Poremećaji u radu EES-a

Zečević, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:950415

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij

POREMEĆAJI U RADU ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Diplomski rad

Filip Zečević

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD.....1
1.1.Zadatak diplomskog rada.....2

2. POGONSKA STANJA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU.....3

2.1. Stacionarno stanje.....5

2.2. Ugroženo stanje.....6

2.3. Poremećaji.....7

2.4. Havarije u elektroenergetskom sustavu.....16

3. REGULACIJA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU.....18

3.1. Primarna regulacija.....19

3.2. Sekundarna regulacija.....21

3.3. Tercijarna regulacija.....23

4.STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....24

4.1. Kutna stabilnost.....25

4.2. Naponska stabilnost.....27

5. SUSTAVI ZA OTKLANJANJE POREMEĆAJA.....31
5.1. Moderni sustavi za otklanjanje poremećaja.....31

5.2. Prikaz poremećaja u realnom sustavu.....34

6. SIMULACIJA ISPITIVANJA n-1 KRITERIJA.....40

7. ZAKLJUČAK.....52

LITERATURA.....53

POPIS SLIKA I TABLICA.....54

SAŽETAK.....56

ŽIVOTOPIS.....57

1. UVOD

Elektroenergetski sustav (EES) se sastoji od proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje električne energije. Osnovna zadaća elektroenergetskog sustava je opskrba potrošača pouzdanom i kvalitetnom električnom energijom. Elektroenergetski sustav je najveći, najneophodniji, najutjecajniji, najrasprostranjeniji od svih tehničkih sustava [1]. Upravo te karakteristike čine ga i najskupljim tehničkim sustavom [1].

Ovaj rad prikazuje elektroenergetski sustav, te poremećaje koji se u sustavu mogu pojaviti.

U prvom dijelu ovog rada opisana su pogonska stanja elektroenergetskog sustava. Elektroenergetski sustav ima s gledišta kvalitete, sigurnosti i ekonomičnosti ima tri stanja sustava: normalno, ugroženo i opasno pogonsko stanje sustava. Svako od tih stanja je opisano. Posebna važnost daje se na poremećaje koji se javljaju u sustavu. Osim o pogonskim stanjima, rad govori i regulaciji u elektroenergetskom sustavu. Postoje primarna, sekundarna i tercijarna regulacija elektroenergetskog sustava. Svaka od navedenih je i opisana u radu.

Također je obrađeno poglavlje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Općenita podjela stabilnosti je na kutnu stabilnost i naponsku stabilnost s dodatnim parametrom perioda vremena promatranja stabilnosti.

Nadalje, dani su primjeri sustava za otklanjanje poremećaja. Razvojem tehnologije dolazi je pronalaženja konkretnih tehničkih rješenja za sistemske izvedbe sustava vođenja. Jedno od tehničkih rješenja je i sistemski nadzor (eng. Wide Area Monitoring WAM) koji je i opširnije opisan.

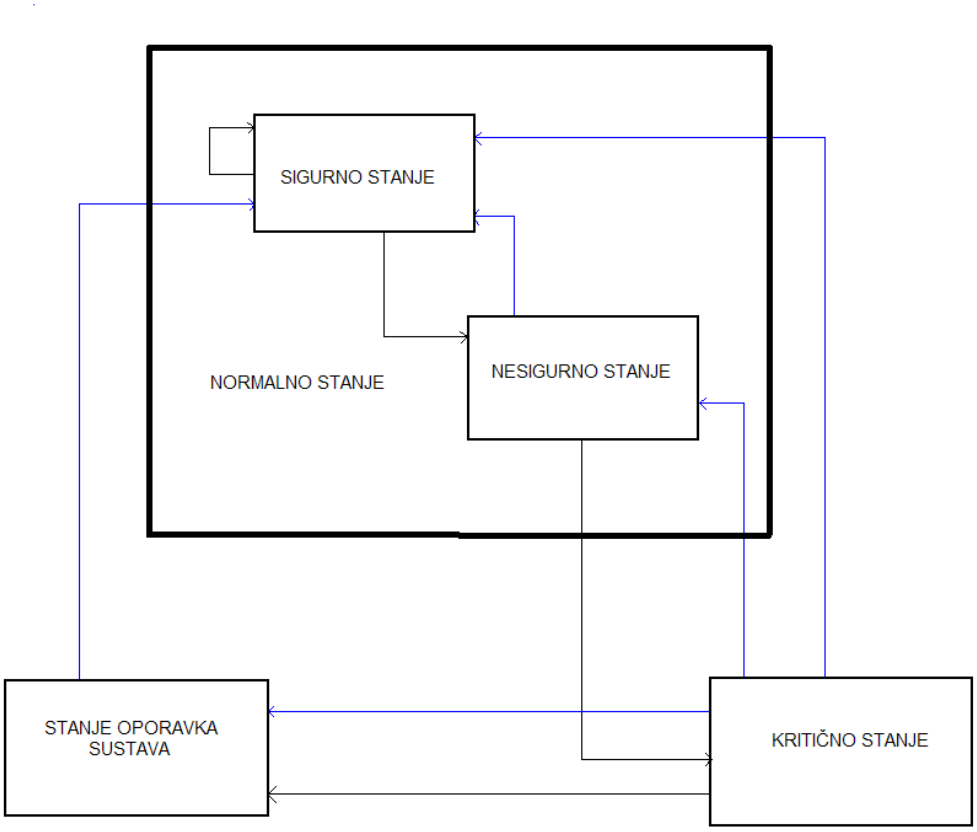
Na samom kraju rada na primjenu realne mreže odrađena je simulacija vođenja sustava. Prikazan je sustav sačinjen od 14 sabirnica. Za svaku sabirnicu isključivali smo pojedine vodove i transformatore te promatrali sigurnost sustava. Provjeravali da li je sustav, nakon ispada svakog voda i transformatora i dalje siguran, odnosno da li je ispunjen kriterij n-1.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada bio je prikazati poremećaje koji se mogu pojaviti u elektroenergetskom sustavu. Na samom poćetku rada opisan je elektroenergetski sustav te njegove karakteristike. U radu su nadalje obrađena stanja u kojima se sustav može naći. To su: normalni pogon (stacionarno stanje), ugroženo stanje te opasno stanje. Glavni dio rada bazira se na poremećajima koji se mogu pojaviti u sustavu te njihove posljedice na sustav. Odrađena je i simulacija na primjeru testnog sustava sačinjenog od 14 sabirnica. Za svaku sabirnicu isključivali smo pojedine vodove i transformatore te provjeravali kriterij sigurnosti sustava (n-1 kriterij). Osim pogonskih stanja u radu su obrađena i poglavlja regulacije u sustavu te stabilnost sustava. Na samom kraju rada dani su moderni primjeri za otklanjanje poremećaja.

2. POGONSKA STANJA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Prilikom upravljanja elektroenergetskim sustavom, pa čak i u stacionarnom stanju (normalnom pogonu) karakteristične su spore promjene koje se moraju pratiti stalnim mijenjanjem proizvedene snage [1]. Isklapanjem ili uklapanjem proizvodnih kapaciteta, velikih potrošača ili drugim nepredvidljivim događajima dolazi do prijelaznih procesa u elektroenergetskom sustavu [1]. Djelovanje dispečerskog centra treba osigurati da pogon uslijed navedenih promjena ne dođe u opasno stanje [1]. S gledišta kvalitete, sigurnosti i ekonomičnosti mogu se razlikovati tri stanja elektroenergetskog sustava: normalno, ugroženo i opasno pogonsko stanje sustava (Sl.2.1.) [1].

