

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Domagoj Peharda

**OBJEKTNO ORIJENTIRANI MODEL
ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

MAGISTARSKI RAD

Zagreb, 2005.

Magistarski rad izrađen je na:

Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
Zagreb, Hrvatska

Mentor:

Dr. sc. Zdravko Hebel, red. prof.
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu

Magistarski rad ima 107 stranica.

Magistarski rad br.:

Povjerenstvo za ocjenu magistarskog rada

1. Doc. dr. sc. Ivica Pavić – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Zdravko Hebel – mentor
3. Prof. dr. sc. Srete Nikolovski, Elektrotehnički fakultet Osijek

Povjerenstvo za obranu magistarskog rada

1. Doc. dr. sc. Ivica Pavić – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Zdravko Hebel – mentor
3. Prof. dr. sc. Srete Nikolovski, Elektrotehnički fakultet Osijek

Magistarski rad je obranjen 6. srpnja 2005. godine.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Model elektroenergetske mreže	2
2.1. Električna mreža	3
2.2. Električno čvorište	4
2.2.1. Matematički model električnog čvorišta	4
2.2.2. Sabirnica	8
2.2.3. Teret.....	9
2.2.4. Generatori	10
2.3. Grana modelirana kao Π model	11
2.3.1. Opći Π model grane.....	11
2.3.2. Prijenosni vod	17
2.3.3. Transformator	18
2.3.4. Prigušnica i kondenzator	25
2.3.5. Prekidači i rastavljači.....	26
2.4. Matrice potrebne za proračun	29
2.4.1. Matrica admitancija čvorišta Y	29
2.4.2. Matrica impedancija čvorišta Z i Z_0 (direktni i nulti sustav).....	30
2.4.3. Matrica za brze razdvojene tokove snaga B' i B''	31
2.4.4. Matrica H za procjenu stanja	33
2.5. Proračuni za analizu i simulaciju EESa	33
2.5.1. Proračun tokova snaga.....	34
2.5.2. Proračun procjene stanja.....	36
2.5.3. Proračun kratkog spoja	38
3. Značajke objektno orijentiranog programiranja	41
3.1. Osnovna svojstva	41
3.1.1. Apstrakcija.....	41
3.1.2. Učahurivanje.....	42
3.1.3. Modularnost.....	42
3.1.4. Hijerarhija	43
3.1.5. Sporedna svojstva	44
3.2. Opis i grafičko prikazivanje objekata i relacija između objekata	45
3.2.1. Objekt/razred	45
3.2.2. Relacije između objekata.....	45
3.3. Prednosti i mane objektno orijentiranog programiranja nad proceduralnim programiranjem.....	47
4. Programska implementacija modela	50
4.1. Model EESa	51
4.1.1. Mreža	52
4.1.2. Čvorište.....	54
4.1.3. Teret.....	56
4.1.4. Generator	57
4.1.5. PogonskaKarta	59
4.1.6. Grana	60
4.1.7. Vod	62
4.1.8. Transformator	63
4.1.9. Poredna Admitancija	65
4.1.10. Prekidač	66

4.2. Pomoćni razredi	67
4.2.1. Mjerenje	67
4.2.2. Signalizacija	71
4.3. Operacije s matricama i vektorima	72
4.3.1. Razred Ymatrica: CxSpSqMx	73
4.3.2. Razred Y0matrica: CxSpSqMx	73
4.3.3. Razred CB za implementaciju B' i B"	74
4.4. Proračun tokova snaga FDLF	74
4.5. Proračun kratkog spoja	76
4.6. Procjena stanja	78
5. Diskusija	80
6. Zaključak.....	81
Dodatak A	83
Dodatak B.....	84
Literatura	101
Popis oznaka	103
Kratki sadržaj.....	106
Summary	106
Životopis.....	107

1. Uvod

Simulacija elektroenergetskog sustava pomoću računala postaje sve važnija u projektiranju, vođenju i edukaciji. Za to su potrebni razni proračuni, kao npr. tokovi snaga, procjena stanja, analize slučajnih događaja, analize sigurnosti, analize prijelazne stabilnosti, itd. Također i potrebe elektroenergetskih poduzeća se razlikuju. Javlja se potreba za programskom podrškom koja je prilagođena poduzeću i njegovim potrebama. Simulacija i vođenje EESa u tržišnim uvjetima također traži prilagođenu programsku podršku [Selvan 05]. Stoga vrijeme potrebno za razvoj i iskoristivost već razvijene programske podrške postaje sve važnija.

Do sada je prilikom razvijanja svakog proračuna ili simulacije bilo potrebno iznova modelirati elemente elektroenergetskog sustava i ugrađivati razvijene modele u programsku podršku. Svi elementi koji se žele uključiti u proračun moraju se modelirati i svakome se elementu mora posvetiti istovjetna pažnja i vrijeme za razvoj. Neki dijelovi programske podrške su do sada bili povezani, te je mala izmjena ili dodavanje novog elementa uzrokovala promjenu većeg dijela programa. Tako je izmjena programske podrške postala proporcionalno ovisna o veličini programa umjesto o veličini promjene. Takvim, izdvojenim pristupom svakom elementu elektroenergetskog sustava, povećava se vrijeme razvoja i trošak, no najveći problem proizlazi iz povećanja mogućnosti pogreške pri razvoju. Ako bi postojao model koji bi bio dovoljno dobar za većinu proračuna ne bi bilo potrebno ponovno razvijati model svakog elementa, te bi mogućnost greške bila smanjena. Druga strana kompleksnosti proračuna jest veliki broj različitih vrsta elemenata. Dakle potrebno je smanjiti vrste elemenata i stvoriti model koji zamjenjuje više elemenata. Obje problematike su obrađene u ovom radu, te predloženo rješenje obuhvaća oba problema.

2. Model elektroenergetske mreže

Elektroenergetski sustav se sastoji od mnogo različitih elemenata povezanih u sustav koji ima zadaću stvoriti i prenijeti energiju od mjesta proizvodnje do potrošača. Osnovni elementi, tj. primarna oprema, su generatori, transformatori, prijenosni vodovi, prigušnice, kondenzatori i trošila. Svi ti elementi su povezani u jednu električnu mrežu, te je za proračune važno sve te elemente ugraditi u model elektroenergetske mreže.

Modeliranju se pristupilo s idejom stvaranja jedinstvenog modela za sve proračune. Ovisno o proračunu određeni podaci se uzimaju iz modela. Ponekad je za izvršenje nekih zadataka potreban slijed proračuna na istom modelu, tako da izlaz jednog proračuna bude ulaz drugome npr. izlaz proračuna procjene stanja može biti ulaz za proračun optimalnih tokova snaga. To se postiže postojanošću podataka na modelu. Algoritmi za proračune kao ulazne podatke ne trebaju neke posebne parametre, već se svi potrebni parametri nalaze u modelu, a svoje rezultate algoritam veže na model tako da se podaci mogu upotrijebiti u nekom drugom proračunu/algoritmu/funkciji.

Pretpostavke i pojednostavljenja

Pošto je elektroenergetski sustav jedan od najvećih i najsloženijih tehnološko tehničkih sustava nije moguće modelirati sve njegove značajke. Matematički model se može više ili manje približiti stvarnom opisu elektroenergetskog sustava i njegovih elemenata. Za potrebe ovog rada uzeto je nekoliko pojednostavljenja modela od kojih je najvažnija pretpostavka o simetričnosti i linearnosti svih elemenata elektroenergetskog sustava. Pretpostavka o linearnosti elemenata omogućava modeliranje grana pomoću pasivnih četveropola. Pretpostavka o simetričnosti elemenata omogućava predstavljanje elektroenergetskog sustava njegovom jednopolnom shemom. Međutim, i nesimetrični proračun je vrlo lako ugraditi u razvijeni model. Potrebno je razviti novi tip podatka i ugraditi ga u model. U proračunu treba svaku veličinu zamijeniti matricom ili vektorom 3. reda.

Uređaji energetske elektronike kao što su FACTS (*eng. Flexible AC Transmission Systems*), STATCOM (*eng. Static Compensation*) i UPFC (*eng. Unified Power Flow Controller*) uređaji dosada nisu primjenjivani u EES-u Hrvatske, te stoga nisu modelirani u ovom radu.

Metoda jediničnih vrijednosti

U radu se koristi metoda jediničnih vrijednosti gdje su parametri snaga [S], napon [U], struja [I] i impedancija [Z] svedeni na jedinične vrijednosti (*eng. per unit*). Pomoću takvih

parametara elemenata mreže, njihove vrijednosti se nalaze u uskom pojasu. Napon u cijeloj mreži u normalnom stanju je blizu 1 p.u., tj. blizu nazivnog napona.

Bazna veličina ima istu jedinicu kao i stvarna veličina tako da je *p.u.* vrijednost bez jedinice tj. relativna veličina. Također bazna veličina je uvijek realan broj, a promatrana veličina može biti kompleksan broj, pa se dijeljenjem s bazom dobiva *p.u.* veličina s istim kutom. Za baznu vrijednost snage uzima se proizvoljna vrijednost. Bazna snaga [S_B] je jednaka za čitavu mrežu i odabire se najčešće kao vrijednost koja je najbliža nazivnoj snazi što većeg broja elemenata. Za bazni napon [U_B] se najčešće odabire nazivna vrijednost, ali ima slučajeva kada se za bazni napon uzima i druga vrijednost kao npr. napon 400kV, umjesto nazivne vrijednosti 380kV.

$$S_B [\text{MVA}] \text{ definiran na razini mreže} \quad (1)$$

$$U_B = U_n [\text{kV}] \quad (2)$$

$$Z_B [\Omega] = \frac{(U_n [\text{kV}])^2}{S_B [\text{MVA}]} \quad (3)$$

$$Y_B [S] = \frac{1}{Z_B [\Omega]} \quad (4)$$

2.1. Električna mreža

U radu se električna mreža promatra kao objekt koji se sastoji od elemenata i njima zajedničkih parametara.

U modelu električna mreža sadrži sva čvorišta i grane modeliranog EESa i time sve elemente EESa. Sadržava slijedeće podatke:

- baznu snagu S_B koja je jednaka za sve elemente
- referentno čvorište (za proračun tokova snage i procjenu stanja)
- numeraciju čvorišta, tj. funkcija bijekcije broj \leftrightarrow čvorište
- matricu admitancija čvorišta

Sljedeće funkcije su pridijeljene električnoj mreži:

- unos podataka
- funkcije za provjeru povezanosti mreže (procesor topologije)
- numeracija čvorišta
- proračuni (algoritmi proračuna)
- izlaz rezultata

Razmjena podataka programa s ostalim dijelovima programske podrške je smještena u dvije funkcije, tako da ako se mijenja format razmjene mijenjaju se samo dvije funkcije.

Ako mreža nije povezana tada svi proračuni moraju raditi na svim dijelovima mreže. Numeracija čvorišta se koristi za otkrivanje dijelova povezanosti i time odjeljivanje proračuna. Nakon što je proračun na jednom dijelu povezanosti gotov provodi se nova numeracija za drugi dio mreže.

Način i izvedba numeracije čvorišta je prikazan u literaturi [Kajganić 99]. Izabrana je metoda pretraživanja u širinu neorijentiranoga grafa (*eng. BFS breadth first search*), prvo čvorište po minimalnom stupnju čvorišta (bez paralelnih grana), ostala po složenosti u grafu. Numeracija se provodi tako da se kreće od zadnjeg čvorišta u listi (okrenuti redosljed).

Svi algoritmi proračuna ulazne podatke nalaze u modelu (čvorišta i grane). Rezultate također ostavljaju u modelu, npr. proračun tokova snaga kao rezultat ima napone čvorišta, koji se tijekom proračuna stavljaju u čvorišta, čime su podaci postojani, tj. nadžive proračun i mogu se upotrijebiti za druge svrhe – proračun optimalnih tokova snaga, proračun kratkog spoja, proučavanje raspodjele gubitaka itd.

Tako uređenu električnu mrežu moguće je kopirati i na kopijama raditi razne druge račune ili ih trajno pohraniti. Moguće je mrežu koju smo dobili procjenom stanja kopirati i na kopiji napraviti optimalne tokove snaga, te usporediti te dvije mreže i vidjeti koliko su se smanjili gubici. Time je omogućeno manipuliranje mrežama bez ugrađivanja dodatnih funkcija u model mreže.

2.2. Električno čvorište

2.2.1. Matematički model električnog čvorišta

Čvorište je element mreže u kojem je spojeno više grana. Matematički model električnog čvorišta, u ovisnosti o vrsti proračuna, sadrži razne parametre. Pod pojmom čvorišta smatra se električno čvorište zajedno s njegovim električnim svojstvima.

Fizička reprezentacija električnog čvorišta je sabirnica. Sabirnica je mjesto na koje se preko prekidača i rastavljača spajaju svi osnovni elementi elektroenergetske mreže. Njih se može prema povezanosti s čvorištima podijeliti u dvije grupe. Prva grupa povezuje najmanje dva različita električna čvorišta, to su prijenosni vodovi i transformatori, a druga je grupa priključena samo na jedno električno čvorište, to su tereti, generatori, prigušnice i kondenzatori. Prigušnice i kondenzatori su priključeni na jedno električno čvorište, ali se modeliraju kao grane koje spajaju isto čvorište.

Elektroenergetska mreža je neorijentirani graf. Za opisivanje povezanosti grana i čvorišta svako čvorište sadrži skup incidentnih grana i skup incidentnih čvorišta. Skup je matematički pojam koji označava zbir različitih objekata koje nazivamo elementima tog skupa. Incidentna grana čvorištu je grana koja je jednim krajem spojena s tim čvorištem. Dva čvorišta su međusobno incidentna ako su povezani granama.

Skup incidentnih čvorišta je označen s $\text{inc}[i]$ (5)

Injeksija snage može biti definirana u podacima (generatora i tereta) ili računata pomoću napona čvorišta:

$$\bar{S}_i = \sum \bar{S}_{ij} \quad (6)$$

\bar{S}_{ij} je tok snage u incidentnoj grani i definiran je u jednadžbi 39.

Matematički model električnog čvorišta za proračun tokova snaga

Matematički model električnog čvorišta za proračun tokova snaga sadrži sljedeće parametre:

1. Injeksija radne snage, P
2. Injeksija jalove snage, Q
3. Modul napona, V
4. Kut napona δ

U svakom električnom čvorištu dvije od ovih četiri vrijednosti su poznate, a ostale dvije su nepoznanice. Svako električno čvorište može biti klasificirano u ovisnosti o tome koje dvije vrijednosti su poznate.

Referentno čvorište je čvorište u mreži kojemu su modul i kut napona poznati. Radna i jalova komponenta snage su nepoznate i određuju se proračunom tokova snaga.

Čvorišta tereta (PQ čvorišta) su čvorišta u kojima je poznata injekcija radne i jalove snage. Takva čvorišta mogu sadržavati i generatore koji nemaju naponsku regulaciju već određenu proizvodnju radne i jalove snage. Isto tako takva čvorišta mogu biti bez tereta i generatora i tada je injekcija radne i jalove snage nula.

Čvorišta s regulacijom napona (PV čvorišta) su čvorišta gdje je poznata apsolutna vrijednost napona i injekcija radne snage. Injekcija jalove snage se računa. Takvo čvorište mora imati proizvodnju jalove snage takvu da drži modul napona konstantnom (naponska regulacija). U nekim slučajevima potrebnu proizvodnju jalove snage nije moguće postići, te se čvorište s regulacijom napona pretvara u čvorište tereta.

Injeksija snage u čvorište \bar{S}_{inj} se računa zbrajanjem snaga svih generatora i tereta spojenih na to čvorište:

$$\bar{S}_{inj} = \sum \bar{S}_{gen} + \sum \bar{S}_{ter} \quad (7)$$

s time da je snaga koja ulazi u čvorište (generator) pozitivna, a snaga koja izlazi negativna (teret).

Tip čvorišta se računa tako da se prvo provjeri da li je spojen barem jedan generator u regulaciji napona. Ako nije spojen generator s regulacijom napona tada je čvorište tereta (PQ čvorište). Nakon što se izračuna injekcija snage čvorišta pomoću snaga incidentnih grana, pristupa se provjeri mogućnosti proizvodnje jalove snage u generatoru. Ako je generator u regulaciji može proizvesti dovoljno jalove snaga čvorište je u naponskoj regulaciji (PV čvorište) inače je čvorište tereta (PQ čvorište).

Matematički model električnog čvorišta za proračun procjene stanja

Moguća mjerenja pridijeljena čvorištu:

- apsolutna vrijednost napona $|\bar{U}_i|_{mj}$ zajedno s pripadajućom standardnom devijacijom (preciznost) $\sigma_u [i]$
- injekcija snage \bar{S}_{inj} zajedno s pripadajućom standardnom devijacijom $\sigma_{inj} [i]$
- apsolutna vrijednost struje zajedno s pripadajućom standardnom devijacijom

Injekcija snage \bar{S}_{inj} se dobija ukupnim zbrojem mjerenja svih tereta i svih generatora:

$$\bar{S}_{inj} = \sum \bar{S}_{genmj} + \sum \bar{S}_{itermj} \quad (8)$$

pripadajuća standardnom devijacijom se računa pomoću jednadžbe:

$$\sigma_{inj} [i] = \frac{\sum \sigma_{iter} |\bar{S}_{itermj}| + \sum \sigma_{igen} |\bar{S}_{igenmj}|}{|\bar{S}_{inj}|} \quad (9)$$

gdje je $\sigma_{inj} [i]$ standardna devijacija mjerenja injekcije, \bar{S}_{itermj} mjerenje snage tereta, a σ_{iter} standardna devijacija pojedinog mjerenja na teretu, \bar{S}_{igenmj} mjerenje snage generatora, a σ_{igen} standardna devijacija pojedinog mjerenja snage generatora

Računski vektor mjerenja $\mathbf{z}^{rač}$ za mjerenje $|\bar{U}_i|_{mj}$ se računa:

$$|\bar{U}_i|_{mj}^{rač} = |U_i| \quad (10)$$

Mjerenje modula napona se ugrađuje u Jakobijevu matricu mjerenja $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ pomoću sljedećih jednadžbi:

$$\frac{\partial |\bar{U}_i|_{mj}^{rač}}{\partial |U_i|} = 1 \quad (11)$$

$$\frac{\partial |\bar{U}_i|_{mj}^{rač}}{\partial \arg(\bar{U}_i)} = 0 \quad (12)$$

Računski vektor mjerenja $\mathbf{z}^{rač}$ se računa kao zbroj tokova snaga svih incidentnih grana ij:

$$\bar{S}_{imj}^{rač} = \sum \bar{S}_{ij} \quad (13)$$

Mjerenje injekcije snage se ugrađuje u Jakobijevu matricu mjerenja $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ pomoću sljedećih jednadžbi:

$$\frac{\partial \bar{S}_{imj}}{\partial |\bar{U}_i|} = \sum \frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{U}_i|} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{imj}}{\partial \arg(\bar{U}_i)} = \sum \frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{U}_i)} \quad (15)$$

Izračun $\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{U}_i|}$ i $\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{U}_i)}$ se može naći u jednadžbama 46, 44.

Ako je jedna od varijabli stanja prijenosni odnos transformatora tada se mora parcijalno derivirati i po toj varijabli:

$$\frac{\partial \bar{S}_{imj}}{\partial |\bar{t}_i|} = \sum \frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_i|} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{imj}}{\partial \arg(\bar{t}_i)} = \sum \frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_i)} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{imj}}{\partial |\bar{t}_j|} = \sum \frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_j|} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{imj}}{\partial \arg(\bar{t}_j)} = \sum \frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_j)} \quad (19)$$

Izračun $\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_i|}$, $\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_i)}$, $\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_j|}$ i $\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_j)}$ se može naći u jednadžbama 65 – 68.

Mjerenje apsolutne vrijednosti struje nije ugrađeno u ovaj model.

Proračun procjene stanja kao rezultat daje kompleksni oblik napona u svakom čvorištu.

Proračun kratkog spoja

Za proračun kratkog spoja potrebno je zbrojiti direktne admitancije generatora i tereta koji su spojeni u čvorište i . Ukupna direktna admitancija u čvorištu i dodaje se u dijagonalni element matrice direktne admitancije čvorišta.

$$\bar{Y}_i = \sum_i \bar{Y}_{gen} + \sum_i \bar{Y}_{ter} \quad (20)$$

Za proračun kratkog spoja potrebno je i zbrojiti nulte admitancije generatora i tereta koji su spojeni u čvorište i . Ukupna nulta admitancija u čvorištu i dodaje se u dijagonalni element matrice nulte admitancije čvorišta.

$$\bar{Y}_{0i} = \sum_i \bar{Y}_{0gen} + \sum_i \bar{Y}_{0ter} \quad (21)$$

Rezultat proračuna kratkog spoja su struje kratkog spoja u granama kada se dogodi jednopolni ili tropolni kratki spoj i struje iz generatora kada se dogodi tropolni kratki spoj. Te struje su potrebne za kasniju provjeru prekidne moći prekidača. Uz čvorište je potrebno zbrojiti ukupnu struju kratkog spoja svih generatora na čvorištu:

$$\bar{I}_{i3pk} = \sum_i \bar{I}_{gen3pk} \quad (22)$$

Uz čvorište je također potrebno pamtit struju jednopolnog kratkog spoja \bar{I}_{i1pk} .

2.2.2. Sabirnica

Sabirnica je element elektroenergetskog sustava koji se nalazi u transformatorskim stanicama, rasklopištima i elektranama. Služi za povezivanje prijenosnih vodova, transformatora i generatora. Sabirnica se modelira kao električno čvorište, no potrebna je pažnja jer više sabirnica može biti povezano preko spojnog polja i tako tvoriti jedno električno čvorište, a isto tako jedna sabirnica može imati sabirnički prekidač kojim se jedna sabirnica razdvaja na dva električna čvorišta. Za takav sud statusi sabirničkih prekidača i prekidača u spojnim poljima moraju biti poznati [Delimar, 01].

Proračun procjene stanja i kratkog spoja

Za proračun procjene stanja i kratkog spoja svaka sabirnica se prikazuje kao čvorište u modelu. Svi prekidači se također modeliraju tako da se može utvrditi mrežna topologija prije nego što se krene u proračun procjene stanja i proračun kratkog spoja. Kada se utvrdi mrežna topologija samo jedna sabirnica predstavlja sve sabirnice koje čine jedno električno čvorište dok se ostale sakriju (postaju neaktivne).

Nakon što se provede proračun procjene stanja, sabirnice i zatvoreni prekidači se ponovno aktiviraju. Vraćanje zatvorenih prekidača je obavezno, jer se tako vraćaju i skrivena čvorišta (sabirnice) i dodjeljuje im se napon.

Nakon što se provede proračun kratkoga spoja, vraćaju se sva čvorišta i svi prekidači. Nakon vraćanja prekidača struja kratkog spoja kroz svaki prekidač je poznata, tako se može provjeriti da li je prekidna moć prekidača dovoljna za proračunatu struju kratkog spoja.

2.2.3. Teret

Teret, trošilo, opterećenje, motor itd. su imena za grupu elemenata električne mreže koja imaju određenu injekciju snage u čvorište. Ta injekcija je osjetljiva na napon i frekvenciju i može se kontrolirati jedino uklopom ili isklupom. Injekcija snage se može modelirati polinomnom funkcijom napona i frekvencije. U ovom modelu nije razmatrano realno modeliranje tereta, no takvo modeliranje je omogućeno, bez utjecaja na preostali model.

Teret koji je priključen na sabirnicu, tj. električno čvorište, označava injekciju snage koja odlazi potrošaču ili direktno ili preko distributivnog transformatora. U prijenosnoj mreži se snaga predaje distributivnom transformatoru koji u pravilu ima automatsku regulaciju napona čime napon na sekundaru ima približno konstantnu vrijednost. Zbog konstantnog napona potrošača, potrošnja ne ovisi o naponu u čvorištu. U jednom električnom čvorištu može biti više distributivnih transformatora.

Proračun tokova snaga

Za proračun tokova snaga i optimalne tokove snaga nije važan svaki distributivni transformator pojedinačno već se njihova snaga \bar{S}_{ter} pribraja injekciji snage električnog čvorišta.

Proračun procjene stanja

Teret može imati mjerenje snage \bar{S}_{termj} s pripadajućom standardnom devijacijom σ_{termj} .

Proračun kratkog spoja

Za proračun kratkog spoja potrebna je direktna i nulta impedancija svakog distributivnog transformatora.

Direktna impedancija se računa iz snage:

$$\bar{Y}_{ter} = \frac{\bar{S}_{ter}^*}{|\bar{U}_i|^2} \quad (23)$$

gdje je \bar{U}_i napon prije kratkog spoja u čvorištu i .

Nulta impedancija \bar{Y}_{0ter} se računa iz podataka transformatora. Ona je specifična za svaki distributivni transformator i ovisi o impedanciji transformatora, vrsti spoja i otporu u zvjezdistu. Modeliranje transformatora je prikazano u poglavlju 2.3.3, potpoglavlja "Opći model transformatora za tokove snaga i procjenu stanja" i "Nulta impedancija transformatora".

Najčešći teret, distributivni transformator, je u većini slučajeva spojen u spoju YNyn (zvijezda-zvijezda s uzemljenim objema stranama, s time da je sekundar uzemljen preko otpornika). Tada je \bar{Y}_{0ter} jednaka uzdužnoj impedanciji transformatora zbrojena s trostrukom vrijednošću otpora uzemljenja.

2.2.4. Generatori

Generatori su obično na sabirnicu, tj. električno čvorište priključeni preko blok transformatora. To je spoj u kojem nema prekidača između generatora i transformatora. Generator je na nižem naponu od sabirnica na koje se veže, te je zbog toga veća struja koju bi morao prekidač prekinuti. Zato se u modelu generator i njegov transformator promatraju kao jedan element. Ako je potrebno gledati odvojeno generator i njegov blok transformator moguće ih je odvojiti stavljajući između električno čvorište.

Proračun tokova snaga

Parametri potrebni za proračun tokova snaga su trenutna snaga proizvodnje, pogonska karta generatora i vrsta regulacije. Ako generator regulira napon tada se čvorište na koje je spojen, modelira drugačije od ostalih čvorišta. Čvorište s naponskom regulacijom regulira apsolutnu vrijednost napona pomoću jalove snage koju mogu proizvesti generatori priključeni na to čvorište. Koliko svaki generator može proizvesti jalove snage ovisi o pogonskoj karti generatora. Ako zahtjev za proizvodnjom jalove snage nije dopušten pogonskom kartom tada taj generator gubi funkciju regulatora napona i postaje samo injekcija određene snage u čvorište. Ako svi generatori priključeni na neko čvorište izgube mogućnost reguliranja napona, tada čvorište također gubi sposobnost reguliranja napona, te postaje čvorište s injekcijom snage.

Proračun procjene stanja

Mjerenje snage generatora se zbraja zajedno s mjerenjima snage distributivnih transformatora, no suprotnog predznaka. Mjerenja se uzimaju između blok transformatora i sabirnica.

Ponekad nam je poznat iznos napona na generatoru. Takva vrijednost se koristi kao pseudomjerenje napona na sabirnicama na koje je taj generator priključen.

Proračun kratkog spoja

Za proračun kratkog spoja generator – blok transformator je nadomješten prema Nortonovom teoremu parametrima Nortonove struje i Nortonove admitancije:

$$\bar{Y}_{gen}'' = \frac{Z_B}{jX_d''[\Omega] + jX_{trafo}[\Omega]} \quad (24)$$

$$\bar{I}_{gen3pk}'' = \bar{Y}_{gen}'' \cdot \bar{E}'' \quad (25)$$

gdje je \bar{E}'' napon elektromotorne sile prilikom kratkog spoja. Prema literaturi [Požar 63] možemo uzeti da je $\bar{E}'' = 1,1 \cdot \bar{U}_{gen}$

Blok transformator je najčešće u DY spoju. Namot spojen u trokut je spojen na generator zato da se smanji utjecaj nesimetrija iz okoline na generator i eliminira treći harmonik kojeg proizvodi generator. Stoga se za nultu admitanciju generatora \bar{Y}_{0gen} uzima uzdužna admitancija blok transformatora.

2.3. Grana modelirana kao Π model

Grana u elektroenergetskoj mreži je apstraktan pojam koji označava bilo koji element mreže koji povezuje dva čvorišta. To je generalizacija svih elemenata mreže koji imaju svojstvo da povezuju dva čvorišta (ista ili različita).

Elementi koji povezuju dva različita čvorišta su dvonamotni transformatori i nadzemni vodovi (dalekovodi) i kabeli. Nadzemni i kabelski vodovi su najbrojniji elementi u elektroenergetskoj mreži, te se njihov matematički model koristi za prezentaciju svih grana u mreži.

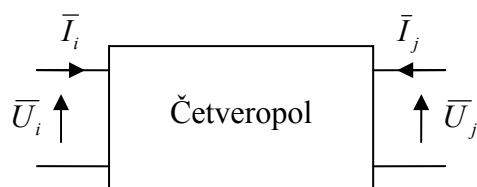
Tronamotni transformator povezuje tri čvorišta te ga nije moguće prikazati sa samo jednom granom. U radu su prikazana dva načina modeliranja tronamotnog transformatora, jedan, točan, s umjetnim čvorištem i modelom tri dvonamotna transformatora, i drugi, približan, modeliran s modelom dva dvonamotna transformatora.

Prigušnica i kondenzator su spojeni na jedno čvorište, te su stoga modelirani kao grana koja spaja isto čvorište (*eng. loop*).

2.3.1. Opći Π model grane

U radu je velika pažnja dana razvoju matematičkog modela koji bi pomoću samo dva elementa, grane i čvorišta mogao predstaviti cijelu elektroenergetsku mrežu. U ovom radu je

pretpostavljeno da su grane elektroenergetskog sustava sastavljene od linearnih, pasivnih, koncentriranih, dvostranih, vremenski invarijantnih, konačnih elemenata. Ti elementi mogu biti bilo koja kombinacija otpora, kondenzatora, prigušnice i idealnog transformatora. Oni se mogu modelirati pomoću četveropola (*eng. two port component*) [Plohl 91]. U ovom modelu grane se prikazuju kao četveropoli (mreže s dva prilaza).



Slika 1 Četveropol

Nisu uzeti klasični parametri za opisivanje tog četveropola (y-parametri, z-parametri, prijenosni parametri, hibridni parametri [Plohl 91]), već su razvijeni novi parametri koji podsjećaju na Π model voda. U elektroenergetici je Π model grane općenito prihvaćen kao osnovni model za modeliranje grana. Stoga je moguće iskoristiti razvijene i testirane algoritme za proračune, te nije potrebno razvijati nove. Pravi Π model grane ima tri parametara i kao takav može opisivati samo recipročne četveropole tj. nije moguće opisati transformator s zakretom faza. Zbog toga je razvijen opći Π model grane koji ima četiri parametara, dva parametra uzdužnih grana i dva parametra poprečnih grana, svakom čvorištu (četveropol je spojen na dva čvorišta) je pridodijeljen jedan parametar uzdužne admitancije i jedan parametar poprečne admitancije. Takvim općim Π modelom grane opisani su svi linearni pasivni elementi sustava koji spajaju dva čvorišta.

Svaki linearni, pasivni četveropol se može potpuno opisati jednadžbama:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_i \\ \bar{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_a & \bar{Y}_b \\ \bar{Y}_c & \bar{Y}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_i \\ \bar{U}_j \end{bmatrix} \quad (26)$$

Koeficijenti \bar{Y}_a , \bar{Y}_b , \bar{Y}_c , \bar{Y}_d se nazivaju y-parametri četveropola. Iz ovih parametara moguće je izvesti četiri parametra nazvana: $\bar{Y}_{uz}[i]$, $\bar{Y}_{uz}[j]$, $\bar{Y}_{pop}[i]$ i $\bar{Y}_{pop}[j]$ (gdje i označava ulazne priključnice, a j izlazne priključnice) koji u potpunosti opisuju četveropol:

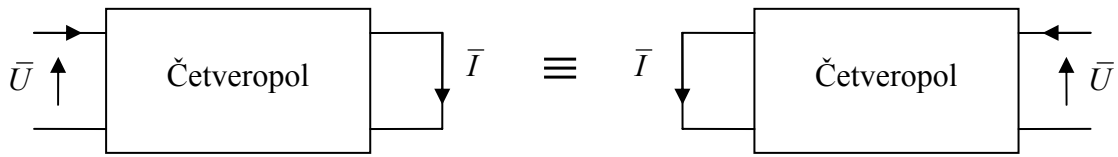
$$\bar{Y}_{uz}[i] = \bar{Y}_b \quad (27)$$

$$\bar{Y}_{uz}[j] = \bar{Y}_c \quad (28)$$

$$\bar{Y}_{pop}[i] = \bar{Y}_a + \bar{Y}_b \quad (29)$$

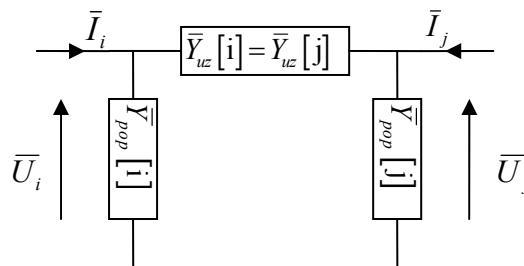
$$\bar{Y}_{pop}[j] = \bar{Y}_c + \bar{Y}_d \quad (30)$$

Recipročni četveropol



Slika 2 Svojstvo recipročnog četveropola

Definicija recipročnog četveropola (Slika 2): U bilo kojoj pasivnoj, linearnoj mreži, ako napon U na ulaznim priključnicama uzrokuje struju I na kratko spojenim izlaznim priključnicama, tada isti napon U na izlaznim priključnicama uzrokuje istu struju I na kratko spojenim ulaznim priključnicama. To svojstvo matematički možemo opisati jednakošću: $\bar{Y}_b = \bar{Y}_c$. To svojstvo posjeduju prijenosni vodovi, transformatori s uzdužnom regulacijom, prigušnice i kondenzatori. Ako je četveropol recipročan dovoljna su tri parametra za opis tog četveropola. Mogu se upotrijebiti gore navedeni parametri $\bar{Y}_{uz}[i] = \bar{Y}_{uz}[j]$, $\bar{Y}_{pop}[i]$ i $\bar{Y}_{pop}[j]$ u ovakvom prikazu četveropola:

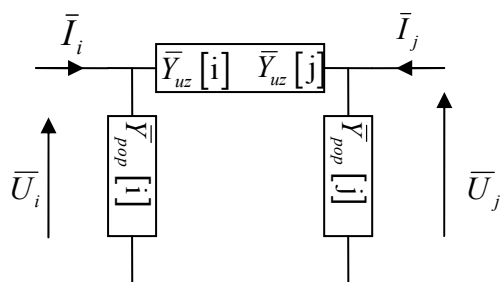


Slika 3 Model recipročnog četveropola

Ovakav model recipročnog četveropola je jednak Π modelu voda i transformatora s uzdužnom regulacijom. Međutim svi elementi elektroenergetske mreži koji imaju dva prilaza nisu recipročni četveropoli.

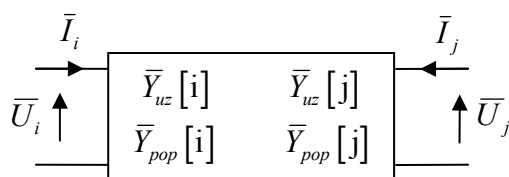
Nerrecipročni četveropol

U elektroenergetske mreži postoje elementi koji se ne mogu predstaviti s recipročnim četveropolima, npr. transformatori s poprečnom i kosom regulacijom. Model na slici 3 moguće je prilagoditi tako da predstavlja i nerrecipročne četveropole, u kojima je $\bar{Y}_b \neq \bar{Y}_c$



Slika 4 Prikaz četveropola

Pošto četveropol koji nije recipročan, za potpun opis treba četiri koeficijenta, na slici 4 je prikazano kako su četiri koeficijenta prikazana pomoću modifikacije Π modela. \bar{Y}_{uz} nije jedinstven već je ovisan o strani s koje se pristupa priključnicama. Isti postupak se može provesti i za poprečnu granu, ovisno s koje strane priključnica se gleda poprečna admitancija dobija se dva različita koeficijenta. Ako se priključnice poistovjete s čvorištima može se potpuno opisati četveropol na ovaj način koristeći razvijene parametre.



