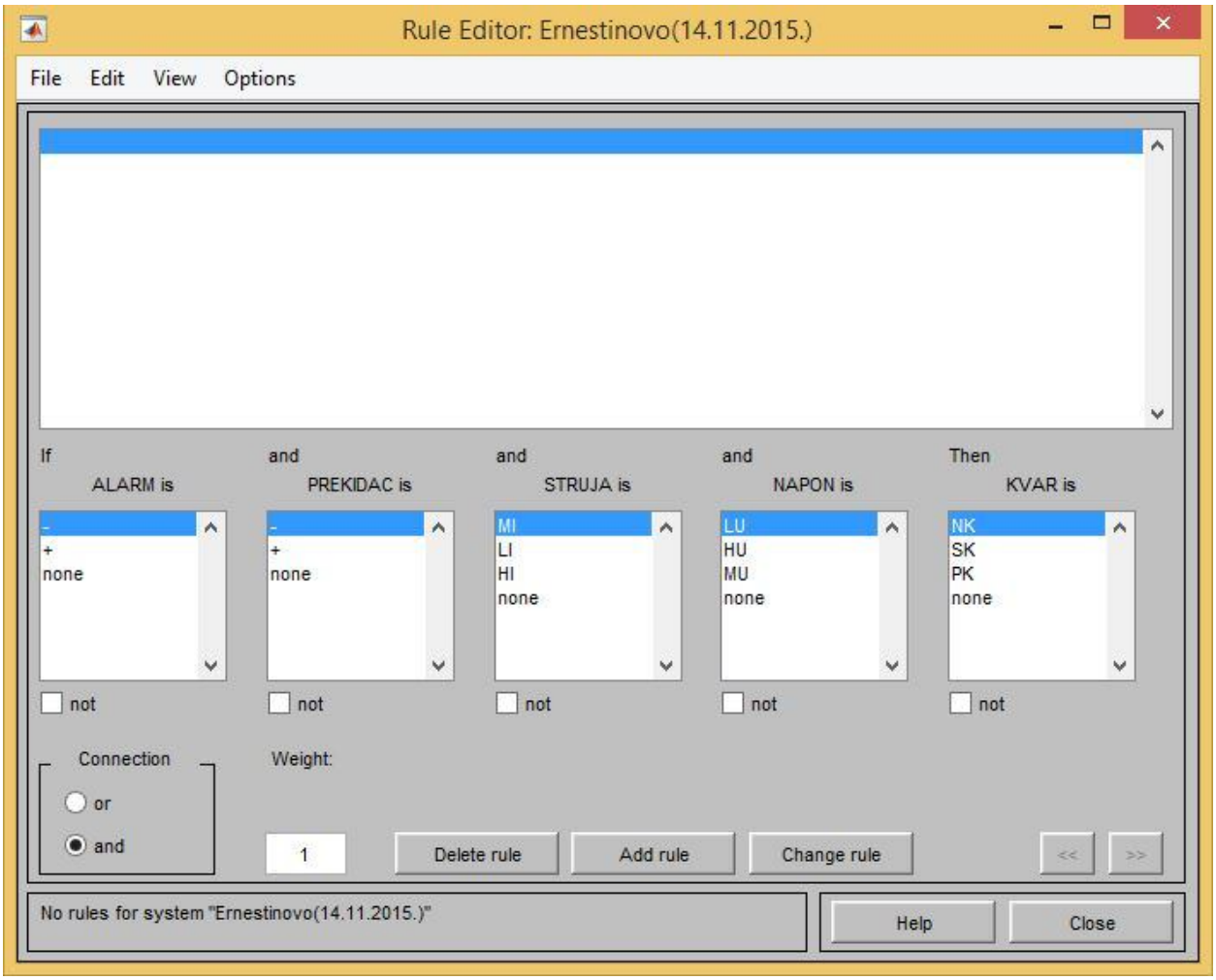
Slika 4.13. Dio popisa aktivacije alarma/signala zaštite iz liste događaja

Dio podataka je također moguće i uvidjeti sa slika dvije minute prije i poslije ispada mreže, kao što se može vidjeti koji su prekidači isključeni, gdje se događalo preopterećenje i ostalo, što je korisno za dodatnu analizu kvara. Slike stanja mreže prije i poslije kvara se mogu vidjeti u prilogu 4.1.

Prema pravilima opisanima u prethodnom poglavlju za vodove i sabirnice donose se pravila za zaključivanje neizrazitog sustava koja se mogu vidjeti u tablicama u prilogu 4.2. Za pravilno i potpuno donošenje pravila za određeni dio mreže je potrebno detaljno proučavanje stanja mreže kako bi se definirali i sekundarni i tercijarni kvarovi s maksimalnom preciznošću. Budući da pravila zaključivanja uvijek donosi sam operater potrebno je imati što više informacija o ponašanju sustava kako bi se točno definirali sekundarni i tercijarni kvarovi i same funkcije pripadnosti za varijable. Za potrebe ovog rada je bitno točno definirati pravila za primarni kvar, sekundarni i tercijarni kvarovi (koji su obilježeni indeksom SK) su napisani intuitivno; ako je prekidač isklopio na prijenosnom vodu to je posljedica glavnog kvara, odnosno sekundarni kvar, ili ako je struja povećana kroz vod je preopterećenje što bi odgovaralo tercijarnom kvaru.

Definirana pravila je potrebno unijeti u model neizrazitog sustava u MATLABu. To se može napraviti iz bilo kojeg sučelja u sklopu *FLD*-a odlaskom na gornji izbornik i odabirom *Edit->Rules...* nakon čega se izbacuje izbornik *Rule Editor* koji se može vidjeti na slici 4.14. U gornjoj polovici ovoga alata će biti ispisana pravila koja se ubacuju u simulaciju. Sama pravila se ubacuju u donjoj polovici alata, gdje se mogu vidjeti sve definirane varijable i njihove poveznice. Moguće je definirati povezivanje ulaznih varijabli s logičkim operatorima "ILI" i "I". Za ovu simulaciju se sva zaključivanja vode s logičkim operatorom "I" (eng. *and*). Za primjer pravila za definiranje primarnog kvara, prema popisu pravila u tablici u prilogu, se unosi pravilo u sustav; za sabirnice se odabire da su ALARM +, PREKIDAC +, STRUJA LI, NAPON LU te je tada izlaz KVAR PK, te se pritišće tipka *Add rule*. Na isti način se dodaje ostalih 35 pravila. Nakon dodavanja pravila za sabirnice, je potrebno dodati pravila za prijenosne vodove, za što je potrebno napraviti, odnosno kopirati, ovaj isti sustav te dodati posebna pravila za prijenosne vodove, ili nakon gotove simulacije nad sabirnicama izbrisati postojeća pravila i ubaciti pravila za vodove. Treba obratiti pozornost na nastanak primarnog kvara; ako se dogodio kratki spoj na vodu, kroz taj vod će biti registrirana struja kratkog spoja, no i za vodove krajem će biti znatno povećana struja. Prema tome je mjesto primarnog kvara na vodu, koje ispunjava pravilo iz tablice u prilogu 4.2. b), je dodatno dopunjeno kriterijem da se primarni kvar dogodio na onom vodu s najvećom razlikom u struji prije i poslije kvara.