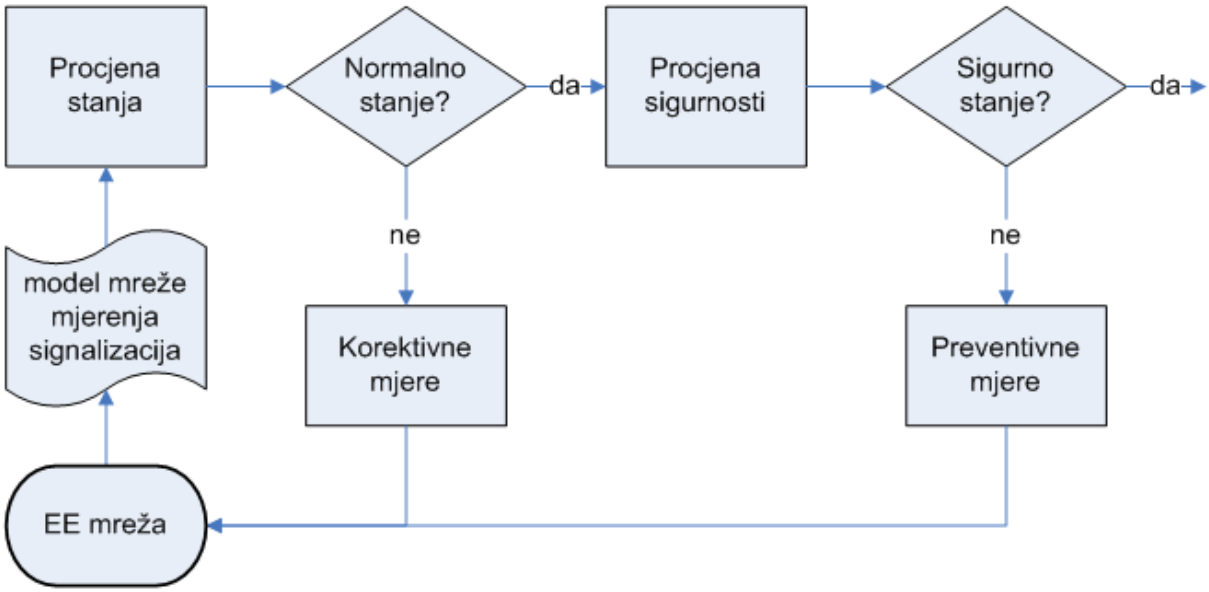


Sl.2.1 Pogonska stanja EES-a [1]

Pod normalnim stanjem smatra se sigurno i nesigurno stanje elektroenergetskog sustava. Sigurno stanje sustava je stanje kojemu sustav teži. Kada sustav dođe u nesigurno stanje, dispečeri ga

moraju vratiti u sigurno. Ukoliko ne uspiju, sustav odlazi u kritično stanje. Iz kritičnog stanja sustav se može vratiti u nesigurno stanje, pa potom u sigurno, ili ukoliko to nije moguće, sustav odlazi u stanje oporavka, nakon čega slijedi povratak u sigurno stanje.

Prema slici 2.2. možemo vidjeti da se prvo procjenom stanja utvrđuje da li je stanje normalno.



Sl.2.2 Pogonska stanja EES-a [1]

Ukoliko stanje nije normalno odrađuju se korektivne mjere sve dok stanje ne postane normalno. Kada imamo potvrdu da je stanje normalno, dolazimo do procjene sigurnosti stanja.

Ako stanje nije sigurno, vrše se preventivne mjere sve dok stanje elektroenergetske mreže ne postane sigurno [1].

2.1. Stacionarno stanje

Stacionarno stanje (normalni pogon) je stanje sustava pri kojem se sve fizikalne veličine u sustavu (napon i frekvencija) održavaju unutar dopuštenih granica [2].

Normalni pogon je stanje u elektroenergetskom sustavu kada su ispunjeni sljedeći uvjeti: svi kupci napajani, kriterij n-1 ispunjen, vrijednosti pogonskih veličina održane unutar određenih ograničenja, dostatnost regulacijskih rezervi osigurana [2].

Najvažnija zadaća elektroenergetskog sustava je da kupci imaju napajanje u svakom trenutku. Energija koju sustav predaje potrošačima mora biti raspoloživa, pouzdana i kvalitetna.

Granice unutar kojih se moraju držati fizikalne veličine sustava su propisane normama prema [2].

Jedan od parametara sustava koji se mora držati unutar određenih granica je frekvencija. Nazivna frekvencija u Europi, pa tako i u Hrvatskom elektroenergetskom sustavu iznosi 50,00 Hz. U normalnim pogonskim uvjetima frekvencija se održava u granicama od 49,95 Hz do 50,05 Hz [2]. Frekvencija u granicama od 49,5 Hz do 50,5 Hz mora biti tijekom godine održavana u 99,5 % prosjeka 10 sekundnih mjernih intervala [2]. U normalnim pogonskim uvjetima i pri radu hrvatskog sustava u interkonekciji, frekvencija u granicama od 47 Hz do 52 Hz uvijek mora biti održana [2]. U normalnim pogonskim uvjetima u izoliranom radu hrvatskog sustava, frekvencija se održava u granicama od 49,50 Hz do 50, 50 Hz [2]. Frekvencija u granicama od 49,00 Hz do 51,00 Hz mora biti održavana tijekom svakog tjedna u 95,0 % prosjeka 10 sekundnih mjernih intervala [2]. U izoliranom radu hrvatskog elektroenergetskog sustava u normalnim pogonskim uvjetima, frekvencija mora ostati u granicama od 42,5 Hz do 57,5 Hz [2].

Drugi parametar sustava koji se mora nalaziti unutar propisanih granica je napon. Nazivni naponi prijenosne mreže hrvatskog elektroenergetskog sustava iznose 400 kV, 220 kV i 110 kV. U distribuciji nazivni napon je 35 kV, 20 kV i 10 kV, dok je industrijski napon 0,4 kV a napon u kućanstvima 230 V. U normalnim pogonskim uvjetima [2]:

– u 400 kV mreži: 400 – 10% +5% = 360 - 420 kV,
– u 220 kV mreži: 220 ± 10% = 198 - 242 kV,
– u 110 kV mreži: 110 ± 10% = 99 - 121 kV.

Osim spomenutih veličina (frekvencije i napona), tu su još i faktor ukupnog harmonijskog izobličenja (THD), flikeri, faktor snage itd. Sve te veličine moraju se nalaziti unutar određenih granica u normalnom pogonu [2].

2.2. Ugroženo stanje

Smanjenje sigurnosti uslijed kvara, odnosno ispada nekog uređaja ili postrojenja dovodi sustav u ugroženo stanje (alertstate). [2] Pri tome se značajke kvalitete još nalaze unutar propisanih granica, nema ni preopterećenja a ekonomičnost pogona odstupa od optimalne vrijednosti [2].

Kod ugroženog stanja EES je unutar prihvatljivih ograničenja. Svaki kvar, ispad ili pogoršanje stanja sustava može ugroziti jedno od pogonskih ograničenja kao što su napon, tokovi snaga, uravnoteženje proizvodnje vezano uz frekvenciju. Sigurnosni kriterij n-1 tada nije ispunjen. Ne postoji dovoljno raspoloživih protumjera, ali sustav je stabilan. Povratak u normalno stanje nije izvjesno kod novog, dodatnog poremećaja, te postoji mogućnost negativnog utjecaja na susjedne elektroenergetske sustave.

S gledišta upravljanja pogonom, najvažniji je zadatak prepoznavanje ugroženog stanja. To nije jednostavno jer do pogonskog osoblja ne dolaze nikakva upozorenja, pošto su sve fizikalne veličine unutar propisanih granica.

Za pomoć pri prepoznavanju ugroženog stanja koriste se unaprijed proračunati, i u bazi pohranjeni, nizovi događaja sa postojećim stanjem u realnom vremenu i/ili sigurnosne analize u realnom vremenu.

Zadatak je dispečera, nakon što uoči ugroženo stanje, isplanirati i što brže provesti mjere za vraćanje sustava u normalno (stacionarno) stanje.

Ukoliko vraćanje sustava u normalno stanje nije moguće napraviti unutar kratkog vremena, ili ako poduzeti zahvati ne vraćaju pogon u normalno stanje, pogon i dalje ostaje u ugroženom stanju. Tada je preventivnim mjerama potrebno smanjiti na minimum vjerojatnost uspostavljanja ugroženog stanja.