Slika 5 Četveropol s parametrima

Nove parametre se mogu povezati s y -parametrima koji u potpunosti opisuju linearni, pasivni četveropol:

$$\bar{Y}_{uz} [i] = -\bar{Y}_b \quad (31)$$

$$\bar{Y}_{uz} [j] = -\bar{Y}_c \quad (32)$$

$$\bar{Y}_{pop} [i] = \bar{Y}_a + \bar{Y}_b \quad (33)$$

$$\bar{Y}_{pop} [j] = \bar{Y}_c + \bar{Y}_d \quad (34)$$

Tada y -parametri izgledaju ovako:

$$\bar{Y}_a = \bar{Y}_{pop} [i] + \bar{Y}_{uz} [i] \quad (35)$$

$$\bar{Y}_b = -\bar{Y}_{uz} [i] \quad (36)$$

$$\bar{Y}_c = -\bar{Y}_{uz} [j] \quad (37)$$

$$\bar{Y}_d = \bar{Y}_{pop} [j] + \bar{Y}_{uz} [j] \quad (38)$$

Pri modeliranju svih elemenata koji spajaju dva čvorišta potrebno je osigurati ova četiri parametra koji potpuno opisuju električno ponašanje tog elementa.

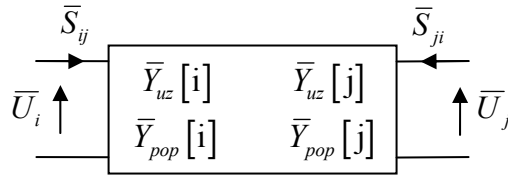
Snaga četveropola

Snaga koja prolazi kroz ovaj četveropol se može opisati ovako

$$\bar{S}_{ij} = \bar{U}_i \cdot \left((\bar{U}_i - \bar{U}_j) \cdot \bar{Y}_{uz} [i] + \bar{U}_i \cdot \bar{Y}_{pop} [i] \right)^* \quad (39)$$

$$\bar{S}_{ji} = \bar{U}_j \cdot \left((\bar{U}_j - \bar{U}_i) \cdot \bar{Y}_{uz} [j] + \bar{U}_j \cdot \bar{Y}_{pop} [j] \right)^* \quad (40)$$

Gdje su oznake kao na slici 6. \bar{S}_{ij} je tok snage od čvorišta i do čvorišta j; a \bar{S}_{ji} je tok snage od čvorišta j do čvorišta i:



Slika 6 Četveropol direktnog sustava s oznakama snage

Ako je grana u praznom hodu spojena na čvorište i, tada jednadžba glasi:

$$\bar{S}_{ij} = \bar{U}_i \cdot \left(\bar{U}_i \cdot \left(\bar{Y}_{pop} [i] + \frac{1}{\frac{1}{\bar{Y}_{uz} [i]} + \frac{1}{\bar{Y}_{pop} [i]}} \right) \right)^* \quad (41)$$

Ako je grana zatvoreni prekidač tada se primjenjuje jednadžba 78.

Gubici grane se mogu definirati kao

$$\bar{S}_{gubici} = \bar{S}_{ij} + \bar{S}_{ji} \quad (42)$$

Dodatno je potrebno definirati nazivnu snagu S_{max} (maksimalnu snagu) koja može teći kroz vod.

Procjena stanja

Za računski vektor mjerenja $\mathbf{z}^{rač}$ mjerenje snage u grani se računa:

$$\bar{S}_{ijmj}^{rač} = \bar{U}_i \cdot \left(\bar{U}_i \cdot (\bar{Y}_{uz} [i] + \bar{Y}_{pop} [i]) - \bar{U}_j \cdot \bar{Y}_{uz} [i] \right)^* \quad (43)$$

Ako postoji mjerenje snage u grani, u Jakobijevu matricu mjerenja $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ se stavlja broj koji nam kaže koliko to mjerenje ovisi o nekoj varijabli vektora stanja. Računa se kao derivacija jednadžbe 39 kad je mjerenje snage kod čvorišta i. U ovisnosti da li je mjerenje radne ili jalove snage uzima se realna ili imaginarna komponenta slijedećih jednadžbi:

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{U}_i|} = 2 \cdot |\bar{U}_i| \cdot (\bar{Y}_{uz} [i] + \bar{Y}_{pop} [i])^* - \frac{\bar{U}_i}{|\bar{U}_i|} \cdot (\bar{U}_j \cdot \bar{Y}_{uz} [i])^* \quad (44)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{U}_j|} = -\bar{U}_i \cdot \left(\frac{\bar{U}_j}{|\bar{U}_j|} \cdot \bar{Y}_{uz} [i] \right)^* \quad (45)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{U}_i)} = -j \cdot \bar{U}_i \cdot (\bar{U}_j \cdot \bar{Y}_{uz} [i])^* \quad (46)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{U}_j)} = j \cdot \bar{U}_i \cdot (\bar{U}_j \cdot \bar{Y}_{uz} [i])^* \quad (47)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{jimj}}{\partial |\bar{U}_i|} = -\bar{U}_j \cdot \left(\frac{\bar{U}_i}{|\bar{U}_i|} \cdot \bar{Y}_{uz} [j] \right)^* \quad (48)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{jimj}}{\partial |\bar{U}_j|} = 2 \cdot |\bar{U}_j| \cdot (\bar{Y}_{uz} [j] + \bar{Y}_{pop} [j])^* - \frac{\bar{U}_j}{|\bar{U}_j|} \cdot (\bar{U}_i \cdot \bar{Y}_{uz} [j])^* \quad (49)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{jimj}}{\partial \arg(\bar{U}_i)} = j \cdot \bar{U}_j \cdot (\bar{U}_i \cdot \bar{Y}_{uz} [j])^* \quad (50)$$

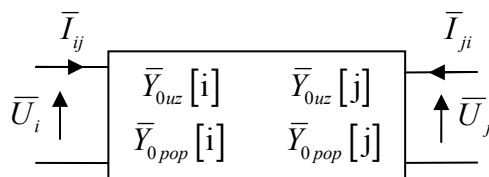
$$\frac{\partial \bar{S}_{jimj}}{\partial \arg(\bar{U}_j)} = -j \cdot \bar{U}_j \cdot (\bar{U}_i \cdot \bar{Y}_{uz} [j])^* \quad (51)$$

Varijabla stanja prijenosni omjer može postojati samo na transformatoru, stoga je derivacija po prijenosnom omjeru definirana u transformatoru.

U razvoju jednadžbi koristio se račun kompleksnih brojeva. Koristilo se svojstvo deriviranja kompleksnih brojeva. Deriviranje kompleksnog broja po kutu je zapravo množenje s j . Deriviranje kompleksnog broja po njegovoj apsolutnoj vrijednosti jest dijeljenje s njegovom apsolutnom vrijednošću. Time se jednadžbe pojednostavljuju, a nema niti sinusnih funkcija za koje je potrebno veće računsko vrijeme od množenja i dijeljenja koje se ovdje nalaze. U ovisnosti da li je mjerenje radne snage ili mjerenje jalove snage upotrijebi se realna ili imaginarna komponenta gore navedenih parcijalnih derivacija.

Proračun kratkog spoja

Za proračun kratkog spoja, osim modela razvijenog za direktni sustav prikazan na slici 6 potrebni su parametri za inverzni i nulti sustav. Za inverzni sustav je pretpostavljeno da je isti kao i direktni sustav, a nulti sustav je modeliran na isti način kao i direktni prikazano na sljedećoj slici:



Slika 7 Četveropol nultog sustava

Podrazumijevana vrijednost (*eng. default*) je ista kao i za direktni sustav. Za transformatore bi se vrijednosti mijenjale u ovisnosti o vrsti spoja.

Rezultat proračuna kratkog spoja su struje kratkog spoja u čvorištima kada se dogodi jednopolni ili trolpolni kratki spoj. No potrebno je zabilježiti struje doprinosa grane struji kratkog spoja svakog čvorišta. Te struje su potrebne za kasniju provjeru prekidne moći prekidača.

Struje doprinosa trolpolnog kratkog spoja se bilježe pomoću dva kompleksna broja: \bar{I}_{ij3pk} i \bar{I}_{ji3pk} .

2.3.2. Prijenosni vod

Prijenosni vod je pasivni element mreže koji prenosi električnu energiju. Imaju svojstvo simetričnog, pasivnog, linearnog četveropola (svojstvo simetričnosti nam govori da ako zamijenimo ulazne i izlazne priključnice električne veličine se ne mijenjaju). Postoji više vrsta prijenosnih vodova: dalekovod, kabel, podvodni kabel, no karakteriziraju ih iste veličine tako da su modelirani zajedno. Modeliranje prijenosnog voda je vrlo jednostavno. Pošto je vod simetričan četveropol moguće ga je opisati s dva parametra, s uzdužnom impedancijom, koja se sastoji od otpora R i reaktancije X u $[\Omega]$ i poprečnom admitancijom, najčešće predstavljenom samo sa susceptancijom B , a ponekad i konduktancijom G u $[S]$. Pomoću tih podataka mogu se izračunati parametri Π modela grane:

$$\bar{Y}_{uz} [i] = \bar{Y}_{uz} [j] = \frac{Z_B}{R + jX} \quad (52)$$

$$\bar{Y}_{pop} [i] = \bar{Y}_{pop} [j] = (G + jB) \cdot Z_B / 2 \quad (53)$$

Ako postoje jedinične vrijednosti parametara voda i njegovu duljinu l , tada za izračun parametara voda se koriste jednadžbe za točan Π model, nakon čega se vrijednosti uvrste u prethodne jednadžbe 52 i 53:

$$R + jX = \sqrt{\frac{r_1 + jx_1}{g_1 + jb_1}} \cdot \sinh\left(l \cdot \sqrt{(r_1 + jx_1) \cdot (g_1 + jb_1)}\right) [\Omega] \quad (54)$$

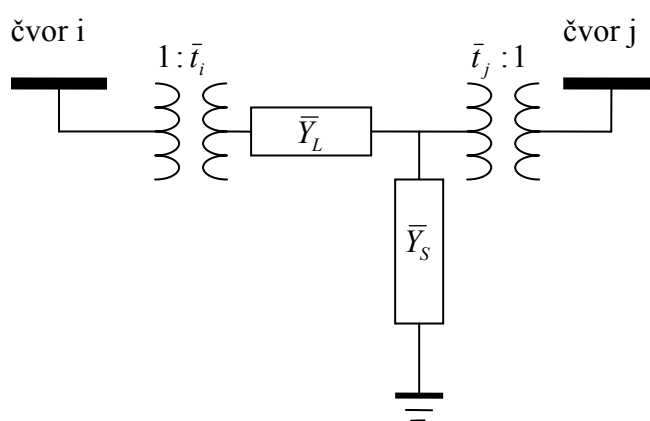
$$G + jB = \sqrt{\frac{g_1 + jb_1}{r_1 + jx_1}} \cdot \frac{\cosh\left(l \cdot \sqrt{(r_1 + jx_1) \cdot (g_1 + jb_1)}\right) - 1}{\sinh\left(l \cdot \sqrt{(r_1 + jx_1) \cdot (g_1 + jb_1)}\right)} [\Omega] \quad (55)$$

2.3.3. Transformator

Transformator je pasivni element mreže koji nam omogućava primjenu najprikladnijeg napona za pojedinu fazu tehnološkog procesa u elektroenergetskom sustavu (proizvodnja, prijenos, distribucija, potrošnja). Postoji više vrsta transformatora koji se dovoljno razlikuju da se moraju modelirati zasebno, međutim svi se mogu modelirati koristeći dvonamotni transformator s poprečnom i uzdužnom regulacijom na obje strane.

Opći model transformatora za tokove snaga i procjenu stanja

Opći model transformatora se modelira kao dvonamotni transformator s poprečnom i uzdužnom regulacijom na obje strane. Ovaj transformator iskorišten je za stvaranje jedinstvenog modela za sve transformatore. Njegova shema izgleda ovako:



Slika 8 Slika općeg modela transformatora za tokove snaga i procjenu stanja

Na slici 8 je prikazana Γ -shema transformatora s regulacijom na obje strane. Ta shema omogućava modeliranje poprečne i uzdužne regulacije na obje strane ($1 : \bar{t}_i$ i $\bar{t}_j : 1$), modeliranje reaktancije namota i gubitaka u bakru (\bar{Y}_L), modeliranje magnetizirajuće struje i gubitaka u željezu (\bar{Y}_S).

Parametri Π modela grane su:

$$\bar{Y}_{uz} [i] = \bar{Y}_L \cdot \bar{t}_i^* \cdot \bar{t}_j \quad (56)$$

$$\bar{Y}_{uz} [j] = \bar{Y}_L \cdot \bar{t}_i \cdot \bar{t}_j^* \quad (57)$$

$$\bar{Y}_{pop} [i] = (\bar{Y}_L + \bar{Y}_S) \cdot \bar{t}_i \cdot \bar{t}_i^* - \bar{Y}_L \cdot \bar{t}_i^* \cdot \bar{t}_j^* \quad (58)$$

$$\bar{Y}_{pop} [j] = \bar{t}_j \bar{Y}_L (\bar{t}_j^* - \bar{t}_i) \quad (59)$$

Dvonamotni transformator s uzdužnom regulacijom

Modelira se pomoću općeg modela transformatora. Najčešće je transformator karakteriziran pomoću relativnog napona kratkog spoja $u_k [\%]$, nazivnom (trofaznom) snagom $S_n [MVA]$,

gubicima kratkog spoja $P_{cu} [kW]$, gubicima praznog hoda $P_{fe} [kW]$ i relativnom strujom magnetiziranja $i_m [\%]$. \bar{Y}_L i \bar{Y}_S se određuju na sljedeći način:

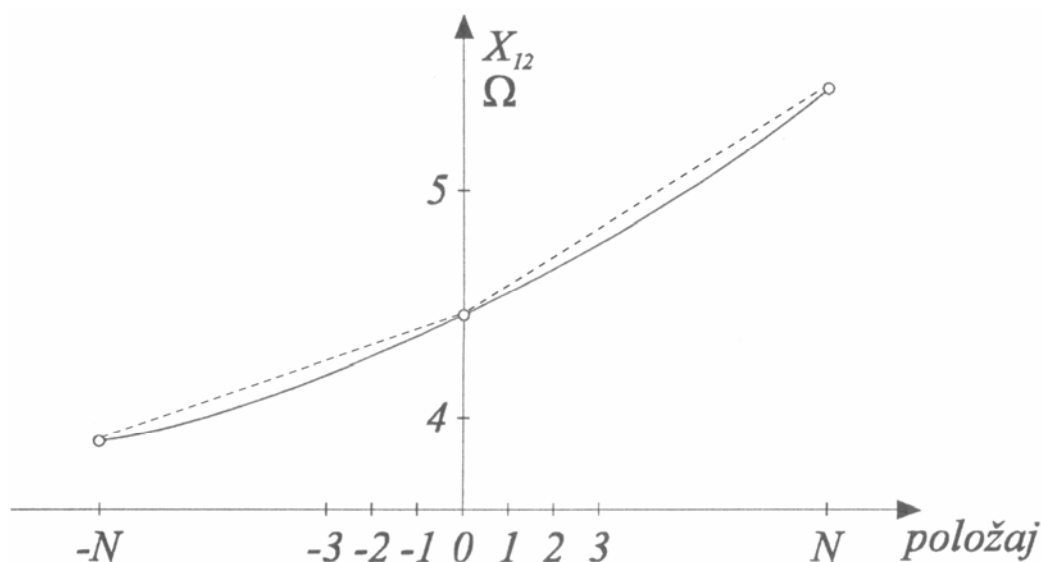
$$\frac{1}{\bar{Y}_L} = \frac{P_{cu} [kW] \cdot 10^{-3} \cdot S_B}{S_n^2 [MVA]} + j \sqrt{\left(\frac{u_k [\%] \cdot 10^{-2} \cdot S_B}{S_n [MVA]} \right)^2 - \left(\frac{P_{cu} [kW] \cdot 10^{-3} \cdot S_B}{S_n^2 [MVA]} \right)^2} \quad (60)$$

$$\bar{Y}_S = \frac{P_{fe} [kW] \cdot 10^{-3}}{S_B [MVA]} + j \sqrt{\left(\frac{i_m [\%] \cdot 10^{-2} \cdot S_n}{S_B [MVA]} \right)^2 - \left(\frac{P_{fe} [kW] \cdot 10^{-3}}{S_B [MVA]} \right)^2} \quad (61)$$

Parametri Γ -sheme dobiveni na opisani način nisu potpuno točni. Naime kad smo uzeli da je uzdužna grana određena strujom i gubicima kratkog spoja, zanemarili smo postojanje poprečne grane. Isto tako smo kod računanja parametra za poprečnu granu zanemarili činjenicu da se u praznom hodu poprečna grana napaja preko dijela uzdužne grane, pri čemu nastaje izvjestan pad napona na uzdužnoj grani.

Točni parametri, a time i točne nadomjesne sheme transformatora mogu se dobiti rješavanjem jednadžbi postavljenih za prazni hod i kratki spoj, i to uvrštavanjem preciznih kompleksnih veličina dobivenih mjerenjem s obje strane transformatora. Međutim i precizna mjerenja se u pogledu točnosti približavaju točnosti Γ -sheme, pa se učinjena zanemarenja ne odražavaju na rezultate proračuna mreže.

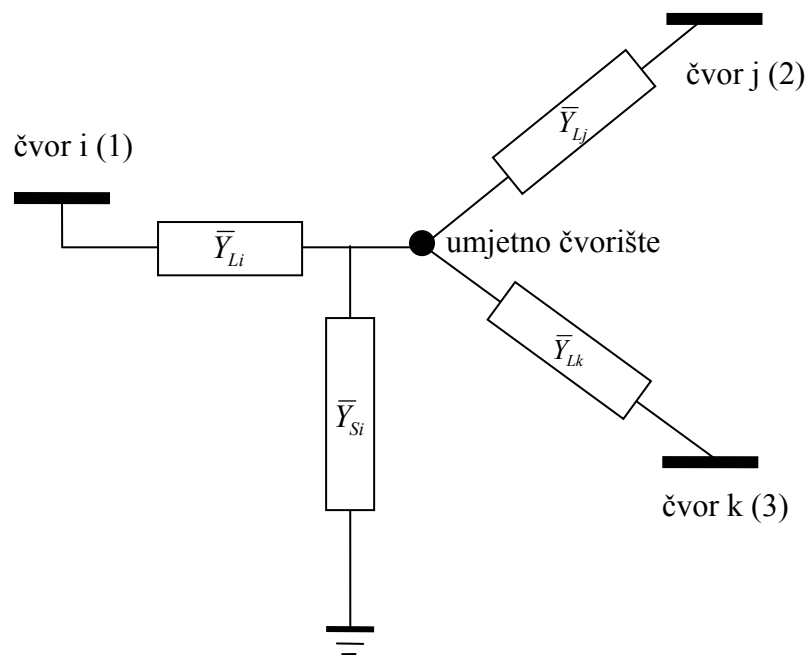
Također se mora uzeti u obzir da se reaktancija namota mijenja promjenom prijenosnog odnosa kao što je ilustrirano na slici



Slika 9 Promjena impedancije transformatora s promjenom prijenosnog odnosa transformatora

Zbog promjene reaktancije namota s promjenom prijenosnog odnosa potrebno je mijenjati \bar{Y}_L u ovisnosti o položaju regulacijske sklopke. Nazivni podaci transformatora sadrže podatke o relativnom odnosu napona kratkog spoja na srednjem i krajnjim položajima regulacijske sklopke. Iz tih podataka moguće je interpolirati $u_k[\%]$ na svim položajima regulacijske sklopke. Na slici 9 je punom crtom prikazana promjena impedancije transformatora s promjenom prijenosnog odnosa transformatora, a crtkanom crtom je prikazana interpolacija korištena u modeliranju \bar{Y}_L transformatora.

Tronamotni transformator (model s umjetnim čvorištem)



Slika 10 Model tronamotnog transformatora s umjetnim čvorištem

Tronamotni transformator je moguće modelirati kao tri dvonamotna transformatora s umjetnim čvorištem s time da se poredna grana s gubicima i magnetizirajućom strujom modelira samo na primarnoj strani. Tronamotni transformator je karakteriziran s relativnim naponima kratkog spoja $u_{k12}[\%]$, $u_{k23}[\%]$, $u_{k13}[\%]$, nazivnom (trofaznom) snagom svakog namota $S_{n1}[MVA]$, $S_{n2}[MVA]$, $S_{n3}[MVA]$, gubicima kratkog spoja $P_{cu12}[kW]$, $P_{cu23}[kW]$, $P_{cu13}[kW]$, gubicima praznog hoda $P_{fe}[kW]$, relativnom strujom magnetiziranja $i_m[\%]$. $\frac{1}{\bar{Y}_{12}}$, $\frac{1}{\bar{Y}_{23}}$, $\frac{1}{\bar{Y}_{13}}$ se računaju prema jednadžbi 60 tako da se umjesto nazivne snage transformatora

$S_n[MVA]$ uvrsti manja snaga od dva promatrana namota. \bar{Y}_{Si} se računa prema jednadžbi 61.

\bar{Y}_{Li} , \bar{Y}_{Lj} , \bar{Y}_{Lk} se računaju ovako

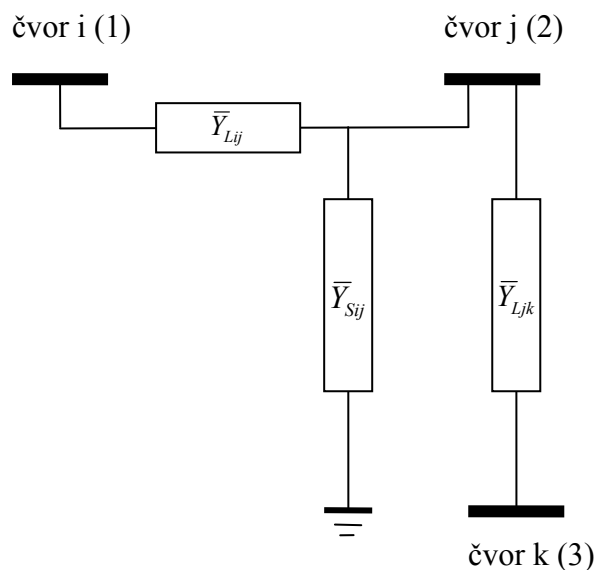
$$\frac{1}{\bar{Y}_{Li}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\bar{Y}_{12}} + \frac{1}{\bar{Y}_{13}} - \frac{1}{\bar{Y}_{23}} \right) \quad (62)$$

$$\frac{1}{\bar{Y}_{Lj}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\bar{Y}_{12}} + \frac{1}{\bar{Y}_{23}} - \frac{1}{\bar{Y}_{13}} \right) \quad (63)$$

$$\frac{1}{\bar{Y}_{Lk}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\bar{Y}_{13}} + \frac{1}{\bar{Y}_{23}} - \frac{1}{\bar{Y}_{12}} \right) \quad (64)$$

Tronamotni transformator (model s dva dvonamotna transformatora)

Tronamotni transformatori su u pravilu napravljeni tako da većina snage prolazi kroz dva namota (namoti 1-2) dok treći može prenositi samo manji dio snage. Zbog konstrukcijskih razloga $1/\bar{Y}_{Lj}$ (sa slike 10) je dovoljno malen da ga se može zanemariti. Tada model tronamotnog transformatora izgleda ovako:



Slika 11 Model tronamotnog transformatora modeliran s dva dvonamotna transformatora

Ovaj model je pogodan za iterativne postupke jer mali $1/\bar{Y}_{Lj}$ (jednadžba 63) donosi slabu konvergenciju iterativnog postupka.

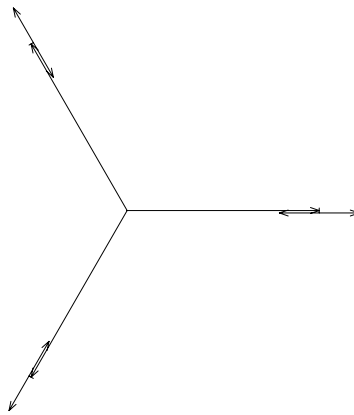
Pomoću ovako modeliranog tronamotnog transformatora nije moguće modelirati nultu impedanciju transformatora, pa se zbog općenitosti pristupa i zbog približenja fizikalnom modelu upotrijebio model tronamotnog transformatora modeliran pomoću umjetnog čvorišta i tri dvonamotna transformatora.

Načini regulacije

Osim za transformaciju napona, transformator se koristi za održavanje povoljnih naponskih prilika u mreži, tj. za regulaciju napona. Promjena prijenosnih odnosa odnosno broja zavoja moguća je u isključenom stanju ili pod opterećenjem.

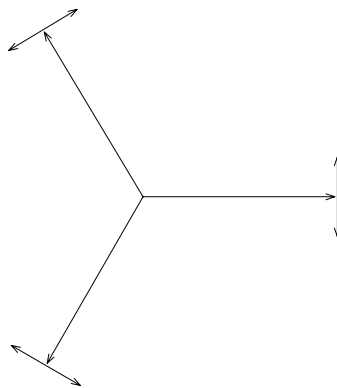
Postoji više načina regulacije transformatora: uzdužna regulacija; poprečna regulacija; uzdužna i poprečna regulacija; kosa regulacija.

Uzdužna regulacija je najčešća regulacija. U toj vrsti regulacije regulira se samo apsolutna vrijednost napona. Za takvu vrstu regulacije dovoljan je jedan regulator koji, ovisno o položaju regulacijske sklopke mijenja broj zavoja na jednom namotu.



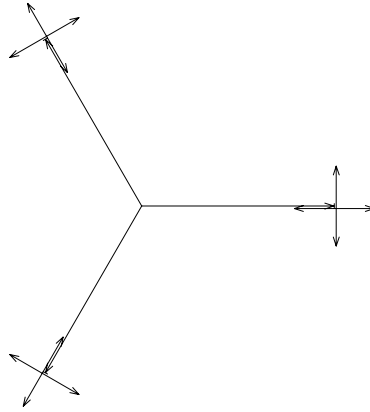
Slika 12 Uzdužna regulacija

Poprečna regulacija (*eng. phase shifting*) je regulacija kod koje se mijenja samo kut između primarne i sekundarne strane transformatora. Tako se može utjecati na tok radne snage kroz transformator u zamkastoj mreži. Da bi se poprečna regulacija mogla izvesti mora određeni broj amperzavoja s jednog i drugog namota dovesti na treći namot. Takva izvedba znatno poskupljuje izradu transformatora, stoga je rijetka.



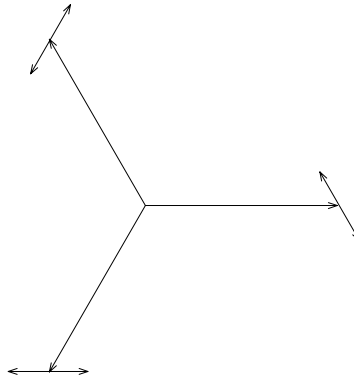
Slika 13 Poprečna regulacija

Uzdužna i poprečna regulacija u jednom transformatoru zahtijevaju dva regulatora koji ovisno o zatraženom kutu i apsolutnoj vrijednosti napona podešavaju broj zavoja.



Slika 14 Uzdužna i poprečna regulacija

Kosa regulacija zahtijeva ugradbu samo jednog regulatora koji uzima amperzavoje s jednog namota i pridružuje ga drugom namotu. Takva izvedba je malo skuplja od izvedbe uzdužne regulacije.



Slika 15 Kosa regulacija

Kod uzdužne regulacije prijenosni omjer transformatora je realni broj dok je kod ostalih načina regulacije kompleksan broj.

Procjena stanja transformatora

Ponekad je potrebno u procjeni stanja procjenjivati prijenosni odnos transformatora. Tada je jedna od varijabla stanja i prijenosni odnos transformatora. Tada su parcijalne derivacije kojima se gradi Jakobijeva matrica sljedeće:

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_i|} = 2 \cdot |\bar{t}_i| \cdot |\bar{U}_i|^2 \cdot (\bar{Y}_L + \bar{Y}_S)^* - \frac{\bar{t}_i}{|\bar{t}_i|} \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{t}_j^* \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (65)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_i)} = -j \cdot \bar{t}_i \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{t}_j^* \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (66)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_j|} = -\bar{t}_i \cdot \bar{U}_i \cdot \frac{\bar{t}_j^*}{|\bar{t}_j|} \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (67)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_j)} = j \cdot \bar{t}_i \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{t}_j^* \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (68)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_i|} = -\bar{t}_i \cdot \bar{U}_i \cdot \frac{\bar{t}_j^*}{|\bar{t}_j|} \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (69)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_i)} = j \cdot \bar{t}_i \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{t}_j^* \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (70)$$

















$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial |\bar{t}_j|} = 2 \cdot |\bar{t}_i| \cdot |\bar{U}_i|^2 \cdot (\bar{Y}_L + \bar{Y}_S)^* - \frac{\bar{t}_i}{|\bar{t}_i|} \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{t}_j^* \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (71)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_{ijmj}}{\partial \arg(\bar{t}_j)} = -j \cdot \bar{t}_i \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{t}_j^* \cdot \bar{U}_j^* \cdot \bar{Y}_L^* \quad (72)$$

Nulta impedancija transformatora

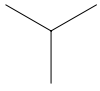
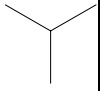
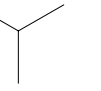
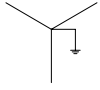
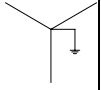
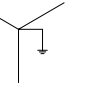
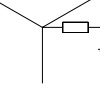
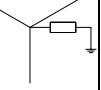
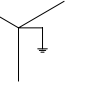
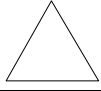
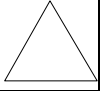
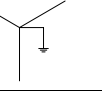
Nulta impedancija transformatora se također modelira pomoću razvijenog Π modela. Za modeliranje nulte impedancije potrebni su podaci o načinu spoja. Ovisno o vrsti spoja namota, na različit se način modelira nulta shema spoja. Model je prikazan u sljedećoj tablici.

Tablica 1 Nadomjesne sheme nultog sustava dvonamotnog transformatora

namot čvorište i	namot čvorište j	$\bar{Y}_{0uz} [i]$	$\bar{Y}_{0pop} [i]$	$\bar{Y}_{0uz} [j]$	$\bar{Y}_{0pop} [j]$
		0	0	0	0
		0	0	0	$1/\left(\frac{1}{\bar{Y}_L} + \frac{1}{\bar{Y}_S}\right)$
		0	$1/\left(\frac{1}{\bar{Y}_L} + \frac{1}{\bar{Y}_S}\right)$	0	0
		\bar{Y}_L	0	\bar{Y}_L	0
		$1/\left(\frac{1}{\bar{Y}_L} + \frac{3}{\bar{Y}_N}\right)$	0	$1/\left(\frac{1}{\bar{Y}_L} + \frac{3}{\bar{Y}_N}\right)$	0
		0	0	0	0
		0	\bar{Y}_L	0	0
		0	0	0	0

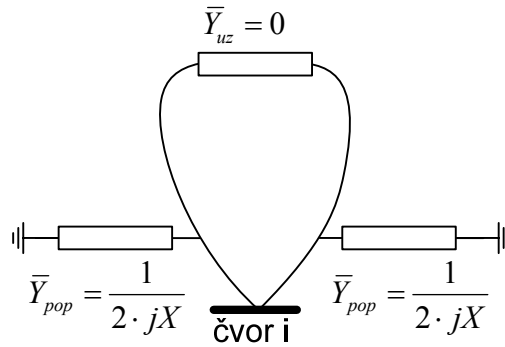
U slučaju tronamotnog transformatora modelira se pomoću tri dvonamotna transformatora s umjetnim čvorištem. Ovisno o spoju namota dvonamotni transformator se modelira prema sljedećoj tablici:

Tablica 2 Modeliranje tronamotnog namota pomoću dvonamotnog transformatora

tronamotni	dvonamotni model	
	spoj namota kod čvorišta i	spoj namota umjetno čvorište
		
		
		
		

2.3.4. Prigušnica i kondenzator

Fizikalna svojstva prigušnice i kondenzatora se mogu matematički modelirati na tri načina. Prvi način je modeliranje prigušnice i kondenzatora kao impedancije spojene na čvorište. Taj način je najbliži realnom fizikalnom objektu no tada bi morali razvijati novi element sustava što bi narušilo jednostavnost modeliranja. Pošto je cilj imati najmanji mogući broj vrsta elemenata odabrani su sljedeći modeli grana, čvorište, generator i teret. Možemo odabrati modeliranje prigušnice i kondenzatora kao teret koji troši jalovu snagu ovisno o naponu u čvorištu. Takvim modeliranjem se nije povećao broj vrsta elemenata, ali model tereta bi se morao modelirati u ovisnosti o naponu, te bi takav način učinio model složenijim i proračun dužim. Svojstva prigušnice i kondenzatora su najbližnje poprečnoj grani općeg Π modela grane i zato je odabrano modeliranje prigušnice i kondenzatora pomoću općeg Π modela grane koja spaja isto čvorište (*eng. loop*). Već razvijene jednačbe snage grane i građenja matrice admitancije čvorišta su dosljedne i nije ih potrebno redefinirati.



Slika 16 Opći Π model grane za prigušnice i kondenzatore

Najčešće parametri prigušnice i kondenzatora su nazivni napon U_n i nazivna snaga S_n , iz njih se može dobiti reaktancija X :

$$X [pu] = \frac{S_n [MVA]}{S_B [MVA]} \quad (73)$$

jer je $\frac{U_n}{U_B} = 1$ prema jednadžbi 2.

Parametri grane su:

$$\bar{Y}_{uz} [i] = 0 \quad (74)$$

$$\bar{Y}_{uz} [j] = 0 \quad (75)$$

$$\bar{Y}_{pop} [i] = \frac{1}{2 \cdot jX} \quad (76)$$

$$\bar{Y}_{pop} [j] = \frac{1}{2 \cdot jX} \quad (77)$$

2.3.5. Prekidači i rastavljači

Prekidač je modeliran kao element s stanjem otvoren, zatvoren i nepoznat, te prekidnom moći izraženoj u struji u p.u. veličinama (I_{ps}).

Rastavljač je također modeliran kao element s stanjem otvoren, zatvoren i nepoznat, te prekidnom moći, no za prekidnu moć rastavljača uzeta je beskonačna vrijednost jer blokade sprečavaju prekidanje struje s rastavljačem tako da rastavljač ne može biti problem za prekidanje struje kratkog spoja.

Prekidač i rastavljač su elementi mreže koji mogu imati dva stanja, stanje gotovo nulte vodljivosti i gotovo nultog otpora. Zbog toga se na njemu ne može primijeniti Ohmov zakon. Stoga jednadžbe 39 i 40 za tok snage kroz granu ne vrijede već se primjenjuje sljedeća jednadžba:

$$\bar{S}_{ij} = -\bar{S}_i - \sum_{\substack{k \in \text{inc}[i] \\ k \neq j}} (\bar{S}_{ik}) \quad (78)$$

Proračun procjene stanja i tokova snaga

Za proračune prekidač i rastavljač nije element s kojim se može računati jer se na njemu ne može primijeniti Ohmov zakon. Zato je potrebno sakriti sve prekidače s poznatim položajem u modelu. Koraci pri skrivanju prekidača su:

Otvoreni prekidač:

- makni prekidač iz popisa aktivnih grana i stavi ga u popis skrivenih grana
- makni prekidač iz popisa incidentnih grana na oba čvorišta
- makni suprotno čvorište iz popisa incidentnih čvorišta kod oba čvorišta
- ako spojeno čvorište nema spojen teret ili generator i ako ima manje od dva incidentna čvorišta tada se čvorište stavlja u popis skrivenih čvorišta, a grana ostavlja u praznom hodu (ako je ta grana prekidač tada se ona miče iz popisa grana i stavlja u popis skrivenih grana)

Zatvoreni prekidač:

- jedan od čvorišta makni iz popisa aktivnih čvorišta i stavi ga u popis skrivenih čvorišta
- uz preostalo čvorište zapamti skup prekidač i skriveno čvorište
- makni prekidač iz popisa grana i stavi ga u popis skrivenih grana
- makni prekidač iz popisa incidentnih grana na aktivnom čvorištu
- makni skriveno čvorište iz popisa incidentnih čvorišta na aktivnom čvorištu
- sve generatore, terete, mjerenja, incidentne grane i incidentna čvorišta skrivenog čvorišta dodaj preostalom čvorištu
- u svim incidentnim čvorištima skrivenog čvorišta zamijeni skriveno čvorište s preostalim čvorištem
- u svim mjerenjima skrivenog čvorišta zamijeni skriveno čvorište s preostalim čvorištem
- u svim incidentnim granama skrivenog čvorišta zamijeni skriveno čvorište s preostalim čvorištem

Ako je neki prekidač u međupoložaju ili kvarnom položaju ili ne postoji signalizacija mora se procijeniti stanje tog prekidača nekom vrstom procjene stanja u kojoj se procjenjuju i stanja prekidača [Monticelli 99], [Kajganić 99].