Nakon ubačenih svih potrebnih pravila potrebno je analizirati podatke iz liste događaja kako bi se mogao simulirati rezultat.



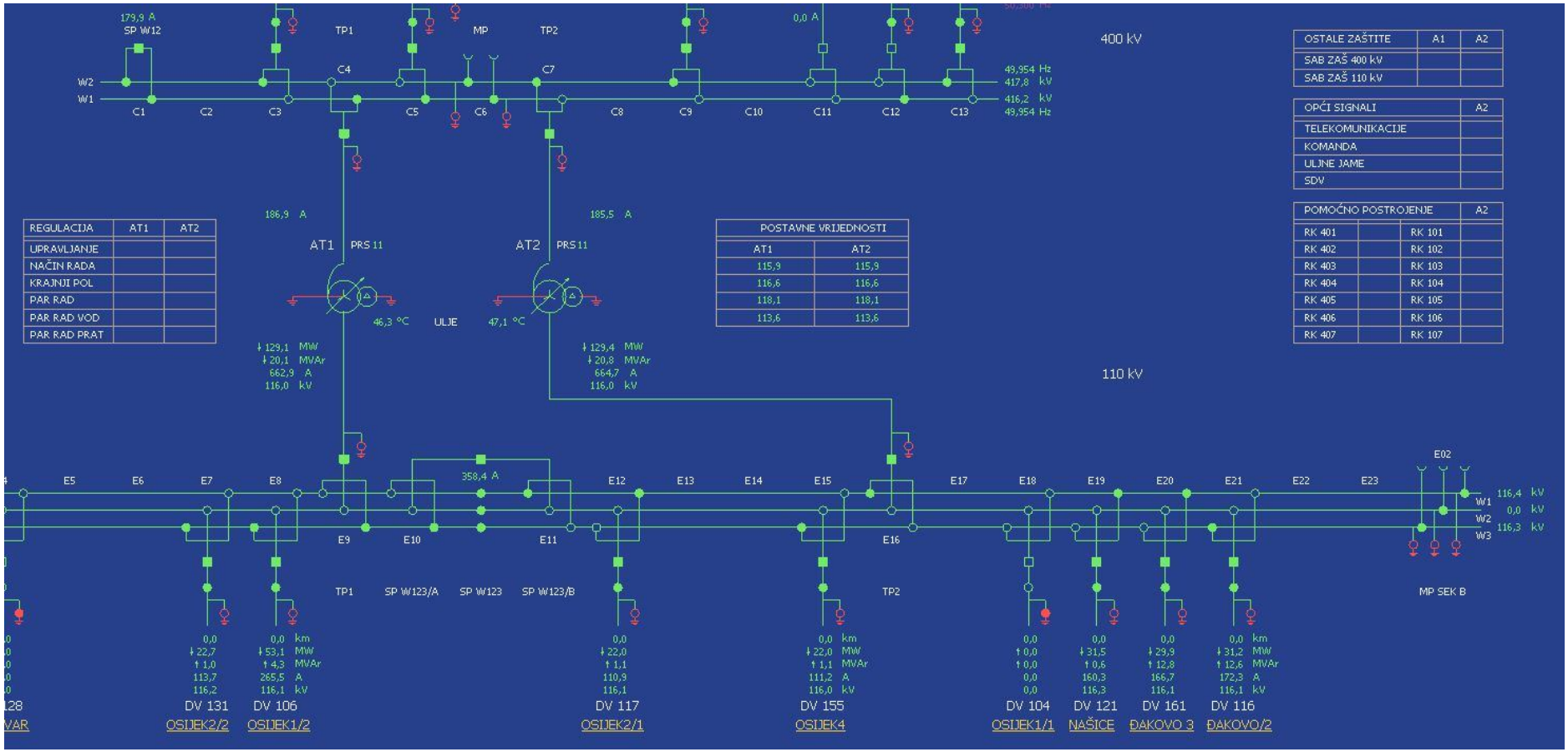
Slika 4.14. Sučelje *Rule Editor* za dodavanje pravila za logično zaključivanje sustava.

4.3. Analiza podataka iz liste događaja i rješenja dobivenih simulacijom

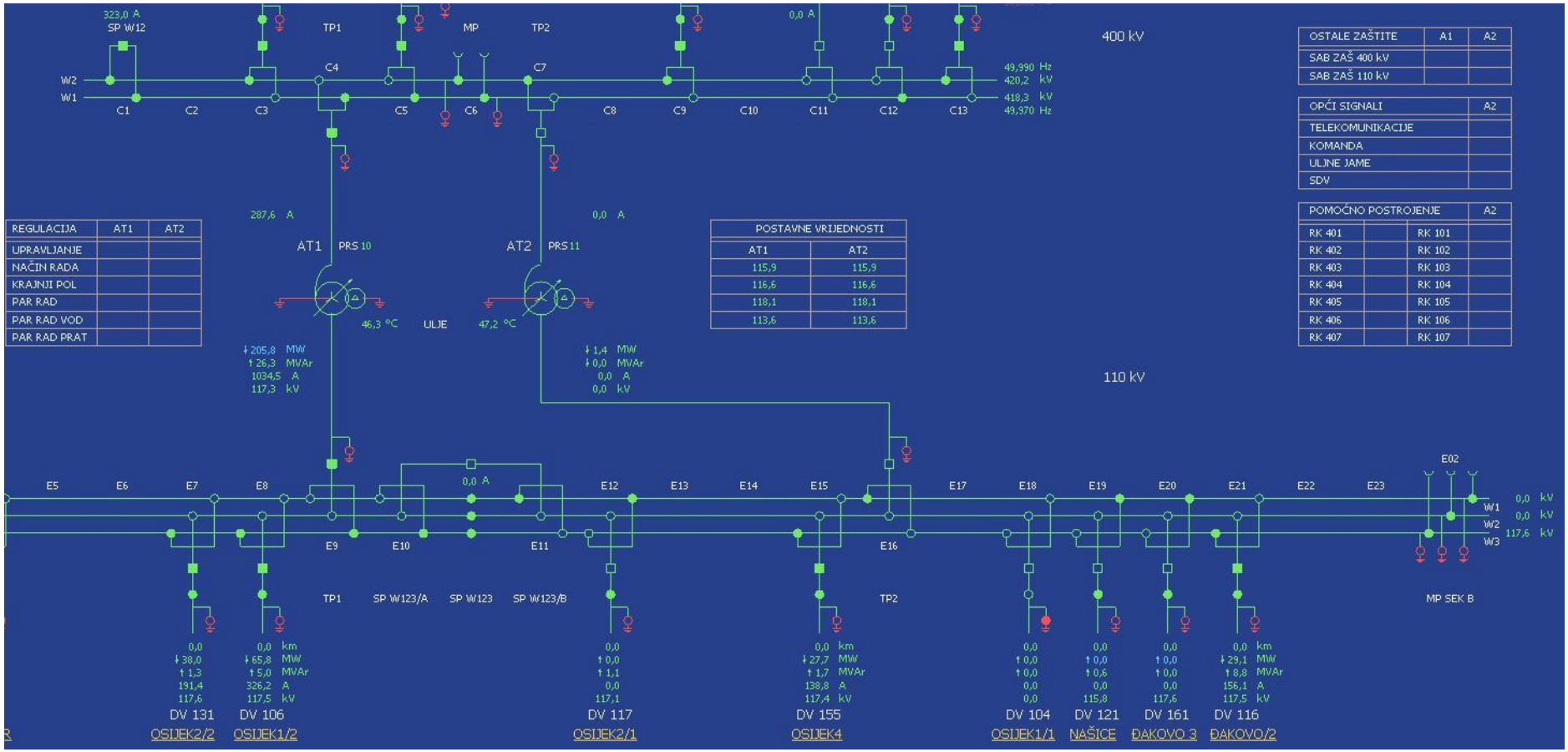
Na listi promjene struja na slici 4.11. je moguće vidjeti da niti jedna struja nije nekoliko puta veća od normalne vrijednosti, odnosno nije u redovima kiloampera, a na listi napona na slici 4.12. je moguće vidjeti kako niti jedan napon ne odgovara naponu kratkog spoja, dok je napon na sabirnici W1 na 110 kV strani u Ernestinovu pao na nulu. Na slici 4.10. se vidi popis aktiviranih prekidača u trenutku kvara, te je moguće vidjeti da je jedan od aktiviranih prekidača imena SP W123 koji razdvaja dva transformatorska polja na sabirnicama 110 kV, kojega je moguće vidjeti na slikama 4.16. i 4.17. Na slici 4.15. se može vidjeti aktivacija zaštite u obliku signala za isklapanje. Zaštita se aktivirala samo za fazu L1. S obzirom na ove podatke se zaključuje da je primarni kvar nastao na sabirnici Ernestinovo 110 kV, na strani transformatorskog polja 2.