2.3. Poremećaji

Poremećaj je stanje elektroenergetskog sustava u kojem, zbog djelovanja nekog kvara i/ili drugih čimbenika, dolazi do odstupanja fizikalnih veličina sustava izvan dopuštenih granica.

Poremećaji dovode elektroenergetski sustav u opasno stanje.

Kada se ne mogu zadovoljiti zahtjevi za sigurnost, ekonomičnost i kvalitetu, tada se sustav nalazi u opasnom stanju.

Dolazi do prekoračenja graničnih vrijednosti frekvencije i napona, pa i do preopterećenja. Kao posljedica opasnog stanja, odnosno teških poremećaja može doći do prestanka sinkronog pogona sustava, što može dovesti do raspadanja sustava na otoke, i u krajnjem slučaju do potpunog raspada elektroenergetskog sustava.

Najčešći poremećaji koji se javljaju u realnom elektroenergetskom sustavu, a koji mogu dovesti elektroenergetski sustav do opasnog stanja su ispadi generatora, elektrana, odnosno proizvodnje, ispadi velikih opterećenja (tereta), ispadi transformatora i vodova, pojava kratkog spoja u sustavu, pogrešno djelovanje zaštite i slično.

Ispadi generatora, odnosno proizvodnje i ispadi opterećenja dovode do promjene ravnoteže snage elektroenergetskog sustava. Te promjene ravnoteže snage mogu se svrstati u 4 skupine, ovisno o njihovom karakteru i veličini.

U prvu skupinu pripadaju potrošači malog iznosa promatranih u odnosu na ukupnu snagu sustava. Kada dođe do ispada takvih potrošača, doći će do promjene frekvencije sustava, ali samo u vrlo uskim granicama. Ta promjena frekvencije je toliko mala da neće preći prag osjetljivosti primarnih regulatora agregata, pa do regulacije niti ne dolazi.

Druga skupina su spore promjene cjelokupnog opterećenja sustava. Ovakve se promjene daju statističkim metodama unaprijed prognozirati i predvidjeti. One također ne predstavljaju prijetnju sustavu, jer su predvidljive i mogu se voznim redom opterećenja kontrolirati, tj. planiranim obustavljanjem i puštanjem u pogon agregata, odnosno koristeći sekundarnu regulaciju strojeva koji se nalaze u pogonu.

Treća skupina obuhvaća ispad iz pogona značajnog potrošača ili proizvodnog kapaciteta. Uzrok ovakvih promjena može biti kratki spoj na sabirnicama elektrane, kvar agregata, kvar cijele jedne

potrošačke mreže ili velikog koncentriranog industrijskog potrošača. Ovakve promjene su trenutne i iznenadne, te dovode do značajne promjene frekvencije. Novo uspostavljena frekvencija obično izlazi izvan propisanih granica. Kako bi se frekvencija elektroenergetskog sustava vratila unutar dozvoljenih granica, potrebno je izvršiti automatsku ili ručnu sekundarnu regulaciju.

Četvrta skupina je posljedica teških pogonskih poremećaja koji dovode do nedostatka raspoložive snage u sustavu. Do nedostatka raspoložive snage dolazi ako ispadne toliko izvora da je zbroj maksimalnih snaga preostalih proizvodnih jedinica znatno ispod ukupnog potrošačkog zahtijeva. Do ovakvog poremećaja može doći i u ograničenim dijelovima sustava ako se osnovna visokonaponska mreža raspadne na asinkrono radeće dijelove koji su međusobno neovisni. U tom slučaju prvo reagira primarna regulacija temeljena na zajedničkoj karakteristici sustava, aktivirajući punu rotirajuću rezervu. Preostali dio nedostatka snage u sustavu ne može se pokriti od strane izvora, te dolazi do brzog opadanja frekvencije. Vraćanje frekvencije u normalno stanje u ovakvom slučaju može se uspostaviti samo isključivanjem dijela potrošača.

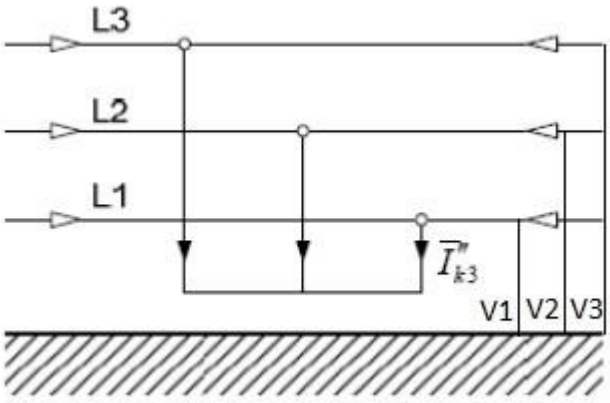
Osim ispada generatora i tereta, ispadi transformatora i vodova također znatno utječu na prilike u elektroenergetskom sustavu. Kada dođe do ispada vodova ili transformatora, dolazi do ispada pojedinih dijelova mreže. Samim time, dolazi do ispada potrošača ili proizvodnih pogona, ovisno o nastanku ispada vodova. Ispad potrošača ili proizvodnih pogona utječu na promjenu frekvencije i napona, kao što smo prethodno opisali.

Visokonaponski vodovi također mogu utjecati i na promjene naponskih prilika i tokova jalovih snaga u sustavu. Ukoliko je visokonaponski vod slabo opterećen ili neopterećen on djeluje kao kondenzator i proizvod veliku količinu induktivne snage koja se pojavljuje u mreži. Posljedica toga može biti nedopušteno povišenje napona u pojedinim točkama u mreži. Najpovoljnije rješenje ovog problema je kada proizvedenu jalovu snagu mogu preuzeti poduzbuđeni generatori u elektranama. Zbog daleke (nepovoljne) lokacije elektrana ili ograničene mogućnosti da elektrane rade u poduzbuđenom stanju to najčešće nije moguće. Tada se u određenim točkama mreže priključuju prigušnice koje će kompenzirati proizvedenu jalovu snagu. Osim neopterećenog ili slabo opterećenog voda, opasnost sustavu predstavlja i preopterećeni vodovi. Ukoliko je vod preopterećen mora imati osiguranu dovoljnu količinu induktivne jalove snage kako ne bi došlo do prevelikog gubitka napona ili čak do sloma napona i ispada sustava. Takvi nepovoljni uvjeti se kompenziraju tako što se u mreži izgrade uređaji za kompenzaciju. Uređaji koji se tada ugrađuju su kondenzatorske baterije. Pošto je njihova brzina reagiranja često

nedovoljno brza za promjene potrošnje, ugrađuju se sinkroni kompenzatori odgovarajućih snaga koji su skuplji od kondenzatorskih baterija, ali prednost im je brza i kontinuirana regulacija.

Sljedeći poremećaj koji dovodi sustav u opasno stanje je kratki spoj. Prilikom pojave kratkog spoja sustavom poteče vrlo velika struja koju gasimo pomoću visokonaponskih prekidača. Postoje različiti oblici kratkog spoja koji se mogu pojaviti u elektroenergetskom sustavu. To su: trofazni kratki spoj (Sl.2.3.), dvofazni kratki spoj (Sl.2.4.), dvofazni kratki spoj sa zemljom (Sl.2.5.) i jednofazni kratki spoj (Sl.2.6.) [3].