Za proračun tokova snaga svi položaji prekidača i rastavljača moraju biti poznati.

Proračun kratkog spoja

Za proračun kratkoga spoja potrebno je sakriti i prekidače i rastavljače. Nakon proračuna potrebno je vratiti prekidače i rastavljače u aktivne grane i provjeriti da li su prekidne moći prekidača prekoračene. Zbog težnje za što jednostavnijim modelom rastavljač je modeliran kao prekidač s beskonačnom prekidnom moći. To omogućuje da se kod provjere prekidne moći za rastavljač zaključi da nema opasnosti prilikom kratkog spoja. Pošto rastavljač zbog blokada u transformatorskoj stanici nikada ne prekida struju zaključak da nema opasnosti je ispravan.

Koraci za vraćanje zatvorenih prekidača i rastavljača (skriveno čvorište ima oznaku i , aktivno čvorište ima oznaku j):

- vrati skrivenu granu u aktivne grane
- makni terete, generatore, incidentne grane i čvorišta koja pripadaju skrivenom čvoru iz aktivnog čvorišta
- u granu stavi doprinos struje trolnog i jednopolnog kratkog spoja (vidi sliku 17):

$$\bar{I}_{ij3pk} = \bar{I}_{j3pk} + \sum_{\substack{k \in \text{inc}[j] \\ k \neq i}} \bar{I}_{jk3pk} \quad (79)$$

$$\bar{I}_{ji3pk} = \bar{I}_{i3pk} + \sum_{\substack{k \in \text{inc}[i] \\ k \neq j}} \bar{I}_{ik3pk} \quad (80)$$

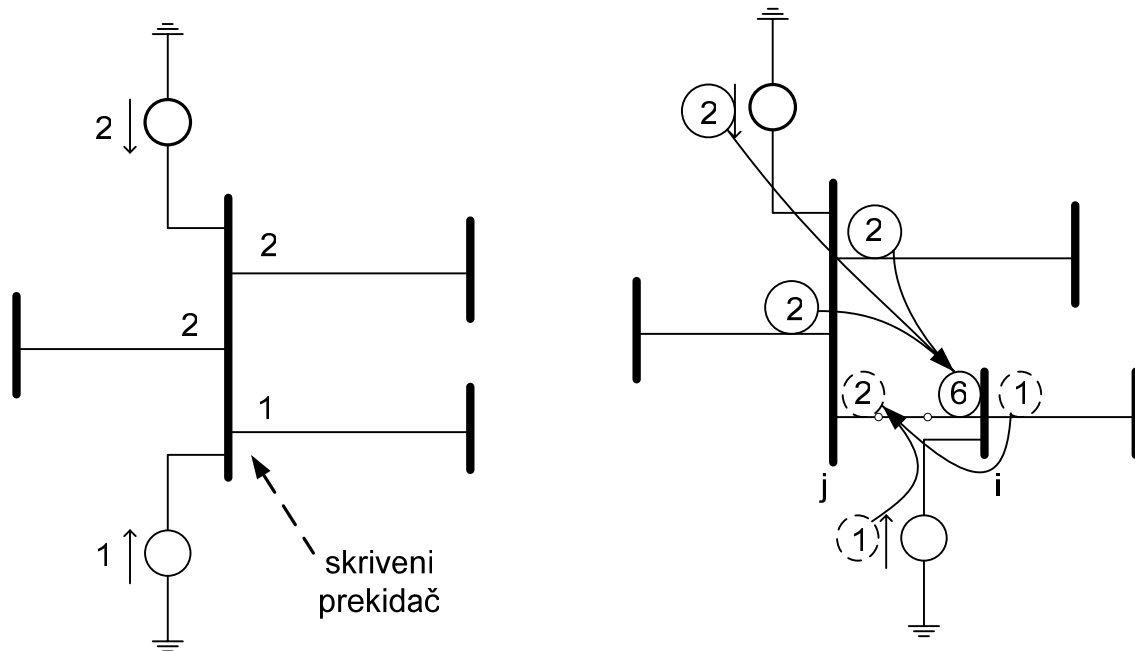
gdje je \bar{I}_{i3pk} ukupna struja trolnog kratkog spoja generatora spojenih na čvorište i .

$$\bar{I}_{ij1pk} = \bar{I}_{j1pk} \quad (81)$$

$$\bar{I}_{ji1pk} = \bar{I}_{i1pk} \quad (82)$$

gdje je \bar{I}_{i1pk} struja jednopolnog kratkog spoja u čvorište i .

- vrati skrivenu granu u incidentne grane aktivnog čvorišta
- vrati skriveno čvorište u sve incidentne grane umjesto aktivnog čvorišta
- vrati skriveno čvorište u sva njegova mjerenja umjesto aktivnog čvorišta
- stavi skriveno čvorište u incidentne čvorove aktivnog čvorišta
- vrati skriveno čvorište umjesto aktivnog u sva incidentna čvorišta skrivenog čvorišta
- vrati skriveno čvorište u aktivna čvorišta



Slika 17 Primjer vraćanja prekidača s vrijednostima za trofazni kratki spoj
 Nakon proračuna potrebno je provjeriti sve prekidače na maksimalnu struju koja može poteći prilikom kratkog spoja:

$$I_{ijpk} > \max(\bar{I}_{ij1pk}, \bar{I}_{ji1pk}, \bar{I}_{ij3pk}, \bar{I}_{ji3pk}) \quad (83)$$

Ako uvjet 83 nije zadovoljen, prekidač ne bi mogao prekinuti struju kratkog spoja i mora se alarmirati operator.

2.4. Matrice potrebne za proračun

Operacije s matricama i njihovo spremanje je matematički problem i koriste se gotovi provjereni proizvodi koji se mogu najlakše iskoristiti. Taj matematički alat mora sadržavati operacije s matricama i vektorima (zbrajanje, oduzimanje i množenje), inverziju matrice, faktorizaciju matrice i rješavanje linearnih sustava. Način spremanja utječe na brzinu proračuna. Moguće je obično spremanje, trakasto spremanje i razne vrste spremanja rijetkih matrica.

2.4.1. Matrica admitancija čvorišta Y

Matrica admitancija čvorišta je potrebna za tokove snaga. Ona se koristi u izračunu tokova snaga za date napone na čvorištima:

$$S = \text{diag}[U] \cdot (Y \cdot U)^* \quad (84)$$

S time da su \mathbf{U} i \mathbf{S} stupčani vektori. Matematička formulacija množenja stupčanih vektora element s elementom je diagonalizacija jednog od njih i množenje klasičnom matematičkom formulacijom.

Matrica admitancija čvorišta se stvara na sljedeći način: \forall grana $ij \in$ mreža

$$\mathbf{Y}_{ij}^- = \bar{Y}_{uz} [i] \quad (85)$$

$$\mathbf{Y}_{ji}^- = \bar{Y}_{uz} [j] \quad (86)$$

$$\mathbf{Y}_{ii}^+ = \bar{Y}_{uz} [i] + \bar{Y}_{pop} [i] \quad (87)$$

$$\mathbf{Y}_{jj}^+ = \bar{Y}_{uz} [j] + \bar{Y}_{pop} [j] \quad (88)$$

Koristi se notacija uvriježena u programiranju gdje $x^+=y$ označava $x=x+y$ i $x^-=y$ označava $x=x-y$.

2.4.2. Matrica impedancija čvorišta \mathbf{Z} i \mathbf{Z}_0 (direktni i nulti sustav)

Direktni sustav \mathbf{Z}

Matrica impedancije čvorišta direktnog sustava se koristi u tropolnom i jednopolnom proračunu kratkog spoja. Za proračun kratkog spoja teret se modelira kao impedancija između čvorišta i nulte točke stoga je potrebno i te elemente ugraditi u matricu impedancija čvorišta. Za stvaranje matrice impedancije čvorišta potrebno je prvo sagraditi matricu admitancije čvorišta te ju invertirati. Matrica admitancije čvorišta koja se upotrebljava u stvaranju matrice impedancije čvorišta pored elemenata spomenutih u jednadžbama 85 – 88 mora sadržavati i elemente:

$$\mathbf{Y}_{ii}^+ = \bar{Y}_{igen} \quad (89)$$

$$\mathbf{Y}_{ii}^- = \bar{Y}_{iter} \quad (90)$$

gdje je \bar{Y}_{igen} definiran u jednadžbi 24, a \bar{Y}_{iter} je definiran u jednadžbi 23.

Nulti sustav \mathbf{Z}_0

Matrica impedancija čvorišta nultog sustava se upotrebljava za izračun jednopolnog proračuna kratkog spoja.

Sve grane nultog sustava nisu povezane stoga se za svako računato čvorište mora odrediti koja čvorišta i koje grane su povezane s tim čvorištem. Mogu se odrediti dijelovi mreže i za sva povezana čvorišta matrica impedancija čvorišta nultog sustava je ista. Za ta čvorišta i grane stvara se matrica admitancije čvorišta nultog sustava:

$$\mathbf{Y}_{0ij}^- = \bar{Y}_{0uz} [i] \quad (91)$$

$$\mathbf{Y}_{0ji}^- = \bar{Y}_{0uz} [j] \quad (92)$$

$$\mathbf{Y}_{0ii} + = \bar{Y}_{0uz} [i] + \bar{Y}_{0pop} [i] \quad (93)$$

$$\mathbf{Y}_{0jj} + = \bar{Y}_{0uz} [j] + \bar{Y}_{0pop} [j] \quad (94)$$

Nulta admitancija \bar{Y}_{0i} se računa zbrajanjem svih nultih admitancija generatora i tereta i dodaje u dijagonalu matrice admitancije čvorišta nultog sustava:

$$\mathbf{Y}_{0ii} + = \bar{Y}_{0i} \quad (95)$$

Nakon toga se invertira matrica admitancije čvorišta nultog sustava i dobije se matrica impedancije čvorišta nultog sustava.

2.4.3. Matrica za brze razdvojene tokove snaga \mathbf{B}' i \mathbf{B}''

Newton – Raphson postupak tokova snaga iterativno računa vektor napona pomoću pune Jakobijeve matrice. Puna Jakobijeva matrica je veličine $(2n-g-2) \times (2n-g-2)$ i iako je matrica rijetka, njezini elementi nisu pretežito uz glavnu dijagonalu.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \arg(\bar{\mathbf{U}}) \\ \Delta |\bar{\mathbf{U}}| \end{bmatrix} \quad (96)$$

U praksi se pokazalo da je utjecaj malih promjena modula napona sabirnica na djelatnu snagu neznatan, a isto tako je neznatan utjecaj malih promjena kuta napona na jalovu snagu. Stoga se u primjeni Newton – Raphsonovog postupka pomoću polarnih koordinata račun može pojednostavniti tako da se koristi razdvojeni tokovi snaga:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \arg(\mathbf{U}) \\ \Delta |\mathbf{U}| \end{bmatrix} \quad (97)$$

Newton – Raphson postupak brže konvergira što je problem linearniji, zbog toga se $\Delta \mathbf{P}$ i $\Delta \mathbf{Q}$ dijeli s apsolutnom vrijednošću napona $|\mathbf{U}|$.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \mathbf{P}}{|\mathbf{U}|} \\ \frac{\Delta \mathbf{Q}}{|\mathbf{U}|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}' & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \arg(\mathbf{U}) \\ \Delta |\mathbf{U}| \end{bmatrix} \quad (98)$$

Umjesto \mathbf{J}' i \mathbf{J}'' možemo uzeti približne matrice, koje nazivamo \mathbf{B}' i \mathbf{B}'' .

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \mathbf{P}}{|\bar{\mathbf{U}}|} \\ \frac{\Delta \mathbf{Q}}{|\bar{\mathbf{U}}|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}' & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \arg(\bar{\mathbf{U}}) \\ \Delta |\bar{\mathbf{U}}| \end{bmatrix} \quad (99)$$

One se definiraju tako da se elementi ne mijenjaju kroz iteracije, a da postupak konvergira što brže.

Ako se primijene sljedeće tri pretpostavke:

$$|\bar{U}| \approx 1.0 \text{ pu} \quad (100)$$

$$G_{ij} \ll B_{ij} \quad (101)$$

$$\cos(\theta_i - \theta_j) \approx 1.0 \quad (102)$$

$$\sin(\theta_i - \theta_j) \approx 0.0$$

tada se njih može definirati na sljedeće načine:

Matrica \mathbf{B}'

Matrica \mathbf{B}' zapravo oslikava ovisnost promjene injekcije radne snage o promjeni kuta. Zbog toga je povoljno uzeti samo one elemente koji utječu na radni tok snage. To znači zanemarivanje prijenosnih odnosa transformatora (zanemarivanjem zakreta kuta (koji utječe na radne tokove snage) brzina konvergencije nije narušena) i porednih impedancija. U praksi se također pokazalo da je povoljno zanemariti serijski radni otpor grane. Zbog toga se mora uvesti novi podatak za granu

$$B'_{ij} = \frac{1}{\text{Im}\left(\frac{1}{\bar{Y}_{uz}[i]}\right)} \quad (103)$$

osim za transformatore gdje je

$$B'_{ij} = \text{Im}(\bar{Y}_L) \quad (104)$$

(gdje je \bar{Y}_L definiran u jednadžbi 60).

Matrica \mathbf{B}' se stvara tako da se za svaku granu ij učini:

$$\mathbf{B}'_{ij} - = B'_{ij} \quad (105)$$

$$\mathbf{B}'_{ji} - = B'_{ij} \quad (106)$$

$$\mathbf{B}'_{ii} + = B'_{ij} \quad (107)$$

$$\mathbf{B}'_{jj} + = B'_{ij} \quad (108)$$

Referentno čvorište ne ulazi u stvaranje \mathbf{B}' matrice, ono se preskače.

Matrica \mathbf{B}''

Matrica \mathbf{B}' zapravo oslikava ovisnost promjene injekcije jalove snage o promjeni prijenosnog odnosa. Zbog toga je povoljno uzeti samo one elemente koji utječu na jalovi tok snage. To znači da se ne uzima u obzir zakret kuta transformatora, no uzimaju se u obzir prijenosni omjeri kod transformatora s uzdužnom i kosom regulacijom. Zbog toga se mora uvesti novi podatak za granu

$$B_{ij}'' = \text{Im}(\bar{Y}_{uz} [i]) \quad (109)$$

osim za transformatore gdje je

$$B_{ij}'' = \text{Im}(\bar{Y}_L \cdot |\bar{t}_i| \cdot |\bar{t}_j|) \quad (110)$$

(gdje je \bar{Y}_L definiran u jednadžbi 60, a \bar{t}_i i \bar{t}_j na slici 8) koji označava granu u kojoj nije uračunat zakretni kut transformatora (ali prijenosni omjer jest).

Matrica \mathbf{B}'' se stvara tako da se za svaku granu ij računa:

$$\mathbf{B}_{ij}'' - = B_{ij}'' \quad (111)$$

$$\mathbf{B}_{ji}'' - = B_{ij}'' \quad (112)$$

$$\mathbf{B}_{ii}'' + = B_{ij}'' \quad (113)$$

$$\mathbf{B}_{jj}'' + = B_{ij}'' \quad (114)$$

Referentno čvorište i čvorišta s regulacijom napona se preskaču.

2.4.4. Matrica \mathbf{H} za procjenu stanja

Za svako mjerenje, u ovisnosti o mjestu i vrsti, stvara se red matrice \mathbf{H} prema jednadžbama 11–19, 46–49, 65–68.

2.5. Proračuni za analizu i simulaciju EESa

U ovom radu razvijen objektni model elektroenergetskog sustava se koristi za različite proračune koji se koriste u analizi rada EES-a. Stvoreni su objekti i njihovi međusobni odnosi pomoću kojih je moguće razvijati proračune bez stvaranja strukture elektroenergetskog sustava, već upotrebljavajući gotovi model.

Formiran je matematički model svakog osnovnog elementa elektroenergetskog sustava za proračun procjene stanja, proračun tokova snaga, statička analiza sigurnosti, optimalni tokovi snaga i proračun kratkoga spoja. Razvijen model pogodan je za razvoj proračuna koji su potrebni u tržišnim uvjetima: upravljanje zagušenjima, simulacija tržišta, računanje

prekograničnih tranzita i dodatnih gubitaka itd. jer je svaka izmjena ili dodavanje proračuna, razvijenih pomoću ovdje predstavljenog modela, pojednostavljena.

2.5.1. Proračun tokova snaga

Proračun tokova snaga se koristi za simulaciju ponašanja EESa. Pomoću njega mogu se simulirati razna stanja EESa i promatrati kako reagira na promjene. Proračun tokova snaga je osnova za druge proračune za analizu EESa: optimalne tokove snaga, statičku analizu sigurnosti. Rezultati proračuna tokova snaga se koriste u proračunima kratkog spoja i raznim dinamičkim analizama.

Iako je EES sastavljen od komponenata koje su linearne (ili se mogu približiti linearnom), rezultat proračuna tokova snaga je rješenje skupa nelinearnih jednažbi.

Poznato je da se sigurnost EESa povećava s veličinom EESa tako da postoji tendencija stvaranja velikih mreža od tisuće čvorišta. Skup jednažbi koje je potrebno riješiti može biti velik, a time i računsko vrijeme potrebno za izračun tokova snaga može biti preveliko ako se koriste nedovoljno efikasni algoritmi.

Zadatak proračuna tokova snaga je: za poznatu elektroenergetsku mrežu, s poznatim injekcijama snage i sa skupom ograničenja na proizvodnju generatora i napona, odrediti sve nepoznate napone električnih čvorišta i nepoznatu proizvodnju jalove snage generatora, te izračunati kompleksne tokove snaga kroz elemente mreže. Dodatno se izračunavaju gubici svakog elementa i u cijeloj mreži. Provjeravaju se prekoračenja snage u prijenosnim vodovima, te naponi u čvorištima.

Algoritam brzih razdvojenih tokova snaga FDLF (*eng. Fast Decoupled Load Flow*)

Ulazni podaci za algoritam su:

- parametri grana kako je opisano u poglavlju 2.3
- injekcije snage u čvorištima: vektor \mathbf{S}_{targ}
- početne vrijednosti napona čvorišta, ako nisu definirane uzimaju se jedinične vrijednosti (*eng. flat start*): vektor \mathbf{U}_0
- matrice \mathbf{B}' i \mathbf{B}''
- matrica admitancija čvorišta \mathbf{Y}

Pomoću matrice admitancija čvorišta i vektora napona dobija se vektor injekcija snaga prema jednažbi:

$$\mathbf{S} = \text{diag}[\mathbf{U}] \cdot (\mathbf{Y} \cdot \mathbf{U})^* \quad (115)$$

Gdje je \mathbf{U} stupčani vektor napona čvorišta, \mathbf{S} stupčani vektor injekcija u čvorištima. Matematički se množenje dva vektora element s elementom prikazuje tako da se jedan vektor stavi u dijagonalu kvadratne matrice i pomnoži s drugim vektorom.

Tada se odredi vektor pogreške injekcije snage tj. koliko su pretpostavljeni naponi bili pogrešni.

$$\Delta \mathbf{P} = \text{Re}(\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{targ}}) \quad (116)$$

$$\Delta \mathbf{Q} = \text{Im}(\mathbf{S} - \mathbf{S}_{\text{targ}}) \quad (117)$$

S time da je $\Delta \mathbf{P}$ i \mathbf{B}' reda $n-1$ (bez referentnog čvorišta). \mathbf{B}'' i $\Delta \mathbf{Q}$ su reda $n-g-1$ (bez referentnog čvorišta i PV čvorišta).

Iterativni postupak:

$$\mathbf{S}^k = \text{diag}[\mathbf{U}^k] \cdot (\mathbf{Y}^k \cdot \mathbf{U}^k)^* \quad (118)$$

$$\Delta \mathbf{P}^k = \text{Re}(\mathbf{S}^k - \mathbf{S}_{\text{targ}}^k) \quad (119)$$

$$\Delta \mathbf{Q}^k = \text{Im}(\mathbf{S}^k - \mathbf{S}_{\text{targ}}^k) \quad (120)$$

$$\Delta \arg(\mathbf{U}^k) = \text{solve}(\mathbf{B}', \Delta \mathbf{P}^k) \quad (121)$$

$$\Delta |\mathbf{U}^k| = \text{solve}(\mathbf{B}'', \Delta \mathbf{Q}^k) \quad (122)$$

$$\Delta \bar{U}_i^k = \text{polar}(\Delta |\bar{U}_i^k|, \Delta \arg(\bar{U}_i^k)) \quad (123)$$

$$\mathbf{U}^{k+1} = \mathbf{U}^k \cdot \Delta \mathbf{U}^k \quad (124)$$

Iterativni postupak se prekida kada je $(\Delta \mathbf{P}^k < \varepsilon) \wedge (\Delta \mathbf{Q}^k < \varepsilon)$.

Konačni vektor napona je rezultat proračuna.

Algoritam FDLF je posebno pogodan za implementaciju na dvoprocesorskom stroju (objašnjeno u poglavlju 4.4).

Koraci pri proračunu tokova snaga

1. Prikupljanje podataka (građenje modela)
2. Stvaranje matrice admitancija čvorišta (Y–matrica)
3. Stvaranje matrica za iterativni postupak
4. Proračun tokova snaga (algoritam)
5. Izračun tokova snaga kroz grane

2.5.2. Proračun procjene stanja

Proračun procjene stanja (*eng. state estimation*) se koristi za određivanje najvjerojatnijeg stanja EESa u nekom trenutku. Podaci mjerenja i signalizacije koji se prikupljaju pomoću SCADA sustava (*eng. Supervisory Control and Data Aquisition*) nisu pogodni za direktnu primjenu jer svaki podatak u sebi sadrži određenu nesigurnost. Prije raznih proračuna analize EESa potrebno je odrediti najvjerojatniji vektor stanja mreže. To je zadaća proračuna procjene snaga. Na temelju mjerenja snaga i napona, signalizacije uklopnog stanja mreže procjenjuje se vektor stanja mreže. Vektor stanja mreže je kompleksni iznos napona u svakom čvorištu, koji u potpunosti određuje mrežu. Pomoću procijenjenog vektora stanja mogu se izračunati najvjerojatniji tokovi snaga u granama, pronalaze eventualne greške u mjerenjima i odbacuju pogrešna mjerenja.

Postoji nekoliko različitih matematičkih algoritama za proračun procjene stanja. Najčešće se primjenjuje klasični postupak WLS procjenitelja (*eng. Weighted Least Squares Estimator*), zbog jednostavnosti implementacije i dobrih svojstava. Korištenjem navedenog algoritma pokazalo se da je algoritam osjetljiv na greške u uklopnom stanju mreže. Razlog tome je početna pretpostavka da je uklopno stanje mreže točno, te da algoritam treba samo pronaći loša mjerenja. Zbog toga je potrebno obraditi mrežnu topologiju tj. pronaći greške signalizacije uklopnih stanja prije pronalaženja grešaka u mjerenjima. Taj dio proračuna je nazvan procjena topologije. U literaturi postoji mnoštvo načina procjene topologije, većina se oslanja na uporabu procesora topologije prije procjene stanja koji uklanja stanja pogrešne topologije i očito pogrešna mjerenja pomoću uporabe baze pravila [Singh 91], [Singh 94], [Lu 94]. Moguće je ugraditi prepoznavanje topologije (utvrđivanje otvorenosti ili zatvorenosti određenih prekidača) u algoritam procjene stanja. To može biti označavanje sumnjivih mjesta na osnovu pronađenih pogrešnih mjerenja [Clements 88] ili ugrađivanje stanja prekidača u vektor stanja koji se procjenjuje [Monticelli 99]. Za procjenu stanja prekidača potrebna je veća redundantnost, te je zbog toga nemoguće procjenjivati sva stanja prekidača već samo neke. Zbog toga je važno smanjiti broj "sumnjivih" prekidača. U literaturi [Kajganić 04] je u tu svrhu prvo upotrijebljena redukcija broja mogućih stanja pomoću blokade od pogrešnog upravljanja aparatima, zatim neizravnom logikom, zatim ugradnja preostalih prekidača u vektor stanja, pritom ugrađivši u funkciju cilja i funkciju kažnjavanja.

Algoritam proračuna procjene stanja

Ulazni podaci za proračun:

- parametri grana kako je opisano u poglavlju 2.3 uključujući i prekidače

- mjerenja u vektoru \mathbf{z} i pripadajuće pouzdanosti σ koje se nalaze u dijagonali matrice \mathbf{R}_z
- početne vrijednosti napona čvorišta (ako ne postoje uzimaju se jedinične vrijednosti):
vektor \mathbf{U}_0

Definicije oznaka:

- vektor \mathbf{x} je vektor stanja koji se sastoji od kutova i apsolutnih vrijednosti napona i ponekad prijenosnih omjera transformatora (vektor ranga $2n+t-1$ jer referentno čvorište ne ulazi u račun kutova)
- vektor \mathbf{z} je vektor svih mjerenja ranga m
- dijagonalna matrica \mathbf{R}_z je zapravo dijagonalizirani vektor σ
- matrica $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ ranga $m \times n$ je Jakobijeva matrica u točki \mathbf{x} tj. prva derivacija vektora mjerenja \mathbf{z} po \mathbf{x} $\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \left. \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}}$
- vektor $\mathbf{z}^{rac} = \mathbf{z}(\mathbf{x})$ tj. odgovarajuće vrijednosti mjerenja računane pomoću vektora \mathbf{x}

Iterativni postupak:

provjeri nadgledivost mreže

$$\Delta \mathbf{z}^k = \mathbf{z} - \mathbf{z}(\mathbf{x}^k)$$

$$\text{izračunaj } \mathbf{H}(\mathbf{x}^k)$$

izračunaj $\Delta \mathbf{x}^k$ iz

$$\left(\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k) \cdot \mathbf{R}_z^{-1} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{x}^k) \right) \Delta \mathbf{x}^k = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k) \cdot \mathbf{R}_z^{-1} \cdot \Delta \mathbf{z}(\mathbf{x}^k) \quad (125)$$

izračunaj novi \mathbf{x}^{k+1} iz

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}^k \quad (126)$$

ponavljaj sve dok svaki član $\Delta \mathbf{x}^k$ veći od ε (najveća dopuštena greška)

$$\text{izračunaj } \mathbf{e}^{k+1} = \mathbf{z} - \mathbf{z}(\mathbf{x}^{k+1})$$

izračunaj

$$\mathbf{R}'_z = \mathbf{R}_z^{-1} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{R}_z \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \quad (127)$$

za svaki i

$$r_{N_i} = \frac{e_i}{\sqrt{R'_{ii}}} \quad (128)$$

pronađi i takav da je $|r_{N_i}|$ maksimalno

ako je $\left| \frac{\sigma_i}{\sqrt{R_{ii}}} r_{N_i} \right| > 3.0$ makni mjerenje iz dobrih mjerenja u kriva mjerenja, te ponovi

postupak procjene stanja (uz provjeru nadgledivosti mreže), a ako je manje od 3.0 tada je procjena stanja završena [Soman 02].

Koraci pri proračunu procjene stanja

1. Prikupljanje podataka (građenje modela i prikupljanje mjerenja)
2. Procjena topologije
3. Analiza nadgledivosti mreže
4. Proračun procjene stanja (algoritam)
5. Procesiranje krivih podataka
6. Određivanje tokova snaga u granama

2.5.3. Proračun kratkog spoja

ANSI i IEC proračuni kratkog spoja su važni za planiranje izgradnje mreže, za izbor prekidača, za podešavanje zaštite i analizu mehaničkih opterećenja elemenata. U pogonu javlja se potreba za provjerom da li struje kratkog spoja ugrožavaju siguran rad EESa. Zbog toga se radi proračun kratkog spoja za neko stanje u mreži.

Proračun kratkog spoja se koristi za izračun struje kratkog spoja u ovisnosti o tipu i mjestu kratkog spoja. Pomoću tog proračuna moguće je izračunati kolika bi bila najveća struja kratkog spoja koju bi prekidač morao prekinuti. Za sigurnost EESa je vrlo važno da prekidači mogu prekinuti struju kratkog spoja. Ako se dogodi kratki spoj na nekom vodu, a prekidač ne prekine struju kratkog spoja, dolazi do prorade sabirničke zaštite i izoliranja sabirnice na kojoj je priključen prekidač voda u kvaru (kod više sabirnica povezanih spojnim poljem samo se jedna sabirnica izolira). Uz neprilike povezane s gubitkom sabirnice (prestanak opskrbe potrošača) postoji problem od gubitka sinkronizma bliskih generatora uslijed tranzijentnih pojava.

Postoji više vrsta kratkoga spoja u trofaznim sustavima: trolni, jednopolni, dvopolni, dvopolni sa zemljom. U praksi se pokazalo da je dovoljno promatrati trolni i jednopolni kratki spoj jer ostale dvije vrste imaju manje struje kratkog spoja.

Rezultat proračuna kratkog spoja alarmira operatora sustava o mogućim zatajenjima prekidača. Operator sustava u tom slučaju može poduzeti mjere za smanjivanje struje kratkog spoja.

Algoritam proračuna kratkog spoja (trenutnog)

Ulazni podaci za proračun kratkog spoja:

- parametri grana kako je opisano u poglavlju 2.3
- parametri generatora i pripadajućeg blok transformatora (početna direktna reaktancija generatora jX_d'' i direktna reaktancija blok transformatora jX_{tr})
- injekcija snage svakog generatora u čvorištu: kompleksni broj za svaki generator \bar{S}_g
- injekcija snage tereta u čvorištu: kompleksni broj za svako čvorište \bar{S}_l
- naponi "zdrave" mreže: vektor napona čvorišta \bar{U}^z
- prekidne moći prekidača: $I_{ps} = \frac{I_{ps} [A] \cdot U_B}{S_B}$
- matrica impedancija čvorišta direktnog sustava \mathbf{Z}

Sakrij prekidače i rastavljače.

Za svako čvorište i učini proračun za trolezni kratki spoj:

$$\bar{I}_f = \frac{\bar{U}_i^z}{\bar{Z}_{ii}} \quad (129)$$

gdje je \bar{I}_f struja troleznog kratkog spoja u čvorištu i; \bar{U}_i^z je vektor napona direktnog sustava "zdrave" mreže u čvorištu i; \bar{Z}_{ii} je dijagonalni član matrice impedancije čvorišta direktnog sustava

za svaku incidentnu granu čvorišta i upiši:

$$\bar{I}_{ij3pk} = \bar{U}_i^z \left(1 - \frac{\bar{Z}_{ji}}{\bar{Z}_{ii}} \right) \cdot \bar{Y}_{uz} [i] \quad (130)$$

Stvori nultu matricu impedancija čvorišta: \mathbf{Z}_0 (objašnjeno u poglavlju 2.4.2).

Za svako čvorište i učini proračun za jednofazni kratki spoj:

$$\bar{I}_f^{012} = \frac{\bar{U}_i^z}{2\bar{Z}_{ii} + \bar{Z}_{0ii}} \quad (131)$$

gdje je \bar{I}_f^{012} struja jednopolnog kratkog spoja direktnog, inverznog i nultog sustava u čvorištu i ; \bar{U}_i^z je vektor napona direktnog, inverznog i nultog sustava "zdrave" mreže u čvorištu i ; \bar{Z}_{ii} je dijagonalni član matrice impedancije čvorišta direktnog sustava; \bar{Z}_{0ii} je dijagonalni član matrice impedancije čvorišta nultog sustava

Uz čvorište upiši trostruku struju kratkog spoja $\bar{I}_{i,pk} = 3\bar{I}_f^{012}$

[Grainger 94]

Koraci pri proračunu kratkog spoja

1. Prikupljanje podataka (građenje modela)
2. Stvaranje matrice impedancija čvorišta direktnog (\mathbf{Z}) i nultog sustava (\mathbf{Z}_0)
3. Proračun kratkog spoja (algoritam)
4. Provjera prekidača

3. Značajke objektno orijentiranog programiranja

U ovom radu se objektno orijentirano programiranje koristilo kao alat u implementaciji matematičkog modela elektroenergetskog sustava. Zbog intenzivnog korištenja različitih značajki objektno orijentiranog programiranja ovdje su predstavljene značajke koje su iskorištene u razvoju modela. Postoji više razloga upotrebe objektno orijentiranog programiranja umjesto uvriježenog proceduralnog programiranja. Najvažniji razlog je iznio izumitelj jezika C++ Bjarne Stroustrup [Stoustrup 97] koji kaže da korištenje razreda omogućava da se koncepti problema koji se rješava izraze direktno pomoću jezičnih konstrukcija programskog jezika. Svaki razred opisuje stvarni matematički model. Sav matematički opis elementa elektroenergetskog sustava je smješten na jedno mjesto omogućavajući lakše čitanje i izmjenu. Primjer toga je određivanje najveće i najmanje proizvodnje jalove snage u generatoru, različiti generatori mogu imati različito određivanje te proizvodnje no ta se razlika implementira samo na jednom mjestu, te izmjenom načina određivanja mijenja se samo kod na jednom mjestu.

Objektno orijentirano programiranje ili kraće OOP je jedan od mogućih pristupa programiranju računala. Za razliku od ostalih pristupa, u kojima je težište na akcijama koje se vrše na podatkovnim strukturama, ovdje je težište na projektiranju aplikacije kao skupa objekata koji izmjenjuju poruke.

Objekt i razred

U radu se koriste termini objekt i razred s jasnom razlikom u uporabi. Objekt je pojavnost (*eng. instance*) nekog razreda. Razred sadrži opis i strukturu objekata koji su stvoreni prema tom razredu. Ako je razvijen razred i nazvan CX tada možemo napraviti objekte x1, x2, ... koji su tipa CX. Npr. možemo razviti razred Transformator i pomoću tog razreda napraviti objekte trafoTrpimirova1, trafoTrpimirova2, ... tipa Transformator.

Ponekad nije moguće razlučiti objekt od njegovog opisa i tada upotrebljavamo riječ objekt za pojavnost nekog objekta i njegov opis.

3.1. Osnovna svojstva

3.1.1. Apstrakcija

Svaki objekt koji se modelira i koji se prikazuje razredom ima neka svojstva koja taj razred mora oslikavati. Ako se nađu bitne karakteristike tj. razluče one karakteristike tog objekta koji

ga razlikuju od nekog drugog objekta, tada se može reći da je napravljena apstrakcija objekta, da je opisana najbitnijim svojstvima. Apstrakcija je važna karakteristika objektno orijentiranog programiranja jer omogućuje lakše poimanje složenog sustava.

Postoji više vrsta apstrakcija, ovisno koja se svojstva žele obuhvatiti apstrakcijom. **Apstrakcija entiteta** je najšira apstrakcija i označava objekt koji sadrži model nekog problema. Najčešće se tom apstrakcijom predstavljaju stvarni objekti, npr. transformator, vod, generator. **Apstrakcija akcije** je objekt koji sadrži skup operacija. Time se grupiraju razne matematički postupci, npr. matrice i operacije nad njima. **Apstrakcija virtualnog stroja** je objekt koji grupira operacije koje se koriste na nekom višem stupnju kontrole. Tako se naziva objekt koji koristi objekte koji su nastali apstrakcijom akcije, npr. linearna algebra sadrži sve operacije s matricama i vektorima.

3.1.2. Učahurivanje

Niti jedan dio složenog sustava (objekta) ne bi smio ovisiti o načinu kako je neki drugi dio složenog sustava implementiran. Skrivanje implementacije (detalja ugradnje) je riješeno pomoću programskog jezika svojstvom koje je nazvano učahurivanje (*eng. encapsulation*). Apstrakcijom je opisano koje operacije pojedini objekt mora obavljati i taj vidljivi dio se naziva sučelje (*eng. interface*), a način kako se te operacije obavljaju ostaje skriven i taj skriveni dio se naziva ugradnja (*eng. implementation*). Učahurivanje omogućava jasnu granicu između različitih razreda.

Skrivanje implementacije ima više prednosti. Odjeljuje se "što objekt radi" od "kako radi". Moguće je promijeniti način na koji je neka funkcija sučelja implementirana bez promjene u razredima koji tu funkciju koriste. Također je smanjena složenost razreda, tj. u svakom razredu je moguće izabrati samo neke funkcije, funkcije sučelja. One funkcije i podaci koji nisu potrebni ostalim objektima već samo za unutrašnju implementaciju funkcija sučelja moraju biti skriveni, tj. ne smiju biti dostupni ostalim razredima.