Book	Sheet	Name	Cell	Value	Formula
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B143	ERNEST 110 SABIRNIČKA ZAŠ 7SS SAB DIF OPĆI ISKLOP+	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B144	ERNEST 110 SABIRNIČKA ZAŠ 7SS SAB DIF OPĆI ISKLOP-	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B217	ERNEST 110 SABIRNIČKA ZAŠ 7SS SAB W1B L1 ISKLOP+	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B245	ERNEST 110 SABIRNIČKA ZAŠ 7SS SAB W1B ISKLOP+	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B246	ERNEST 110 SABIRNIČKA ZAŠ 7SS SAB W1B ISKLOP-	
Lista dogadjaja - Regija Osijek(1).xls	Lista dogadjaja - Regija Osijek		B374	ERNEST 110 SABIRNIČKA ZAŠ 7SS SAB W1B L1 ISKLOP-	

Slika 4.15. Prikaz reagiranja sustava zaštite na sabirnici Ernestinovo 110 kV



Slika 4.16. Prikaz transformatorske stanice Ernestinovo dvije minute prije kvara



Slika 4.17. Prikaz transformatorske stanice Ernestinovo 2 minute nakon kvara

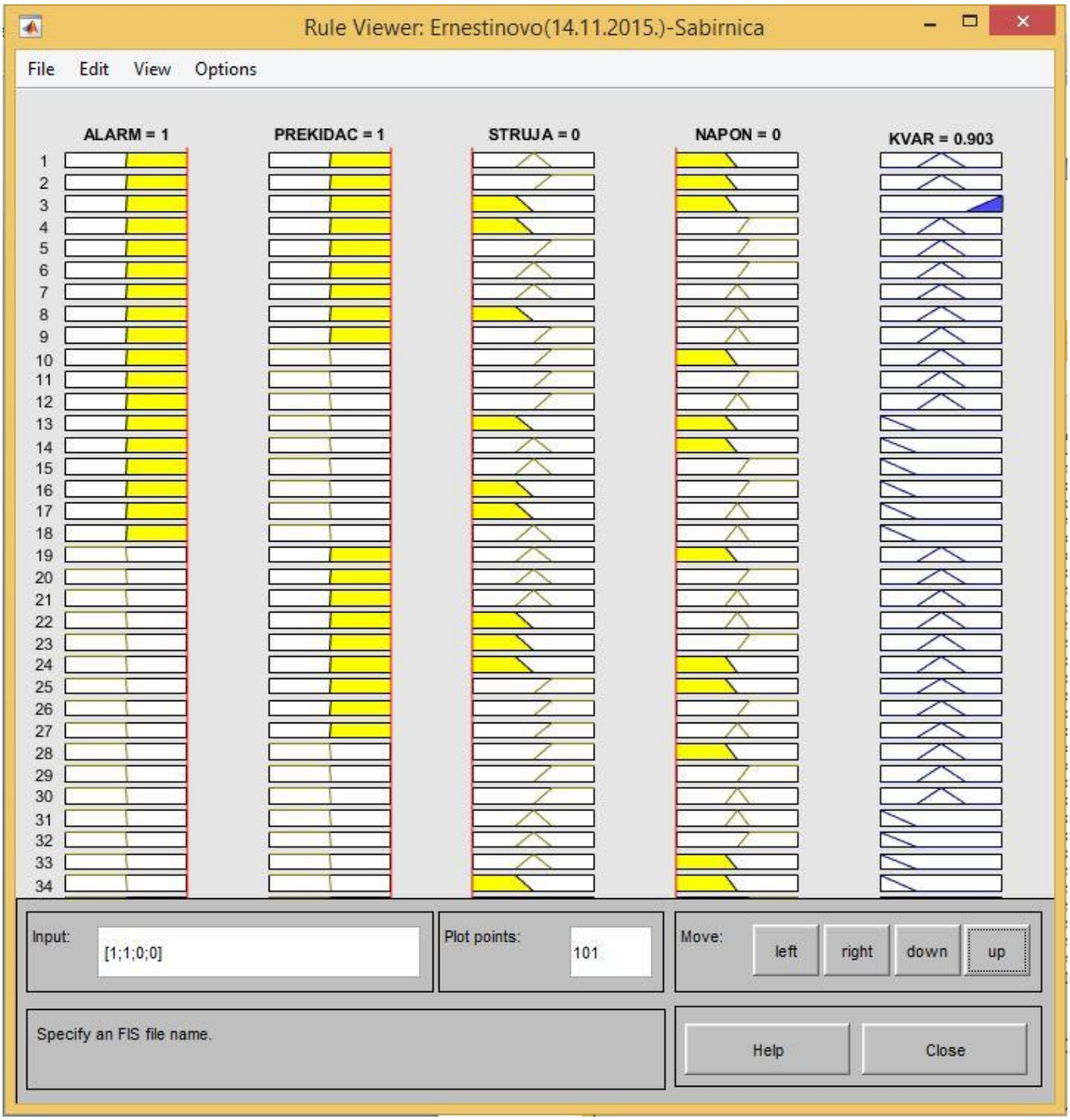
Za potrebe simulacije navedene podatke treba pretvoriti u definirane neizrazite vrijednosti:

1. ALARM - Budući da je zaštita reagirala na promatranoj sabirnici ova varijabla ima vrijednost 1 u simulaciji
2. PREKIDAC - Budući da je prekidač isklopio na sabirnici ova varijabla ima vrijednost 1 u simulaciji
3. NAPON - Sa slike 4.16. je moguće vidjeti da je napon bio 116,4 kV na sabirnici W1 prije ispada. Iz liste događaja se vidi da je nakon kvara napon pao na nultu vrijednost što će davati onda rezultat:

$$\Delta U = \left|\frac{U_t}{U_n}\right| = \left|\frac{0}{116,4}\right| = 0\,V$$

4. STRUJA - Budući da je prekidač aktiviran, a napona kroz sabirnicu W1 nema, tok snage je jednak nuli što znači da je i struja jednaka nultoj vrijednosti

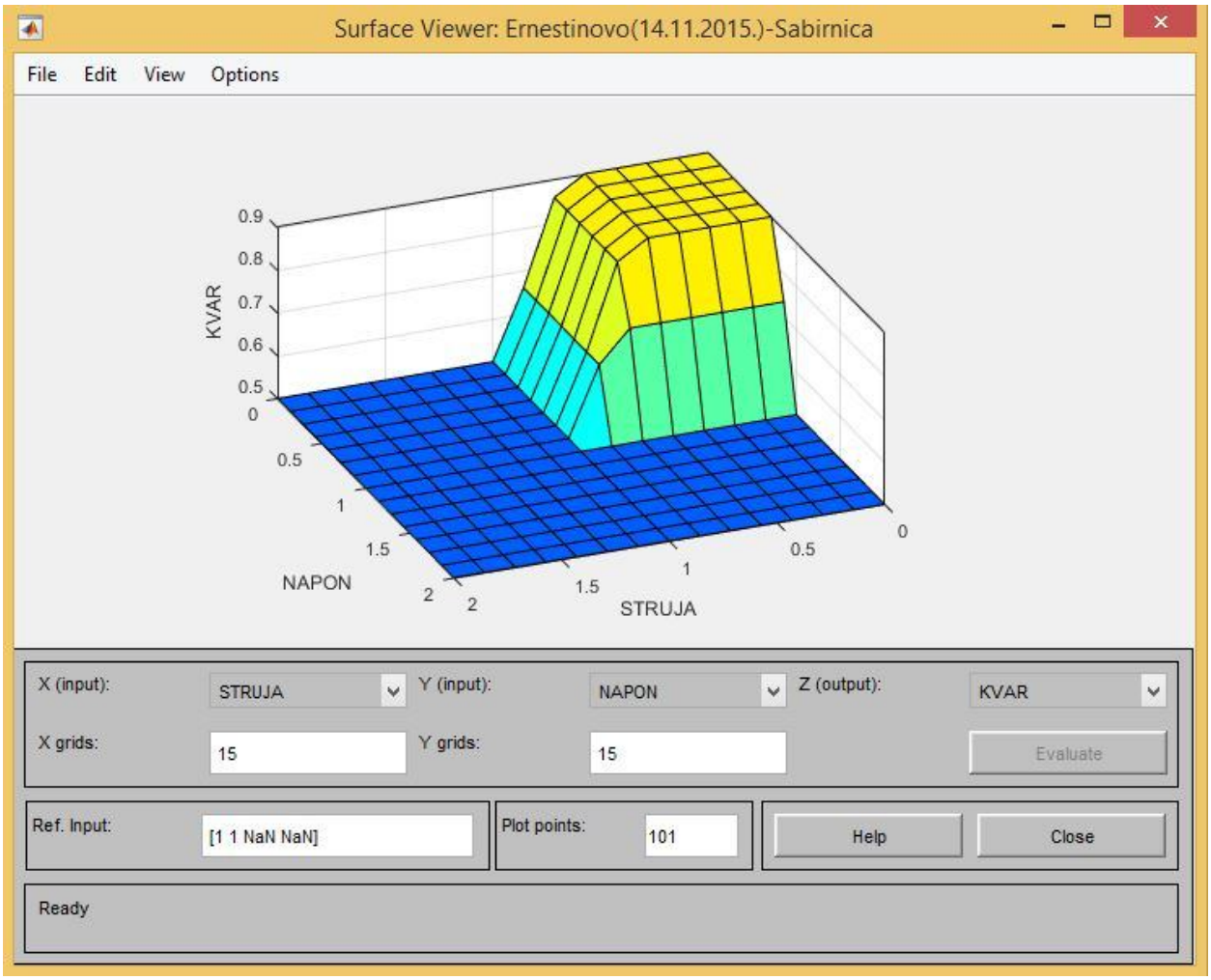
Kako bi se mogao provjeriti rezultat simulacije potrebno je, u bilo kojem od sučelja za definiranje neizrazitog sustava u MATLAB-u, u gornjem izborniku izabrati *View->Rules* nakon čega se pojavljuje sučelje *Rule Viewer* koje se može vidjeti na slici 4.18, s unesenim vrijednostima za 4 ulazne varijable. Nije moguće prikazati sva pravila u jednoj slici (zadnja 2 pravila ne stanu na jedan prozor, već je potrebno koristiti funkciju *move* na desnoj strani), no može se vidjeti da s ovako postavljenim parametrima, pravilo broj 3 je zadovoljeno, izlazna veličina ima vrijednost 0,93, što je veće od 0,7 te označava da je to indeks osjetljivosti PK. U donjem lijevom dijelu, gdje je naznačeno *Input* se može promijeniti bilo koja ulazna varijabla, s tim da je maksimalna promjena do dometa koji je odabran pri definiranju prijenosnih funkcija. U ovom slučaju se za struju i napon ne može staviti više od 2 dok se ne promijeni domet.



Slika 4.18. Sučelje *Rule Viewer* alata sa unesenim parametrima za sabirnicu Ernestinovo 110 kV

Za lakši pregled rješenja postoji grafički trodimenzionalni prikaz u alatu *Surface Viewer* do kojeg se dolazi odabirom u gornjem izborniku na *View->Surface*. Pri prvom pokretanju će MATLAB sam podesiti da je veličina na *x* osi (*X (input)*) ALARM, a na *y* osi (*Y (input)*) PREKIDAC. U *Ref. Input* dijelu se podešavaju vrijednosti druge dvije ulazne varijable, ako ih ima više od dvije, i kao početno stanje im je stavljena vrijednost 0. Ovaj prikaz je idealan ako ne postoji više od dvije promjenjive varijable budući da samo varijable na *x* i *y* osi mogu prikladno prikazati svoju promjenjivost, dok se druge konstante varijable definiraju u *Ref. Input* dijelu.

Potrebno je dakle *X(input)* prebaciti na varijablu STRUJA, a *Y(input)* na varijablu napon. Varijable ALARM i PREKIDAC se tada automatski prebacuju u *Ref. Input* odjeljak te im se tu može postaviti vrijednost 0 ili 1. Kada se postavi vrijednost 1 za oba dvije varijable dobije se grafički prikaz vidljiv na slici 4.19. Sliku je moguće rotirati radi lakšeg pregleda. Moguće je vidjeti da je minimalna vrijednost Izlazne veličine KVAR u ovom slučaju 0,5, odnosno SK, budući da je u pravilima postavljeno kada god je prekidač isključen da se dogodio sekundarni ili tercijarni kvar. Graf se uzdiže po *z* osi tek pri zajedničkom opadanju varijabli STRUJA i NAPON ispod vrijednosti 1; vrijednost 0,7, koja označava indeks PK, je moguće dosegnuti tek na vrijednostima za varijablu STRUJA 0,85 i za NAPON 0,9. U ovome alatu se pravila mogu jednostavno pregledati, jedino je potrebno promijeniti jednu od dvije konstantne varijable na drugu vrijednost (nula u ovoj simulaciji), pa se dobiva grafički prikaz za set od drugih 9 pravila, što se može vidjeti u slikama u prilogu 4.3., zajedno s ostalim stanjima varijable ALARM i PREKIDAC.