Trofazni kratki spoj:



Sl.2.3 Trofazni kratki spoj [3]

Strujne i naponske prilike trofaznog kratkog spoja:

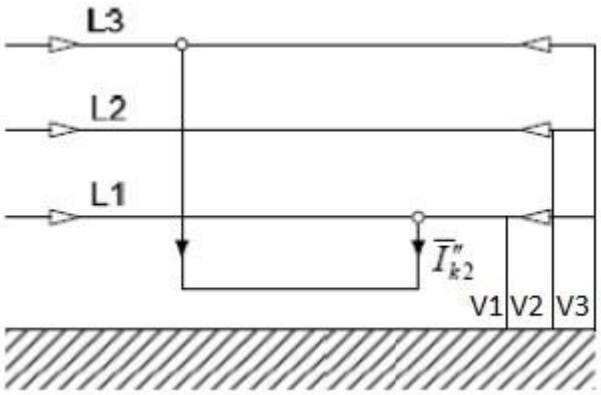
$$\overline{V}_1 = \overline{V}_2 = \overline{V}_3 = 0 \qquad (2\text{-}1)$$

$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2 = \overline{I}_3 = 0 \qquad (2\text{-}2)$$

Trofazni kratki spoj je poremećaj u kojem su sve tri faze međusobno spojene. Vidimo da tada dolazi do pada napona na 0 V u sve tri faze (Sl.2.3).

Dvofazni kratki spoj:

Prilikom dvofaznog kratkog spoja dolazi do međusobnog spoja dvije faze. Naponi tih faza se izjednače, dok struja treće faze padne na 0 (Sl.2.4).



Sl.2.4 Dvofazni kratki spoj [3]

Strujne i naponske prilike dvofaznog kratkog spoja:

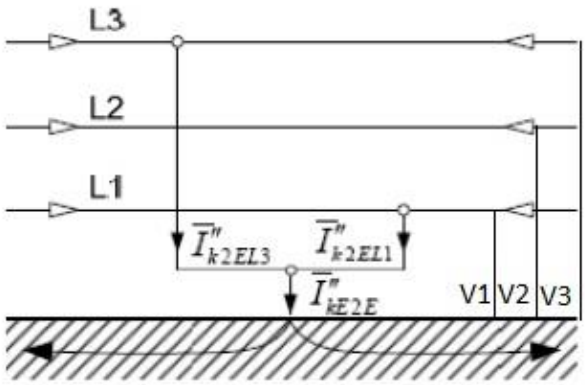
$$\overline{V}_1 = \overline{V}_2 \qquad (2\text{-}3)$$

$$\overline{I}_3 = 0 \qquad (2\text{-}4)$$

$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2 = 0 \qquad (2\text{-}5)$$

Dvofazni kratki spoj sa zemljom:

Na slici 2.5 prikazan je dvofazni kratki spoj s zemljom.



Sl.2.5 Dvofazni kratki spoj sa zemljom [3]

Strujne i naponske prilike dvofaznog kratkog spoja sa zemljom:

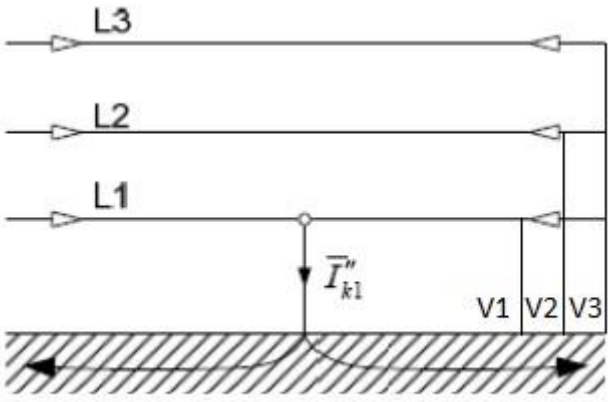
$$\overline{V}_1 = \overline{V}_2 = 0 \qquad (2\text{-}6)$$

$$\overline{I}_3 = 0 \qquad (2\text{-}7)$$

Prilikom dvofaznog kratkog spoja sa zemljom naponi faza koji su zahvaćeni kratkim spojem padaju na 0.

Jednofazni kratki spoj:

Prilikom jednofaznog kratkog spoja napon faze na kojoj se dogodio kratki spoj pada na 0, kao i struja preostale dvije faze (Sl.2.6.).



Sl.2.6 Jednofazni kratki spoj [3]

Strujne i naponske prilike jednofaznog kratkog spoja:

$$\overline{V}_1 = 0 \qquad (2\text{-}8)$$

$$\overline{I}_2 = \overline{I}_3 = 0 \qquad (2\text{-}9)$$

Posebna vrsta jednofaznog kratkog spoja je zemljospoj. On predstavlja posebnu vrstu kvara u mrežama koje nemaju direktno uzemljenje. Uzroci zemljospoja uglavnom su isti kao i kod jednofaznog kratkog spoja, ali posljedice su im različite. U slučaju zemljospoja nemamo uvijek strujni krug koji je galvanski zatvoren, pa su električne prilike drugačije, i što se tiče struje i što se tiče napona [3].

Stoga zemljospoj kao vrstu kvara moramo posebno razmatrati, jer predstavlja posebnu problematiku mreža srednjeg napona s neuzemljenim zvjezdištem i sa zvjezdištem uzemljenim preko malog djelatnog ili induktivnog otpora [3].

Parametar koji također može dovesti pogon u ugroženo stanje je i pogrešno djelovanje zaštite. Prema [3] zadatak relejne zaštite je maksimalno smanjiti posljedice neželjenih pojava koje se pojavljuju u elementima elektroenergetskog sustava, odnosno konstantno nadzirati karakteristične veličine objekta kojeg štit. U slučaju opasnog pogonskog stanja ili kvara automatski treba poduzeti sve mjere kako b se kvar izbjegao, a posljedice neželjenog stanja smanjile na minimum. Kako bi pouzdan i siguran rad elektroenergetskog sustava bio omogućen, potrebno je otkriti i izolirati element sustava koji je u kvaru ili opasnom pogonskom stanjuod ostatka sustava u što kraćem vremenu. Upravo zbog navedenih razloga na zaštitu se stavljaju osnovni zahtjevi: brzina djelovanja, osjetljivost, selektivnosti pouzdanost [3].

Najvažniji od ova četiri kriterija koji utječe na pogonsko stanje elektroenergetskog sustava je pouzdanost. Pouzdanost rada relejne zaštite je značajan kriterij jer on govori o kvaliteti djelovanja same zaštite. Releji dugo vrijeme mogu biti u stanju mirovanja, a pri pojavi kvara moraju pouzdano odraditi to je vrlo važan kriterij koji treba biti ispunjen. U slučaju ne reagiranja zaštite ili njenog nepotrebnog djelovanja posljedice za sustav mogu biti katastrofalne. Pouzdanost zaštite također ovisi i o nizu vanjskih činitelja kao što su pouzdanost mjernih transformatora, pouzdanost napajanja pomoćnim naponima, pouzdanost sekundarnih strujnih krugova, pouzdanost samog prekidača i slično.

Pored toga što relejni uređaji mogu imati visoku pouzdanost u praksi se mora zadovoljiti i kriterij rezervnog djelovanja zaštite, tj. zalihnosti. Rezervna zaštita treba biti smještena na drugom mjestu u odnosu na glavnu zaštitu i zbog toga se i naziva „backup protection“.

Ukoliko bilo koji od navedenih zahtijeva zakaže, može doći do dovođenja sustava u opasno stanje, pa čak i do djelomičnog ili potpunog raspada sustava.

U svrhu ukidanja opasnog stanja, odnosno vraćanja sustava u normalno stanje ukoliko je to moguće, ili ako nije onda u ugroženo stanje, potrebne su brze, odlučne i dobro utemeljene intervencije upravljačkog osoblja (dispečera).

Ukoliko se vraćanje pogona u normalno, odnosno ugroženo stanje ne može riješiti u kratkom vremenu, tj. ako intervencije pogonskog osoblja ne postignu očekivane rezultate, potrebno je poduzete korektne zahvate za sprečavanje proširenja poremećaja.

Za uspješnu provedbu zahvata vraćanja, korekcije i prevencije neizostavno je da pogonskom osoblju na raspolaganju stoje točne informacije koje opisuju stvarno stanje sustava.

Kako bi se EES zaštitio od velikih poremećaja, mora postojati tzv. Plan obrane elektroenergetskog sustava od velikih poremećaja. Osnovna zadaća Plana obrane od velikih poremećaja je osigurati zaštitne procedure koje onemogućuju narušavanje sigurnog i stabilnog pogona elektroenergetskog sustava [5].