3.1.3. Modularnost

Razlaganje sustava u više relativno nezavisnih modula koji sadrže razrede koji imaju nešto zajedničko. Kako količina razreda i pripadajućeg koda raste, mora se naći način da se smanji složenost nastalog sustava. Na razini jezika omogućeno je objedinjavanje više razreda na jednom mjestu (u C++ jeziku *.h i *.cpp datoteke). Npr. moguće je sve operacije s matricama i vektorima objediniti na jedno mjesto. Osim očite prednosti lakše čitljivosti koda i čišće

strukture postoje i prednosti koje se tiču ponovne uporabe koda i smanjene međuovisnosti objekata, čime više ljudi može nezavisno razvijati različite dijelove koda.

Modularnost omogućava korištenje koda koji je razvijen i testiran čime se smanjuje razvojno vrijeme i mogućnost pogreške. U gore navedenom primjeru za operacije s matricama i vektorima moguće je koristiti već razvijen, testiran i optimiran modul često razvijen tako da koristi prednosti procesora koje su poznate samo malom broju ljudi povećavajući brzinu i efikasnost programske podrške. Taj modul može se razvijati, poboljšavati čak i mijenjati za drugi s istim sučeljem (umjesto operacija s punim matricama operacije s rijetkim matricama) bez promjene u ostalom kodu. Moguće je modul prevesti u strojni jezik i dati na korištenje drugim korisnicima. Tada mogu samo koristiti funkcije sučelja bez uvida u kod.

3.1.4. Hijerarhija

Hijerarhija označava svojstvo objektno orijentiranog programiranja da implementira odnose generalizacija – specijalizacija, i cjelina – dio.

Generalizacija – specijalizacija

Često je generalizacija – specijalizacija nazivana "je tip" hijerarhija, npr. dalekovod je tip grane. U objektno orijentiranom programiranju ta je hijerarhija nazvana nasljeđivanje (*eng. inheritance*). Nasljeđivanje definira odnose među razredima, gdje jedan razred dijeli strukturu i ponašanje jednog ili više drugih razreda (jednostruko i višestruko nasljeđivanje). Nasljeđivanje se može stvoriti kada postoji odnos "je tip" u modelu. Drugi način stvaranja nasljeđivanja jest pomoću izdvajanja nekih podataka i funkcija u zajednički nadrazred (*eng. superclass*).

Svojstvo učahurivanja i svojstvo hijerarhije su međusobno proturječni jer podređeni razred mora imati pristup nekim podacima i funkcijama iz nadređenog razreda. Zbog toga, pored svima dostupnim, postoje dvije razine skrivanja podataka i funkcija, u jednoj su skriveni za sve razrede, no druga razina dopušta pristup podređenim razredima.

Cjelina – dio

Ta je hijerarhija nazivana i "jest dio od", npr. čvorište jest dio električne mreže. U objektno orijentiranom programiranju ta je hijerarhija nazvana agregacija ili kompozicija (*eng. aggregation, composition*). Realizira se jednostavnom ugradnjom podređenog razreda u nadređeni. Ova hijerarhija postoji i u programskim jezicima koji nisu objektno orijentirani (strukture).

Zbog načina implementacije podređeni razred ne može koristiti podatke i funkcije iz nadređenog razreda. Ako podređeni razred treba podatke i funkcije iz nadređenog razreda realizira se asocijativna veza između podređenog i nadređenog razreda. U C++ je to pokazivač na nadređeni razred, koristeći deklaraciju unaprijed (prije deklaracije razreda u kojem se koristi pokazivač na nadređeni razred potrebno je napisati prototip nadređenog razreda).

3.1.5. Sporedna svojstva

Tipizacija

Tip je precizan opis strukture ili ponašanja koju dijeli neki skup entiteta, tj. svaki objekt ima svoje ime (tip) koje je ime njegovog razreda. Tipizacija je poštivanje razreda objekta, tako da se objekti različitih tipova ne mogu međusobno zamjenjivati, ili se mogu zamjenjivati na vrlo ograničen način.

Istodobnost

Povezana je s pojmom procesa (dretva, nit, *eng. thread*). Razvoj računala i operativnih sustava doveo je do mogućnosti obavljanja istovremeno više poslova na višeprosorskom računalu. Moguće je neke proračune ubrzati odvajajući neke dijelove proračuna koji se mogu vršiti istodobno.

Postojanost

Postojanost je svojstvo objekta koje govori o vremenu i prostoru u kojem određeni objekt može postojati.

Vrste postojanosti:

- prijelazni rezultati u izračunavanju izraza (na razini linije kôda)
- lokalne varijable kod aktiviranja procedura
- globalne varijable
- podaci koji postoje između izvođenja programa
- podaci koji postoje između različitih verzija programa
- podaci koji nadžive program

3.2. Opis i grafičko prikazivanje objekata i relacija između objekata

Za lakše poimanje objekata i njihovih relacija potrebno je bilo sastaviti grafičku reprezentaciju objekata i njihovih relacija. Umjesto razvijanja novih rješenja upotrijebio se dio općeg razvojnog jezika UML (*eng. unified modelling language*) za grafičku reprezentaciju [Lee 97].

3.2.1. Objekt/razred

Razred kao opis objekta je predstavljen sljedećim simbolom:

Razred1
+tip1 atribut1
-double atribut2
#complex<double> a3
+tip1 fn1(tip2 a1)
+double virtual fn2()
+void virtual fn3()==0

Slika 18 Grafička reprezentacija razreda

U gornjem pravokutniku je napisano ime razreda. Razred u objektno orijentiranom jeziku može biti različitih vrsta. Apstraktni razred, koji se ne može instancirati (ne može postojati objekt tipa apstraktnog razreda) i ima barem jednu čistu virtualnu funkciju, njegov naziv je napisan u italik slovima, ostali razredi su napisani običnim slovima

U srednjem pravokutniku su popisani atributi (podaci) koje sadrži taj razred.

+ označava javno dostupan podatak ili funkciju (*eng. public*).

- označava privatni podatak ili funkciju (*eng. private*).

označava zaštićen podatak ili funkciju (*eng. protected*), dostupan samo naslijeđenim razredima.

U donjem pravokutniku su popisane funkcije koje može obavljati taj razred.

fn1 je obična funkcija.

fn2 je virtualna funkcija (u naslijeđenom se razredu može redefinirati).

fn3 je čista virtualna funkcija (u naslijeđenom se razredu mora redefinirati).

3.2.2. Relacije između objekata

Postoji više vrsta relacija između objekata:

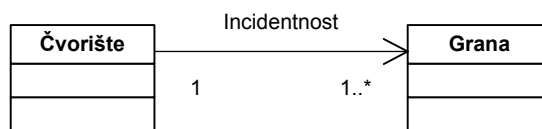
- asocijacija (implementira se pomoću pokazivača)

- generalizacija - specijalizacija (implementira se pomoću nasljeđivanja)
- sadržavanje (implementira se pomoću spremnika (*eng. container*) pokazivača)
- korištenje (koristi cijeli objekt)

Asocijacija

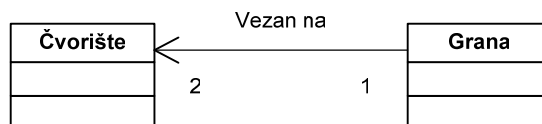
Vrsta relacije koja označava mogućnost da neki objekt koristi metodu iz drugog razreda. Takva vrsta relacija dozvoljava vezu u bilo kojem smjeru. Ponekad se može napraviti i razred koja formalizira tu vezu. Ako je veza između tri ili više razreda, razred koji formalizira tu vezu je obavezan. U jeziku C++ ta se veza označava s pokazivačem.

Označava se pomoću ravne linije koja povezuje dva razreda. Brojke koje su pridružene ispod krajeva veze označavaju broj pridruženih objekata. Veza na slici 19 nam govori da objekt tipa Čvorište ima asocijativnu vezu s jednim ili više objekata tipa Grana. Ta veza se može upotrijebiti za realiziranje veze čvorišta s incidentnim granama. Jedno čvorište mora biti vezano s najmanje jednom, a može i više, incidentnih grana.



Slika 19 Relacija asocijacije 1 na više

Grana mora biti vezana na dva čvorišta. Tada veza izgleda ovako:



Slika 20 Relacija asocijacije 1 na 2

Generalizacija-specijalizacija

Vrsta relacije koja označava "jest" relaciju. Tako na primjer transformator "jest" grana.

Označava se pomoću ravne linije koja povezuje dva razreda, a na strani razreda koji je generalizacija se nalazi prazni trokut. Na slici je prikazana relacija generalizacija specijalizacija, gdje je objekt tipa Grana generalizacija, a objekt tipa Transformator specijalizacija:

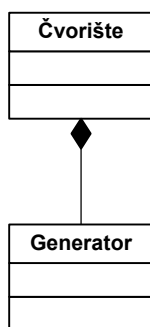


Slika 21 Relacija generalizacija - specijalizacija

Sadržavanje (*eng. aggregation, composition*)

Vrsta relacije koja je tipična dio–cjelina asocijacija. Tako se na primjer električna mreža sastoji od grana i čvorišta, stoga je relacija između čvorišta i električne mreže sadržavanje. Ova relacija po potrebi sadrži i asocijativnu vezu između ta dva razreda.

Označava se pomoću ravne linije koja povezuje dva razreda, a na strani razreda koji je cjelina se nalazi romb. Ako je nadređeni razred zadužen za kontrolu "života" (trajanja) podređenog razreda, ta veza je prikazana podebljano. Na slici je prikazano sadržavanje gdje objekt tipa Čvorište sadrži nula ili više objekata tipa Generator:



Slika 22 Relacija sadržavanje

3.3. Prednosti i mane objektno orijentiranog programiranja nad proceduralnim programiranjem

Elektroenergetski sustav je sastavljen od elemenata (objekata) generatora i tereta, koji su povezani pomoću elemenata (objekata) linija i transformatora. Prirodni zakoni upravljaju načinom interakcije između elemenata i reakciju elemenata na djelovanje okoline. Ova struktura, u svojoj suštini objektna struktura, omogućava jednostavno preslikavanje stvarnih objekata na programske objekte.

Proračuni za analizu i simulaciju EESa su uobičajeno bili pisani u proceduralnim jezicima kao što su Fortran, Pascal i C. Dosadašnji uspjeh proceduralnih metoda i stvoreno iskustvo je veliki razlog za nastavak takvog pristupa. Pitanje je da li je isplativ prelazak na novu paradigmu za stare, prokušane, programe. Ipak objektno orijentirano programiranje se

pokazalo kao pravi izbor za velike projekte i stoga bi trebalo istražiti mogućnosti objektno orijentiranog programiranja.

Proceduralno programiranje

Mnogo programa i numeričkih metoda su napisane u fortranu. Izbor programa utječe na pristup rješavanja problema jer se problem mora prilagoditi alatu pomoću kojeg se rješava.

Prednosti proceduralnog programiranja za proračune na elektroenergetskom sustavu:

- proračuni su u svim priručnicima i knjigama predstavljeni kao algoritmi koji se mogu jednostavno implementirati pomoću proceduralnog programiranja
- algoritmi problema su izraženi u skupu jednadžbi (linearne, nelinearne, diferencijalne) koje se jednostavno prikazuju pomoću jezika kao što su fortran i C

Mane proceduralnog programiranja:

- podaci su više ili manje globalni
- podaci su korišteni, dijeljeni i mijenjani procedurama koje ih koriste, veza koja je uspostavljena između procedure i podataka je privremena
- podržana je ograničena modularnost pomoću funkcija ili biblioteka funkcija (algoritama)
- ne postoji apstrakcija podataka
- gotovo svaka funkcija ima mogućnost mijenjanja svakog podatka
- gotovo svaka promjena uzrokuje promjene u mnogim procedurama

Proceduralni jezici nisu osposobljeni za programiranje u velikom opsegu, s većim timom ljudi, ponajviše zbog zadnja dva navedena svojstva.

Objektno orijentirano programiranje

Stvorena je za programiranje u velikom opsegu i s jednostavnom proširivošću. Složeni sustav se dijeli na sastavne dijelove. Svaki dio ima strogo definirano sučelje i opis poslova.

Podacima je moguće pristupiti jedino preko sučelja objekta. Takav pristup ima više koristi:

- programer koji koristi objekt je ograničen samo na podatke koji su mu potrebni, ne mora biti opterećen s pomoćnim podacima
- programer koji programira objekt ima slobodne ruke u izboru načina čuvanja podataka
- programer koji programira objekt može mijenjati format podataka i dodavati nove podatke bez promjene za programere koji koriste taj objekt

- objekt (apstraktni tip objekta) ne mora pohranjivati podatke već može biti sučelje za druge objekte koji će sadržavati te podatke pojednostavljujući promjenu ili dodavanje elemenata

Proceduralno programiranje je zadržano u objektno orijentiranom programiranju jer je to jedini način za implementaciju algoritama, no učajurivanjem funkcije u objektu jednostavnije je sagraditi i održavati funkciju jer ima manje podataka kojima se manipulira. Dio algoritma se ugradi u funkcije pristupa podacima tako da je algoritam jednostavniji. Preopterećenjem (*eng. overloading*) operatora dodatno se može smanjiti kompleksnost algoritma i povećati čitljivost. Predlošci (*eng. template*) su način da se određeni algoritmi i pogotovo manipulacija podacima pojednostavni i oslobodi teško uočljivih grešaka.

4. Programska implementacija modela

Glavna prepreka razvoju objektno orijentirane programske podrške za analizu i simulaciju EESa je smanjeni proračun za nadzor i upravljanje EESa (*eng. EMS – Energy Management System*) na globalnoj razini upravo u vrijeme kada je objektno orijentirano programiranje se započelo primjenjivati na široj razini [Maghsoodlou 04]. Druga prepreka je mnoštvo razvijenih programa i algoritama u proceduralnim tehnikama programiranja, koji se još uvijek koriste i održavaju. Razvojem i unapređivanjem te programske podrške i dodavanjem novih funkcija koje tržište zahtijeva, mnogi takvi sustavi su postali presloženi za održavanje [Zhu 97].

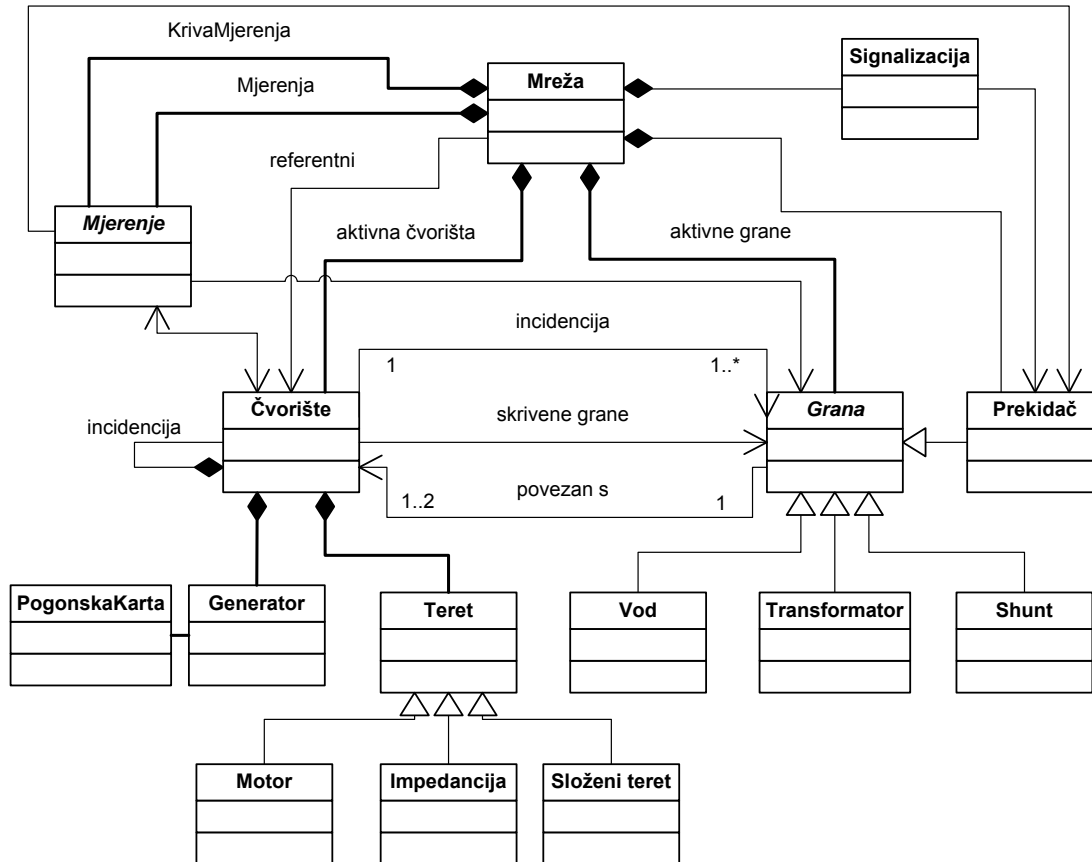
Većina do sada razvijenih objektno orijentiranih modela se zasniva ili je potekla iz razvoja grafički orijentiranih alata za analizu sustava [Debeljuh 95], [Džafić 04], [Neyer 90], [Foley 95], [Džafić 04], [Zhu 97]. Takvi sustavi u istim objektima miješaju grafičku reprezentaciju i proračunske zahtjeve. Iako objektno orijentirano programiranje omogućava odvajanje dijelova zaduženih za grafičku reprezentaciju, oni predstavljaju dodatne parametre koji doprinose složenosti modela. Neki objektno orijentirani modeli su specijalizirani za određenu svrhu, npr. za topološki procesor [Selvan 05].

Primarna zadaća ovog rada je stvaranje što jednostavnijeg modela, koji bi još uvijek opisivao sve značajke EESa, i koji bi bio jedinstven za više proračuna i proširiv za druge proračune. Nastali model sadržava dvije osnovne komponente: čvorište i grana.

Čvorište je apstraktni razred čija je zadaća sadržavanje elemenata sustava (ima "*has a*" relaciju s elementima koje sadržava). Čvorište je karakterizirano samo jednim podatkom, naponom, dok ostale potrebne podatke (snaga injekcije, tip čvorišta) pribavlja obavljanjem operacija nad elementima koje sadržava. Čvorište u fizičkom obliku predstavlja sabirnicu, element koji, kao i predstavljeni model čvorišta, ne može posjedovati nikakvo drugo svojstvo osim napona.

Grana je apstraktni razred čija su svojstva zajednički nazivnik svojstava elemenata koje predstavlja (ima "*is a*" svojstvo). Grana predstavlja sve pasivne elemente mreže koji imaju ulazne i izlazne priključnice i stoga se njezina svojstva sastoje od četiri parametara pasivnog četveropola. Svi naslijeđeni elementi preslikavaju svojstva svojih elemenata u četiri parametra pasivnog četveropola.

4.1. Model EESa



Slika 23 Model sustava i međusobne relacije

Matematički model razvijen u poglavlju 2 je implementiran u programskom jeziku C++. Na slici 23 su prikazani razredi koji implementiraju matematičke modele elemenata sustava. Svi proračuni dijele ovaj osnovni model i nadopunjavaju ga svojim specifičnostima, no osnovna struktura ostaje jednaka.

Objašnjenja grafičkih simbola se nalaze u poglavlju 3.2.

4.1.1. Mreža

Mreža
+double Sb +map<Čvorište*, int> čvnum +vector<Čvorište*> numčv +Ymatrica ymatrica +CB B1, B2
+void ulazPodataka(istream& is) +vector<čvor*> numeracija(Čvor* start) +void sakrij(Grana* g) +void vrati(Grana* g) +void TokSnaga() +void ProcjenaStanja() +void KratkiSpoj() +void izlazPodataka(ostream& os)

Razred Mreža je razred koji objedinjuje sve elemente mreže kroz relacije s razredima Grana i Čvorište. Ujedno je mjesto za ulazne i izlazne podatke koji su potrebni svakom proračunu, te parametre koji su zajednički za sve proračune. Ovdje, zbog jednostavnosti, nije navedena manipulacija s više nepovezanih dijelova mreže.

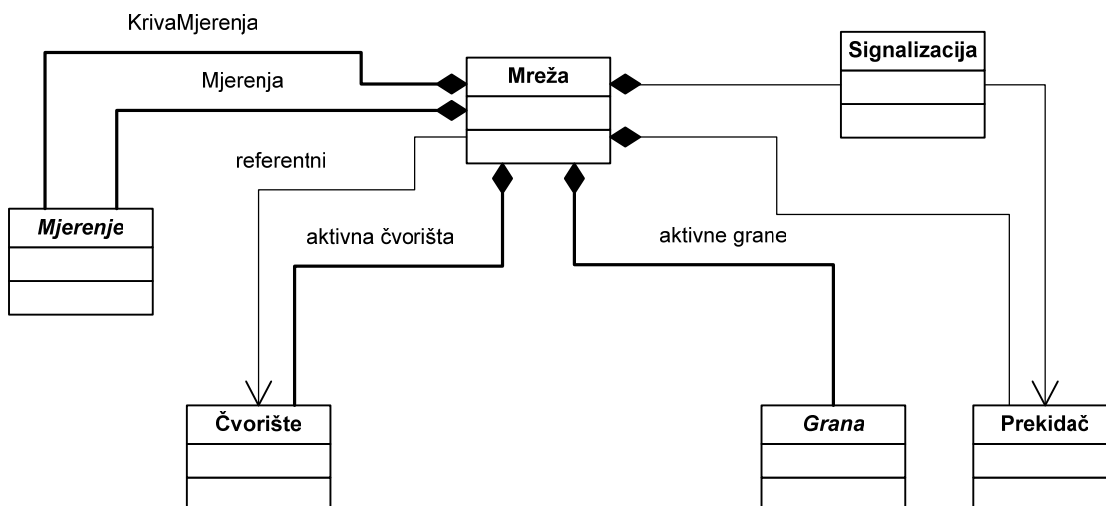
Razred Mreža se sastoji od sljedećih podataka koji su potrebni za više proračuna (koji trebaju nadživjeti proračune):

- double Sb; bazna snaga S_B koja je ista za sve elemente i potrebna je kod unosa podataka i prikaza rezultata, jer su svi podaci u modelu, osim u ulaznoj funkciji u per unit veličinama tj. neovisni o formatu ulaznih podataka
- map<Čvorište*, int> čvnum; numeracija čvorišta aktivnog otoka povezanosti (skup uređenih parova broj, pokazivač na čvorište)
- vector<Čvorište*> numčv; numeracija čvorišta aktivnog otoka povezanosti (skup uređenih parova broj, pokazivač na čvorište)
- Ymatrica ymatrica; matrica admitancija čvorišta (kompleksna (*eng. complex* Cx) rijetka (*eng. sparse* Sp) kvadratna (*eng. square* Sq) matrica (*eng. matrix* Mx))
- CB B1, B2; matrice potrebne za brze razdvojene tokove snage (realne matrice) nadživljavaju proračun tokova snaga jer su potrebne za neke druge proračune (optimalni tokovi snaga, proračun sigurnosti), da nisu potrebne za druge proračune definirale bi se lokano u proračunu (kao što se definira matrica $\mathbf{H}(\mathbf{x})$)

Svi proračuni se oslanjaju na sljedeće funkcije koje su implementirane u razredu Mreža, i obuhvaćaju cijelu mrežu i koriste se u svim proračunima:

- `void ulazPodataka(istream& is);` funkcija za ulaz podataka ovisno o vrsti proračuna i smještaju podataka (podaci mogu biti iz raznih izvora i različitih načina formatiranja), ta se funkcija jedino mijenja promjenom načina formatiranja podataka, može biti više različitih funkcija za svaki proračun
- `vector<čvorište*> numeracija(Čvorište* start);` numeracija čvorišta određenog dijela mreže, (polazno čvorište `start` ne mora biti numerirano brojem 1); koristi se metoda pretraživanja u širinu neorijentiranoga grafa (*eng. BFS breadth first search*), prvo čvorište po minimalnom stupnju čvorišta (bez paralelnih grana), ostala po složenosti u grafu, numerirano okrenutim redosljedom
- `void sakrij(Grana* g);` sakrivanje grane (izbacivanje iz popisa trenutno aktivnih grana), po potrebi izbacivanje iz `ymatrica`
- `void vrati(Grana* g);` vraćanje grane u aktivne grane
- `void TokSnaga();` proračun tokova snaga
- `void ProcjenaStanja();` proračun procjene stanja
- `void KratkiSpoj();` proračun kratkog spoja
- `void izlazPodataka(ostream& os);` funkcija za izlaz rezultata za svaki proračun, može postojati više izlaza za svaki proračun

Mreža ima sljedeće relacije s ostalim elementima:



Slika 24 Relacije razreda Mreža s ostalim razredima

- `list<Čvorište*> čvorišta;` popis aktivnih čvorišta
- `list<Grana*> grane;` popis aktivnih grana

- `set<Prekidač*>` prekidači; popis prekidača
- `list<Mjerenje*>` mjerenja; popis mjerenja
- `list<Mjerenje*>` krivamjerenja; popis krivih mjerenja
- `čvorište* refčv;` referentno čvorište tj. pokazivač na referentno čvorište (koristi se za proračune tokova snaga i procjene stanja)

Važno je primijetiti da je mreža povezana samo s četiri vrste elemenata. Ta jednostavnost modela je postignuta pomoću apstrakcije i nasljeđivanja.

4.1.2. Čvorište

Čvorište
+double Un -complex<double> u +double I1pk
+complex<double> U() +complex<double> U(complex<double> upostavi) +bool pv() +bool ref() +complex<double> Sinj() +complex<double> Sinj(complex<double> sset) +complex<double> Y() +complex<double> Y0() +complex<double> Igen3pk()

Razred Čvorište prvenstveno je dio grafa i kao takav ima relacije s granama i ostalim čvorištima. Druga uloga jest uloga električnog čvorišta. Često se te dvije uloge odvajaju no u ovom modelu obje su uloge objedinjene pod jednim razredom.

Čvorište mora sadržavati sljedeće podatke:

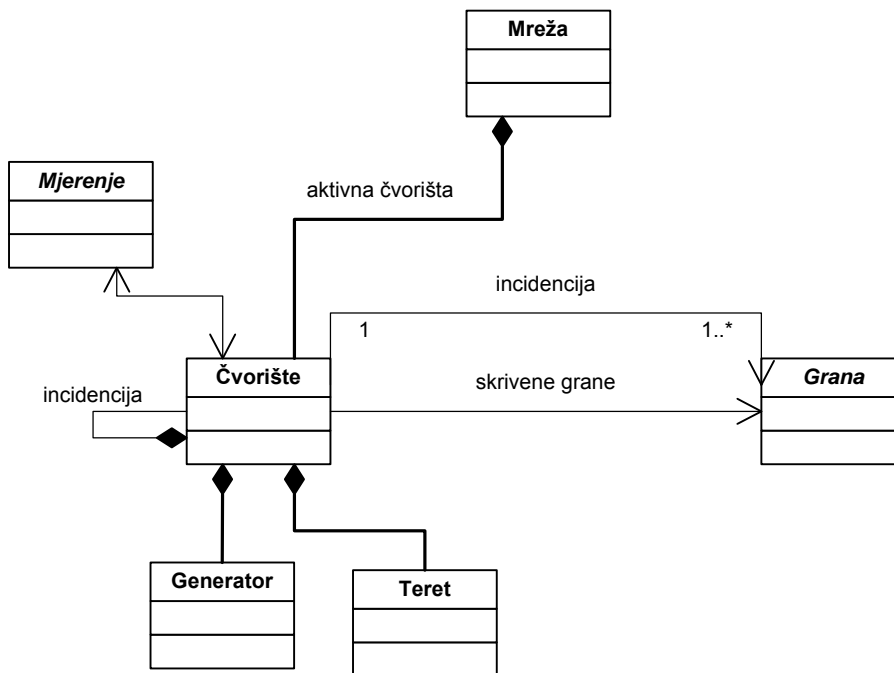
- `double Un;` nazivni (bazni) napon tog čvorišta (potreban za izračun pu veličina za unos podataka i prikaz rezultata)
- `complex<double> u;` napon čvorišta u kompleksnom obliku, privatni pristup
- `double I1pk;` struja jednopolnog kratkog spoja

Čvorište mora sadržavati sljedeće funkcije:

- `complex<double> U();` selektor napona
- `complex<double> U(complex<double> upostavi);` mutator napona
- `bool pv();` ako je čvorište naponski regulirano vraća true
- `bool ref();` ako je čvorište referentno vraća true

- `complex<double> Sinj ()`; selektor injekcije snage (zbraja pojedine injekcije iz tereta i generatora)
- `complex<double> Sinj (complex<double> sset)`; mutator injekcije snage (ne mijenja terete u čvorištu već mijenja snagu generatora kada je u PV regulaciji)
- `complex<double> Y ()`; selektor admitancije čvorišta direktnog sustava (zbraja sve admitancije tereta i generatora), potrebno za proračun kratkog spoja
- `complex<double> Y0 ()`; selektor admitancije čvorišta nultog sustava (zbraja sve admitancije tereta i generatora), potrebno za proračun kratkog spoja
- `complex<double> Igen3pk ()`; struja troleznog kratkog spoja svih generatora, računa se prema jednadžbi 22

Čvorište ima sljedeće relacije s ostalim elementima sustava:



Slika 25 Relacije razreda Čvorište

- `Mreža* m`; relacija sadržavanja u suprotnom smjeru
- `set<Grana*> inc_grane`; popis incidentnih grana (najmanje jedna)
- `set<Čvorište*> inc_čvorišta`; popis incidentnih čvorišta (bilo koji broj, teoretski mreža se može sastojati od čvorišta s granom u praznom hodu)
- `list<Generator*> generatori`; lista generatora
- `list<Teret*> tereti`; lista tereta

- `set<Grana*> skr_grane;` popis skrivenih grana (prekidača u slučaju kratkog spoja i procjene stanja, a vodova i transformatora u slučaju analize sigurnosti)
- `set<Mjerenje*> mjerenja;` mjerenja uz čvorište

4.1.3. Teret

Teret
-complex<double> snaga
-complex<double> yd
-complex<double> y0
virtual complex<double> S()
virtual complex<double> Y()
virtual complex<double> Y0()

Teret je u realnom sustavu osjetljiv na različite parametre kao što je naglašeno u poglavlju 2.2.3. U ovom razredu modeliran je samo teret konstantne snage, no ostavljena je mogućnost da se nasljeđivanjem stvori bilo koja vrsta tereta bilo kojih parametara koji ovise o frekvenciji i naponu.

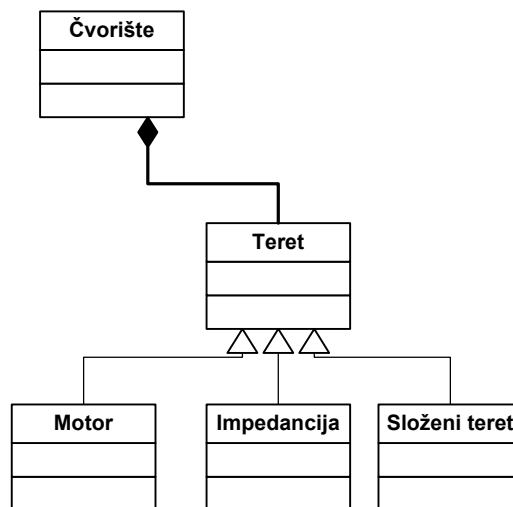
Teret sadrži sljedeće podatke:

- `complex<double> snaga;` snaga tereta
- `complex<double> yd;` admitancija direktnog sustava
- `complex<double> y0;` admitancija nultog sustava

Teret sadrži sljedeće funkcije (virtualne tako da se mogu redefinirati u naslijeđenim razredima):

- `virtual complex<double> S();` vraća snaga
- `virtual complex<double> Y();` vraća yd
- `virtual complex<double> Y0();` vraća y0

Teret sadrži sljedeću relaciju:



Slika 26 Relacije razreda Teret

- Čvorište* č; povratna veza prema razredu Čvorište

Ako bi bilo potrebno razraditi razred Teret tako da uključuje razne vrste modeliranja stvarnog potrošača, jednostavno bi se dodala relacija nasljeđivanja u kojoj bi se redefinirale virtualne funkcije gore navedene (tada podaci snaga, y i y_0 ne bi bili korišteni). Npr. na slici 26 su prikazani specijalizirani razredi Motor, Impedancija, Složeni teret.

4.1.4. Generator

Generator
-complex<double> snaga -complex<double> yd -complex<double> y0 -double naponregulatora -bool regpostava +double l3pk
+complex<double> S() +complex<double> S(complex<double> sset) +complex<double> Y() +complex<double> Y0() +bool pv() +double regnapon() +double regnapon(double napon)

Generator objedinjuje one elemente mreže koji mogu kontrolirati napon. Razred Generator se razlikuje od razreda Teret u nekoliko dodatnih funkcija koje su uzrokovane svojstvom generatora da upravlja naponom električnog čvorišta na koji je spojen. Tako se asinkroni generator, iako proizvodi energiju, modelira pomoću razreda Teret, podrazred Motor.

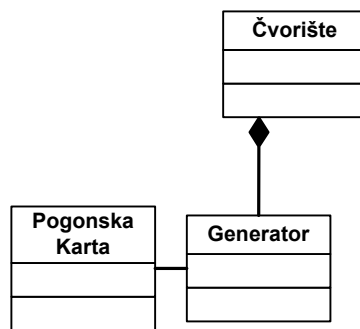
Razred Generator sadrži sljedeće podatke:

- `complex<double> snaga;` snaga tereta
- `complex<double> yd;` admitancija direktnog sustava (potrebna za kratki spoj dakle prijelazna reaktancija generatora jX_d'' i reaktancija jX_{tr} pripadajućeg blok transformatora zajedno)
- `complex<double> y0;` admitancija direktnog sustava (potrebna za kratki spoj dakle prijelazna reaktancija generatora jX_d'' i reaktancija jX_{tr} pripadajućeg blok transformatora zajedno)
- `double naponregulatora;` napon regulatora
- `bool regpostava;` postava naponskog regulatora, samo se sprema inicijalno stanje regulatora
- `double I3pk;` struja trolnog kratkog spoja

Razred Generator sadrži sljedeće funkcije:

- `complex<double> S();` virtualna selektor funkcija za snagu generatora
- `complex<double> S(complex<double> sset);` virtualna mutator funkcija za snagu generatora (provjerava pogonsku kartu)
- `complex<double> Y();` vraća `yd`
- `complex<double> Y0();` vraća `y0`
- `bool pv();` govori da li je naponski regulator aktivan ili nije (jedino ako je `regpostava true` i ako je snaga generatora unutar pogonske karte `pk`)
- `double regnapon();` selektor napona regulatora
- `double regnapon(double napon);` mutator napona regulatora

Razred Generator ima sljedeće relacije:



Slika 27 Relacije razreda Generator

- Čvorište* č;
- PogonskaKarta pk; objekt koji sadrži odgovor na pitanje da li je određena snaga unutar pogonske karte ili je izvan (stvoren je razred za tu funkciju jer je izvedba različita, nasljeđivanjem se može napraviti više tipova pogonske karte, od jednostavnog qmin, qmax, ili parametara generatora, ili čitanje slike pogonskih karata)

Male razlike između hidrogeneratora i turbogeneratora se rješavaju pravilnim izborom pogonske karte (ako je pogonska karta spremljena kao slika nisu potrebni parametri koji bi opisivali pogonsku kartu već se pogonski slučaj čita iz slike).

4.1.5. PogonskaKarta

PogonskaKarta
-double pmin, pmax, qmin, qmax
+bool pv(complex<double> snaga)
+complex<double> snaga(complex<double> snaga)

Pogonska karta odgovara na pitanje da li je neka snaga unutar pogonske karte ili nije. Može se naslijediti i redefinirati.

Podaci potrebni za najjednostavniji slučaj gdje je pogonska karta opisana s pravokutnikom u nasljeđenim funkcijama moguće je drugačije definirati pogonsku kartu:

- double pmin, pmax, qmin, qmax; definiranje pravokutnika

Sljedeće funkcije u potpunosti prikazuju funkcionalnost pogonske karte:

- bool pv(complex<double> snaga); daje odgovor na pitanje da li je spomenuta snaga unutar pogonske karte
- complex<double> snaga(complex<double> snaga); ako je snaga unutar pogonske karte tada funkcija vraća istu snagu, ako je snaga van pogonske karte tada

funkcija vraća snagu koja ima istu radnu komponentu i na pogonskoj karti najbližu jalovu komponentu

Ako se želi složenije opisati pogonsku kartu moguće je napraviti podrazred i redefinirati način prikaza pogonske karte (funkcijama, slikom ili parametrima generatora).