Slika 4.19. Grafički prikaz rezultata u alatu *Surface Viewer*

Za daljnju analizu se mogu pogledati, kao prvo, stanja ostalih prekidača. Može se vidjeti na slici 4.10. da je TP2 (transformatorsko polje 2) isključeno, te su jednostrano isključeni vodovi od 110 kV strane Ernestinova prema Našicama, Đakovu3 i Osijeku 2/1, što znači da su ti vodovi zahvaćeni sekundarnim kvarom, odnosno nisu u pogonu radi glavnog kvara (Slika 4.17. i Prilog 4.1.). Na popisu promjene struje sa slike 4.12 se može vidjeti da je na 110 kV strani TP1 (transformatorskog polja 1) struja povećana, kao i što je slučaj s vodom *OSIJEK1 110 ERNESTIN/2*, odnosno njihove vrijednosti su

$$\Delta \mathrm{I} = |\frac{I_t}{I_n}| = |\frac{165}{132}| = 1,25 \qquad \Delta \mathrm{I} = |\frac{I_t}{I_n}| = |\frac{645}{516}| = 1,25$$

Što bi značilo da su oba dva elementa u preopterećenju, odnosno da su pod utjecajem primarnog kvara. Primjer simulacije za vod *ĐAKOVO 110 -> ĐAKOVO 3* se može vidjeti na slici 4.20 za varijable ovih vrijednosti: ALARM = 1, PREKIDAČ = 0, STRUJA = 1,25, NAPON:

$$\Delta U = |\frac{U_t}{U_n}| = |\frac{94}{99}| = 0,9495$$



Slika 4.20. Rezultat nakon unesenih podataka za vod *ĐAKOVO 110 -> ĐAKOVO 3*

Moguće je vidjeti da je rezultat varijable KVAR 0,427, što odgovara indeksu SK. Rezultat nije 0,5 radi vrijednosti napona koja se "preklapa" preko LU i MU indeksa (iako je MU većinski), isto kao što i struja nije u potpunosti na indeksu HI već se preklapa s MI indeksom.

Kompletne posljedice ovoga kvara se mogu provjeriti na slikama koje prikazuju stanje mreže prije i poslije kvara, čiji dio se može vidjeti u prilogu.

MATLAB je koristan za kompletno modeliranje simulacije i testiranje pravila i funkcija pripadnosti pri sintezi neizrazitog regulatora, te je jako bitno što daje mogućnost crtanja vlastitih funkcija pripadnosti i testiranja oba dva modela neizrazitog sustava (Mamdani i Sugeno). Neizraziti regulator uzima osnovne podatke iz baze podataka te ih uspoređuje s podatcima nastalih tijekom događaja iz SCADA sustava; kalkulacijama i usporedbama po definiranim pravilima dolazi do rješenja gdje je nastao primarni kvar te tu informaciju prikazuje zaduženom operateru kako bi on mogao reagirati. Dobro definirani neizraziti sustav ima svoje prednosti, kao što su lakoća pregleda rezultata, automatsko prioritetno sortiranje da se odmah može uočiti primarni kvar među rezultatima, popis elemenata koji osjete posljedice primarnog kvara, te velika brzina cijelog procesa usporedbe.

5. ZAKLJUČAK

Neizrazita logika dobiva sve veću primjenu u regulaciji prvenstveno zbog eliminacije potrebe za znanjem složenih matematičkih operacija za krajnjeg korisnika ili operatera. Postoje i nedostatci koji se zagovaraju za regulaciju primjenom neizrazitih sustava - klasična regulacija može nadmašiti neizrazitu uz korištenje sofisticiranih metoda projektiranja za što se mora poznavati model samoga procesa te se prema tome može ući dublje u svaki detalj pomoću matematičkog računa, dok je neizrazita regulacija više deskriptivna, odnosno empirijska. Što je kompliciraniji sustav ili proces lakše ga je detaljno obrazložiti primjenom klasične regulacije, dok je za potrebe ovoga diplomskoga rada, odnosno za detekciju kvara u prijenosnoj mreži, i vjerojatno za općenitu primjenu pri detekciji kvara u električnim sustavima, iznimno prikladna neizrazita logika budući da ulazne vrijednosti nisu komplicirane, matematičke jednadžbe za detekciju kvara su jednostavne te se putem pravila jako lagano može odrediti u kojoj situaciji se pojavljuje koji kvar. Također je lagano mijenjati osjetljivost samog sustava promjenom funkcija pripadnosti određene veličine, pa se tako može na primjer definirati i 5 indeksa osjetljivosti (ili više) za varijablu STRUJA u ovome radu, kako bi se točnije moglo definirati područja bez struje ili područja s jako velikim strujama. Radi toga je lagano koristiti već napravljeni neizraziti sustav za određenu električnu mrežu u drugoj električnoj mreži; logika zaključivanja ostaje ista samo je potrebno osjetljivost drugačije definirati i sukladno tome podesiti pravila inferencije. U samoj električnoj mreži se većina kvarova automatski otklanja pomoću elemenata zaštite i prekidača pa potreba za automatskom regulacijom putem neizrazitog regulatora nije izražena kao u drugim regulacijskim sustavima. Prvenstvena joj je namjena da se operatora odmah usmjeri na samo mjesto kvara, te da mu pokaže ostale zahvaćene dijelove kako bi mogao koordinirati daljnje vođenje elektroenergetskog sustava.

LITERATURA

[1] L.A., Zadeh., Fuzzy Sets. Information and Control, 8:338-353, 1965.

[2] D., Lončar, Primjena neizrazite logike u regulacijskom sustavu termoenergetskog bloka, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, doktorska disertacija, 2001.