Plan obrane od poremećaja obuhvaća procedure sustava zaštite od kvarova u sustavu, prevenciju kvarova i lokalizaciju koja je u skladu s pravilima koje daje Operator prijenosnog sustava. Poremećaji koji se pojave u jednom elektroenergetskom sustavu ne smiju se širiti na susjedne sustave koji rade u sinkronizmu. Operator prijenosnog sustava odgovoran je za stabilan i pouzdan rad elektroenergetskog sustava, te zajedno s drugim korisnicima mreže donosi i usklađuje Plan obrane. Mjera iz Plana obrane moraju se pridržavati svi korisnici prijenosnog sustava.

Pored zahtijeva danih Mrežnim pravilima Plan obrane sadrži i pripadne dodatke [5]:

- Plan podfrekvencijskog rasterećenja

- Plan hitnog rasterećenja

- Plan uspostave elektroenergetskog sustava

- Popis kompenzacijskih uređaja instaliranih u mreži

- Popis transformatora 400/X kV i 220/110 kV s regulacijskim značajkama instaliranih u prijenosnoj mreži

- Popis regulacijskih značajki (pogonskih karti) generatora instaliranih u pogonskoj mreži

Plan obrane i njegovi pripadni dodaci izrađeni su u skladu s Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava u kojima se ukazuje na odgovornost Operatora prijenosnog sustava za izradu Plana obrane [5].

Izmjene i dopune plana ovise o [5]:

- razvoju proizvodnog dijela elektroenergetskog sustava
- razvoju prijenosnog sustava
- izmjeni standarda za pogon i razvoj prijenosnog sustava
- povezivanju novih korisnika na prijenosnu mrežu

U slučaju da se u planskom razdoblju predviđa bitna promjena u kapacitetima proizvodnje, kapacitetima prijenosne mreže ili u potrošnji operator prijenosnog sustava mora provjeriti postojeći Plan obrane i pripadne dodatke.

U sklopu navedenih ispitivanja potrebno je provjeriti sljedeće:

- sudjelovanja korisnika prijenosne mreže i objekata Operatora prijenosnog sustava u ponovnoj uspostavi elektroenergetskog sustava nakon potpunog ili djelomičnog raspada s posebnom naznakom na procjenu postoji li dovoljan broj jedinica proizvodnje s mogućnošću pokretanja iz beznaponskog stanja i otočnog pogona, te
- mogućnost rasterećenja potrošnje (ručnog ili automatskog)

Ako analiza za slučaj velikih poremećaja pokaže ugroženost elektroenergetskog sustava, u plan razvoja prijenosnog sustava unose se odgovarajuće preporuke i upozorenja [5].

Pouzdanost rada EES-a ovisi o ispravnosti opreme u postrojenjima samog elektroenergetskog sustava te sposobnostima i kvalifikacijama pogonskog osoblja za upravljanje pojedinim njegovim dijelovima. Zato je nakon svakog poremećaja obavezna provedba ispitivanja procedura i postavki uređaja navedenih u Planu obrane [5].

Ukoliko ipak do poremećaja dođe, elektroenergetski sustav mora se vratiti u normalno stanje. Kako bi se sustav vratio u normalan (stacionarni) pogon, provodi se Plan uspostave elektroenergetskog sustava [5].

Plan uspostave elektroenergetskog sustava daje smjernice za koordinirano djelovanje Operatora prijenosnog sustava, te prioritete za ponovne uspostave elektroenergetskog sustava u slučaju poremećaja ili raspada sustava. Operator prijenosnog sustava ima odgovornost, da u suradnji sa korisnicima mreže prijenosa, izradi i ažurira plan uspostave [5].

Uspostava EES-a obuhvaća sljedeće podatke:

- Povezivanje susjednih elektroenergetskih sustava

- Uspostava tzv. otočnih elektroenergetskih sustava unutar kojih se elektrane mogu pokretati beznaponski

- Napajanje lokalnih opterećenja iz ovih elektrana

- Sinkronizaciju, korak po korak, i međusobno povezivanje otočnih elektroenergetskih sustava

- Potpuno povezivanje cijelog elektroenergetskog sustava uključujući i veza sa susjednim elektroenergetskim sustavima

Plan uspostave sadrži osnovne scenarije koji obuhvaćaju većinu uobičajenih raspada ili poremećaja koji se periodički ažuriraju i nadopunjuju.

Kod izrade Plana uspostave Operator prijenosnog sustava obavezan je, u suradnji s proizvođačima električne energije, planirati dovoljan broj jedinica proizvodnje koje pružaju pomoćnu uslugu otočnom radu i beznaponskom pokretanju.

Svaki korisnik mreže prijenosa koji sudjeluje u Planu uspostave može predlagati dopune i izmjene plana.

Dijelovi plana uspostave moraju se usuglasiti sa susjednim operatorima.

U nastavku je prikazan tijek uspostave elektroenergetskog sustava.

Uspostava elektroenergetskog sustava započinje odmah nakon provedenih mjera obrane sustava od velikih poremećaja, odnosno nakon stabiliziranja ili potpunog raspada elektroenergetskog sustava. Proces uspostave započinje pregledom stanja u kojem se sustav nalazi. Pouzdana i brza razmjena informacija temelj je uspostave elektroenergetskog sustava. Prije ponovne uspostave mora se odrediti uzrok poremećaja i predvidjeti vrijeme završetka uspostave.

Nacionalni dispečerski centar (NDC) kontrolira samu uspostavu.

Kada poremećaj obuhvati područje odgovornosti Operatora prijenosnog sustava, te jednog ili više susjednih Operatora prijenosnog sustava mora se odrediti dva voditelja:

- Voditelja frekvencije, koji će samostalno regulirati i održavati frekvenciju,

- I voditelja rezonancije, koji koordinira voditelje frekvencije prilikom spajanja sa susjednim sinkronim područjima.

2.4. Havarije u elektroenergetskom sustavu

Havarije mogu dovesti do djelomičnog ili potpunog raspada elektroenergetskog sustava. Kada dođe do raspada u sustavu, to znači da je došlo od nestanka napona u cijelom elektroenergetskom sustavu ili u njegovom velikom dijelu. Posljedica toga je gubitak tereta (opterećenja), i/ili ispadi proizvodnih jedinica sa mreže, donosno dolazi do njihovog prijelaza u rad u praznom hodu i napajanje vlastite potrošnje.

Prije nego što dođe do totalnog raspada sustava, u sustavu dolazi do postupnog progresivnog sloma, dok je dinamika ponašanja često prebrza za bilo kakvu odluku operatora prijenosnog sustava (dispečera), ručnu radnju ili koordinaciju sa susjednim operatorima. Upravo zbog spomenute prebrze dinamike sustava operator prijenosnog sustava koristi automatske uređaje kako bi zaštitio opremu, te integritet mreže i njenih dijelova. Sve to dispečeri rade kako b u što kraćem vremenu i što uspješnije uspostavili normalno stanje elektroenergetskog sustava.

U cilju kasnije brže i uspješnije uspostave elektroenergetskog sustava operator prijenosnog sustava (dispečer) može poduzeti hitne lokalne radnje i akcije koje će dovesti do sprječavanja uništenja opreme. Ponekad takve lokalne akcije i radnje mogu privremeno narušiti trenutnu sigurnost sustava.

Ovisno o vrsti raspada sustava (djelomični ili potpuni raspad) slom sustava zaustavlja se u nekoj međufazi ili u završnoj fazi. Nakon zaustavljanja sloma, operator prijenosnog sustava jasno može identificirati dijelove mreže bez napajanja, topologiju mreže, broj isključenih vodova i proizvodnih jedinica, kao i dijelove sustava koji su ostali u otočnom pogonu, te proizvodne jedinice koje rade na vlastitu proizvodnju.