4.1.6. Grana

Grana
+double Ii3pk, Ij3pk +double Ii1pk, Ij1pk
+virtual complex<double> Y(Čvorište* strana)=0 +virtual complex<double> Y2(Čvorište* strana)=0 +virtual complex<double> Y0(Čvorište* strana) +virtual complex<double> Y02(Čvorište* strana) +complex<double> S(Čvorište* strana) +virtual double Smax()=0 +virtual double B1() +virtual double B2()

S razredom Grana opisani su svi elementi sustav koji povezuju dva čvorišta (iako ponekad vod može biti u praznom hodu).

Grana je apstraktni razred. Razred Grana se može nazvati i sučelje za sve elemente sustava koji povezuju dva čvorišta.

Razred Grana sadrži sljedeće podatke:

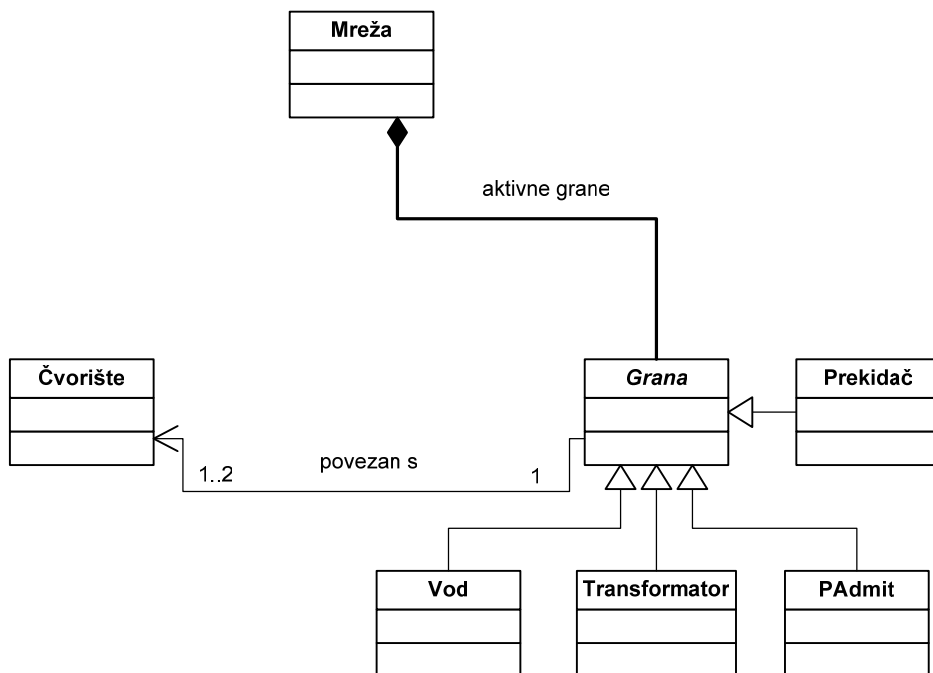
- double Ii3pk, Ij3pk; struja trolnog kratkog spoja
- double Ii1pk, Ij1pk; struja jednopolnog kratkog spoja

Razred Grana ima sljedeće virtualne funkcije (moгу se redefinirati u naslijeđenim granama, označene s `virtual` prefiksom) i čiste virtualne funkcije (moraju se redefinirati u naslijeđenim razredima, označene prefiksom `virtual` i sufiksom `=0`):

- `virtual complex<double> Y(Čvorište* strana)=0; $\bar{Y}_{uz}[i]$ ili $\bar{Y}_{uz}[j]$`
ovisno koje čvorište je naznačeno, čvorište i ili čvorište j
- `virtual complex<double> Y2(Čvorište* strana)=0; $\bar{Y}_{pop}[i]$ ili $\bar{Y}_{pop}[j]$`
ovisno koje čvorište je naznačeno, čvorište i ili čvorište j
- `virtual complex<double> Y0(Čvorište* strana); $\bar{Y}_{0uz}[i]$ i $\bar{Y}_{0uz}[j]$`
ovisno koje čvorište je naznačeno, čvorište i ili čvorište j; ako nije drugačije naznačeno (*eng. default*) onda je to vrijednost funkcije `Y(Čvorište* strana)`

- `virtual complex<double> Y02(Čvorište* strana); $\bar{Y}_{0pop}[i]$ i $\bar{Y}_{0pop}[j]$` ovisno koje čvorište je naznačeno, čvorište i ili čvorište j; ako nije drugačije naznačeno onda je to vrijednost funkcije `Y2(Čvorište* strana)`
- `complex<double> S(Čvorište* strana);` računanje toka snage kroz granu pomoću jednadžbe 39 ili ako je grana u praznom hodu 41; ako je $\bar{Y}_{uz}[i] = \infty$ znači da je grana zatvoreni prekidač te se za nju snaga računa zbrajanjem snaga koje dolaze u čvorište prema jednadžbi 78
- `virtual double Smax()=0;` označava maksimalnu snagu elementa
- `virtual double B1();` funkcija čiji je rezultat broj za građenje B' matrice ako nije drukčije definirano onda $1/(1/Y(i)).imag()$ (jednadžba 103)
- `virtual double B2();` funkcija čiji je rezultat broj za građenje B'' matrice ako nije drukčije definirano onda $Y(i).imag()$ (jednadžba 109)

Relacije razreda Grana su sljedeće:



Slika 28 Relacije razreda Grana

- Čvorište* i; veza s jednim incidentnim čvorištem
- Čvorište* j; veza s drugim incidentnim čvorištem
- Mreža* m; veza s nadređenom mrežom

4.1.7. Vod

Vod
-complex<double> y -complex<double> y2 -double snaz
+complex<double> Y(Čvorište* strana) +complex<double> Y2(Čvorište* strana) +double Smax()

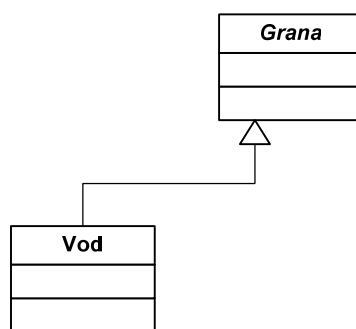
U matematičkom modelu je navedeno da su za potpuni opis voda potrebna samo dva parametra, tako da u podacima voda imamo:

- complex<double> y; uzdužna admitancija \bar{Y}_{uz}
- complex<double> y2; poprečna admitancija \bar{Y}_{pop}
- double snaz; nazivna snaga (termička)

U razredu Vod nalaze se sljedeće funkcije:

- complex<double> Y(Čvorište* strana); uzdužna impedancija (neovisna je o strani)
- complex<double> Y2(Čvorište* strana); poprečna impedancija (neovisna je o strani)
- double Smax(); vraća nazivnu snagu

Razred Vod ima sljedeću relaciju:



Slika 29 Relacija razreda Vod

4.1.8. Transformator

Transformator
-int polreg -vector< complex<double> > taps -vector< complex<double> > yuzi -vector< complex<double> > yuzj -vector< complex<double> > ypopi -vector< complex<double> > ypopj -vector< complex<double> > y0uzi -vector< complex<double> > y0uzj -vector< complex<double> > y0popi -vector< complex<double> > y0popj -double snaz -double smax
+complex<double> Y(Čvorište* strana) +complex<double> Y2(Čvorište* strana) +complex<double> Y0(Čvorište* strana) +complex<double> Y20(Čvorište* strana) +complex<double> B1() +complex<double> B2() +void t(int polreg) +void t(complex<double> željenitap) +double Smax()

Ovaj razred ima funkcije i podatke koji su općeniti za sve transformatore, kao što je opisano u poglavlju 2.3.3.

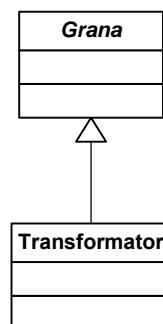
- int polreg; trenutni položaj regulacijske sklopke transformatora (počevši od 1, nulti položaj je rezerviran za prijenosni omjer 1.0)
- vector< complex<double> > taps; popis svih prijenosnih omjera
- vector< complex<double> > yuzi; popis svih $\bar{Y}_{uz}[i]$
- vector< complex<double> > yuzj; popis svih $\bar{Y}_{uz}[j]$
- vector< complex<double> > ypopi; popis svih $\bar{Y}_{pop}[i]$
- vector< complex<double> > ypopj; popis svih $\bar{Y}_{pop}[j]$
- vector< complex<double> > y0uzi; popis svih $\bar{Y}_{0uz}[i]$
- vector< complex<double> > y0uzj; popis svih $\bar{Y}_{0uz}[j]$
- vector< complex<double> > y0popi; popis svih $\bar{Y}_{0pop}[i]$
- vector< complex<double> > y0popj; popis svih $\bar{Y}_{0pop}[j]$

- `double snaz;` nazivna snaga
- `double smax;` maksimalna snaga, obično 1.2 nazivne snage

Ovaj razred ima funkcije:

- `complex<double> Y(Čvorište* strana);` uzdužna admitancija ovisno da li je čvorište i ili čvorište j uzima se vrijednost `yuzi[polreg]` ili `yuzj[polreg]`
- `complex<double> Y2(Čvorište* strana);` poprečna admitancija ovisno da li je čvorište i ili čvorište j uzima se vrijednost `ypopi[polreg]` ili `ypopj[polreg]`
- `complex<double> Y0(Čvorište* strana);` uzdužna admitancija nultog sustava ovisno da li je čvorište i ili čvorište j uzima se vrijednost `y0uzi[polreg]` ili `y0uzj[polreg]`
- `complex<double> Y20(Čvorište* strana);` poprečna admitancija nultog sustava ovisno da li je čvorište i ili čvorište j uzima se vrijednost `y0popi[polreg]` ili `y0popj[polreg]`
- `complex<double> B1();` provjeri se koji položaj sklopke ima vrijednost 1.0, taj položaj neka bude `polreg1` te se uzme `1/(1/yuzi[polreg1]).imag()`
- `complex<double> B2();` uzme se `yuzi[polreg]/t[polreg]*abs(t[polreg])`
- `void t(int polreg);` mijenjanje položaja regulacijske sklopke
- `void t(complex<double> željenitap);` mijenjanje položaja regulacijske sklopke tako da se nađe najbliži prijenosni omjer željenom
- `double Smax();` maksimalna snaga koju može podnijeti transformator u radu

Relacija razreda transformator:



Slika 30 Relacija razreda Transformator

4.1.9. Poredna Admitancija

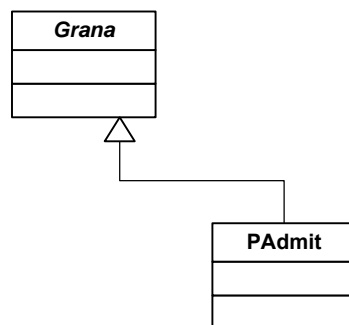
PAdmit
-int polreg
-vector< complex<double> > y2
+complex<double> Y(Čvorište* strana)
+complex<double> Y2(Čvorište* strana)
+double Smax()

Svojstva prigušnice i kondenzatora su objedinjena u jedan razred nazvan PAdmit. Pošto je često moguće regulirati iznos impedancije prigušnice i kondenzatora, modeliran je opći slučaj kao da postoji regulacija. Podaci potrebni su:

- `int polreg`; trenutni položaj regulacijske sklopke transformatora, pri čemu je položaj 0 rezerviran za položaj sklopke 1.0
- `vector< complex<double> > y2`; popis svih admitancija prigušnice ili kondenzatora

Funkcije su:

- `complex<double> Y(Čvorište* strana)`; vraća 0
- `complex<double> Y2(Čvorište* strana)`; vraća `y2[polreg]`
- `double Smax()`; vraća ∞ jer su prigušnica i kondenzator predviđeni za sve regularne naponske prilike u mreži



Slika 31 Relacija razreda PAdmit

4.1.10. Prekidač

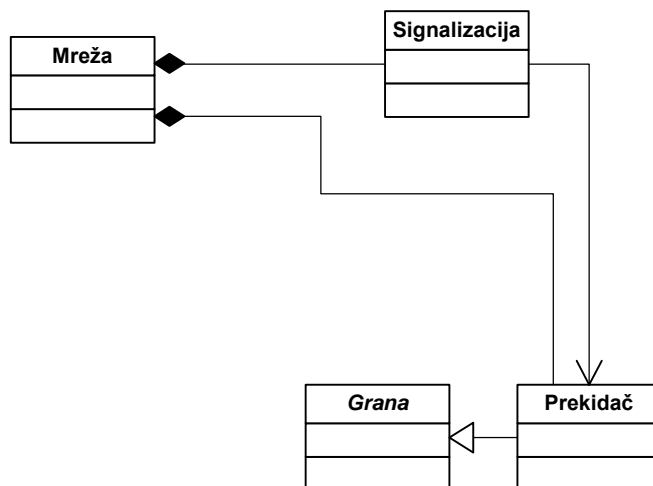
Prekidač
-bool zatvoren -double ips
+complex<double> Y() +complex<double> Y2() +double Smax() +void sakrij() +void vrati()

U ovom razredu su objedinjeni i rastavljači i prekidači s jedinom razlikom u iznosu prekidne struje. Kod prekidača je struja definirana, a kod rastavljača je ona ∞ . Prekidač ima sljedeće podatke:

- bool z; status zatvoren
- bool o; status otvoren
- double ips; prekidna struja prekidača I_{ps} , kod rastavljača je ∞

Sljedeće funkcije:

- bool zatvoren(); vraća status z
- bool otvoren(); vraća status o
- complex<double> Y(); ako je status prekidača otvoren vraća 0, a ako je status prekidača zatvoren vraća ∞
- complex<double> Y2(); vraća 0
- double Smax(); vraća ips (kod ostalih elemenata razreda naslijeđenih od grane ovaj broj se upotrebljava za proračun sigurnosti, a kod prekidača se upotrebljava za proračun kratkog spoja)
- void sakrij(); kada ulazimo u proračune moramo izbaciti prekidače iz aktivnih elemenata mreže, postupak je opisan u poglavlju 2.3.5
- void vrati(); nakon proračuna prekidače moramo vratiti u aktivne elemente mreže, postupak je opisan u poglavlju 2.3.5



Slika 32 Relacije razreda prekidač

4.2. Pomoćni razredi

4.2.1. Mjerenje

Mjerenje
-double s -double z -timedate t
+virtual double sigma() +virtual double z() +virtual datetime t() +virtual double zrač()=0 +virtual double Uabs(Čvorište* č)=0 +virtual double Uarg(Čvorište* č)=0 +virtual double tijabs(Grana* g)=0 +virtual double tijarg(Grana* g)=0

Razred Mjerenje je apstraktna klasa koja obuhvaća sva mjerenja.

Podatak o točnosti mjerenja σ je svima zajednički tako da se on pamti u ovom razredu:

- double s; točnost mjerenja σ , ako nije drugačije naznačeno: 0.001
- double z; mjerenje
- timedate t; vrijeme mjerenja

Funkcije za formiranje vektora $\mathbf{z}^{\text{rač}}$ i matrice $\mathbf{H}(\mathbf{x})$:

- virtual double sigma(); vraća točnost mjerenja σ (moguće je upotrijebiti razne dodatne funkcije za točnije određivanje σ)
- virtual double z(); vraća mjerenje

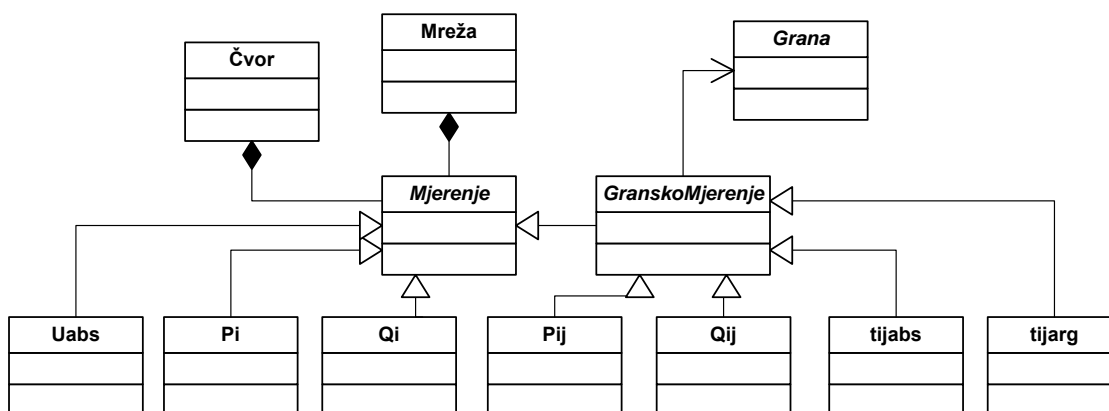
- virtual datetime t (); vraća vrijeme mjerenja
- virtual double zrač ()=0; računanje $z^{\text{rač}}$ od tog mjerenja (element vektora $\mathbf{z}^{\text{rač}}$)
- virtual double Uabs (Čvorište* č)=0; računanje varijable stanja x (tj. $|\bar{U}_c|$)
- virtual double Uarg (Čvorište* č)=0; računanje varijable stanja x (tj. $\arg(\bar{U}_c)$)
- virtual double tijabs (Grana* g)=0; računanje varijable stanja x (tj. $|\bar{t}_g|$)
- virtual double tijarg (Grana* g)=0; računanje varijable stanja x (tj. $\arg(\bar{t}_g)$)

Razred Mjerenje sadrži sljedeću relaciju

- Čvorište* č; čvorište na koje se mjerenje odnosi ili ako je gransko mjerenje onda pri kojem čvorištu se mjerenje nalazi

Naslijeđeni razred GranskoMjerenje ima dodatnu relaciju:

- Grana* gmj; grana na kojem je mjerenje u grani



Slika 33 Relacije razreda Mjerenje i njegovih naslijeđenih razreda

Uabs

Razred Uabs sadrži mjerenje napona u nekom čvorištu

Redefinirane su funkcije

- double zrač (); vraća $\check{c}m_j \cdot U()$
- double Uabs (Čvorište* č); vraća 1 ako je $\check{c}m_j = \check{c}$ (jednadžba 11)
- double Uarg (Čvorište* č); vraća 0
- double tijabs (Grana* g); vraća 0

- double tijarg(Grana* g); vraća 0

Pi i Qi

Razredi Pi i Qi sadrže injekcije radne i jalove snage u čvorištu. Za Pi se uzimaju realne vrijednosti, a za Qi se uzimaju imaginarne vrijednosti.

Redefinirane su funkcije

- double zrač(); vraća (čmj.S()).real() za Pi; (čmj.S()).imag() za Qi
- double Uabs(Čvorište* č);
ako je čmj==č računa se po jednađžbi 14
ako je čvorište č incidentno čvorištu čmj računa se po jednađžbi 44, gdje je čmj čvorište i, a č čvorište j
- double Uarg(Čvorište* č);
ako je čmj==č računa se po jednađžbi 15
ako je čvorište č incidentan čvorištu čmj računa se po jednađžbi 46, gdje je čmj čvorište i, a č čvorište j
- double tijabs(Grana* g);
ako je čmj==g->i&&č==g->j onda jednađžba 16
ako je čmj==g->j&&č==g->i onda jednađžba 18
- double tijarg(Grana* g);
ako je čmj==g->i&&č==g->j onda jednađžba 17
ako je čmj==g->j&&č==g->i onda jednađžba 19

Pij i Qij

Ovdje su smještena mjerenja snage u grani. Za Pij se uzimaju realne vrijednosti, a za Qij se uzimaju imaginarne vrijednosti u funkcijama.

Redefinirane su funkcije

- double zrač(); gmj.S(čmj).real() za Pij; gmj.S(čmj).imag() za Qij
- double Uabs(Čvorište* č);
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.i tada se računa po jednađžbi 44
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.j tada se računa po jednađžbi 45
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.i tada se računa po jednađžbi 48
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.j tada se računa po jednađžbi 49

- double Uarg (Čvorište* č);
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.i tada se računa po jednadžbi 46
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.j tada se računa po jednadžbi 47
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.i tada se računa po jednadžbi 50
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.j tada se računa po jednadžbi 51
- double tijabs (Grana* g);
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.i tada se računa po jednadžbi 65
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.j tada se računa po jednadžbi 67
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.i tada se računa po jednadžbi 70
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.j tada se računa po jednadžbi 71
- double tijarg (Grana* g);
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.i tada se računa po jednadžbi 66
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.j tada se računa po jednadžbi 68
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.i tada se računa po jednadžbi 69
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.j tada se računa po jednadžbi 72

tijabs i tijarg

Ovdje su smještena mjerenja prijenosnih omjera u grani.

Redefinirane su funkcije:

- double zrač();
ako je čmj=gmj.i tada vraća (dynamic_cast<Transformator>gmj).t()
ako je čmj=gmj.j tada vraća 1/(dynamic_cast<Transformator>gmj).t()
- double Uabs (Čvorište* č); vraća 0
- double Uarg (Čvorište* č); vraća 0
- double tijabs (Grana* g);
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.i tada za tijabs vraća 1, a za tijarg 0
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.j tada za tijabs vraća 0, a za tijarg 0
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.i tada za tijabs vraća 0, a za tijarg 0
ako je čmj==gmj.j&&č==gmj.j tada za tijabs vraća 1, a za tijarg 0
- double tijarg (Grana* g);
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.i tada za tijabs vraća 1, a za tijarg 0
ako je čmj==gmj.i&&č==gmj.j tada za tijabs vraća 0, a za tijarg 0

ako je $\check{c}m_j == gm_j . j \ \&\& \ \check{c} == gm_j . i$ tada za `tijabs` vraća 0, a za `tijarg` 0

ako je $\check{c}m_j == gm_j . j \ \&\& \ \check{c} == gm_j . j$ tada za `tijabs` vraća 1, a za `tijarg` 0

4.2.2. Signalizacija

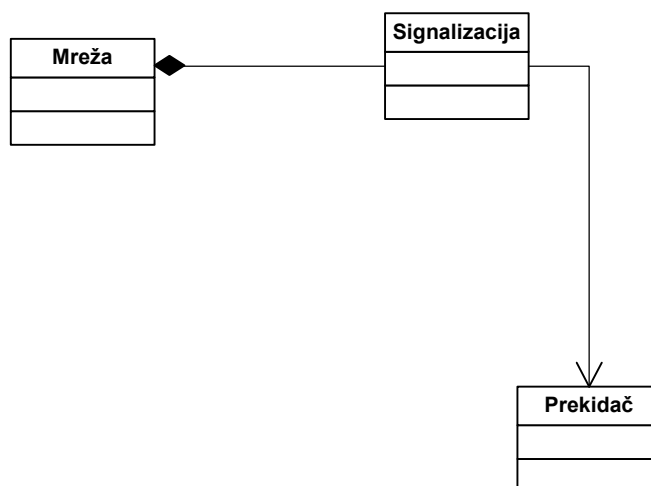
Signalizacija
-int z
-double s
-datetime t
+int status()
+double sigma()
+datetime t()

Razred `Signalizacija` sadrži mjerenja statusa prekidača. Sadrži sljedeće podatke:

- `int z`; status prekidača, enumeracija pomaže povezati broj sa statusom:
`enum statusi{ otvoren, zatvoren, ručnootvoren, ručnozatvoren, međupoložaj, kvar}`
- `double s`; pouzdanost mjerenja
- `datetime t`; vrijeme nastanka mjerenja

Funkcije su:

- `int status()`; vraća status prekidača
- `double sigma()`; vraća pouzdanost mjerenja
- `datetime t()`; vraća vrijeme mjerenja



Slika 34 Relacije razreda `Signalizacija`

- `grana* g`; signalizacija se odnosi na prekidač (granu)

4.3. Operacije s matricama i vektorima

Za operacije s matricama i vektorima koriste se razredi ljuske (*eng. wrapper*) koji omogućava upotrebu gotovih biblioteka funkcija linearne algebre. Te biblioteke su testirane i optimizirane, što skraćuje vrijeme razvoja i omogućava lakše pronalaženje grešaka, jer se "zna" da greške nisu u razvijenim i testiranim bibliotekama. Upotreba razreda ljuski omogućava i izmjenu biblioteka bez izmjena u kôdu.

U ovom radu se upotrijebila razvijena biblioteka klasa i funkcija za rad s matricama i vektorima CVM Class Library [Nikolaev 05]. To je objektno orijentirana ljuska za Intel® Math Kernel Library [Intel MKL] u kojemu su implementirane osnovne podrutine linearne algebre (*eng. BLAS – Basic Linear Algebra Subroutines*).

Ime razreda ljuske govori kakva je matrica (npr. CxSpSqMx) ili vektor (npr. ReDsCoVc):

Prva dva slova označavaju vrstu brojeva u matrici ili vektoru:

B1 – binarni brojevi (*eng. bool*)

In – prirodni brojevi (*eng. integer*)

Re – realni brojevi (*eng. real*)

Cx – kompleksni brojevi (*eng. complex*)

Sljedeća dva slova označavaju prirodu objekta:

Ds – puna (*eng. dense*)

Sp – rijetka (*eng. sparse*)

Sljedeća dva slova označavaju oblik matrice:

Sq – kvadratna (*eng. square*)

Rc – pravokutna (*eng. rectangular*)

ili vektora:

Co – stupčasti (*eng. column*)

Ro – redni (*eng. row*)

Zadnja dva slova označavaju da li je matrica ili vektor:

Mx – matrica (*eng. matrix*)

Vc – matrica (*eng. vector*)

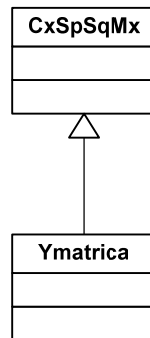
Primjer:

Kompleksna, rijetka, kvadratna matrica: CxSpSqMx

Realni, puni, stupčasti, vektor: ReDsCoVc

Ovi razredi moraju imati operacije zbrajanja, oduzimanja i množenja pomoću prekrivanja operatora (*eng. overload*). Moraju imati faktorizaciju i rješavanje linearnih jednadžbi. Dodatno moraju, pored regularnih matematičkih operacija s matricama i vektorima, imati množenje i dijeljenje stupčanih vektora element po element.

4.3.1. Razred Ymatrica: CxSpSqMx

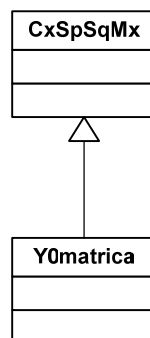


Slika 35 Relacija razreda Ymatrica

Razred Ymatrica je kompleksna rijetka kvadratna matrica koja ima dodatne funkcije dodavanja i izbacivanja grana iz te matrice:

- void dodaj(Grana& g); dodavanje grane u ymatricu mreže
- void izbaci(Grana& g); izbacivanje grane iz ymatrice mreže

4.3.2. Razred Y0matrica: CxSpSqMx



Slika 36 Relacija razreda Y0matrica

Razred Y0matrica je kompleksna rijetka kvadratna matrica potrebna u proračunima kratkog spoja. Prilikom stvaranja te matrice mora se funkciji dati parametar čvorište u kojem mora izračunati matricu admitancije čvorišta nultog sustava.

- void stvori(Čvorište& č); stvaranje matrice admitancije čvorišta nultog sustava počevši od danog čvorišta.

4.3.3. Razred CB za implementaciju B' i B''

Razred CB mora implementirati rješavanje sustava linearnih jednadžbi $\mathbf{Bx} = \mathbf{b}$ tako da se dodatno kontroliraju koje se varijable rješavaju (npr. referentno čvorište se ne računa), a to se kontrolira pomoću vektora binarnih brojeva.

Funkcije:

- `ReDsCoVc solve(ReDsCoVc b, BLDsCoVc c);`
- `void dodaj(Grana& g);`
- `void izbaci(Grana& g);`

4.4. Proračun tokova snaga FDLF

Proračun tokova snaga je izveden kao funkcija u razredu mreža. Preduvjeti za funkciju proračuna tokova snaga su:

- izvršeno numeriranje čvorišta
- sakriveni svi prekidači
- stvorena matrica admitancija čvorišta
- stvorene matrice za brze razdvojene tokove snaga

Ulazni parametri za funkciju proračuna tokova snaga su:

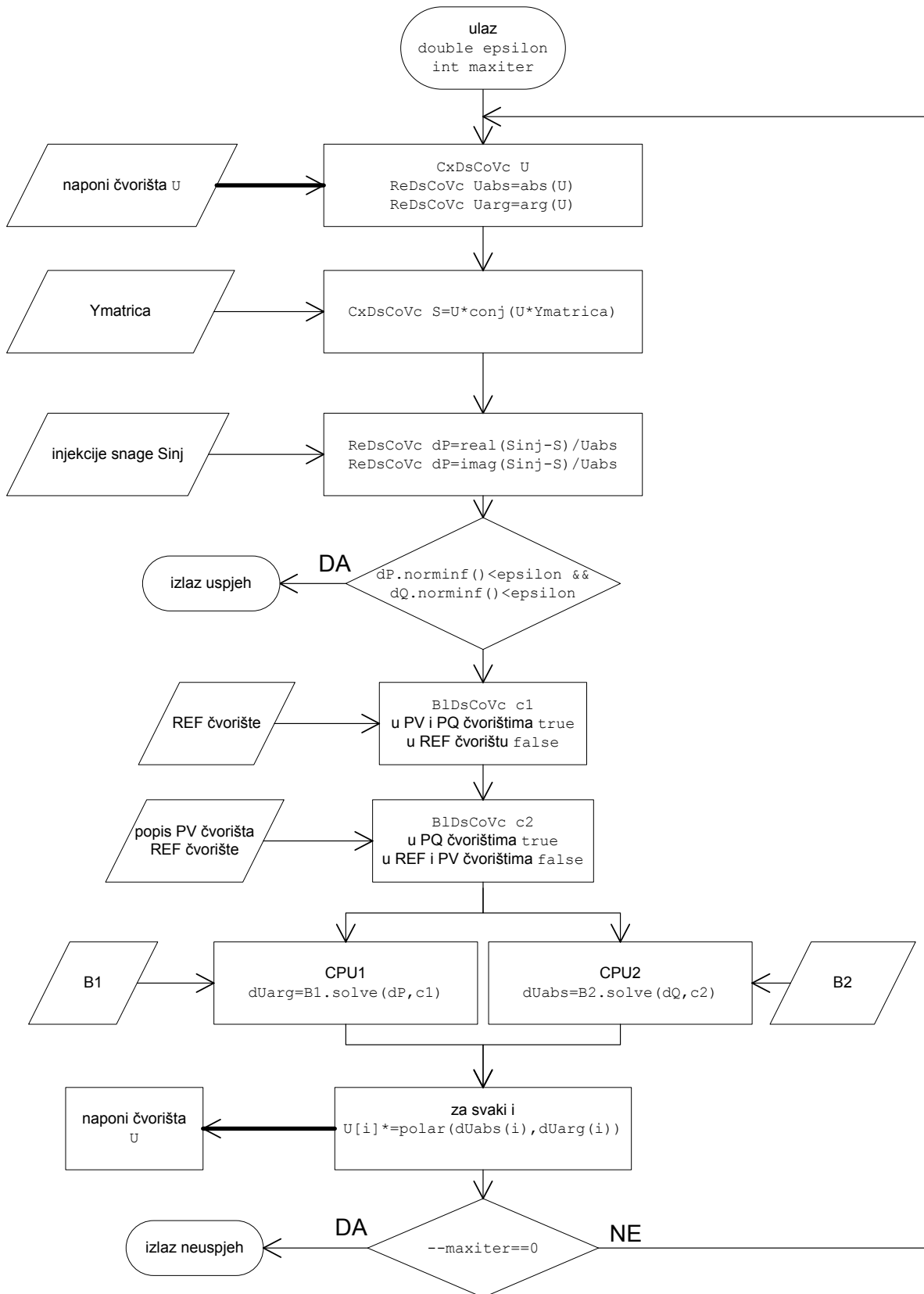
- `double epsilon;` točnost proračuna dana u snazi [MVA], ako nije specificirana uzima se 0,01MVA
- `int maxiter;` maksimalni broj iteracija, ako nije specificirana uzima se 20

Početni naponi uzimaju se iz modela. Obično su to naponi preostali od nekog proračuna (procjena stanja ili tokovi snaga) ili vrijednost napona 1.0. Pošto brzi razdvojeni proračuni imaju šire područje konvergencije [Arrillaga 90], početni naponi ne moraju biti bliski stvarnima. U svakoj iteraciji proračuna naponi se vraćaju u model, time se omogućava rad funkcija koje računaju da li je čvorište u naponskoj regulaciji i funkcija koje računaju injekciju snage tereta (ako je ovisan o naponu) itd. Nakon proračuna izračunati naponi ostaju u modelu.

Nakon proračuna tokova snaga potrebno je vratiti sve prekidače i provjeriti da li je tok snaga kroz svaku granu premašio ograničenje.

Proračun tokova snaga je pogodan za implementaciju za dvoprosorske sustave jer računanje $\Delta \arg(\mathbf{U}^k) = \text{solve}(\mathbf{B}', \Delta \mathbf{P}^k)$ i $\Delta |\mathbf{U}^k| = \text{solve}(\mathbf{B}'', \Delta \mathbf{Q}^k)$ odnosi 80-85% ukupnog vremena

proračuna. Te dvije jednačbe su neovisne jedna o drugoj i otprilike izračun traje jednako, stoga je procijenjena ušteda u vremenu proračuna oko 40%.