[3] Foundations of fuzzy logic, The MathWorks Inc., dostupno na: https://nl.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[4] B., Knapp, Fuzzy Sets and Pattern Recognition, dostupno na: http://www.iaeng.org/IJCS/issues_v42/issue_4/IJCS_42_4_12.pdf (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[5] F. Chevrie, F. Guely, Fuzzy Logic, Cahier Technique no. 191, 1998, dostupno na: https://www.schneider-electric.com/en/download/document/ECT191/ (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[6] M., Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže I, FESB Split, 1996

[7] Projektovanje elektroenergetskih mreža, seminarski rad, dostupno na: http://www.seminarski-diplomski.co.rs/ELEKTRONIKA/Projektovanje-elektroenergetskih-mreza.html (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[8] Godišnje izvješče 2016, Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o., dostupno na: https://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/godisnjiizvjestaji (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[9] Desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže 2018. -2027., s detaljnom razradom za početno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje , Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o., 2017, dostupno na: https://www.hera.hr/hr/docs/2017/Prijedlog_2017-10-03_01.pdf (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[10] M., Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže VI, FESB Split, 2008

[11] MATLAB Product description, dostupno na: https://uk.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[12] I. Petrović, L. Jozsa, Z. Baus, Use of fuzzy logic systems for assessment of primary faults, Journal of electrical engineering, 66 (2015), 5; 257-263

[13] G. i V. Jose, Fuzzy logic based Fault Diagnosis in Induction Motor, 14th National Conference on Technological Trends, Kerala India, Volume 14, August 2013, dostupno

na: https://www.researchgate.net/publication/274248316/download (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[14] C. Danial, A. Abdulrahman i dr. S. Abdullah, A Fuzzy Logic Based Approach for Fault Classification in Power Transformer System, International Journal of Computer Science and Electronics Engineering (IJCSEE, Volume 2, Issue 2 (2014), dostupno na: http://www.isaet.org/images/extraimages/B414026.pdf (pristup ostvaren 17.9.2018.)

[15] Ž. Šitum, Regulacija pneumatskih servosustava primjenom neizrazitog regulatora, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, doktorska disertacija, 2001.

[16] I. Petrović, L. Jozsa, D. Galić, The application of fuzzy inference systems in overload elimination and correction, Automatika - Journal for Control Measurement, Electronics, Computing and Communications, Volume 57, No 1, 2016.g dostupno na: https://automatika.korema.hr/index.php/automatika/issue/view/A57%5B1%5D (pristup ostvaren 17.9.2018.)

SAŽETAK

Analiza detekcije kvara putem neizrazite logike je precizan proces gdje se mora uzeti u razmatranje veliki broj čimbenika, odnosno parametara vezanih za promatranu električnu mrežu. Kako bi se u potpunosti mogao razriješiti taj problem je potrebno teorijski razumjeti što definira neizrazitu logiku, kako se formiraju neizraziti sustavi te razumjeti što je potrebno provesti u sintezi neizrazitog regulatora. Potrebno je i teorijsko poznavanje prijenosnih mreža, njena osnovna svojstva te ponašanje cjelokupnog sustava pri pojavi kvara. Primarni kvar u većini slučajeva nije teško detektirati i definirati u samim pravilima neizrazitog regulatora, no pri definiranju sekundarnih i tercijarnih kvarova, odnosno detektiranje dijelova mreže zahvaćenih primarnim kvarom, je detaljniji posao za što je dobro složenije definirati funkcije pripadnosti kako bi se svaki detalj, koji se operatoru želi prikazati, mogao lagano definirati. U ovome diplomskome radu je teorijski razmotrena detekcija primarnog kvara i napravljen je model u programskom paketu MATLAB kako bi se prikazao proces neizrazitog zaključivanja.

Ključne riječi: neizrazita logika, neizraziti sustav, prijenosna mreža, primarni kvar, kratki spoj, regulacija, MATLAB

ABSTRACT

Detection of faults is analysed through the use of fuzzy logic. Analysis is a precise process which must consider many factors and criteria related to the observed electrical network. For that problem to be solved, it is necessary to theoretically understand the fuzzy logic, to know how to form fuzzy systems and the knowledge for synthesizing the fuzzy regulator. Theoretical knowledge of transmission networks is necessary as well, along with the basic properties and behaviour of the whole power system when fault occurs. Primary fault isn't hard to detect in most cases, and it is pretty easy to define in rules of the fuzzy regulator; harder and perhaps finer part to define are the secondary and tertiary faults which equates to detecting the parts of the network that are affected by the primary fault. For that purpose it is good to make a more complex membership functions which would allow for easier definitions of each and every detail so it can be clearly shown to the network operator. In this master's thesis, the detection of primary faults is theoretically considered and a fuzzy model was made in a computer program MATLAB to represent the process of fuzzy inference.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy system, transmission network, primary fault, short circuit, regulation, MATLAB

ŽIVOTOPIS

Damir Krancpiler

Rođen je 8. Siječnja 1994. godine u Đakovu, gdje i živi. Završio je Osnovnu školu "Vladimir Nazor" u Đakovu. Nakon završene osnovne škole upisao je Obrtničku školu "Antun Horvat" u Đakovu sa zanimanjem Mehatronika te ju je završio 2011./2012. godine. Godine 2012./2013. upisuje prvu godinu preddiplomskog studija na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku te se na drugoj godini studiranja opredjeljuje za smjer energetika. Završni rad nosi naziv "Numerički proračun magnetskog polja različitih tipova zavojnica". Godine 2015./2016. upisuje prvu godinu diplomskog studija Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku, smjer održiva energetika. Od stranih jezika razumije i govori engleski. Živi s bratom i roditeljima i nezaposlen je.

PRILOZI

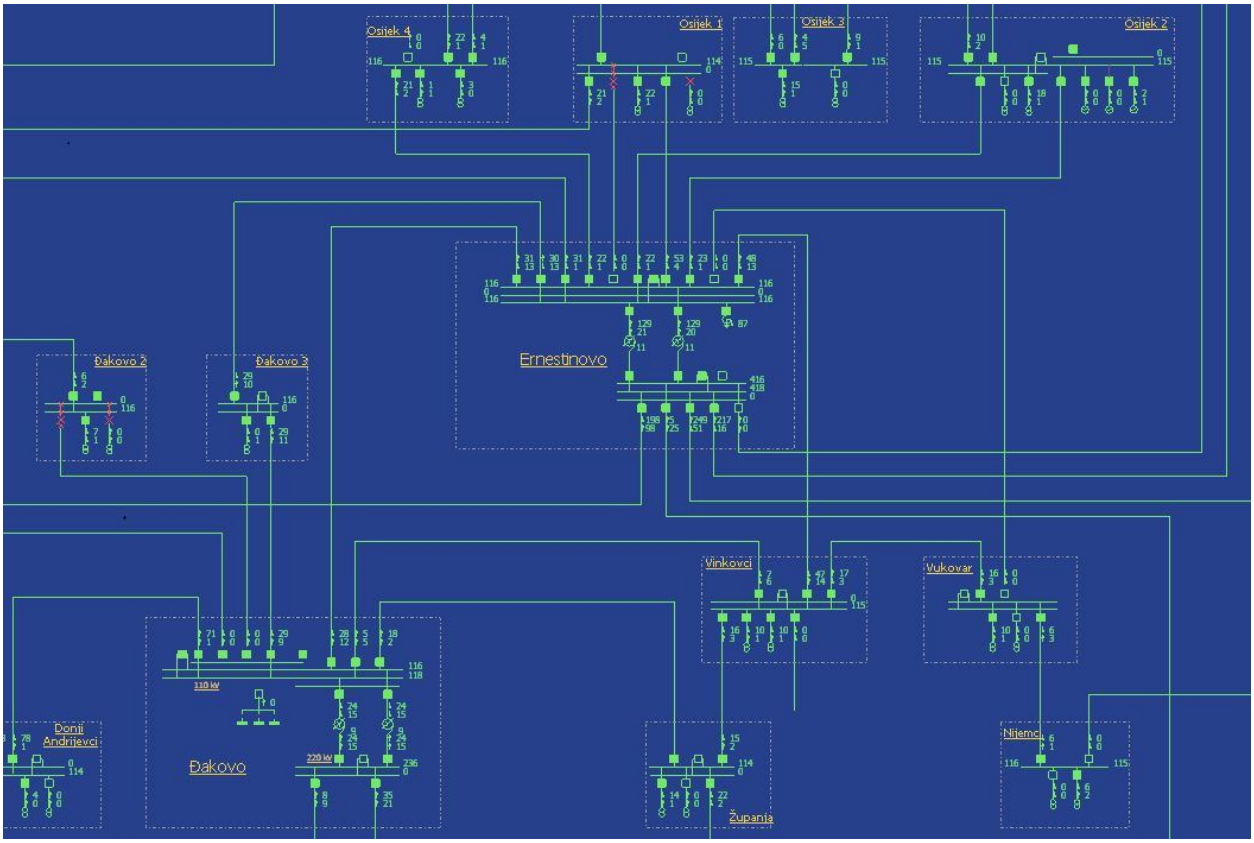
Popis priloga:

P.4.1 Prikaz stanja mreže - a) dvije minute prije kvara i b) dvije minute poslije kvara

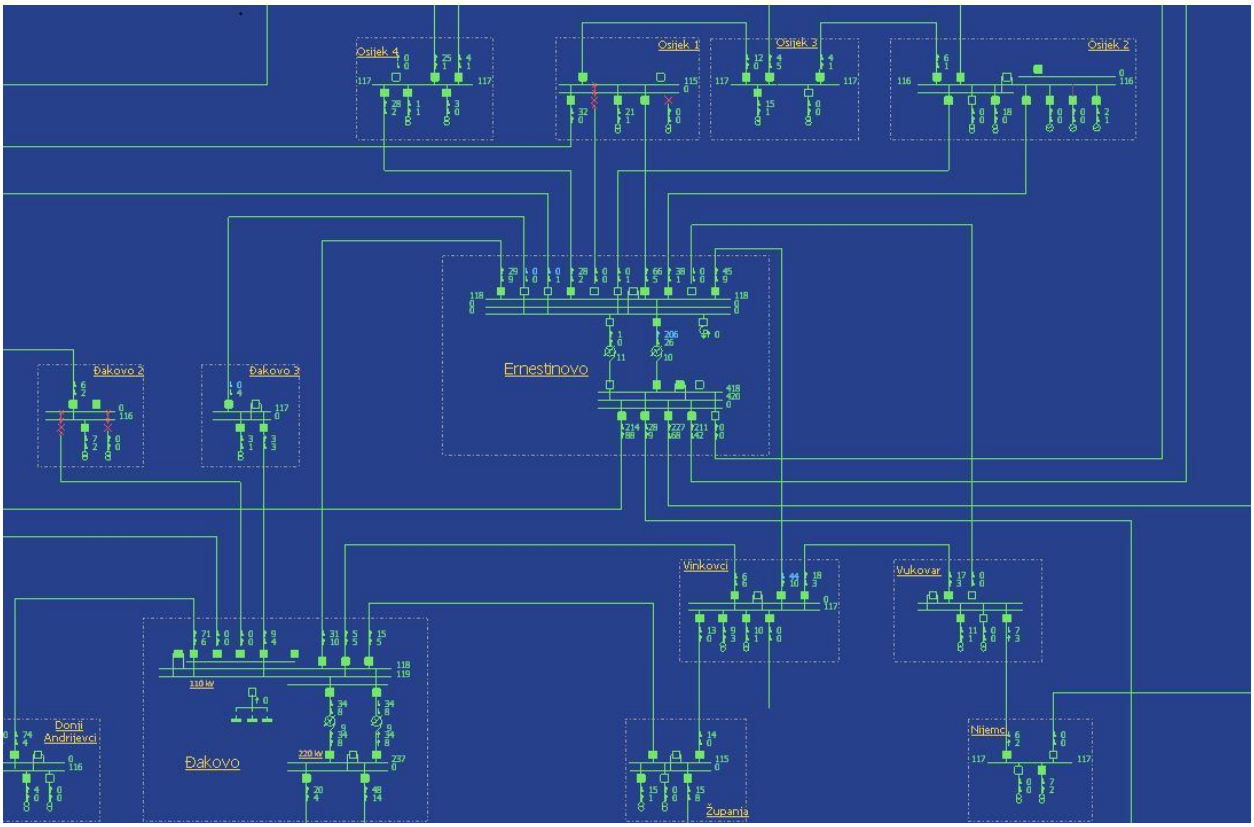
P.4.2 Tablični prikaz definiranih pravila za zaključivanje neizrazitog sustava - a) pravila za prijenosne vodove i b) pravila za sabirnice

P.4.3 Grafički prikaz pravila za sabirnice - za vrijednosti varijabli a) Alarm ima vrijednost 0, a PREKIDAC vrijednost 1; i b) ALARM ima vrijednost 0 ili 1, a PREKIDAC vrijednost 0

P.4.1 Slike prikazuju stanje mreže:



a) Dvije minute prije kvara



b) Dvije minute poslije kvara

P.4.2. Tablice prikazuju definirana pravila za zaključivanje neizrazitog sustava:

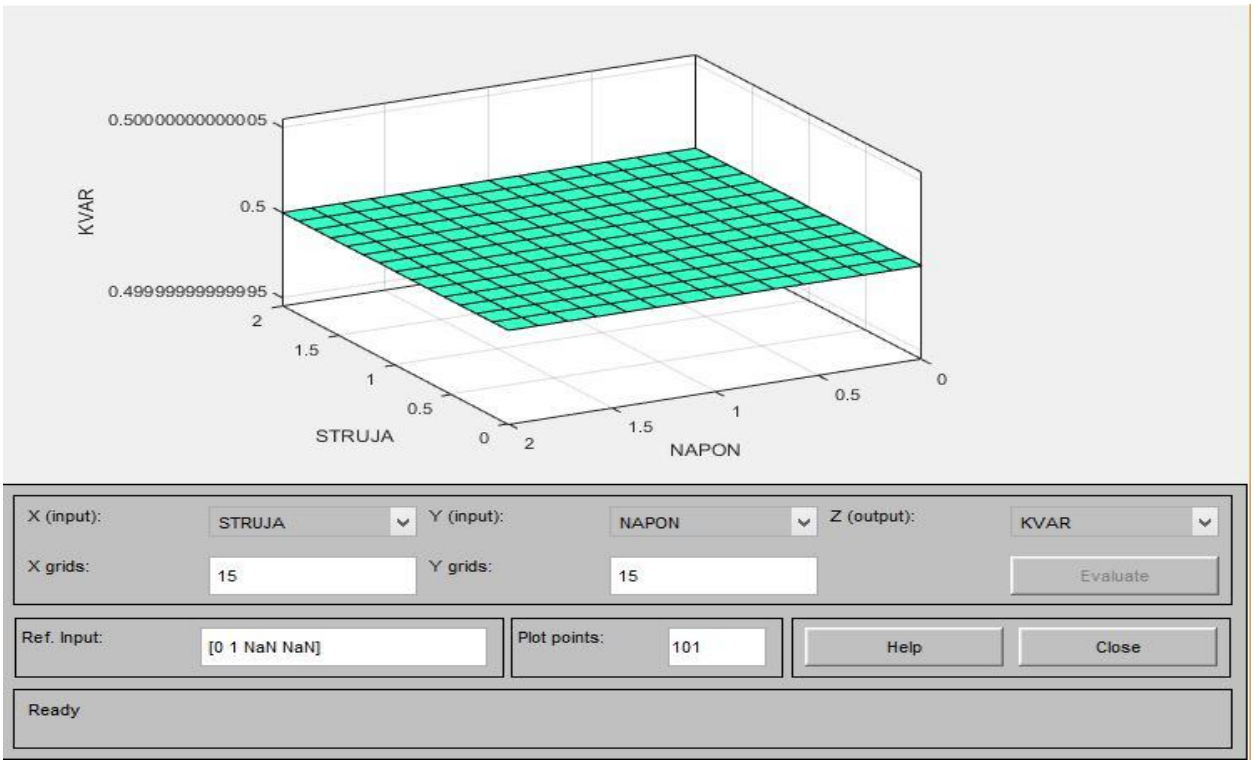
a) Pravila za prijenosne vodove

ALARM	PREKIDAC	NAPON	STRUJA	KVAR
+	+	LU	HI	PK
+	+	LU	MI	SK
+	+	LU	LI	SK
+	+	MU	HI	SK
+	+	MU	MI	SK
+	+	MU	LI	SK
+	+	HU	HI	SK
+	+	HU	MI	SK
+	+	HU	LI	SK
+	-	LU	HI	SK
+	-	LU	MI	NK
+	-	LU	LI	NK
+	-	MU	HI	SK
+	-	MU	MI	NK
+	-	MU	LI	NK
+	-	HU	HI	SK
+	-	HU	MI	NK
+	-	HU	LI	NK
-	+	LU	HI	SK
-	+	LU	MI	SK
-	+	LU	LI	SK
-	+	MU	HI	SK
-	+	MU	MI	SK
-	+	MU	LI	SK
-	+	HU	HI	SK
-	+	HU	MI	SK
-	+	HU	LI	SK
-	-	LU	HI	SK
-	-	LU	MI	NK
-	-	LU	LI	NK
-	-	MU	HI	SK
-	-	MU	MI	NK
-	-	MU	LI	NK
-	-	HU	HI	SK
-	-	HU	MI	NK
-	-	HU	LI	NK

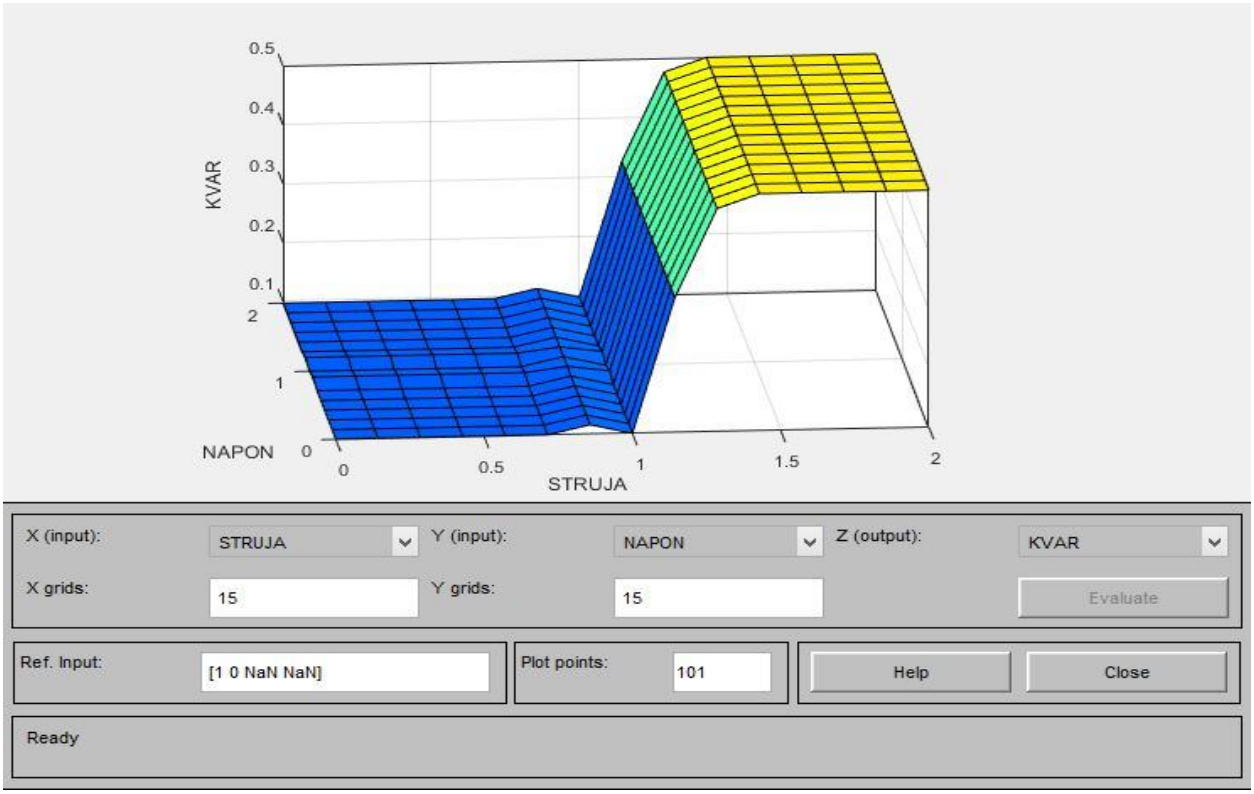
b) Pravila za sabirnice

ALARM	PREKIDAC	NAPON	STRUJA	KVAR
+	+	LU	HI	SK
+	+	LU	MI	SK
+	+	LU	LI	PK
+	+	MU	HI	SK
+	+	MU	MI	SK
+	+	MU	LI	SK
+	+	HU	HI	SK
+	+	HU	MI	SK
+	+	HU	LI	SK
+	-	LU	HI	SK
+	-	LU	MI	NK
+	-	LU	LI	NK
+	-	MU	HI	SK
+	-	MU	MI	NK
+	-	MU	LI	NK
+	-	HU	HI	SK
+	-	HU	MI	NK
+	-	HU	LI	NK
-	+	LU	HI	SK
-	+	LU	MI	SK
-	+	LU	LI	SK
-	+	MU	HI	SK
-	+	MU	MI	SK
-	+	MU	LI	SK
-	+	HU	HI	SK
-	+	HU	MI	SK
-	+	HU	LI	SK
-	-	LU	HI	SK
-	-	LU	MI	NK
-	-	LU	LI	NK
-	-	MU	HI	SK
-	-	MU	MI	NK
-	-	MU	LI	NK
-	-	HU	HI	SK
-	-	HU	MI	NK
-	-	HU	LI	NK

P.4.3. Slike prikazuju grafički prikaz pravila, za sabirnice, za vrijednosti varijabli:



a) ALARM ima vrijednost 0, a PREKIDAC vrijednost 1



b) ALARM ima vrijednost 0 ili 1, a PREKIDAC vrijednost 0