Kako je već spomenuto, havarije, odnosno djelomični i potpuni raspad elektroenergetskog sustava dovod do otočnog pogona. Otočni pogon je stanje sustava u kojem proizvodna jedinica napaja lokalne potrošače u izdvojenom dijelu mreže, iako napajanje sa strane mreže nije prisutno. Postoji nekoliko razloga zbog kojih takav pogon nije poželjan. Glavni razlog je taj što napon i frekvencija dijela mreže koji se nalazi u otočnom pogonu mogu doći izvan dopuštenih granica, što nam daje neželjenu kvalitetu električne energije na priključcima kupaca, te dovodi do eventualnih kvarova njihove opreme. Osim toga, kada sustav ostane u otočnom pogonu,može doći do gubitka sinkronizma između pogona koji radi u otočnom načinu rada i ostatka mreže. Ponovni uklop od strane mreže na nesinkronizirani dio sustava pod naponom može dovesti do velikih kvarova poput raspada generatora i slično.

Kada dođe do kvara u sustavu dolazi do automatskog ponovnog uklopa (APU). Njegova svrha je uklanjanje prolaznog kvara. Prilikom automatskog ponovnog uklopa doći će do pojave električnog luka, koji se u ovom slučaju neće ugasiti ako je napajan od strane izvora u otočnom radu.

I na kraju, postoji velika opasnost za radnike koji bi, nesvjesni da je dio mreže pod naponom iako je odspojen od ostatka mreže, mogli doći u pogibelj pri radu.

3. REGULACIJA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Uslijed kvara ili poremećaja dolazi do odstupanja karakterističnih veličina izvan dopuštenih granica. Kako bi se vratile unutar dozvoljeni granica koristi se regulacija u elektroenergetskom sustavu.

U elektroenergetskom sustavu frekvencija je mjerilo ravnoteže proizvodnje i potrošnje. Dok su snage proizvodnje i potrošnje jednake, frekvencija ima stalan iznos. Kada snage proizvodnje i potrošnje nisu jednake frekvencija pada ili raste sve do ponovnog uspostavljanja ravnoteže. Osim u određenim slučajevima, kao što je sustavno rasterećenje, snaga potrošnje sustava se ne regulira. Kako bi frekvencija u sustavu ostala nepromijenjena moramo regulirati snagu proizvodnje. Pošto znamo da se potrošnja stalno mijenja, cilj regulacije je slijediti snage potrošnje snagama proizvodnje [6].

Regulacija frekvencije izvršava se pomoću regulacijskih pričuva. Regulacijska pričuva je nekorišteni, raspoloživi kapacitet djelatne snage. Postoje rotirajuće i ne rotirajuće pričuve. Rotirajuća pričuva dobiva se kao razlika između maksimalne moguće snage i trenutne radne snage. Rotirajuća pričuva je zapravo elektrana, agregat, regulacijsko područje ili interkonekcija. Rotirajuću pričuvu čine pogonski agregati koji u kratkom vremenu (unutar 10 min) mogu svoju snagu povećati na zahtijevanu razinu. Za razliku od rotirajuće pričuve, ne rotirajuća pričuva su agregati koji se ne nalaze u pogonu, tj. nisu spojeni na mrežu, ali mogu biti dostupni kroz neko određeno vrijeme.

Postoje tri vrste regulacije: 1. Primarna regulacija

2. Sekundarna regulacija

3. Tercijarna regulacija

3.1. Primarna regulacija

Primarna regulacija frekvencije obuhvaća djelovanje brzine vrtnje turbinskih regulatora. Do primarne regulacije dolazi kada frekvencija odstupa od zadane ili nazivne frekvencije. Uzrok frekvencijskog odstupanja je neravnoteža između potrošnje i proizvodnje sinkrono povezane mreže. Prilikom primarne regulacije sve proizvodne jedinice moraju biti obuhvaćene [6].

Pri proizvodnji električne energije u elektroenergetskom sustavu sudjeluju razne vrste elektrana poput plinskih elektrana, hidroelektrana, termoelektrana, nuklearnih elektrana, te u zadnje vrijeme sve više obnovljivi izvori (vjetroelektrane i solarne elektrane). No prilikom regulacije frekvencije ne sudjeluju sve elektrane u svim razinama regulacije. U primarnoj regulaciji frekvencije sudjeluju sve vrste elektrana osim vjetroelektrana. Razlog njihovog izostavljanja u regulaciji frekvencije je stohastička priroda vjetra. Nuklearne elektrane najčešće proizvode stalnu snagu blizu svog maksimuma, dok plinske elektrane uglavnom koriste za pokrivanje vršnih vrijednosti u dijagramu opterećenja. Najčešće se analizira utjecaj hidroelektrana i termoelektrana prilikom proračunavanja regulacijske frekvencije u elektroenergetskom sustavu.

U daljnjem tekstu bit će objašnjeno djelovanje primarnih regulatora brzine vrtnje turbine.

Kao što je već rečeno, poremećaji unutar samog sustava uzrokuju neravnoteže snaga između proizvodnje i potrošnje što za rezultat ima odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti. Primarna regulacija odmah djeluje nakon pojave odstupanja kako bi stabilizirala sustav ponovnom uspostavom ravnoteže snaga. Ulazni signal primarnog regulatora je izmjerena vrijednost brzine vrtnje, odnosno frekvencije sustava. Regulator primarne regulacije detektira odstupanje frekvencije od zadane vrijednosti, te na osnovu toga odstupanja mijenja snagu proizvodnje elektrana sve dok se ponovo ne uspostavi ravnoteža snage proizvodnje i snage potrošnje u interkonekciji. Primarna regulacija ostvaruje se promjenom količine pogonskog sredstva (ovisno o tipu elektrane to može biti voda, para, gorivo) do koje dolazi zbog regulatorskog djelovanja. Regulator djeluje na ventile, pumpe, mlaznice ili lopatice. Ukratko, elektrane mijenjaju vlastitu proizvodnju pod utjecajem primarne regulacije za iznos snage koji je jednak iznosu uzroka neravnoteže, samo suprotnog predznaka.

Svaka proizvodna jedinica sustava ima svoj primarni regulator frekvencije. Hidroelektrane i termoelektrane imaju regulator brzine vrtnje s dvojakom funkcijom: u izoliranom radu generatora frekvencija sustava se regulira regulatorima brzine vrtnje, dok u radu generatora na

mreži pomoću regulatora brzine vrtnje kontrolira se proizvedena snaga generatora i sudjeluje se u održavanju frekvencije sustava.

Iako svaka proizvodnja ima svoj primarni regulator, regulacijska područja međusobno se potpomažu unutar interkonekcije. Načelo solidarnosti kaže da ukoliko dođe do poremećaja u sustavu, svi primarni regulatori u proizvodnim jedinicama koji sudjeluju u regulaciji u cijeloj interkonekciji moraju djelovati trenutačno. Koeficijent doprinosa kaže koliko svako regulacijsko područje doprinosi primarnoj regulaciji [6].

Prema jednadžbi (3-1) koeficijent doprinosa za pojedino područje regulacije izračunava se kao omjer proizvodnje regulacijskog područja i ukupne proizvodnje u interkonekciji [6]:

$$C_{RP} = \frac{E_{RP}}{E_{INTERKONEKCIJA}} = \frac{E_{RP}}{\Sigma E_{RP}} \quad (3\text{-}1)$$

Razlikujemo dvije izvedbe primarnih regulatora: elektro-hidrauličke i mehaničko-hidrauličke regulatore. Centrifugalni regulator je najjednostavniji primjer primarnog regulatora. Općenito mehanički regulatori spadaju u regulatore proporcionalnog tipa (P). Prilikom upravljanja procesima koji imaju statičko vladanje pomoću regulatora P tipa doći će do pojave pogreške u stacionarnom stanju u slučaju skokovite promjene poremećajne ili upravljačke veličine. Upravo iz tog razloga i nakon djelovanja primarne regulacije imamo frekvencijsko odstupanje od nazivne vrijednosti. Noviji elektro-hidraulički primarni regulatori su PI ili PID (proporcionalno-integracijsko-derivacijskog) tipa. Iako pri njihovom korištenju neće doći do pojave pogreške u stacionarnom stanju pri skokovitoj promjeni poremećajne ili upravljačke veličine oni se, kako bi se osiguralo postojanje pogreške karakteristične za djelovanje P regulatora, proširuju sa dodatnom povratnom vezom. Razlog dodatne povratne veze je da kada bi primarni regulatori bili podešeni da u potpunosti kompenziraju frekvencijsko odstupanje sustava, postojala bi mogućnost pojavljivanja dodatnih oscilacija koje bi mogle dovesti sustav do nestabilnosti. Upravo te oscilacije interkonekcijom istovremenog djelovanja velikog broja primarnih regulatora uzrokovale bi odstupanje frekvencije. U regulacijskom području koje je izolirano, za djelovanje primarne regulacije, minimalno jedan primarni regulator mora imati čisto P djelovanje, dok za

djelovanje primarne regulacije u interkonekciji svi primarni regulatori moraju imati P djelovanje. U protivnom bi često bili u ograničenjima, budući da zasebni regulator ne može regulirati frekvenciju cijele interkonekcije.