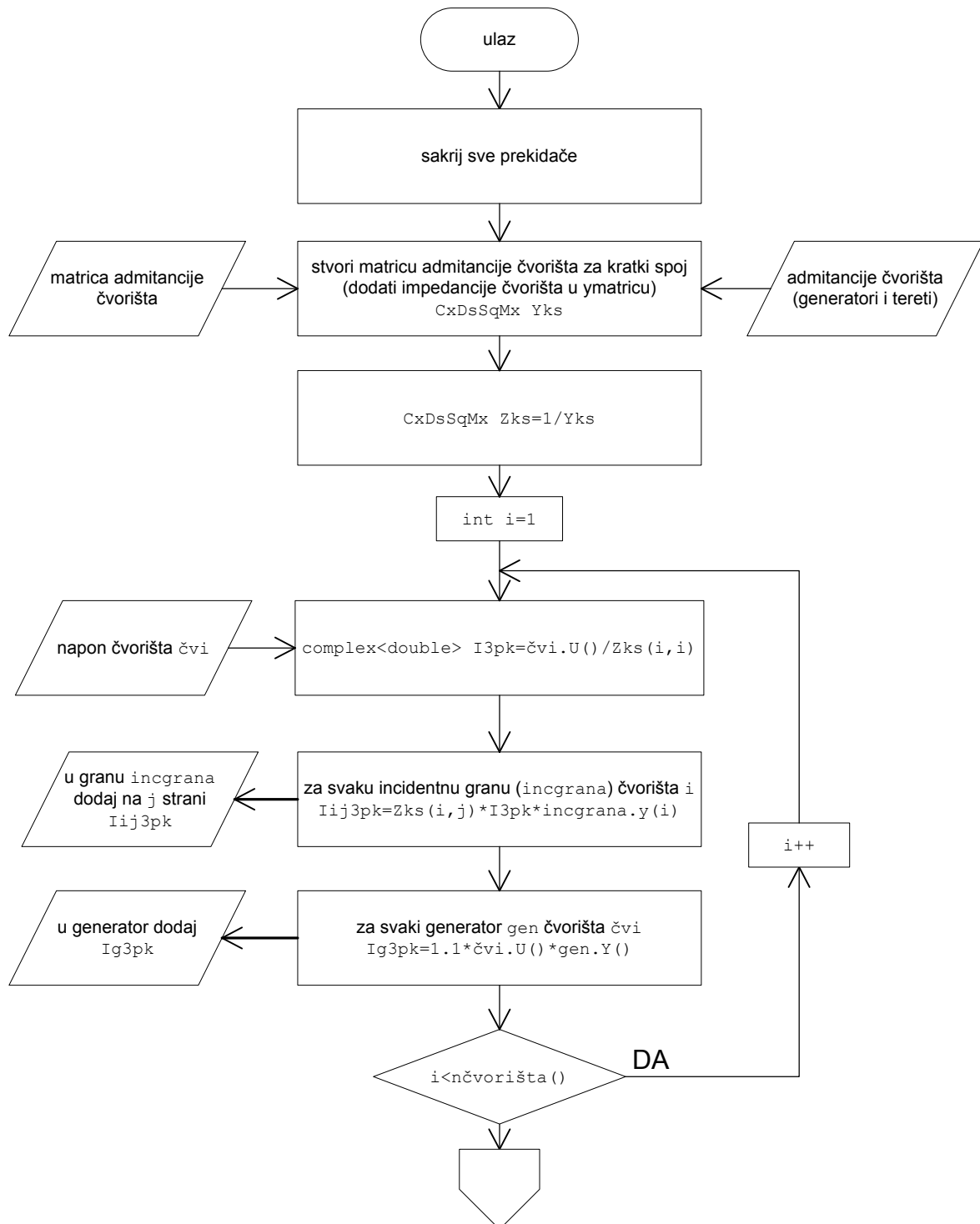


Slika 37 Dijagram toka za brzi razdvojeni proračun tokova snaga

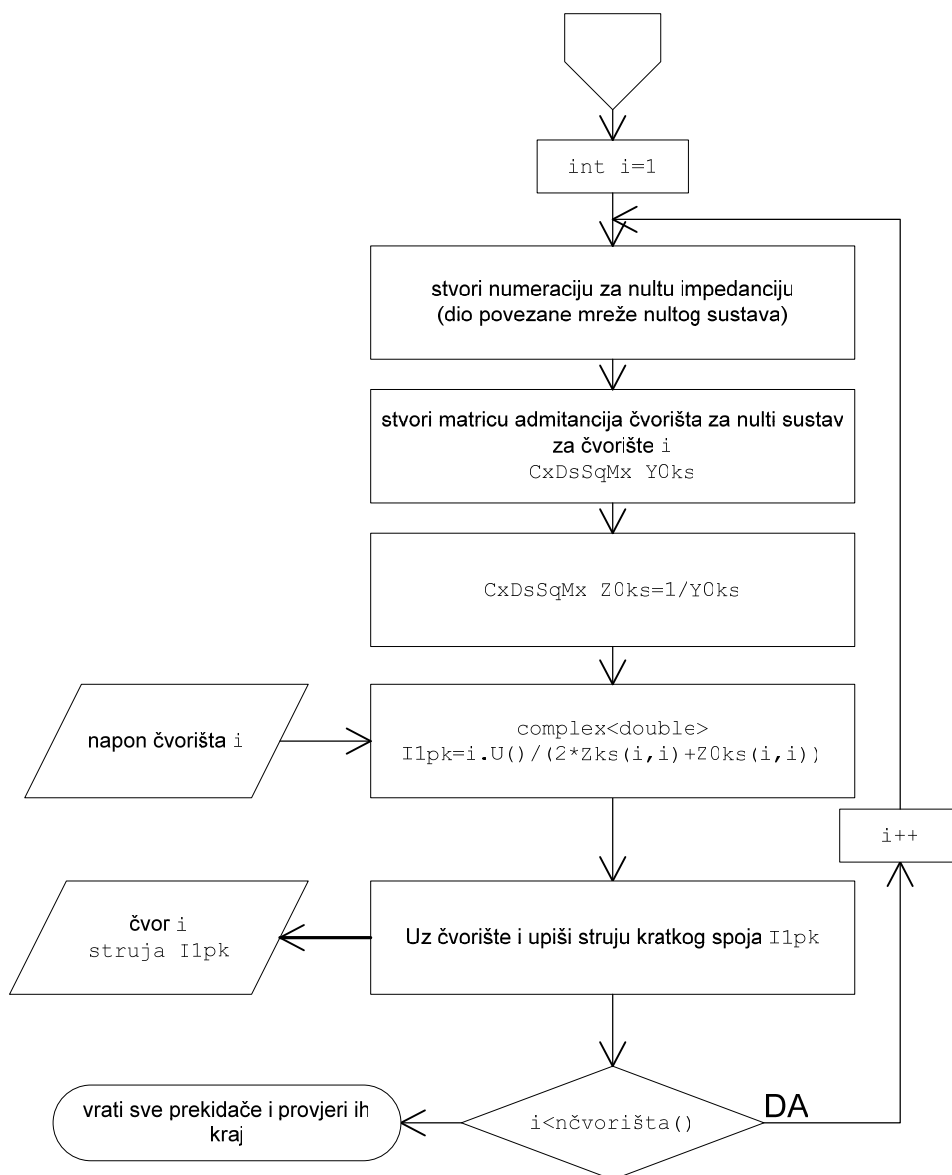
U dijagramu se koristi notacija uobičajena za programiranje: $--x$ je ekvivalentno s $x=x-1$, $x*=y$ je ekvivalentno $x=x*y$

4.5. Proračun kratkog spoja

Proračun tokova snaga je izveden kao funkcija u razredu mreža. Preduvjet za funkciju proračuna kratkog spoja je izvršeno numeriranje čvorišta.



Slika 38 Dijagram toka za proračun kratkog spoja (prvi dio, trolni proračun)



Slika 39 Dijagram toka proračuna kratkog spoja (drugi dio, jednopolni proračun)

4.6. Procjena stanja

Proračun procjene stanja je izveden kao funkcija u razredu mreža. Preduvjeti za funkciju proračuna procjene stanja su:

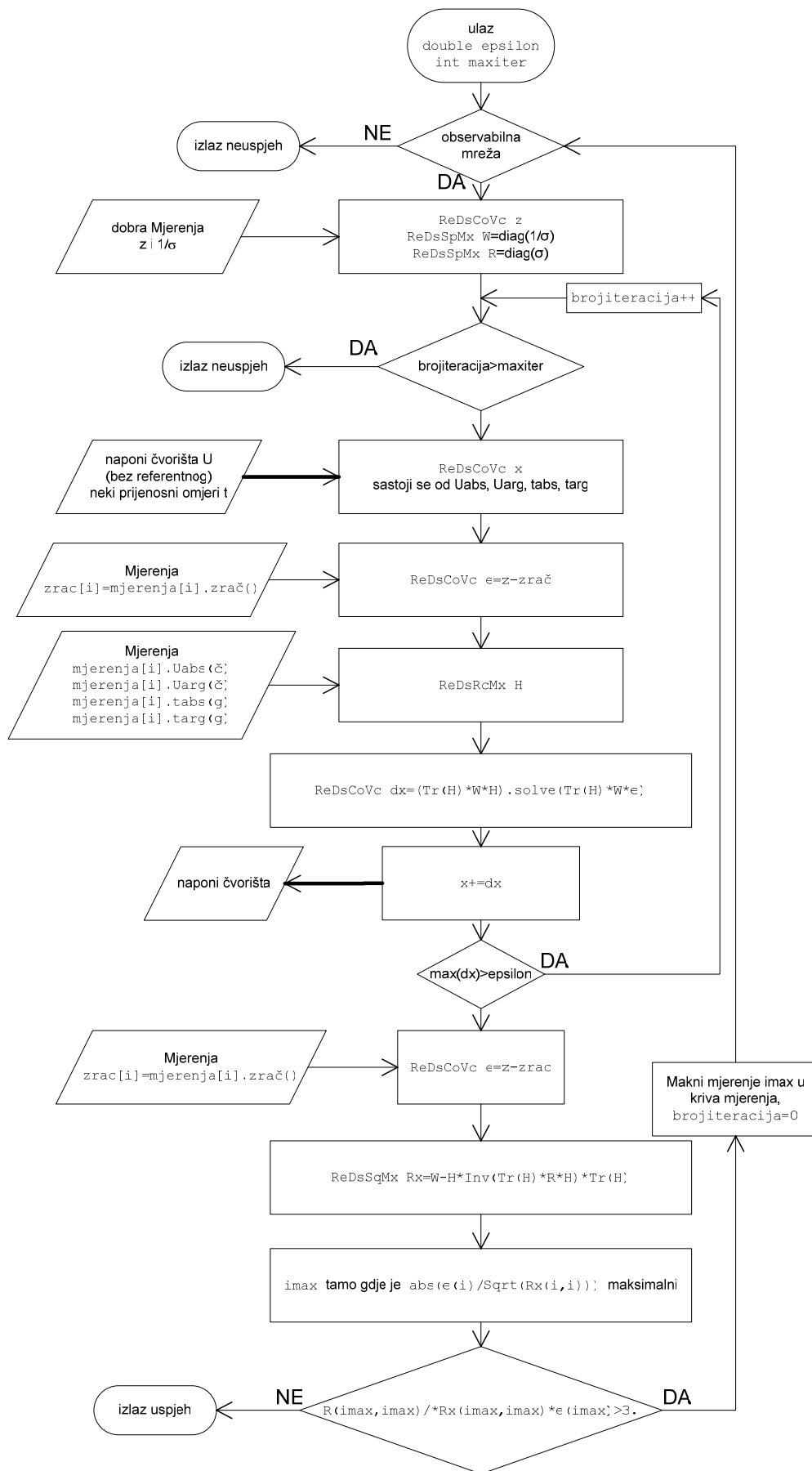
- izvršeno numeriranje čvorišta
- nadgledivost mreže (provjerava se i u proračunu)

Ulazni parametri za funkciju proračuna tokova snaga su:

- `double epsilon`; točnost proračuna dana u per unit veličini napona [pu], ako nije specificirana uzima se 0.001
- `int maxiter`; maksimalni broj iteracija, ako nije specificirana uzima se 20

Proračun uzima ulazne podatke mjerenja, a kao izlaz sprema napon u čvorišta.

Model razreda Mjerenje omogućava više mjerenja na istome mjestu, što povećava redundanciju. Razred Mjerenje među svojim podacima sadržava i vrijeme. Vrijeme se direktno odražava na pouzdanost mjerenja jer što je starije mjerenje to je manje pouzdano. Koliko utječe starost mjerenja na njegovu pouzdanost potrebno je utvrditi heurističkim metodama. Podatak o vremenu mjerenja omogućava također i uključenje starijih mjerenja u procjenu povećavajući redundanciju. Moguće je i odrediti životni vijek svake vrste mjerenja.



Slika 40 Dijagram proračuna procjene stanja

5. Diskusija

Razvijeni matematički model nastao je iz potrebe smanjenja broja elemenata koji se koriste u proračunima. Za proračun tokova snaga koriste se samo dvije vrste elemenata: grana i čvorište. Prilikom proračuna procjene stanja dodatno se koriste mjerenja, a za proračun kratkog spoja podaci o prekidaču. Svaki od proračuna je izveden kao funkcija koja ulazne podatke uzima iz modela i izlazne podatke vraća u model, tako da mogu biti korišteni za druge proračune. Podaci se unose neovisno o proračunu. Svi podaci u modelu su u *per unit* veličinama, ali sadrže informaciju o svojim baznim veličinama (S_B , U_B , ostale bazne veličine se izvode). Sve interakcije s vanjskim programima su izdvojene u funkcije. Takav način omogućava fleksibilnost u izboru izvora podataka jer nije važan format u kojem su podaci. Ovako razvijeni model omogućava više razina proračuna. Moguće je koristiti jednostavni model samo s vodovima, transformatorima, i čvorištima s injekcijama snage za proračun tokova snaga, ili složeniji model EESa sa svim prekidačima i rastavljačima, svim distribucijskim transformatorima i generatorima, svim vodovima i transformatorima. Model za obje krajnosti ostaje isti i nisu potrebne nikakve intervencije u kôdu kako bi se široki raspon potreba zadovoljio.

Razvijeni model implementiran je u programskom jeziku C++ pomoću razvojnog alata "Microsoft® Visual Studio". U svrhu ispitivanja valjanosti modela proveden je proračun tokova snaga na prijenosnoj mreži Hrvatske. Hrvatska prijenosna mreža zajedno s vanjskom mrežom ima između 180 i 200 čvorišta i oko 290 grana, ovisno o konfiguraciji. Ima četrdesetak transformatora i generatora, jedan transformator s kosom regulacijom, dvije prigušnice i nekoliko kondenzatorskih baterija. Proračun je proveden metodom brzih razdvojenih tokova snaga (FDLF) za više konfiguracija, s početnim naponima jednakim 1.0 pu. Za proračun je bilo potrebno između 8 i 10 iteracija.

Pokazalo se da je prosječno vrijeme čitanja podataka i građenja matrica potrebnih za proračune 3-4ms, a vrijeme potrebno za proračun 35-40ms. Rezultati primjera su navedeni u dodatku B. Potrebno je napomenuti da nije implementirana rijetka matrica već su proračuni rađeni pomoću pune matrice na računalu Pentium IV 3.0GHz.

6. Zaključak

U razvoju programske podrške za analizu i simulaciju EESa još uvijek prevladavaju proceduralne metode programiranja, što je posljedica smanjenih ulaganja u razvoj sustava za nadzor i upravljanje i povijesnih okolnosti. Implementacija novih funkcija za simulaciju i vođenje tržišnih odnosa je skupa i dugotrajna bez obzira na mnoštvo razvijenih biblioteka i funkcija, jer izmjena ili dodavanje nove funkcije uzrokuje promjenu većeg dijela programa.

Do sada je prilikom razvijanja svakog proračuna ili simulacije bilo potrebno iznova modelirati elemente EESa što povećava mogućnost pogreške, a time i povećava troškove i vrijeme razvoja. U ovom radu je predstavljen model koji je jedinstven za veliki broj proračuna, i koji je proširiv i za druge vrste proračuna.

Drugi razlog složenosti problema jest veliki broj različitih vrsta elemenata. Predstavljeni model je pojednostavljen tako da većina proračuna koristi samo dvije vrste elemenata: grane i čvorišta. Čvorište kao element sadrži samo napon, a svi ostali podaci dobivaju se obavljanjem operacija na s njime povezanim elementima. Svojstva grane su izabrana tako da budu zajednički nazivnik za sve elemente koji imaju svojstvo povezivanja dva čvorišta. Grana je modelirana kao linearni pasivni četveropol s četiri parametara koji prikazuju Π model.

Prigušnica i kondenzator su modelirani kao grane koje povezuju isto čvorište jer su njihova svojstva najbližnja poprečnoj grani općeg Π modela grane. Sve razvijene jednadžbe za granu vrijede i za ovako modelirane prigušnice i kondenzatore.

U matematičkom modeliranju i kasnije u programskoj implementaciji korištene su kompleksne vrijednosti svugdje gdje je to bilo moguće. Procesorsko vrijeme je jednako za operacije s kompleksnim brojevima i realnim brojevima. Općenitost modela se upotrebom kompleksnih brojeva povećava (npr. omogućava modeliranje transformatora s zakretom faza), dok se vrijeme izvršavanja ne povećava.

Za izvode jednadžbi uporabljen je matematički alat "Mathematica® 5.0" [Wolfram 03].

Mjerenje je modelirano kao zasebni razred koji se referencira na granu ili čvorište gdje je izmjereno. Nema nikakve zapreke da postoji više mjerenja za jedno mjerno mjesto. Proračun procjene stanja može koristiti više mjerenja s različitom točnošću, također može koristiti stara mjerenja s smanjenom pouzdanošću.

Model prekidača i rastavljača koji je uzet u radnji omogućava modeliranje cjelokupne (potencijalne) topologije EESa. Moguće je, kao drugu krajnost, uzeti samo podatke vodova i

transformatora i injekcija snaga u čvorišta, te provesti proračun tokova snaga. Model je isti za oba slučaja. Mijenja se samo ulazna funkcija.

Nakon proračuna kratkog spoja provjerava se da li je prekidna moć svakog prekidača veća od struje kratkog spoja koju taj prekidač treba prekinuti.

Operacije s vektorima i matricama su implementirane pomoću objektno orijentirane ljske za Intelove osnovne podrutine linearne algebre "CVM Class Library" [Nikolaev 05]. Time je omogućeno pisanje algoritama u programskom jeziku gotovo matematičkom notacijom. Npr. izračun injekcija čvorišta se implementira pomoću množenja matrica i vektora: $S = U * conj(U * Y_{matrica})$

Razvijeni model implementiran je u programskom jeziku C++, pomoću razvojnog alata "Microsoft® Visual Studio 2003". Za provjeru razvijenog modela proveden je proračun tokova snaga na prijenosnoj mreži Hrvatske koja sadržava 180-200 čvorišta, ovisno o konfiguraciji. Pokazalo se da većina proračuna završi za 40-45ms.

Zbog jednostavnosti modela moguće ga je koristiti u edukaciji, naročito zato jer nije potrebna implementacija operacija s matricama i vektorima.

Dodatak A

Implementirana funkcija za brze razdvojene tokove snaga.

```
bool Mreža::FDLF(double epsilon, int maxiter)
{
    epsilon/=Sb;
    do
    {
        //dobavljanje napona
        CxDsCoVc U(nčvorišta());
        for(int i = 1; i < nčvorišta(); i++)
            U(i)=čvorište(i)->u;
        ReDsCoVc Uabs = abs(U);
        ReDsCoVc Uarg = arg(U);

        //računanje snage u čvorištima
        CxDsCoVc S = U * conj(U * Ymatrica);

        ReDsCoVc dP(nčvorišta()), dQ(nčvorišta());
        double max = 0.;
        for(int i = 1; i < nčvorišta(); i++)
        {
            //računanje odstupanja računске snage i injekcije
            dP(i) = real(čvorište(i)->Sinj() - S(i))/Uabs(i);
            dQ(i) = imag(čvorište(i)->Sinj() - S(i))/Uabs(i);
            //izračun maksimalne greške
            complex<double> dS = čvorište(i)->Sinj()-S(i);
            if(!čvorište(i)->ref() && abs(real(dS)) > max)
                max = abs(real(dS));
            if(!čvorište(i)->pv() && abs(imag(dS)) > max)
                max = abs(imag(dS));
        }
        //ako je maksimalna greška unutar tolerancije proračun uspješan
        if(max < epsilon) return true;

        //postavljanje kontrolnih vektora
        BlDsCoVc c1(nčvorišta()), c2(nčvorišta());
        for(int i = 1; i < nčvorišta(); i++)
        {
            c1(i) = !čvorište(i)->ref();
            c2(i) = !čvorište(i)->pv();
        }
        //računanje pomaka napona
        ReDsCoVc dUarg=B1.solve(dP, c1);
        ReDsCoVc dUabs=B2.solve(dQ, c2);

        //vraćanje rezultata u model
        for(int i = 1; i < nčvorišta(); i++)
            čvorište(i)->u *= polar(dUabs(i), dUarg(i));
    }while(--maxiter>0);
    //proračun neuspješan, svi naponi se postavljaju na 1. pu
    if (maxiter==0)
    {
        for(int i = 1; i < nčvorišta(); i++)
            čvor(i)->u(1.);
        return false;
    }
}
```


Dodatak B

Rezultati tokova snaga na hrvatskoj mreži koja sadrži 202 čvorišta, 289 grana i 45 generatora.

Čvorište	Grana	Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
		S(MVA)	gubici (MVA)	
Ernestinovo380		0 + j0 MVA	409.394 ∠ 4.67194°kV	PQ
	TS Mladost380	-512.424 + j88.921 MVA	4.655 - j5.806 MVA	
	TS Ugljevik380	21.263 + j28.242 MVA	0.129 - j78.489 MVA	
	Žerjavinec380	242.534 - j30.942 MVA	2.370 - j101.187 MVA	
	Ernestinovo110	124.136 - j43.129 MVA	0.082 + j6.157 MVA	
	Ernestinovo110	124.490 - j43.093 MVA	0.075 + j6.172 MVA	
TS Mladost380		669.175 - j275.429 MVA	406.329 ∠ 9.97994°kV	PQ
	Ernestinovo380	517.079 - j94.726 MVA	4.655 - j5.806 MVA	
	Novi Sad380	76.047 - j90.351 MVA	0.163 - j48.327 MVA	
	Novi Sad380	76.047 - j90.351 MVA	0.163 - j48.327 MVA	
Novi Sad380		0 + j0 MVA	410.782 ∠ 9.12571°kV	PQ
	TS Mladost380	-75.885 + j42.024 MVA	0.163 - j48.327 MVA	
	Subotica380	151.769 - j84.049 MVA	0.383 - j41.911 MVA	
	TS Mladost380	-75.885 + j42.024 MVA	0.163 - j48.327 MVA	
Subotica380		0 + j0 MVA	414.119 ∠ 7.66873°kV	PQ
	Novi Sad380	-151.386 + j42.138 MVA	0.383 - j41.911 MVA	
	Sandorfalva380	151.387 - j42.138 MVA	0.225 - j29.355 MVA	
Sandorfalva380		0 + j0 MVA	414.771 ∠ 6.70425°kV	PQ
	Subotica380	-151.162 + j12.783 MVA	0.225 - j29.355 MVA	
	Paks380	151.162 - j12.783 MVA	0.431 - j47.598 MVA	
Paks380		0 + j0 MVA	412.573 ∠ 4.79619°kV	PQ
	Sandorfalva380	-150.731 - j34.815 MVA	0.431 - j47.598 MVA	
	Toponar380	50.740 + j7.806 MVA	0.041 + j0.428 MVA	
	Liter380	99.992 + j27.008 MVA	0.190 + j1.947 MVA	
Toponar380		0 + j0 MVA	411.737 ∠ 4.33029°kV	PQ
	Paks380	-50.698 - j7.379 MVA	0.041 + j0.428 MVA	
	Heviz380	50.698 + j7.379 MVA	0.077 - j60.750 MVA	
Heviz380		481.721 - j120.552 MVA	408.267 ∠ 3.8001°kV	PQ
	Toponar380	-50.621 - j68.129 MVA	0.077 - j60.750 MVA	
	Žerjavinec380	266.116 - j14.711 MVA	2.208 - j73.789 MVA	
	Liter380	0.110 - j23.002 MVA	0.009 + j0.091 MVA	
	Žerjavinec380	266.116 - j14.711 MVA	2.208 - j73.789 MVA	
Žerjavinec380		0 + j0 MVA	401.911 ∠ -1.08456°kV	PQ
	Heviz380	-263.908 - j59.078 MVA	2.208 - j73.789 MVA	
	Tumbri380	322.352 - j69.744 MVA	1.209 - j21.636 MVA	
	Ernestinovo380	-240.164 - j70.245 MVA	2.370 - j101.187 MVA	
	Heviz380	-263.908 - j59.078 MVA	2.208 - j73.789 MVA	
	Žerjavinec220	509.085 + j249.243 MVA	1.064 + j82.887 MVA	
	Žerjavinec110	130.084 + j17.710 MVA	0.083 + j6.181 MVA	
	Žerjavinec110	130.084 + j17.710 MVA	0.083 + j6.181 MVA	
	Tumbri380		0 + j0 MVA	
Tumbri380	Žerjavinec380	-321.143 + j48.109 MVA	1.209 - j21.636 MVA	
	NE Krško380	-63.556 - j70.115 MVA	0.068 - j27.055 MVA	
	NE Krško380	-63.556 - j70.115 MVA	0.068 - j27.055 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kV)	tip
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	čvorišta
	Melina380	294.205 - j32.661 MVA	2.104 - j50.778 MVA	
	Tumbri110	77.702 + j62.875 MVA	0.064 + j3.400 MVA	
	Tumbri110	76.347 + j61.908 MVA	0.060 + j3.378 MVA	
NE Krško380		440.412 + j23.733 MVA	405.695 \angle -2.96664°kV	PV
	Tumbri380	63.624 + j43.061 MVA	0.068 - j27.055 MVA	
	Tumbri380	63.624 + j43.061 MVA	0.068 - j27.055 MVA	
	Maribor380	313.164 + j52.429 MVA	1.514 + j14.995 MVA	
	NE Krško - G1	672.000 + j54.000 MVA		
Maribor380		0 + j0 MVA	401.054 \angle -5.62158°kV	PQ
	NE Krško380	-311.650 - j37.433 MVA	1.514 + j14.995 MVA	
	Podlog380	321.517 + j26.990 MVA	1.509 + j14.936 MVA	
	Kainachtal380	-9.867 + j10.443 MVA	0.001 + j0.010 MVA	
Podlog380		0.078 - j0.008 MVA	398.055 \angle -8.26286°kV	PV
	Maribor380	-320.008 - j12.054 MVA	1.509 + j14.936 MVA	
	Beričevo380	336.035 - j0.919 MVA	1.162 + j11.661 MVA	
	Podlog220	-15.949 + j27.287 MVA	0.003 + j0.107 MVA	
	Podlog - G1	0.078 - j0.008 MVA		
Beričevo380		0 + j0 MVA	396.956 \angle -10.2575°kV	PQ
	Podlog380	-334.872 + j12.580 MVA	1.162 + j11.661 MVA	
	Divača380	361.963 - j19.337 MVA	2.068 + j20.612 MVA	
	Beričevo220	-13.545 + j3.379 MVA	0.001 - j0.095 MVA	
	Beričevo220	-13.545 + j3.379 MVA	0.001 - j0.095 MVA	
Divača380		-1154.125 + j51.275 MVA	396.547 \angle -13.5336°kV	PQ
	Beričevo380	-359.895 + j39.949 MVA	2.068 + j20.612 MVA	
	Melina380	-752.412 + j7.556 MVA	7.191 + j41.868 MVA	
	Redipuglia380	-41.818 + j3.769 MVA	0.031 + j0.304 MVA	
Melina380		0 + j0 MVA	401.077 \angle -7.5558°kV	PQ
	Divača380	759.603 + j34.312 MVA	7.191 + j41.868 MVA	
	RHE Velebit380	-372.250 - j58.668 MVA	4.931 - j53.132 MVA	
	Tumbri380	-292.101 - j18.117 MVA	2.104 - j50.778 MVA	
	Melina220	-48.218 + j21.489 MVA	0.009 + j0.575 MVA	
	Melina220	-47.034 + j20.985 MVA	0.009 + j0.562 MVA	
RHE Velebit380		267.754 - j53.916 MVA	411.193 \angle 5.82029e-002°kV	PV
	Melina380	377.181 + j5.536 MVA	4.931 - j53.132 MVA	
	TS Konjsko380	-165.985 + j277.182 MVA	2.323 - j32.855 MVA	
	RHE Velebit110	56.558 + j218.753 MVA	0.287 + j16.666 MVA	
	RHE Velebit - G1	133.067 - j27.093 MVA		
	RHE Velebit - G2	134.687 - j26.823 MVA		
TS Konjsko380		0 + j0 MVA	388.141 \angle 2.38232°kV	PQ
	RHE Velebit380	168.308 - j310.038 MVA	2.323 - j32.855 MVA	
	TS Mostar380	-155.613 - j144.532 MVA	0.843 - j51.990 MVA	
	TS Konjsko220	-6.332 + j226.704 MVA	0.163 + j12.923 MVA	
	TS Konjsko220	-6.363 + j227.866 MVA	0.164 + j12.987 MVA	
TS Mostar380		-110.100 + j236.131 MVA	400.168 \angle 4.26256°kV	PQ
	TS Konjsko380	156.456 + j92.542 MVA	0.843 - j51.990 MVA	
	TS Sarajevo380	7.813 - j75.647 MVA	0.045 - j53.748 MVA	
	TS Mostar220	-137.184 + j109.618 MVA	0 + j8.272 MVA	
	TS Mostar220	-137.184 + j109.618 MVA	0 + j8.272 MVA	
TS Sarajevo380		0 + j0 MVA	403.946 \angle 4.12438°kV	PQ
	TS Mostar380	-7.768 + j21.899 MVA	0.045 - j53.748 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kV)	tip
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	čvorišta
	TS Tuzla380	7.768 - j21.899 MVA	0.001 - j50.038 MVA	
TS Tuzla380		0 + j0 MVA	403.671 \angle 4.04882°kV	PQ
	TS Sarajevo380	-7.767 - j28.139 MVA	0.001 - j50.038 MVA	
	TS Ugjjevik380	-74.895 + j57.546 MVA	0.081 - j22.532 MVA	
	TS Tuzla220	41.331 - j14.703 MVA	0 + j0.507 MVA	
	TS Tuzla220	41.331 - j14.703 MVA	0 + j0.507 MVA	
TS Ugjjevik380		53.842 - j186.809 MVA	401.593 \angle 4.4381°kV	PQ
	TS Tuzla380	74.976 - j80.077 MVA	0.081 - j22.532 MVA	
	Ernestinovo380	-21.134 - j106.732 MVA	0.129 - j78.489 MVA	
Wien380		0.001 - j0.004 MVA	408.761 \angle 2.28853°kV	PV
	Gyor380	-99.646 + j0.627 MVA	0.122 + j1.213 MVA	
	Wien220	49.823 + j4.020 MVA	0 + j0.220 MVA	
	Wien220	49.823 + j4.020 MVA	0 + j0.220 MVA	
	Wien - G1	0.001 - j0.004 MVA		
Gyor380		0 + j0 MVA	409.261 \angle 2.98555°kV	PQ
	Wien380	99.768 + j0.586 MVA	0.122 + j1.213 MVA	
	Liter380	-99.768 - j0.586 MVA	0.134 + j1.381 MVA	
Liter380		0 + j0 MVA	409.883 \angle 3.77692°kV	PQ
	Gyor380	99.902 + j1.967 MVA	0.134 + j1.381 MVA	
	Heviz380	-0.101 + j23.094 MVA	0.009 + j0.091 MVA	
	Paks380	-99.801 - j25.061 MVA	0.190 + j1.947 MVA	
Obersielach380		0 + j0 MVA	400.483 \angle -5.54243°kV	PQ
	Kainachtal380	9.871 - j13.714 MVA	0.002 + j0.022 MVA	
	Obersielach220	-4.935 + j6.857 MVA	-0 + j0.006 MVA	
	Obersielach220	-4.935 + j6.857 MVA	-0 + j0.006 MVA	
Kainachtal380		-0 + j0.001 MVA	400.867 \angle -5.5909°kV	PV
	Obersielach380	-9.868 + j13.736 MVA	0.002 + j0.022 MVA	
	Maribor380	9.868 - j10.433 MVA	0.001 + j0.010 MVA	
	Kainachtal - G1	-0 + j0.001 MVA		
Redipuglia380		0 + j0 MVA	396.595 \angle -13.117°kV	PQ
	Divača380	41.849 - j3.465 MVA	0.031 + j0.304 MVA	
	Redipuglia220	-41.849 + j3.465 MVA	-0 + j0.316 MVA	
TS Tuzla220		-79.485 + j41.480 MVA	234.624 \angle 3.42695°kV	PV
	Đakovo220	42.592 - j53.712 MVA	0.532 - j11.423 MVA	
	TS Kakanj220	-39.415 + j18.793 MVA	0.157 - j24.454 MVA	
	TS Tuzla380	-41.331 + j15.211 MVA	0 + j0.507 MVA	
	TS Tuzla380	-41.331 + j15.211 MVA	0 + j0.507 MVA	
	TS Tuzla - G1	0 + j0 MVA		
Đakovo220		0 + j0 MVA	240.726 \angle 1.50151°kV	PQ
	TS Tuzla220	-42.060 + j42.289 MVA	0.532 - j11.423 MVA	
	TS Gradačac220	-8.136 + j1.562 MVA	0.009 - j9.321 MVA	
	Đakovo110	25.099 - j21.925 MVA	0.016 + j0.623 MVA	
	Đakovo110	25.097 - j21.927 MVA	0.016 + j0.623 MVA	
TS Gradačac220		8.145 - j10.882 MVA	240.272 \angle 1.72207°kV	PQ
	Đakovo220	8.145 - j10.882 MVA	0.009 - j9.321 MVA	
TS Kakanj220		-0 + j0.009 MVA	232.879 \angle 4.25987°kV	PV
	TS Tuzla220	39.573 - j43.248 MVA	0.157 - j24.454 MVA	
	TS Jablanica220	-5.481 + j26.280 MVA	0.096 - j9.140 MVA	
	TS Mostar220	-34.092 + j38.776 MVA	0.556 - j13.378 MVA	
	TS Kakanj - G1	-0 + j0.009 MVA		

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
TS Jablanica220		0.001 + j0 MVA	229.456 ∠ 4.58954°kV	PV
	TS Kakanj220	5.577 - j35.420 MVA	0.096 - j9.140 MVA	
	TS Prijedor220	74.227 + j22.601 MVA	1.698 - j13.520 MVA	
	TS Mostar220	-79.803 + j71.755 MVA	0.783 - j2.200 MVA	
	TS Jablanica - G1	0.001 + j0 MVA		
TS Prijedor220		-68.399 - j55.151 MVA	215.929 ∠ -0.69425°kV	PQ
	TS Jablanica220	-72.529 - j36.121 MVA	1.698 - j13.520 MVA	
	Međurić220	4.131 - j19.030 MVA	0.025 - j7.001 MVA	
Međurić220		0 + j0 MVA	217.491 ∠ -0.895691°kV	PQ
	TS Prijedor220	-4.106 + j12.029 MVA	0.025 - j7.001 MVA	
	TE Sisak220	-44.581 - j23.362 MVA	0.185 - j4.940 MVA	
	Međurić110	48.687 + j11.333 MVA	0.047 + j1.742 MVA	
TE Sisak220		0 + j0 MVA	220. ∠ 0.°kV	PVREF
	Međurić220	44.767 + j18.422 MVA	0.185 - j4.940 MVA	
	Mraclin220	192.614 - j81.194 MVA	3.183 + j10.543 MVA	
	TE Sisak110	93.046 - j67.560 MVA	0.170 + j7.200 MVA	
Mraclin220		0 + j0 MVA	224.117 ∠ -4.4552°kV	PQ
	TE Sisak220	-189.431 + j91.737 MVA	3.183 + j10.543 MVA	
	Žerjavinec220	167.482 - j42.753 MVA	1.184 + j2.568 MVA	
	Mraclin110	10.986 - j24.211 MVA	0.016 + j0.431 MVA	
	Mraclin110	10.963 - j24.771 MVA	0.016 + j0.439 MVA	
Žerjavinec220		0 + j0 MVA	224.642 ∠ -6.50264°kV	PQ
	Mraclin220	-166.298 + j45.322 MVA	1.184 + j2.568 MVA	
	Cirkovce220	35.898 - j5.809 MVA	0.169 - j10.649 MVA	
	Žerjavinec380	-508.021 - j166.356 MVA	1.064 + j82.887 MVA	
Cirkovce220		-37.259 - j60.654 MVA	223.653 ∠ -7.87197°kV	PQ
	Žerjavinec220	-35.729 - j4.840 MVA	0.169 - j10.649 MVA	
	Podlog220	-1.531 - j55.814 MVA	0.190 + j1.301 MVA	
Podlog220		0 + j0 MVA	228.883 ∠ -8.027°kV	PQ
	Cirkovce220	1.721 + j57.115 MVA	0.190 + j1.301 MVA	
	Obersielach220	-87.277 - j14.052 MVA	0.588 - j5.804 MVA	
	Beričevo220	69.604 - j15.739 MVA	0.379 + j2.520 MVA	
	Podlog380	15.952 - j27.179 MVA	0.003 + j0.107 MVA	
Obersielach220		0 + j0 MVA	231.72 ∠ -5.51781°kV	PQ
	Podlog220	87.865 + j8.249 MVA	0.588 - j5.804 MVA	
	Wien220	-97.735 + j5.453 MVA	1.911 + j13.054 MVA	
	Obersielach380	4.935 - j6.851 MVA	-0 + j0.006 MVA	
	Obersielach380	4.935 - j6.851 MVA	-0 + j0.006 MVA	
Wien220		0 + j0 MVA	236.57 ∠ 2.03763°kV	PQ
	Obersielach220	99.647 + j7.601 MVA	1.911 + j13.054 MVA	
	Wien380	-49.823 - j3.800 MVA	0 + j0.220 MVA	
	Wien380	-49.823 - j3.800 MVA	0 + j0.220 MVA	
Beričevo220		0 + j0 MVA	229.625 ∠ -10.0611°kV	PQ
	Podlog220	-69.225 + j18.259 MVA	0.379 + j2.520 MVA	
	Kleče220	42.133 - j11.023 MVA	0.031 + j0.208 MVA	
	Beričevo380	13.546 - j3.474 MVA	0.001 - j0.095 MVA	
	Beričevo380	13.546 - j3.474 MVA	0.001 - j0.095 MVA	
Kleče220		0 + j0 MVA	229.75 ∠ -10.3365°kV	PQ
	Beričevo220	-42.103 + j11.232 MVA	0.031 + j0.208 MVA	
	Divača220	42.103 - j11.232 MVA	0.137 - j8.869 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kV)	tip
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	čvorišta
Divača220		0 + j0 MVA	229.826 \angle -11.6058°kV	PQ
	Kleče220	-41.966 + j2.363 MVA	0.137 - j8.869 MVA	
	Padriciano220	41.966 - j2.363 MVA	0.022 + j0.153 MVA	
Padriciano220		0 + j0 MVA	229.754 \angle -11.8159°kV	PQ
	Divača220	-41.944 + j2.516 MVA	0.022 + j0.153 MVA	
	Redipuglia220	41.944 - j2.516 MVA	0.095 + j0.634 MVA	
Redipuglia220		0 + j0 MVA	229.472 \angle -12.6875°kV	PQ
	Padriciano220	-41.849 + j3.150 MVA	0.095 + j0.634 MVA	
	Redipuglia380	41.849 - j3.150 MVA	-0 + j0.316 MVA	
TS Mostar220		441.286 - j374.836 MVA	225.025 \angle 6.43401°kV	PQ
	TS Jablanica220	80.586 - j73.955 MVA	0.783 - j2.200 MVA	
	TS Kakanj220	34.648 - j52.154 MVA	0.556 - j13.378 MVA	
	HE Zakučac220	51.683 - j46.035 MVA	0.664 - j10.624 MVA	
	TS Mostar380	137.184 - j101.345 MVA	0 + j8.272 MVA	
	TS Mostar380	137.184 - j101.345 MVA	0 + j8.272 MVA	
HE Zakučac220		181.944 + j12.499 MVA	230.671 \angle 3.71952°kV	PV
	TS Mostar220	-51.019 + j35.411 MVA	0.664 - j10.624 MVA	
	TS Bilice220	54.722 + j85.115 MVA	1.309 - j3.699 MVA	
	TS Konjsko220	135.103 + j149.814 MVA	1.538 + j4.423 MVA	
	HE Zakučac110	43.160 + j16.010 MVA	0.074 + j2.315 MVA	
	HE Zakučac - G2	67.246 + j17.301 MVA		
	HE Zakučac - G3	114.698 - j4.802 MVA		
TS Bilice220		0 + j0 MVA	217.184 \angle 2.43929°kV	PQ
	HE Zakučac220	-53.413 - j88.814 MVA	1.309 - j3.699 MVA	
	TS Konjsko220	-13.605 - j56.696 MVA	0.276 - j5.551 MVA	
	TS Konjsko220	-13.605 - j56.696 MVA	0.276 - j5.551 MVA	
	TS Bilice110	41.546 + j128.904 MVA	0.317 + j11.281 MVA	
	TS Bilice110	39.077 + j73.303 MVA	0.126 + j4.467 MVA	
TS Konjsko220		0 + j0 MVA	222.875 \angle 2.52366°kV	PQ
	TS Bilice220	13.881 + j51.146 MVA	0.276 - j5.551 MVA	
	Brinje220	42.411 - j46.939 MVA	0.974 - j24.573 MVA	
	HE Orlovac220	-24.765 - j123.950 MVA	0.730 - j0.261 MVA	
	HE Orlovac220	-24.765 - j123.950 MVA	0.730 - j0.261 MVA	
	HE Zakučac220	-133.566 - j145.391 MVA	1.538 + j4.423 MVA	
	TS Bilice220	13.881 + j51.146 MVA	0.276 - j5.551 MVA	
	TS Konjsko110	45.631 + j6.253 MVA	0.034 + j1.406 MVA	
	TS Konjsko110	44.857 + j6.270 MVA	0.030 + j1.382 MVA	
	TS Konjsko380	6.495 - j213.780 MVA	0.163 + j12.923 MVA	
	TS Konjsko380	6.527 - j214.880 MVA	0.164 + j12.987 MVA	
Brinje220		0 + j0 MVA	232.999 \angle -2.08393°kV	PQ
	TS Konjsko220	-41.437 + j22.366 MVA	0.974 - j24.573 MVA	
	HE Senj220	41.437 - j22.366 MVA	0.051 - j2.030 MVA	
HE Senj220		73.340 - j1.736 MVA	233.352 \angle -2.3902°kV	PV
	Brinje220	-41.385 + j20.336 MVA	0.051 - j2.030 MVA	
	Melina220	182.890 - j14.695 MVA	2.722 + j5.834 MVA	
	HE Sen110	-68.164 - j131.145 MVA	0.426 + j14.643 MVA	
	HE Senj - G1	73.340 - j1.736 MVA		
Melina220		0 + j0 MVA	231.616 \angle -6.83219°kV	PQ
	HE Senj220	-180.168 + j20.529 MVA	2.722 + j5.834 MVA	
	Pehlin220	25.021 - j3.021 MVA	0.013 - j1.916 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	Pehlin220	20.292 - j2.145 MVA	0.008 - j2.547 MVA	
	TE Plomin220	3.605 + j11.256 MVA	0.019 - j9.123 MVA	
	TE Rijeka220	0 - j1.127 MVA	0 - j1.127 MVA	
	Melina110	35.425 - j27.035 MVA	0.032 + j1.284 MVA	
	Melina380	48.227 - j20.914 MVA	0.009 + j0.575 MVA	
	Melina380	47.043 - j20.423 MVA	0.009 + j0.562 MVA	
Pehlin220		0 + j0 MVA	231.549 \angle -6.98838°kV	PQ
	Melina220	-25.009 + j1.104 MVA	0.013 - j1.916 MVA	
	Melina220	-20.284 - j0.402 MVA	0.008 - j2.547 MVA	
	TE Plomin220	-2.396 + j20.155 MVA	0.029 - j6.414 MVA	
	Pehlin110	47.688 - j20.857 MVA	0.050 + j1.676 MVA	
TE Plomin220		151.212 + j8.056 MVA	229.702 \angle -6.87083°kV	PV
	Pehlin220	2.425 - j26.569 MVA	0.029 - j6.414 MVA	
	Melina220	-3.586 - j20.379 MVA	0.019 - j9.123 MVA	
	TE Plomin110	76.187 - j69.862 MVA	0.190 + j7.611 MVA	
	TE Plomin110	76.187 - j69.862 MVA	0.190 + j7.611 MVA	
	TE Plomin - B	151.212 + j8.056 MVA		
TE Rijeka220		0 + j0 MVA	231.621 \angle -6.83233°kV	PQ
	Melina220	-0 - j0 MVA	0 - j1.127 MVA	
HE Orlovac220		50.990 - j5.585 MVA	229.716 \angle 2.53724°kV	PV
	TS Konjsko220	25.495 + j123.689 MVA	0.730 - j0.261 MVA	
	TS Konjsko220	25.495 + j123.689 MVA	0.730 - j0.261 MVA	
	HE Orlovac - G1	50.163 - j5.822 MVA		
	HE Orlovac - G2	0.413 + j0.118 MVA		
	HE Orlovac - G3	0.413 + j0.118 MVA		
Velika Gorica110		-16.701 - j4.416 MVA	112.924 \angle -4.98941°kV	PQ
	Mraclin110	-8.350 - j2.208 MVA	0.004 - j0.181 MVA	
	Mraclin110	-8.350 - j2.208 MVA	0.004 - j0.181 MVA	
Mraclin110		0 + j0 MVA	113.016 \angle -4.9097°kV	PQ
	Velika Gorica110	8.354 + j2.027 MVA	0.004 - j0.181 MVA	
	Pračno110	-10.212 + j34.293 MVA	0.436 + j0.321 MVA	
	Tumbri110	-7.153 - j23.371 MVA	0.113 - j0.344 MVA	
	Tumbri110	-7.153 - j23.371 MVA	0.113 - j0.344 MVA	
	Ivanić110	39.800 + j5.837 MVA	0.708 + j0.574 MVA	
	TE-TO Zg110	7.494 - j21.560 MVA	0.064 - j0.976 MVA	
	Resnik110	-1.627 - j13.533 MVA	0.035 - j0.624 MVA	
	Resnik110	-1.627 - j13.533 MVA	0.035 - j0.624 MVA	
	Ludina110	-2.555 + j14.268 MVA	0.086 - j1.051 MVA	
	Pračno110	-10.212 + j34.293 MVA	0.436 + j0.321 MVA	
	Velika Gorica110	8.354 + j2.027 MVA	0.004 - j0.181 MVA	
	Mraclin220	-10.970 + j24.643 MVA	0.016 + j0.431 MVA	
	Mraclin220	-10.947 + j25.210 MVA	0.016 + j0.439 MVA	
Pračno110		-10.031 - j1.839 MVA	108.946 \angle -3.53559°kV	PQ
	Mraclin110	10.648 - j33.972 MVA	0.436 + j0.321 MVA	
	Željezara110	-25.180 + j23.015 MVA	0.064 + j0.049 MVA	
	TE Sisak110	-48.375 + j40.612 MVA	0.218 + j0.591 MVA	
	Petrinja110	17.872 + j1.600 MVA	0.025 - j0.162 MVA	
	Mraclin110	10.648 - j33.972 MVA	0.436 + j0.321 MVA	
	Raf.Sisak110	24.363 + j0.878 MVA	0.030 - j0.035 MVA	
Željezara110		-3.932 - j1.181 MVA	108.616 \angle -3.1866°kV	PQ

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	Pračno110	25.243 - j22.966 MVA	0.064 + j0.049 MVA	
	TE Sisak110	-29.175 + j21.785 MVA	0.058 + j0.066 MVA	
TE Sisak110		0 + j0 MVA	108.393 \angle -2.87529°kV	PQ
	Željezara110	29.233 - j21.719 MVA	0.058 + j0.066 MVA	
	Raf.Sisak110	3.718 + j1.642 MVA	0.001 - j0.078 MVA	
	Međurić110	0.413 - j0.269 MVA	0 - j1.385 MVA	
	Pračno110	48.593 - j40.021 MVA	0.218 + j0.591 MVA	
	Kutina110	10.921 - j14.395 MVA	0.171 - j0.716 MVA	
	TE Sisak220	-92.876 + j74.760 MVA	0.170 + j7.200 MVA	
Raf.Sisak110		-3.716 - j1.719 MVA	108.36 \angle -2.8904°kV	PQ
	TE Sisak110	-3.717 - j1.720 MVA	0.001 - j0.078 MVA	
Međurić110		-24.039 - j7.439 MVA	108.299 \angle -2.89943°kV	PQ
	TE Sisak110	-0.413 - j1.117 MVA	0 - j1.385 MVA	
	N.Gradiška110	13.029 - j5.532 MVA	0.104 - j1.407 MVA	
	Daruvar110	11.665 - j3.245 MVA	0.062 - j0.835 MVA	
	Međurić220	-48.640 - j9.591 MVA	0.047 + j1.742 MVA	
N.Gradiška110		-15.673 - j2.374 MVA	108.506 \angle -4.43009°kV	PQ
	Međurić110	-12.925 + j4.125 MVA	0.104 - j1.407 MVA	
	Požega110	-2.744 - j6.496 MVA	0.023 - j0.971 MVA	
Požega110		-27.604 - j13.775 MVA	109.399 \angle -4.43118°kV	PQ
	N.Gradiška110	2.766 + j5.526 MVA	0.023 - j0.971 MVA	
	Slavonski Brod110	-30.378 - j19.307 MVA	0.731 + j0.390 MVA	
Slavonski Brod110		-35.009 - j5.435 MVA	113.896 \angle -2.94077°kV	PQ
	Požega110	31.109 + j19.697 MVA	0.731 + j0.390 MVA	
	Đakovo110	-66.115 - j25.129 MVA	1.564 + j4.218 MVA	
Đakovo110		0 + j0 MVA	119.57 \angle 0.612506°kV	PQ
	Slavonski Brod110	67.679 + j29.347 MVA	1.564 + j4.218 MVA	
	Ernestinovo110	-23.530 + j15.550 MVA	0.216 - j0.474 MVA	
	Đakovo 2110	24.530 + j6.322 MVA	0.021 - j0.047 MVA	
	Vinkovci110	8.790 + j16.731 MVA	0.102 - j0.875 MVA	
	Ernestinovo110	-24.260 + j16.284 MVA	0.228 - j0.446 MVA	
	Đakovo220	-25.083 + j22.547 MVA	0.016 + j0.623 MVA	
	Đakovo220	-25.081 + j22.549 MVA	0.016 + j0.623 MVA	
Ernestinovo110		0 + j0 MVA	118.566 \angle 2.11781°kV	PQ
	Đakovo110	23.745 - j16.024 MVA	0.216 - j0.474 MVA	
	Osijek1110	33.770 + j18.649 MVA	0.062 + j0.022 MVA	
	Valpovo110	25.156 + j7.407 MVA	0.184 - j0.563 MVA	
	PTE Osijek 2110	13.320 + j37.744 MVA	0.145 + j0.107 MVA	
	PTE Osijek 2110	12.715 + j36.010 MVA	0.138 + j0.065 MVA	
	Našice110	23.624 - j1.206 MVA	0.226 - j1.065 MVA	
	Osijek1110	29.238 + j11.117 MVA	0.074 - j0.054 MVA	
	Vukovar110	30.826 + j1.105 MVA	0.246 - j0.330 MVA	
	Vinkovci110	33.763 - j3.427 MVA	0.436 - j0.112 MVA	
	Đakovo110	24.489 - j16.730 MVA	0.228 - j0.446 MVA	
	Ernestinovo380	-124.054 + j49.286 MVA	0.082 + j6.157 MVA	
	Ernestinovo380	-124.415 + j49.265 MVA	0.075 + j6.172 MVA	
Osijek1110		-30.627 - j10.616 MVA	118.082 \angle 1.88527°kV	PQ
	Ernestinovo110	-33.708 - j18.626 MVA	0.062 + j0.022 MVA	
	Našice110	18.339 - j2.934 MVA	0.148 - j1.387 MVA	
	Osijek3110	13.899 + j22.122 MVA	0.025 - j0.071 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	Ernestinovo110	-29.164 - j11.171 MVA	0.074 - j0.054 MVA	
Našice110		-31.305 - j11.242 MVA	117.543 \angle 0.223403°kV	PQ
	Osijek1110	-18.190 + j1.546 MVA	0.148 - j1.387 MVA	
	Đakovo 2110	-9.902 - j11.023 MVA	0.103 - j1.134 MVA	
	Slatina110	24.177 - j7.285 MVA	0.326 - j0.693 MVA	
	Donji Miholjac110	-3.987 + j5.381 MVA	0.020 - j1.037 MVA	
	Ernestinovo110	-23.399 + j0.141 MVA	0.226 - j1.065 MVA	
Đakovo 2110		-14.498 + j3.532 MVA	119.419 \angle 0.525134°kV	PQ
	Našice110	10.004 + j9.889 MVA	0.103 - j1.134 MVA	
	Đakovo110	-24.509 - j6.369 MVA	0.021 - j0.047 MVA	
Slatina110		-9.782 - j1.455 MVA	117.011 \angle -1.57257°kV	PQ
	Našice110	-23.850 + j6.592 MVA	0.326 - j0.693 MVA	
	Virovitica110	14.059 - j8.056 MVA	0.068 - j0.907 MVA	
Virovitica110		-13.993 + j7.149 MVA	117.408 \angle -2.44649°kV	PQ
	Slatina110	-13.991 + j7.149 MVA	0.068 - j0.907 MVA	
Donji Miholjac110		-4.673 - j1.990 MVA	117.118 \angle 0.561387°kV	PQ
	Našice110	4.008 - j6.418 MVA	0.020 - j1.037 MVA	
	Valpovo110	-8.680 + j4.432 MVA	0.018 - j0.699 MVA	
Valpovo110		-18.484 - j7.195 MVA	116.949 \angle 0.923546°kV	PQ
	Donji Miholjac110	8.698 - j5.131 MVA	0.018 - j0.699 MVA	
	Ernestinovo110	-24.972 - j7.970 MVA	0.184 - j0.563 MVA	
	Beli Manastir110	-2.209 + j5.905 MVA	0.011 - j0.940 MVA	
Beli Manastir110		-16.848 - j4.859 MVA	116.4 \angle 1.11263°kV	PQ
	Valpovo110	2.220 - j6.846 MVA	0.011 - j0.940 MVA	
	PTE Osijek 2110	-19.073 + j1.995 MVA	0.140 - j0.684 MVA	
PTE Osijek 2110		-1.882 - j5.786 MVA	117.013 \angle 2.07267°kV	PV
	Beli Manastir110	19.213 - j2.679 MVA	0.140 - j0.684 MVA	
	Ernestinovo110	-13.175 - j37.637 MVA	0.145 + j0.107 MVA	
	Ernestinovo110	-12.577 - j35.945 MVA	0.138 + j0.065 MVA	
	Osijek3110	4.676 - j21.729 MVA	0.065 - j0.220 MVA	
	PTE Osijek 2 - TE-TO	19.963 - j0.581 MVA		
	PTE Osijek 2 - G2	-0.092 - j0.316 MVA		
Osijek3110		-18.472 - j0.699 MVA	117.691 \angle 1.82994°kV	PQ
	PTE Osijek 2110	-4.611 + j21.509 MVA	0.065 - j0.220 MVA	
	Osijek1110	-13.874 - j22.193 MVA	0.025 - j0.071 MVA	
Vukovar110		-24.201 - j2.419 MVA	117.489 \angle 0.572981°kV	PQ
	Ernestinovo110	-30.580 - j1.435 MVA	0.246 - j0.330 MVA	
	Vinkovci110	6.383 - j0.980 MVA	0.008 - j0.499 MVA	
Vinkovci110		-25.008 + j6.407 MVA	117.384 \angle 0.413765°kV	PQ
	Vukovar110	-6.375 + j0.481 MVA	0.008 - j0.499 MVA	
	Ernestinovo110	-33.327 + j3.316 MVA	0.436 - j0.112 MVA	
	Županja110	23.380 + j20.216 MVA	0.480 - j0.218 MVA	
	Đakovo110	-8.688 - j17.605 MVA	0.102 - j0.875 MVA	
Županja110		-31.352 - j24.441 MVA	113.414 \angle -0.477952°kV	PQ
	Vinkovci110	-22.900 - j20.434 MVA	0.480 - j0.218 MVA	
	Orašje110	-8.455 - j4.019 MVA	0.018 - j0.447 MVA	
Orašje110		8.472 + j3.571 MVA	113.806 \angle -0.303118°kV	PQ
	Županja110	8.473 + j3.572 MVA	0.018 - j0.447 MVA	
TE Plomin110		0 + j0 MVA	116.807 \angle -9.92064°kV	PQ
	Lovran110	-8.187 + j7.151 MVA	0.041 - j0.780 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	Raša110	39.819 + j10.315 MVA	0.336 + j0.221 MVA	
	Šijana110	59.470 + j6.378 MVA	2.134 + j3.197 MVA	
	Pazin110	65.654 + j12.424 MVA	0.980 + j2.528 MVA	
	TE Plomin220	-75.996 + j77.473 MVA	0.190 + j7.611 MVA	
	TE Plomin220	-75.996 + j77.473 MVA	0.190 + j7.611 MVA	
Lovran110		3.669 + j1.149 MVA	116.483 \angle -9.4377°kV	PQ
	TE Plomin110	8.228 - j7.931 MVA	0.041 - j0.780 MVA	
	Matulji110	-4.559 + j9.082 MVA	0.013 - j0.296 MVA	
Matulji110		-10.583 + j1.493 MVA	116.255 \angle -9.30101°kV	PQ
	Lovran110	4.572 - j9.379 MVA	0.013 - j0.296 MVA	
	Pehlin110	-44.386 + j6.004 MVA	0.086 + j0.166 MVA	
	Ilirska Bistrica110	29.240 + j4.878 MVA	0.303 + j0.581 MVA	
Pehlin110		-28.341 - j7.404 MVA	116.327 \angle -8.73689°kV	PQ
	Matulji110	44.472 - j5.837 MVA	0.086 + j0.166 MVA	
	HE Rijeka110	-24.442 + j1.593 MVA	0.019 - j0.068 MVA	
	Pehlin220	-47.638 + j22.533 MVA	0.050 + j1.676 MVA	
HE Rijeka110		5.047 - j4.727 MVA	116.399 \angle -8.58488°kV	PV
	Pehlin110	24.461 - j1.661 MVA	0.019 - j0.068 MVA	
	Melina110	-19.411 - j6.891 MVA	0.047 - j0.300 MVA	
	HE Rijeka - G2	19.020 + j0 MVA		
	HE Rijeka - G1	19.180 + j0.930 MVA		
Melina110		0 + j0 MVA	116.945 \angle -8.2082°kV	PQ
	HE Rijeka110	19.458 + j6.590 MVA	0.047 - j0.300 MVA	
	Omišalj110	2.450 - j11.349 MVA	0.007 - j11.868 MVA	
	HE Vinodol110	-43.268 - j16.712 MVA	0.235 + j0.353 MVA	
	Krasica110	28.674 + j8.835 MVA	0.011 - j0.020 MVA	
	Krasica110	28.674 + j8.835 MVA	0.011 - j0.020 MVA	
	Melina220	-35.393 + j28.319 MVA	0.032 + j1.284 MVA	
Omišalj110		0 + j0 MVA	117.119 \angle -8.31614°kV	PQ
	Melina110	-2.444 - j0.519 MVA	0.007 - j11.868 MVA	
	Dina110	2.435 + j0.526 MVA	0 - j1.712 MVA	
Dina110		-2.435 - j2.236 MVA	117.113 \angle -8.31833°kV	PQ
	Omišalj110	-2.435 - j2.238 MVA	0 - j1.712 MVA	
HE Vinodol110		-7.767 + j3.003 MVA	118.305 \angle -7.30394°kV	PV
	Melina110	43.504 + j17.065 MVA	0.235 + j0.353 MVA	
	Delnice110	16.956 + j3.069 MVA	0.057 - j0.635 MVA	
	HE Gojak110	-24.663 + j5.514 MVA	0.335 - j0.646 MVA	
	Crikvenica110	-43.561 - j22.648 MVA	0.162 + j0.239 MVA	
	HE Vinodol - G1	0 + j1.470 MVA		
	HE Vinodol - G2	0.840 + j1.785 MVA		
Delnice110		-10.322 + j0.604 MVA	117.654 \angle -7.91419°kV	PQ
	HE Vinodol110	-16.899 - j3.704 MVA	0.057 - j0.635 MVA	
	Moravice110	6.577 + j4.309 MVA	0.014 - j0.863 MVA	
Moravice110		-0.318 + j3.685 MVA	117.084 \angle -8.13067°kV	PQ
	Delnice110	-6.563 - j5.172 MVA	0.014 - j0.863 MVA	
	Švarča110	6.244 + j8.857 MVA	0.070 - j1.867 MVA	
Švarča110		-12.935 - j2.301 MVA	114.656 \angle -8.48358°kV	PQ
	Moravice110	-6.175 - j10.724 MVA	0.070 - j1.867 MVA	
	Rakitje110	-23.498 + j8.421 MVA	0.337 - j0.899 MVA	
	Dubovac110	16.738 + j0.002 MVA	0.012 - j0.126 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
Rakitje110		9.080 + j1.328 MVA	114.256 \angle -5.77453°kV	PQ
	Švarča110	23.835 - j9.319 MVA	0.337 - j0.899 MVA	
	Stenjevec110	34.985 + j12.943 MVA	0.078 + j0.058 MVA	
	Stenjevec110	34.985 + j12.943 MVA	0.078 + j0.058 MVA	
	Samobor110	40.626 + j5.701 MVA	0.153 + j0.170 MVA	
	Tumbri110	-32.146 - j2.327 MVA	0.149 - j0.047 MVA	
	TE-TO Zg110	-21.448 - j6.133 MVA	0.115 - j0.507 MVA	
	Jarun110	-6.615 - j4.095 MVA	0.007 - j0.447 MVA	
	Jarun110	-6.615 - j4.095 MVA	0.007 - j0.447 MVA	
	Tumbri110	-26.380 - j1.963 MVA	0.123 - j0.267 MVA	
	Tumbri110	-32.146 - j2.327 MVA	0.149 - j0.047 MVA	
Stenjevec110		-69.814 - j25.770 MVA	113.741 \angle -6.12759°kV	PQ
	Rakitje110	-34.907 - j12.885 MVA	0.078 + j0.058 MVA	
	Rakitje110	-34.907 - j12.885 MVA	0.078 + j0.058 MVA	
Samobor110		-17.492 - j3.536 MVA	113.635 \angle -6.46436°kV	PQ
	Rakitje110	-40.473 - j5.530 MVA	0.153 + j0.170 MVA	
	Zaprešič110	22.981 + j1.994 MVA	0.045 - j0.161 MVA	
Zaprešič110		-22.936 - j2.156 MVA	113.349 \angle -6.82427°kV	PQ
	Samobor110	-22.936 - j2.156 MVA	0.045 - j0.161 MVA	
Tumbri110		0 + j0 MVA	114.911 \angle -4.89397°kV	PQ
	Rakitje110	32.295 + j2.280 MVA	0.149 - j0.047 MVA	
	Zdenčina 110	10.181 - j12.185 MVA	0.028 - j0.356 MVA	
	Botinec110	36.771 + j0.928 MVA	0.050 - j0.213 MVA	
	Rakitje110	26.503 + j1.697 MVA	0.123 - j0.267 MVA	
	Rakitje110	32.295 + j2.280 MVA	0.149 - j0.047 MVA	
	Mraclin110	7.266 + j23.026 MVA	0.113 - j0.344 MVA	
	Mraclin110	7.266 + j23.026 MVA	0.113 - j0.344 MVA	
	Tumbri380	-77.638 - j59.475 MVA	0.064 + j3.400 MVA	
	Tumbri380	-76.287 - j58.530 MVA	0.060 + j3.378 MVA	
Zdenčina 110		-8.760 - j0.848 MVA	115.316 \angle -5.19957°kV	PQ
	Tumbri110	-10.153 + j11.829 MVA	0.028 - j0.356 MVA	
	Pokuplje110	1.393 - j12.677 MVA	0.033 - j0.773 MVA	
Pokuplje110		-17.181 - j1.042 MVA	116.343 \angle -5.41211°kV	PQ
	Zdenčina 110	-1.360 + j11.904 MVA	0.033 - j0.773 MVA	
	HE Gojak110	-15.822 - j12.946 MVA	0.135 - j0.973 MVA	
HE Gojak110		40.954 + j3.814 MVA	118.604 \angle -4.62832°kV	PV
	Pokuplje110	15.957 + j11.973 MVA	0.135 - j0.973 MVA	
	HE Vinodol110	24.998 - j6.160 MVA	0.335 - j0.646 MVA	
	HE Gojak - G3	16.450 + j0.821 MVA		
	HE Gojak - G1	16.712 + j2.212 MVA		
	HE Gojak - G2	16.655 + j1.163 MVA		
Botinec110		-27.976 - j2.274 MVA	114.722 \angle -5.44755°kV	PQ
	Tumbri110	-36.721 - j1.141 MVA	0.050 - j0.213 MVA	
	Sopot110	-17.577 - j2.881 MVA	0.016 - j0.142 MVA	
	TE-TO Zg110	-41.651 - j9.369 MVA	0.139 + j0.187 MVA	
	Jarun110	33.986 + j5.558 MVA	0.037 + j0.004 MVA	
	Jarun110	33.986 + j5.558 MVA	0.037 + j0.004 MVA	
Sopot110		-25.344 - j7.523 MVA	114.88 \angle -5.28377°kV	PQ
	Botinec110	17.593 + j2.739 MVA	0.016 - j0.142 MVA	
	TE-TO Zg110	-42.938 - j10.260 MVA	0.108 + j0.150 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kV)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
TE-TO Zg110		106.399 + j15.991 MVA	115.377 \angle -4.85168°kV	PV
	Sopot110	43.046 + j10.410 MVA	0.108 + j0.150 MVA	
	Botinec110	41.791 + j9.555 MVA	0.139 + j0.187 MVA	
	Rakitje110	21.563 + j5.626 MVA	0.115 - j0.507 MVA	
	TE-TO Zg - G5	64.072 + j9.124 MVA		
	TE-TO Zg - G4	63.181 + j11.285 MVA		
Jarun110		-66.923 - j25.996 MVA	114.532 \angle -5.64356°kV	PQ
	Botinec110	-33.949 - j5.554 MVA	0.037 + j0.004 MVA	
	Rakitje110	6.623 + j3.648 MVA	0.007 - j0.447 MVA	
	Rakitje110	6.623 + j3.648 MVA	0.007 - j0.447 MVA	
	EL-TO Zg110	-12.270 - j22.185 MVA	0.005 - j4.581 MVA	
	Botinec110	-33.949 - j5.554 MVA	0.037 + j0.004 MVA	
EL-TO Zg110		12.274 + j2.755 MVA	114.649 \angle -5.62098°kV	PV
	Jarun110	12.274 + j17.604 MVA	0.005 - j4.581 MVA	
	EL-TO Zg - G1+G2	9.024 + j5.792 MVA		
	EL-TO Zg - G3	25.010 + j5.246 MVA		
	EL-TO Zg - G4	25.059 + j3.465 MVA		
Dubovac110		-16.726 - j0.128 MVA	114.573 \angle -8.62747°kV	PQ
	Švarča110	-16.726 - j0.128 MVA	0.012 - j0.126 MVA	
Crikvenica110		-11.561 - j0.432 MVA	119.265 \angle -6.82445°kV	PQ
	HE Vinodol110	43.724 + j22.887 MVA	0.162 + j0.239 MVA	
	Krk110	5.560 - j29.345 MVA	0.126 - j5.014 MVA	
	HE Senj110	-60.815 + j6.024 MVA	1.178 + j2.524 MVA	
Krk110		-11.212 - j0.009 MVA	120.251 \angle -7.18931°kV	PQ
	Crikvenica110	-5.434 + j24.331 MVA	0.126 - j5.014 MVA	
	Rab110	-12.474 - j12.723 MVA	0.076 - j13.344 MVA	
	Lošinj110	6.669 - j11.607 MVA	0.123 - j3.077 MVA	
Rab110		-3.985 - j2.424 MVA	121.68 \angle -6.51438°kV	PQ
	Krk110	12.549 - j0.621 MVA	0.076 - j13.344 MVA	
	TS Novalja110	-16.534 - j1.804 MVA	0.065 - j12.967 MVA	
TS Novalja110		-2.236 - j1.525 MVA	121.729 \angle -5.79893°kV	PQ
	Rab110	16.599 - j11.163 MVA	0.065 - j12.967 MVA	
	Lički Osik110	-21.141 + j12.289 MVA	0.298 - j4.156 MVA	
	TS Pag110	2.304 - j2.650 MVA	0.001 - j0.618 MVA	
Lički Osik110		18.907 + j8.497 MVA	120.174 \angle -3.52334°kV	PV
	TS Novalja110	21.439 - j16.444 MVA	0.298 - j4.156 MVA	
	Gračac110	0.101 + j31.328 MVA	0.484 - j0.416 MVA	
	Otočac110	-2.609 - j2.848 MVA	0.005 - j1.353 MVA	
	Lički Osik - G1	22.800 + j2.160 MVA		
Gračac110		-7.578 - j6.088 MVA	113.905 \angle -2.63089°kV	PQ
	Lički Osik110	0.384 - j31.743 MVA	0.484 - j0.416 MVA	
	TS Obrovac110	-24.450 + j15.837 MVA	0.170 - j0.168 MVA	
	TS Kulen Vakuf110	16.489 + j9.819 MVA	0.207 - j1.264 MVA	
TS Obrovac110		0 + j0 MVA	113.232 \angle -1.4982°kV	PQ
	Gračac110	24.619 - j16.005 MVA	0.170 - j0.168 MVA	
	RHE Velebit110	-53.280 - j31.323 MVA	0.084 + j0.342 MVA	
	TS Nin110	4.885 - j0.330 MVA	0.010 - j1.522 MVA	
	TS Zadar110	24.829 + j19.580 MVA	0.968 + j0.094 MVA	
	TS Benkovac110	-1.046 + j28.076 MVA	0.370 - j0.204 MVA	
RHE Velebit110		0 + j0 MVA	113.975 \angle -1.01669°kV	PQ

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	TS Obrovac110	53.364 + j31.665 MVA	0.084 + j0.342 MVA	
	RHE Velebit380	-56.271 - j202.087 MVA	0.287 + j16.666 MVA	
TS Nin110		-4.875 - j1.192 MVA	112.928 \angle -1.89205°kV	PQ
	TS Obrovac110	-4.875 - j1.192 MVA	0.010 - j1.522 MVA	
TS Zadar110		-30.006 - j7.502 MVA	105.885 \angle -3.44316°kV	PQ
	TS Obrovac110	-23.860 - j19.486 MVA	0.968 + j0.094 MVA	
	TS Zadar centar110	11.745 + j1.673 MVA	0.001 - j2.581 MVA	
	TS Biograd110	-17.896 + j10.309 MVA	0.200 - j0.386 MVA	
TS Zadar centar110		-11.745 - j4.254 MVA	105.865 \angle -3.46742°kV	PQ
	TS Zadar110	-11.744 - j4.254 MVA	0.001 - j2.581 MVA	
TS Biograd110		-6.130 - j2.849 MVA	105.631 \angle -2.1167°kV	PQ
	TS Zadar110	18.096 - j10.695 MVA	0.200 - j0.386 MVA	
	TS Bilice110	-24.234 + j7.854 MVA	0.578 - j0.294 MVA	
TS Bilice110		-24.866 + j1.541 MVA	106.261 \angle 0.979803°kV	PQ
	TS Biograd110	24.813 - j8.148 MVA	0.578 - j0.294 MVA	
	TS Knin110	15.646 - j35.806 MVA	0.754 + j0.723 MVA	
	TS Benkovac110	7.613 - j27.348 MVA	0.530 - j0.117 MVA	
	TS Bilice220	-41.229 - j117.624 MVA	0.317 + j11.281 MVA	
	TS Bilice220	-38.951 - j68.836 MVA	0.126 + j4.467 MVA	
TS Knin110		-14.892 - j2.748 MVA	109.678 \angle -0.980324°kV	PV
	TS Bilice110	-14.892 + j36.529 MVA	0.754 + j0.723 MVA	
	TS Knin - Miljacka	0 + j0 MVA		
TS Benkovac110		-5.666 - j1.051 MVA	110.062 \angle -0.674558°kV	PQ
	TS Bilice110	-7.083 + j27.231 MVA	0.530 - j0.117 MVA	
	TS Obrovac110	1.416 - j28.280 MVA	0.370 - j0.204 MVA	
TS Kulen Vakuf110		-16.281 - j11.082 MVA	110.638 \angle -4.1039°kV	PQ
	Gračac110	-16.281 - j11.082 MVA	0.207 - j1.264 MVA	
Otočac110		-4.749 + j0.828 MVA	120.578 \angle -3.43005°kV	PQ
	Lički Osik110	2.614 + j1.494 MVA	0.005 - j1.353 MVA	
	HE Senj110	-7.403 - j0.612 MVA	0.023 - j1.311 MVA	
HE Senj110		69.400 - j4.067 MVA	120.948 \angle -3.00724°kV	PV
	Otočac110	7.427 - j0.700 MVA	0.023 - j1.311 MVA	
	Crikvenica110	61.993 - j3.500 MVA	1.178 + j2.524 MVA	
	HE Senj - G3	69.400 - j4.067 MVA		
TS Pag110		-2.303 + j2.032 MVA	121.816 \angle -5.87231°kV	PQ
	TS Novalja110	-2.303 + j2.032 MVA	0.001 - j0.618 MVA	
Lošinj110		-6.538 + j8.535 MVA	121.804 \angle -8.36931°kV	PQ
	Krk110	-6.546 + j8.530 MVA	0.123 - j3.077 MVA	
Krasica110		-57.327 - j17.709 MVA	116.844 \angle -8.30084°kV	PQ
	Melina110	-28.663 - j8.855 MVA	0.011 - j0.020 MVA	
	Melina110	-28.663 - j8.855 MVA	0.011 - j0.020 MVA	
Ilirska Bistrica110		-28.928 - j4.285 MVA	114.674 \angle -10.4957°kV	PQ
	Matulji110	-28.937 - j4.297 MVA	0.303 + j0.581 MVA	
Raša110		-39.474 - j10.077 MVA	115.361 \angle -10.8091°kV	PQ
	TE Plomin110	-39.483 - j10.093 MVA	0.336 + j0.221 MVA	
Šijana110		-26.672 - j4.385 MVA	111.909 \angle -14.3449°kV	PQ
	TE Plomin110	-57.336 - j3.181 MVA	2.134 + j3.197 MVA	
	Dolinka110	24.557 + j2.807 MVA	0.039 - j0.090 MVA	
	Rovinj110	6.100 - j4.016 MVA	0.016 - j1.118 MVA	
Dolinka110		-24.520 - j2.898 MVA	111.661 \angle -14.651°kV	PQ