3.2. Sekundarna regulacija

Zadaća sekundarne regulacije je kompenzaciju poremećaja koji su uzrokovali odstupanje frekvencije. Sekundarna regulacija mora promijeniti snagu proizvodnje samo u području u kojemu je poremećaj nastao i tako vratiti sustav u stanje u kojemu se nalazio prije poremećaja, odnosno vratiti frekvenciju sustava na nazivnu (zadanu) vrijednost. Snaga promjene proizvodnje koju postiže sekundarna regulacija jednaka je neravnoteži snage koja je uzrokovala poremećaj, samo suprotnog smjera. Regulacijske elektrane su elektrane koje su uključene u sekundarnu regulaciju.

Unutar interkonekcije, nisu sva regulacijska područja u mogućnosti proizvesti snagu dovoljnu za pokrivanje vlastite proizvodnje. Ali isto tako postoje i regulacijska područja koja proizvode više snage nego što im je potrebno. Na temelju predviđanja proizvodnje i potrošnje u području, moguće je unaprijed znati može li se u području proizvesti više ili manje snage od potrebne. Ukoliko područje ne proizvodi dovoljno snage za pokrivanje vlastite potrošnje, ono ugovara razmjenu potrošnje s područjima koja mogu proizvesti više od svojih potreba. Postoji plan razmjene za uvoze i izvoze snage u regulacijskom području. Planirana se razmjena proračunava jednom dnevno, te se njome određuje snaga razmjene svakog sata sljedećeg dana. Planirana razmjena ugovara se između susjednih regulacijskih područja. Kada dođe do promjene planirane razmjene snage, one se ne odvijaju naglo, već linearno po rampi koja počinje 5 minuta prije punog sata a završava 5 min nakon punog sata. Kada interkonekcija radi u normalno pogonu, odnosno bez poremećaja, tokovi snaga između područja slijede unaprijed dogovoreni plani.

Pojavom poremećaja u jednom regulacijskom području, dolazi do primarne regulacije koja mijenja proizvodnju cijele interkonekcije. Također dolazi i do promjene potrošnje te dolazi do uspostavljanja ravnoteže snaga na frekvenciji različitoj od nazivne. Procesom uravnoteživanja mijenjaju se i tokovi snaga između područja. Zbog već prije spomenutog načela solidarnosti, u interkonekciji sva područja potpomažu području u kojem je nastao poremećaj. To čine tako što

mu daju ili oduzimaju dio snage, ovisno o smjeru neravnoteže uzrokovane poremećajem. Zbog tog djelovanja tokovi snaga postaju različiti od ugovorenih.

Odstupanje snage razmjene regulacijskog područja od ugovorene definira se kao [6]:

$$\Delta P_{RAZ} = P_{RAZ} - P_{RAZ0} \quad (3\text{-}2)$$

gdje je P_{RAZ} stvarna vrijednost snage razmjene sa susjednim područjima regulacije, a P_{RAZ0} ugovorena vrijednost snage razmjene sa susjednim područjima regulacije. Dogovoreno je da razmjena snage regulacijskog područja kod sekundarne regulacije ima pozitivan predznak kada područje izvozi snagu, odnosno negativan predznak kada uvozi snagu. Odstupanjem snage razmjene od ugovorene (planirane) razmjene narušava se tržišno načelo trgovine između susjednih područja. Sekundarna regulacija također ima zadaću vratiti snagu razmjene na ugovorenu vrijednost.

Kako se sekundarnom regulacijom istodobno regulira snaga razmjene područja i frekvencija interkonekcije, ona se naziva i sekundarnom regulacijom frekvencije i djelatne snage razmjene. Sekundarna regulacija može regulirati samo frekvenciju interkonekcije ili samo snagu razmjene ukoliko je to potrebno, ali se rijetko koristi kao takva.

Koristeći arhivske, statističke i iskustvene podatke moguće je predvidjeti potrošnju u regulacijskom području za svaki dan unaprijed. Dijagramom opterećenja osigurava se proizvodnja potrebne snage.

Svako regulacijsko područje najčešće sadrži jedan sekundarni regulator. Postoje i slučajevi kad je jedan sekundarni regulator zadužen za više područja regulacije. Ta područja tada čine regulacijski blok s centraliziranom regulacijom. Osim centraliziranih, postoje još i drugačije organizirani kontrolni blokovi poput hijerarhijski decentraliziranog i pluralistički decentraliziranog kontrolnog bloka.

Sekundarna regulacija djeluje na sljedeći način: algoritam sekundarne regulacije proračunava potrebnu promjenu vlastite proizvodnje kako bi se frekvencija sustava i snaga razmjene regulacijskog područja održale na ugovorenim vrijednostima. Ako u regulacijskom području postoji više od jedne regulacijske elektrane, potrebno je proračunati iznos željene promjene proizvodnje djelatne snage rasporediti na prikladan način među njima.

3.3. Tercijarna regulacija

Tercijarna regulacija obuhvaća svaku ručnu ili automatsku korekciju planiranog rada jedinica proizvodnje. Cilj tercijarne regulacije je osiguravanje potrebne pričuve sekundarnoj regulaciji.

Tercijarna regulacija obavlja se:

- uključenjem elektrana koje se lako pokreću
- upravljanjem potrošnjom
- promjenom plana razmjene ili
- preraspodjelom snage regulacijskih elektrana

Zadatak tercijarne regulacije je optimalna raspodjela snage sekundarne regulacije na regulacijske elektrane. To se postiže tako što se u sekundarnom regulatoru mijenjaju koeficijenti razdiobe pojedinih proizvodnih jedinica.