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	Šijana110	-24.518 - j2.897 MVA	0.039 - j0.090 MVA	
Rovinj110		-10.828 - j1.184 MVA	112.13 \angle -14.8119°kV	PQ
	Šijana110	-6.084 + j2.898 MVA	0.016 - j1.118 MVA	
	Poreč110	-4.744 - j4.081 MVA	0.009 - j0.929 MVA	
Poreč110		-19.107 - j5.352 MVA	112.651 \angle -14.6138°kV	PQ
	Rovinj110	4.753 + j3.153 MVA	0.009 - j0.929 MVA	
	Pazin110	-50.239 - j4.072 MVA	0.497 + j1.015 MVA	
	Katoro110	26.379 - j4.433 MVA	0.201 - j0.342 MVA	
Pazin110		-13.937 - j4.808 MVA	114.109 \angle -12.7077°kV	PQ
	Poreč110	50.735 + j5.087 MVA	0.497 + j1.015 MVA	
	TE Plomin110	-64.673 - j9.895 MVA	0.980 + j2.528 MVA	
Katoro110		-4.168 - j1.998 MVA	112.277 \angle -16.1425°kV	PQ
	Poreč110	-26.178 + j4.091 MVA	0.201 - j0.342 MVA	
	Buje110	22.010 - j6.089 MVA	0.062 - j0.218 MVA	
Buje110		-16.837 + j5.781 MVA	112.256 \angle -16.6954°kV	PQ
	Katoro110	-21.948 + j5.871 MVA	0.062 - j0.218 MVA	
	Kopar110	5.112 - j0.089 MVA	0.006 - j0.499 MVA	
Kopar110		-5.106 - j0.410 MVA	112.118 \angle -16.8364°kV	PQ
	Buje110	-5.107 - j0.410 MVA	0.006 - j0.499 MVA	
HE Sen110		64.243 - j4.221 MVA	121.703 \angle -0.11289°kV	PV
	HE Senj220	68.590 + j145.788 MVA	0.426 + j14.643 MVA	
	HE Senj - G2	69.014 + j5.733 MVA		
TS Konjsko110		0 + j0 MVA	111.415 \angle 0.725243°kV	PQ
	TS Kaštela110	30.341 + j8.646 MVA	0.122 + j0.004 MVA	
	TS Kaštela110	30.341 + j8.646 MVA	0.122 + j0.004 MVA	
	TS Vrboran110	23.137 - j6.427 MVA	0.041 - j0.155 MVA	
	TS Vrboran110	23.137 - j6.427 MVA	0.041 - j0.155 MVA	
	HE Đale110	-17.094 - j19.822 MVA	0.118 - j0.232 MVA	
	TS Konjsko220	-45.597 - j4.847 MVA	0.034 + j1.406 MVA	
	TS Konjsko220	-44.827 - j4.889 MVA	0.030 + j1.382 MVA	
TS Kaštela110		-60.438 - j17.285 MVA	110.591 \angle 4.08764e-002°kV	PQ
	TS Konjsko110	-30.219 - j8.643 MVA	0.122 + j0.004 MVA	
	TS Konjsko110	-30.219 - j8.643 MVA	0.122 + j0.004 MVA	
TS Vrboran110		-23.773 - j0.670 MVA	111.493 \angle 0.211248°kV	PQ
	TS Konjsko110	-23.096 + j6.272 MVA	0.041 - j0.155 MVA	
	TS Sučidar110	55.632 + j24.308 MVA	0.064 - j1.961 MVA	
	TS Meterize110	-16.606 - j18.761 MVA	0.008 - j0.016 MVA	
	TS Meterize110	-16.606 - j18.761 MVA	0.008 - j0.016 MVA	
	TS Konjsko110	-23.096 + j6.272 MVA	0.041 - j0.155 MVA	
TS Sučidar110		-55.569 - j26.269 MVA	111.194 \angle 1.6448e-002°kV	PQ
	TS Vrboran110	-55.569 - j26.269 MVA	0.064 - j1.961 MVA	
TS Meterize110		-27.394 - j9.895 MVA	111.608 \angle 0.239535°kV	PQ
	TS Vrboran110	16.614 + j18.745 MVA	0.008 - j0.016 MVA	
	TS Vrboran110	16.614 + j18.745 MVA	0.008 - j0.016 MVA	
	HE Zakučac110	-25.319 - j12.668 MVA	0.224 - j0.136 MVA	
	HE Zakučac110	-23.302 - j16.091 MVA	0.152 - j0.187 MVA	
	TS Sinj110	11.300 - j2.549 MVA	0.047 - j0.666 MVA	
	HE Zakučac110	-23.302 - j16.078 MVA	0.152 - j0.162 MVA	
HE Zakučac110		50.124 + j9.706 MVA	113.274 \angle 0.93429°kV	PV
	TS Meterize110	25.543 + j12.531 MVA	0.224 - j0.136 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kV)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	TS Dugi Rat110	4.657 - j10.022 MVA	0.007 - j0.161 MVA	
	TS Dugi Rat110	5.584 - j10.085 MVA	0.006 - j0.157 MVA	
	TS Meterize110	23.454 + j15.903 MVA	0.152 - j0.187 MVA	
	HE-TS Kraljevac110	5.260 + j11.139 MVA	0.022 - j0.442 MVA	
	HE-TS Kraljevac110	5.260 + j11.139 MVA	0.022 - j0.442 MVA	
	TS Meterize110	23.454 + j15.916 MVA	0.152 - j0.162 MVA	
	HE Zakučac220	-43.086 - j13.695 MVA	0.074 + j2.315 MVA	
	HE Zakučac - G1	50.124 + j9.706 MVA		
TS Dugi Rat110		-10.227 + j19.783 MVA	113.43 ∠0.855258°kV	PQ
	HE Zakučac110	-4.650 + j9.861 MVA	0.007 - j0.161 MVA	
	HE Zakučac110	-5.577 + j9.927 MVA	0.006 - j0.157 MVA	
HE-TS Kraljevac110		-2.029 - j5.247 MVA	112.576 ∠0.881494°kV	PV
	HE Zakučac110	-5.238 - j11.581 MVA	0.022 - j0.442 MVA	
	TS Imotski110	-20.711 + j5.113 MVA	0.213 - j0.567 MVA	
	RHE B.Blato110	12.366 - j0.591 MVA	0.053 - j1.062 MVA	
	HE Zakučac110	-5.238 - j11.581 MVA	0.022 - j0.442 MVA	
	TS Makarska110	16.781 + j13.187 MVA	0.078 - j0.338 MVA	
	HE-TS Kraljevac - GT	0 + j0 MVA		
TS Imotski110		-7.042 - j7.705 MVA	113.059 ∠2.19267°kV	PQ
	HE-TS Kraljevac110	20.924 - j5.681 MVA	0.213 - j0.567 MVA	
	TS Grude110	-27.974 - j2.022 MVA	0.117 - j0.101 MVA	
TS Grude110		28.072 + j1.911 MVA	113.602 ∠2.70118°kV	PQ
	TS Imotski110	28.091 + j1.920 MVA	0.117 - j0.101 MVA	
RHE B.Blato110		0 + j0 MVA	112.105 ∠4.6584e-002°kV	PQ
	HE-TS Kraljevac110	-12.313 - j0.471 MVA	0.053 - j1.062 MVA	
	TS Livno110	8.004 + j1.209 MVA	0.016 - j0.807 MVA	
	HE Peruća110	4.309 - j0.736 MVA	0.010 - j1.182 MVA	
TS Livno110		-7.988 - j2.016 MVA	111.743 ∠-0.306124°kV	PQ
	RHE B.Blato110	-7.988 - j2.016 MVA	0.016 - j0.807 MVA	
HE Peruća110		2.566 + j3.820 MVA	111.867 ∠-0.249378°kV	PV
	RHE B.Blato110	-4.299 - j0.446 MVA	0.010 - j1.182 MVA	
	TS Sinj110	6.867 + j8.831 MVA	0.022 - j0.326 MVA	
	HE Peruća - G2	5.092 + j4.723 MVA		
TS Sinj110		-18.097 - j7.284 MVA	111.357 ∠-0.30968°kV	PQ
	HE Peruća110	-6.845 - j9.156 MVA	0.022 - j0.326 MVA	
	TS Meterize110	-11.254 + j1.883 MVA	0.047 - j0.666 MVA	
TS Makarska110		-12.450 - j13.307 MVA	111.393 ∠0.456015°kV	PQ
	HE-TS Kraljevac110	-16.703 - j13.525 MVA	0.078 - j0.338 MVA	
	TS Opuzen110	4.253 + j0.219 MVA	0.013 - j2.201 MVA	
TS Opuzen110		-11.543 - j2.420 MVA	110.759 ∠-3.54554e-002°kV	PQ
	TS Makarska110	-4.240 - j2.420 MVA	0.013 - j2.201 MVA	
	TS Čapljina110	34.632 + j0.011 MVA	0.464 + j0.179 MVA	
	TS Neum110	-41.929 - j0.008 MVA	0.762 + j0.706 MVA	
TS Čapljina110		-34.165 + j0.168 MVA	109.28 ∠-1.74714°kV	PQ
	TS Opuzen110	-34.167 + j0.168 MVA	0.464 + j0.179 MVA	
TS Neum110		-0.658 - j4.338 MVA	112.811 ∠2.23773°kV	PQ
	TS Opuzen110	42.691 + j0.714 MVA	0.762 + j0.706 MVA	
	TS Ston110	-43.352 - j5.060 MVA	0.738 + j0.684 MVA	
TS Ston110		-16.090 + j12.186 MVA	115.224 ∠4.22472°kV	PQ
	TS Neum110	44.090 + j5.745 MVA	0.738 + j0.684 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kV)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	TS Komolac110	-60.180 + j6.445 MVA	1.458 + j3.442 MVA	
TS Komolac110		-32.630 - j22.357 MVA	117.237 \angle 9.09912°kV	PQ
	TS Ston110	61.638 - j3.003 MVA	1.458 + j3.442 MVA	
	HE Dubrovnik110	-101.734 - j10.571 MVA	1.096 + j3.274 MVA	
	TS Trebinje110	7.469 - j8.783 MVA	0.032 - j0.642 MVA	
HE Dubrovnik110		102.827 + j13.844 MVA	118.993 \angle 11.0941°kV	PV
	TS Komolac110	102.829 + j13.845 MVA	1.096 + j3.274 MVA	
	HE Dubrovnik - G1	102.827 + j13.844 MVA		
TS Trebinje110		-7.431 + j8.142 MVA	117.574 \angle 8.73477°kV	PQ
	TS Komolac110	-7.436 + j8.141 MVA	0.032 - j0.642 MVA	
HE Đale110		17.212 + j0.046 MVA	113.051 \angle 1.10954°kV	PV
	TS Konjsko110	17.212 + j19.590 MVA	0.118 - j0.232 MVA	
	HE Đale - G1	17.212 + j0.046 MVA		
Žerjavinec110		0 + j0 MVA	115.197 \angle -3.83642°kV	PQ
	Dubec110	80.670 + j24.189 MVA	0.197 + j1.426 MVA	
	TE Jertovec110	46.741 + j7.343 MVA	0.477 + j0.837 MVA	
	Resnik110	52.461 + j8.716 MVA	0.333 + j0.663 MVA	
	Dubec110	80.670 + j24.189 MVA	0.197 + j1.426 MVA	
	Žerjavinec380	-130.001 - j11.529 MVA	0.083 + j6.181 MVA	
	Žerjavinec380	-130.001 - j11.529 MVA	0.083 + j6.181 MVA	
Dubec110		-35.345 - j15.786 MVA	114.393 \angle -4.73355°kV	PQ
	Žerjavinec110	-80.473 - j22.763 MVA	0.197 + j1.426 MVA	
	Ksaver110	17.448 + j3.823 MVA	0.039 - j0.337 MVA	
	Ksaver110	17.448 + j3.823 MVA	0.039 - j0.337 MVA	
	Resnik110	44.812 + j11.069 MVA	0.066 + j0.112 MVA	
	Resnik110	45.892 + j11.025 MVA	0.069 + j0.117 MVA	
	Žerjavinec110	-80.473 - j22.763 MVA	0.197 + j1.426 MVA	
Ksaver110		-34.818 - j8.320 MVA	113.95 \angle -5.13648°kV	PQ
	Dubec110	-17.409 - j4.160 MVA	0.039 - j0.337 MVA	
	Dubec110	-17.409 - j4.160 MVA	0.039 - j0.337 MVA	
Resnik110		-60.848 - j22.872 MVA	114.095 \angle -4.99454°kV	PQ
	Dubec110	-44.746 - j10.957 MVA	0.066 + j0.112 MVA	
	Dubec110	-45.823 - j10.908 MVA	0.069 + j0.117 MVA	
	Dugo Selo110	44.348 + j13.694 MVA	0.261 + j0.426 MVA	
	TE-TO Zg110	17.088 - j16.233 MVA	0.045 - j0.159 MVA	
	TE-TO Zg110	17.088 - j16.233 MVA	0.045 - j0.159 MVA	
	Mraclin110	1.662 + j12.909 MVA	0.035 - j0.624 MVA	
	Žerjavinec110	-52.128 - j8.053 MVA	0.333 + j0.663 MVA	
	Mraclin110	1.662 + j12.909 MVA	0.035 - j0.624 MVA	
Dugo Selo110		-20.785 - j7.476 MVA	112.855 \angle -5.93825°kV	PQ
	Resnik110	-44.087 - j13.268 MVA	0.261 + j0.426 MVA	
	Križevci110	23.302 + j5.792 MVA	0.200 - j0.558 MVA	
Križevci110		-17.253 - j2.936 MVA	111.152 \angle -7.37927°kV	PQ
	Dugo Selo110	-23.102 - j6.350 MVA	0.200 - j0.558 MVA	
	Koprivnica110	5.849 + j3.414 MVA	0.016 - j1.025 MVA	
Koprivnica110		-34.040 - j9.875 MVA	110.478 \angle -7.67058°kV	PQ
	Križevci110	-5.833 - j4.439 MVA	0.016 - j1.025 MVA	
	Bjelovar110	9.404 + j6.302 MVA	0.043 - j0.905 MVA	
	HE Dubrava110	-28.094 - j6.525 MVA	0.139 - j0.085 MVA	
	Ludbreg110	-9.518 - j5.213 MVA	0.022 - j0.571 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kv)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
Bjelovar110		-25.218 - j8.310 MVA	109.34 \angle -8.13281°kV	PQ
	Koprivnica110	-9.362 - j7.207 MVA	0.043 - j0.905 MVA	
	Ivanić110	-15.852 - j1.102 MVA	0.146 - j0.876 MVA	
Ivanić110		-23.084 - j5.034 MVA	110.438 \angle -6.99639°kV	PQ
	Bjelovar110	15.998 + j0.225 MVA	0.146 - j0.876 MVA	
	Mraclin110	-39.092 - j5.263 MVA	0.708 + j0.574 MVA	
HE Dubrava110		38.426 + j0.597 MVA	111.419 \angle -6.791°kV	PV
	Koprivnica110	28.233 + j6.440 MVA	0.139 - j0.085 MVA	
	Prelog110	10.193 - j2.810 MVA	0.011 - j0.303 MVA	
	HE Dubrava - G1	41.091 + j0 MVA		
	HE Dubrava - G2	0 + j0 MVA		
Prelog110		-12.684 - j0.334 MVA	111.409 \angle -7.00534°kV	PQ
	HE Dubrava110	-10.182 + j2.507 MVA	0.011 - j0.303 MVA	
	HE Čakovec110	-2.502 - j2.840 MVA	0.001 - j0.376 MVA	
HE Čakovec110		39.928 + j2.808 MVA	111.549 \angle -6.96898°kV	PV
	Prelog110	2.504 + j2.465 MVA	0.001 - j0.376 MVA	
	Ludbreg110	18.022 + j5.602 MVA	0.043 - j0.264 MVA	
	Varaždin Grad110	9.715 - j0.953 MVA	0.017 - j0.565 MVA	
	Čakovec110	9.688 - j2.022 MVA	0.012 - j0.376 MVA	
	HE Čakovec - G1	39.928 + j2.808 MVA		
Ludbreg110		-8.440 - j1.224 MVA	111.044 \angle -7.35998°kV	PQ
	HE Čakovec110	-17.980 - j5.866 MVA	0.043 - j0.264 MVA	
	Koprivnica110	9.540 + j4.642 MVA	0.022 - j0.571 MVA	
Varaždin Grad110		-45.437 - j15.865 MVA	111.401 \angle -7.3153°kV	PQ
	HE Čakovec110	-9.698 + j0.387 MVA	0.017 - j0.565 MVA	
	Nedeljanec110	-35.739 - j16.253 MVA	0.154 + j0.170 MVA	
Nedeljanec110		-11.421 - j12.669 MVA	112.417 \angle -6.71669°kV	PQ
	Varaždin Grad110	35.894 + j16.422 MVA	0.154 + j0.170 MVA	
	HE Varaždin110	-43.445 - j1.477 MVA	0.127 + j0.201 MVA	
	Čakovec110	22.346 + j7.543 MVA	0.115 - j0.211 MVA	
	Ivanec110	34.181 - j4.936 MVA	0.184 + j0.086 MVA	
	HE Varaždin110	-43.634 + j0.154 MVA	0.128 + j0.204 MVA	
	TE Jertovec110	-15.355 - j3.852 MVA	0.085 - j0.968 MVA	
	Formin110	-1.407 - j26.519 MVA	0.144 - j0.273 MVA	
HE Varaždin110		43.573 + j0.463 MVA	112.788 \angle -6.13646°kV	PV
	Nedeljanec110	43.573 + j1.678 MVA	0.127 + j0.201 MVA	
	HE Varaždin - G2	43.573 + j0.463 MVA		
Čakovec110		-31.906 - j6.105 MVA	111.506 \angle -7.21186°kV	PQ
	Nedeljanec110	-22.230 - j7.754 MVA	0.115 - j0.211 MVA	
	HE Čakovec110	-9.676 + j1.646 MVA	0.012 - j0.376 MVA	
Ivanec110		-12.371 + j6.205 MVA	112.127 \angle -7.8218°kV	PQ
	Nedeljanec110	-33.996 + j5.022 MVA	0.184 + j0.086 MVA	
	Straža110	21.626 + j1.183 MVA	0.150 - j0.620 MVA	
Straža110		-21.476 - j1.802 MVA	111.169 \angle -9.15084°kV	PQ
	Ivanec110	-21.476 - j1.803 MVA	0.150 - j0.620 MVA	
HE Varaždin110		43.762 - j1.164 MVA	112.746 \angle -6.12742°kV	PV
	Nedeljanec110	43.762 + j0.051 MVA	0.128 + j0.204 MVA	
	HE Varaždin - G1	43.762 - j1.164 MVA		
TE Jertovec110		-30.824 - j3.621 MVA	113.451 \angle -5.76326°kV	PQ
	Nedeljanec110	15.439 + j2.884 MVA	0.085 - j0.968 MVA	

Čvorište		Sinj(MVA)	v(kV)	tip čvorišta
	Grana	S(MVA)	gubici (MVA)	
	Žerjavinec110	-46.263 - j6.506 MVA	0.477 + j0.837 MVA	
Formin110		1.551 + j26.247 MVA	114.535 \angle -6.96894°kV	PQ
	Nedeljanec110	1.551 + j26.247 MVA	0.144 - j0.273 MVA	
TE-TO Zg110		-10.785 - j1.857 MVA	114.447 \angle -5.33957°kV	PV
	Resnik110	-17.044 + j16.074 MVA	0.045 - j0.159 MVA	
	Mraclin110	-7.429 + j20.584 MVA	0.064 - j0.976 MVA	
	Resnik110	-17.044 + j16.074 MVA	0.045 - j0.159 MVA	
	Trpimirova110	30.733 - j0.852 MVA	0.014 - j7.779 MVA	
	TE-TO Zg - G6	39.651 + j9.810 MVA		
Trpimirova110		-30.719 - j6.927 MVA	114.37 \angle -5.47519°kV	PQ
	TE-TO Zg110	-30.719 - j6.927 MVA	0.014 - j7.779 MVA	
Daruvar110		-11.603 + j2.409 MVA	108.102 \angle -3.71999°kV	PQ
	Međurić110	-11.603 + j2.410 MVA	0.062 - j0.835 MVA	
Kutina110		-8.049 - j2.243 MVA	109.58 \angle -4.05466°kV	PQ
	TE Sisak110	-10.750 + j13.679 MVA	0.171 - j0.716 MVA	
	Ludina110	2.699 - j15.920 MVA	0.059 - j0.601 MVA	
Ludina110		0 + j0 MVA	110.917 \angle -4.38801°kV	PQ
	Kutina110	-2.641 + j15.319 MVA	0.059 - j0.601 MVA	
	Mraclin110	2.641 - j15.319 MVA	0.086 - j1.051 MVA	
Petrinja110		-17.847 - j1.762 MVA	108.741 \angle -3.81095°kV	PQ
	Pračno110	-17.847 - j1.762 MVA	0.025 - j0.162 MVA	
Raf.Sisak110		-24.325 - j0.914 MVA	108.798 \angle -3.69114°kV	PQ
	Pračno110	-24.332 - j0.913 MVA	0.030 - j0.035 MVA	
	HE Dubrava - G1	39.308 + j0 MVA		
	HE Dubrava - G2	0 + j0 MVA		
Prelog110		-7.652 + j1.545 MVA	114.72 \angle -5.50025°kV	PQ
	HE Dubrava110	-22.628 + j4.856 MVA	0.049 - j0.189 MVA	
	HE Čakovec110	14.976 - j3.312 MVA	0.024 - j0.321 MVA	
Varaždin Grad110		-27.722 - j5.248 MVA	114.657 \angle -6.87065°kV	PQ
	HE Čakovec110	-29.303 + j8.365 MVA	0.158 - j0.120 MVA	
	Nedeljanec110	1.581 - j13.613 MVA	0.017 - j0.313 MVA	
Formin110		-58.814 + j21.747 MVA	115.391 \angle -9.49813°kV	PQ
	Nedeljanec110	-58.814 + j21.748 MVA	0.786 + j1.874 MVA	
Zaprešić110		-19.050 - j1.670 MVA	117.084 \angle -2.91342°kV	PQ
	Rakitje110	-17.847 - j2.370 MVA	0.022 - j0.216 MVA	
	Samobor110	-1.203 + j0.700 MVA	0 - j0.330 MVA	
Samobor110		-11.771 - j3.782 MVA	117.069 \angle -2.89127°kV	PQ
	Zaprešić110	1.204 - j1.030 MVA	0 - j0.330 MVA	
	Rakitje110	-12.975 - j2.752 MVA	0.015 - j0.317 MVA	
Stenjevec110		-46.172 - j15.704 MVA	116.974 \angle -2.90973°kV	PQ
	Rakitje110	-23.086 - j7.852 MVA	0.032 - j0.117 MVA	
	Rakitje110	-23.086 - j7.852 MVA	0.032 - j0.117 MVA	
Dubovac110		-13.473 + j0.833 MVA	121.948 \angle -4.85764°kV	PQ
	Švarča110	-13.473 + j0.833 MVA	0.007 - j0.166 MVA	
Tumbri35		0 + j0 MVA	36.2623 \angle -2.30252°kV	PQ
	Tumbri35	0 + j36.527 MVA	0 + j73.053 MVA	
	Tumbri35	0 + j36.527 MVA	0 + j73.053 MVA	
	Tumbri110	-0.207 - j46.660 MVA	0.042 + j1.753 MVA	
	Tumbri110	-0.244 - j46.215 MVA	0.043 + j1.695 MVA	

Literatura

- [Arrillaga 90] Arrillaga J., Arnold C.P., *Computer Analysis of Power Systems*, John Wiley & Sons, 1990.
- [Booch 94] Booch G., *Object-oriented Analysis and Design With Applications*, 2. izdanje Addison-Wesley, 1994.
- [Clements 88] Clements K.A., Davis P.W., "Detection and Identification of Topology Errors in Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(4):1748-1753 1988 Nov
- [Das 02] Das J.C., *Power System Analysis*, Marcel Dekker, 2002.
- [Debeljuh 95] Debeljuh V., Primjena teorije grafova u analizi elektromagnetskih mreža, magistarski rad, FER Zagreb, 1995.
- [Delimar 01] Delimar M., Određivanje topologije elektroenergetskog sustava primjenom neuronskih mreža, magistarski rad, FER Zagreb 2001.
- [Dorf 93] Dorf R.C., "Linear Circuit Analysis", *The Electrical Engineering Handbook*, CRC Press, 1993.
- [Džafić 04] Džafić I., Glavić M., Tešnjak S., "An Object-Oriented Graphical Package for Power System Simulation and Analysis", *MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Conference*, 3:835 – 839, 2004 May
- [Foley 95] Foley M., Bose A., "Object-Oriented On-Line Network Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1):125-132 1995 Feb
- [Grainger 94] Grainger J.J., Stevenson W.D., *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1994.
- [Intel MKL] Intel® Math Kernel Library, <http://www.intel.com/software/products/mkl/>
- [Kajganić 04] Kajganić B., Procjena topologije elektroenergetskih mreža primjenom neizrazite logike, doktorska disertacija, FER Zagreb, 2004.
- [Kajganić 99] Kajganić B., *Objektni pristup proračunu elektroenergetskih mreža*, magistarski rad, FER Zagreb, 1999.
- [Lee 97] Lee R.C., Tepefendhart W.M., *UML and C++ A Practical Guide to Object Oriented Development*, Prentice-Hall, 1997.
- [Lu 94] Lu C.N., Teng J.H., "Chang B.S., Power System Network Topologs Error Detection", *IEEE Proceedings Generation Transmission & Distribution*, 141(6):632-629, 1994 Nov
- [Maghsoodlou 04] Maghsoodlou F., Masielo R., Ray T., "Energy Management Systems", *IEEE Power & Energy Magazine*, 1(5):49-57, 2004 Sep
- [Mili 85] Mili L., Cutsem T.V., Pavella M.R., Bad Data Identification Methods in Power System State Estimation – a Comparative Study, *IEEE Transaction on power Apparatus and Systems*, 104(11):3037-3049 1985 Nov
- [Monticelli 99] Monticelli A., *State Estimation in Electric Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.

- [Motik 97] Motik B., Šribar J., *Demistificirani C++*, Element, 1997.
- [Neyer 90] Neyer A.F., Wu F.F., Imhof K., "Object-Oriented Programming for Flexible Software: Example of a Load Flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(3):689-696 1990 Aug
- [Nikolaev 05] Nikolaev S., *CVM Class Library 5.1.1.*, <http://www.cvmlib.com/>, 2005
- [Ožegović 02] Ožegović M, Ožegović K, *Električne energetske mreže V*, FESB Split, 2002.
- [Ožegović 96] Ožegović M, Ožegović K, *Električne energetske mreže I*, FESB Split, 1996.
- [Ožegović 97-1] Ožegović M, Ožegović K, *Električne energetske mreže II*, FESB Split, 1997.
- [Ožegović 97-2] Ožegović M, Ožegović K, *Električne energetske mreže III*, FESB Split, 1997.
- [Ožegović 99] Ožegović M, Ožegović K, *Električne energetske mreže IV*, FESB Split, 1999.
- [Plohl 91] Plohl M., *Teorija četveropola*, Sveučilišna naklada, 1991.
- [Požar 63] Požar H., *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, ITP Tehnička knjiga, 1990., 1. izdanje 1963.
- [Selvan 05] Selvan M.P., Swarup K.S., "Object Methodology Method and Design for Topological Processing", *IEEE Power & Energy*, 6(1):18-29 2005 Jan
- [Singh 91] Singh N., Glavitsch H.: Detection and Identification of Topological Errors in Online Power System Analysis; *IEEE Transaction on Power Systems*, 6(1): 324-331 1991 Feb
- [Singh 94] Singh N., Oesch F.: Practical Experience with Rule-Based Online Topology Error Detection, *IEEE Transaction on Power Systems*, 9(2): 841-847, 1994 May
- [Soman 02] Soman S.A., Khaparde S.A., Subha Pandit, *Computational Methods for Large Sparse Power Systems Analysis*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [Stagg 68] Stagg G.W., El-Abiad A.H., *Computer Methods in Power System Analysis*, McGraw-Hill 1987., 1. izdanje 1968.
- [Stoustrup 97] Stoustrup B., *The C++ Programming Language*, 3. izdanje Addison-Wesley, 1997.
- [Wolfram 03] Wolfram Research, Inc. "Mathematica® 5.0", <http://www.wolfram.com>, 2003
- [Wu 88] Wu F.F., Liu W.-H.L., Lun S.-M., Observability Analysis and Bad Data Processing for State Estimation With Equality Constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2):541-547 1988 May
- [Zhu 97] Zhu J., Lubkeman D.L., Object-Oriented Development of Software Systems for Power System Simulations, *IEEE Transaction on Power Systems*, 12(2):1002-1007, 1997 May

Popis oznaka

S	simboli pisani kurzivom bez crte iznad su realni brojevi.
\bar{S}	simboli pisani kurzivom s crtom iznad su kompleksni brojevi.
\bar{S}^*	zvjezdica označava konjugirano kompleksnu vrijednost broja
\mathbf{S}	simboli pisani masnim slovima su matrice i vektori.
<hr/>	
S_B	bazna snaga
U_B, U_n	bazni, nazivni napon
Z_B	bazna impedancija
$\text{inc}[i]$	skup incidentnih čvorišta čvorištu i
Y_B	bazna admitancija
\bar{S}_i	snaga injekcije čvorišta dobivena zbrojem snaga kroz incidentne grane
\bar{S}_{inj}	snaga injekcije čvorišta dobivena zbrojem snaga tereta i generatora
\bar{S}_{ij}	snaga grane koja teče od čvorišta i do čvorišta j
\bar{U}_i	kompleksni oblik napona u čvorištu i
$ \bar{U}_{inj} ^{rač}$	procijenjena vrijednost mjerenja apsolutne vrijednosti napona u čvorištu i
$ \bar{U}_{inj} $	mjerenje apsolutne vrijednosti napona u čvorištu i
$\bar{S}_{inj}^{rač}$	procijenjena vrijednost mjerenja injekcije snage u čvorištu i
\bar{S}_{inj}	mjerenje injekcije snage u čvorištu i
$\arg(\bar{U}_i)$	kut napona u čvorištu i
\bar{t}_i	kompleksni oblik prijenosnog omjera transformatora
$\bar{I}_{igen3pk}$	struja tropskog kratkog spoja svih generatora u čvorištu
σ	pouzdanost mjerenja
$\sigma_{inj}[i]$	pouzdanost mjerenja injekcije

\bar{S}_{itmj}	mjerenje snage na distributivnom transformatoru ili generatoru
\bar{Y}_{iter}	direktna admitancija tereta (za kratki spoj)
\bar{S}_{iter}	snaga tereta
\bar{Y}_{gen}^n	direktna početna admitancija generatora
X_d^n	početna impedancija generatora
X_{trafo}	reaktancija transformatora
\bar{I}_{gen3pk}	struja kratkog spoja generatora
$\bar{Y}_a, \bar{Y}_b, \bar{Y}_c, \bar{Y}_d$	y-parametri četveropola
$\bar{Y}_{uz} [i]$	uzdužna admitancija grane gledano sa strane čvorišta i
$\bar{Y}_{uz} [j]$	uzdužna admitancija grane gledano sa strane čvorišta j
$\bar{Y}_{pop} [i]$	poprečna admitancija grane gledano sa strane čvorišta i
$\bar{Y}_{pop} [j]$	poprečna admitancija grane gledano sa strane čvorišta j
S_{max}	nazivna snaga grane (maksimalna snaga grane)
\bar{S}_{ijmj}	mjerenje snage u grani
\bar{I}_{ij3pk}	struja trolnog kratkog spoja u grani ij gledano sa strane čvorišta i
$\bar{I}_{ij1pk}^{(012)}$	struja jednopolnog kratkog spoja u grani ij gledano sa strane čvorišta i (u simetričnim komponentama)
\bar{Y}_L	u Γ -shemi transformatora uzdužna admitancija
\bar{Y}_S	u Γ -shemi transformatora poprečna admitancija
$\bar{Y}_{0uz} [i]$	uzdužna admitancija nultog sustava grane gledano sa strane čvorišta i
$\bar{Y}_{0uz} [j]$	uzdužna admitancija nultog sustava grane gledano sa strane čvorišta j
$\bar{Y}_{0pop} [i]$	poprečna admitancija nultog sustava grane gledano sa strane čvorišta i
$\bar{Y}_{0pop} [j]$	poprečna admitancija nultog sustava grane gledano sa strane čvorišta j
I_{ijps}	prekidna moć prekidača

S	vektor kompleksnih injekcija snage u čvorištima
U	vektor kompleksnih napona čvorišta
$diag[\mathbf{U}]$	vektor kompleksnih napona čvorišta diagonaliziran u matricu
Y	matrica admitancije čvorišta
Z	matrica impedancije čvorišta
\bar{Y}_{ij}	element matrice admitancije čvorišta redak i stupac j
\bar{Y}_{0ij}	element matrice admitancije čvorišta nultog sustava redak i stupac j
Z₀	matrica impedancije čvorišta nultog sustava
$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix}$	Jakobijeva matrica za Newton – Raphson tokove snaga
$\Delta\mathbf{P}$	razlika injekcije radne snage i izračunate injekcije radne snage
$\Delta\mathbf{Q}$	razlika injekcije jalove snage i izračunate injekcije jalove snage
B' i B''	matrice za brze razdvojene tokove snaga
R_z	diagonalna matrica pouzdanosti mjerenja
H	Jakobijeva matrica za proračun procjene stanja
z	vektor mjerenja
$\mathbf{z}^{rač}$	procijenjeni vektor mjerenja
R_z⁻¹	diagonalna matrica težinskih faktora
e	vektor greške mjerenja
R_z'	matrica kovarijance
r_{N_i}	normalizirani ostatak pogreške
\bar{I}_f	struja kratkog spoja u kratko spojenom čvorištu
\bar{U}_i^z	vektor napona direktnog sustava "zdrave" mreže u čvorištu i

Kratki sadržaj

Ključne riječi:

objektno orijentirano programiranje, model elektroenergetskog sustava, procjena stanja, tok snage, kratki spoj

Programska podrška za analizu i simulaciju elektroenergetskog sustava je do sada bila razvijana uglavnom pomoću proceduralnih metoda programiranja. U ovom radu je predložen objektno orijentirani model EESa koji je jednostavan, proširiv i nepromjenjiv s obzirom na proračun. Korišteni su kompleksni brojevi omogućavajući općenitost pristupa modeliranju, bez produžavanja računanja. Za operacije s vektorima i matricama korištene su gotove biblioteke. Model mjerenja omogućava više mjerenja za jedno mjerno mjesto. Modeliranje prekidača omogućava modeliranje EESa u cijelosti, čak i elemente koji nisu pod naponom. Implementacija modela je predstavljena pomoću proračuna tokova snaga na prijenosnoj mreži Hrvatske.

Summary

OBJECT ORIENTED MODEL OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Keywords:

object oriented programming, power system model, state estimation, load flow, short circuit

Software for analysis and simulation of power system has traditionally been developed using procedural programming languages. Developed model is object oriented and simple, extendable and invariant to performed analysis. Complex numbers were used to facilitate generalization of models of elements, which did not prolong calculations. For matrix and vector calculations third party library was used. Measurement model allows for multiple measurements. Breaker model implementation permits modelling of whole power system, even the elements that are not powered. Example of model use was shown using load flow analysis on Croatian transmission system.

Životopis

Domagoj Peharda rođen je 1978. godine u Zagrebu, gdje je pohađao osnovnu i srednju školu. Tijekom srednje škole sudjelovao je na tri državna natjecanja u znanju iz fizike. Maturirao je 1996. godine u I. gimnaziji u Zagrebu.

Fakultet elektrotehnike i računarstva upisao je 1996. godine. Upisao je završetak studija na Zavodu za visoki napon i energetiku s naglaskom na znanstveno istraživačkom radu, tema "Procjena stanja elektroenergetskog sustava pomoću neuronskih mreža", pod vodstvom prof. dr. sc. Zdravka Hebela. Fakultet elektrotehnike i računarstva završio je 2001. godine s izvrsnim uspjehom. Nagrađen je Rektorovom nagradom za rad "Kratkoročna prognoza plinske potrošnje pomoću neuronskih mreža".

Nakon završenog fakulteta proveo je tri mjeseca na stažu u tvrtci "Energie Cités", Besançon, Francuska.

Od rujna 2001. zaposlen je kao znanstveni novak na Fakultetu elektrotehnike i računarstva. Sudjeluje u nastavi na predmetima Numerička analiza elektroenergetskog sustava i Numerički postupci u elektroenergetici.

Govori engleski i francuski jezik.