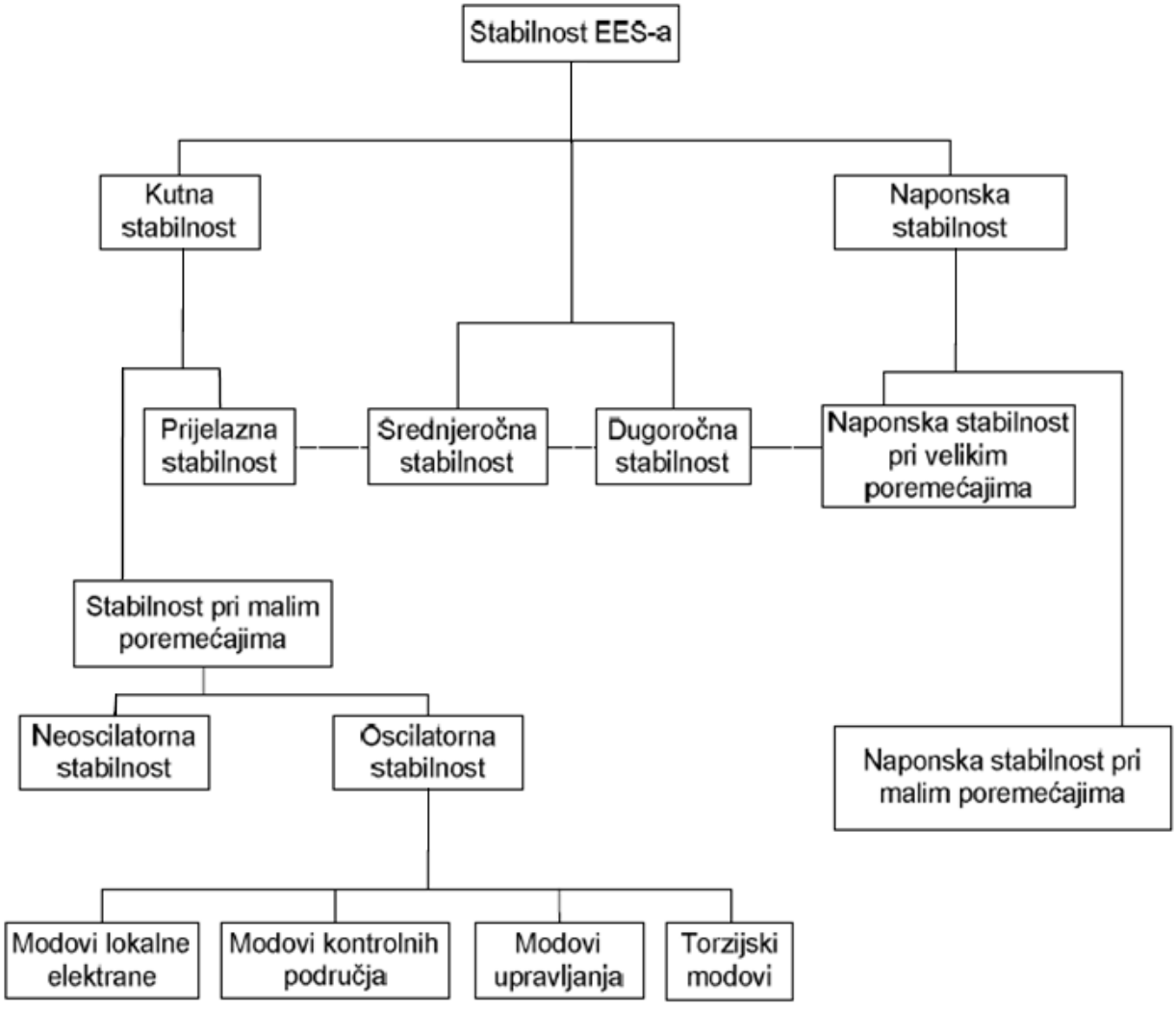
Tercijarna regulacijska pričuva može se podijeliti na sporu i brzu. Brza tercijarna regulacijska pričuva angažira se u svrhu osiguravanja sekundarne regulacijske pričuve koja vrlo je zahtijevana. Još se naziva i minutnom pričuvom. Tercijarna pričuva mora moći pokriti ispad najveće jedinice proizvodnje u sustavu. Pričuva ne mora biti osigurana iz vlastitih sredstava područja regulacije, već se može ugovoriti i s drugim područjima regulacije u interkonekciji. Spora tercijarna pričuva služi za optimiziranje tokova snaga u mreži te optimiziranje proizvodnje u sustavu. Osim navedenih uloga tercijarne regulacije, ona može služiti i za smanjenje mrežnih zagušenja. To se obavlja preraspodjelom proizvodnje u regulacijskom području.

Nadziranjem raspoložive sekundarne regulacijske pričuve tercijarna regulacija prati rad sekundarne regulacije. Ukoliko je potrebno vratiti sekundarnu regulacijsku pričuvu unutar zadanog opsega aktivira se tercijarna pričuva. Pri tome se mora voditi računa da se djeluje u skladu sa ekonomskim i sigurnosnim kriterijima [7].

4. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Stabilnost je, kada se govori o elektroenergetskom sustavu, svojstvo sustava ili njegovog dijela koji ga čini sposobnim razviti među svojim elementima povratne sile veće ili jednake silama poremećaja uspostavljajući ponovno ravnotežno stanje među elementima [8].

Općenita podjela stabilnosti je na naponsku stabilnost i kutnu stabilnost s periodom vremena promatranja kao dodatnim parametrom stabilnosti (Sl.4.1.)

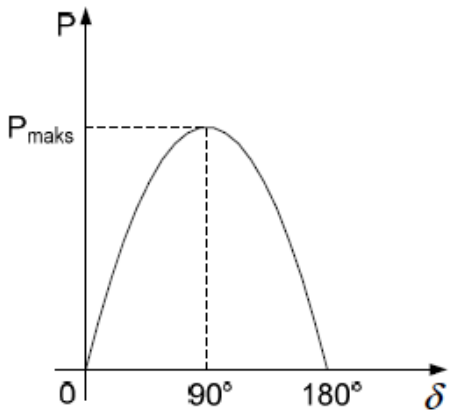


Sl.4.1 Klasifikacija stabilnosti EES [8]

Kutna stabilnost općenito nam govori o ravnoteži momenata sinkronih generatora te o njihovoj sposobnosti ostanka u sinkronizmu. Kutnu stabilnost dijelimo na prijelaznu stabilnost te stabilnost pri malim poremećajima. Prijelazna kutna stabilnost odnosi se na velike poremećaje. Kutna stabilnost pri malim poremećajima može biti oscilatorna i neoscilatorna. Naponska stabilnost sustava nam govori o sposobnosti sustava u zadržavanju zadanog napona. u stacionarnom stanju. Naponska stabilnost dijeli se na naponsku stabilnost pri velikim i naponsku stabilnost pri malim poremećajima. Naponska i kutna stabilnost pri velik poremećajima može biti srednjeročna ili dugoročna. Kod srednjeročne stabilnosti vrijeme promatranja iznosi nekoliko minuta, dok je kod dugoročne to vrijeme i do nekoliko desetaka minuta.

4.1. Kutna stabilnost

Kutna stabilnost je sposobnost zadržavanja generatora u interkonekciji u sinkronizma [8]. Problematika koja obuhvaća kutnu stabilnost uključuje elektromehaničke oscilacije u sustavu. Odnosno, drugim riječima rečeno, analizom kutne stabilnosti promatra se generatorski odziv pri osciliranju njegova rotora [8]. Uzmimo za primjer da se jedan generator ubrza, odnosno da se kut njegova rotora, u odnosu na kut ostalih rotora u interkonekciji poveća, dio opterećenja prebaciti će se na ubrzani generator, kako bi mu smanjiti brzinu i kutnu razliku. Stabilnost sustava u tom slučaju ovisi o dijagramu snaga – kut (Sl.4.2.) koji ima sinusoidalni oblik. Upravo zbog oblika dijagrama snaga – kut možemo zaključiti da postoji točka prijenosa maksimalne snage. Nakon te točke, što se više povećava kutna razlika prenesena snaga opada što dovodi sustav u nestabilnost [8].



Sl.4.2 Dijagram snaga – kut [8]

Jednadžba koja opisuje odnos snaga – kut je:

$$P = \frac{\overline{V}_1}{X} \cdot \frac{\overline{V}_2}{X} \cdot \sin\theta \text{ (MW)} \qquad (4\text{-}1)$$

Gdje je: P -trofazna aktivna snaga (MW)

$\overline{V}_1$ - napon na početku voda (kV)

$\overline{V}_2$- napon na kraju voda (kV)

X – ukupna reaktancija između dva čvorišta (Ω)

$\sin\theta$ - kut između napona (°)

Kutnu stabilnost možemo podijeliti prema vrsti poremećaja na stabilnost pri malim poremećajima i prijelaznu stabilnost [8].

Nedostatak sinkronizirajućeg momenta ili prigušujućeg momenta pri malim poremećajima može uzrokovati nestabilnost [8].

Statička stabilnost neophodna je pretpostavka pogona elektroenergetskog sustava i mora biti osigurana u svakoj pogonskoj točki i u svakom trenutku. Ukoliko tijekom normalnog pogona dođe do malih promjena stanja elektroenergetskog sustava, kao što je promjenjiv prijenos snage, sklopnih operacija itd., pri kojima se normalan pogon ne može održati statička stabilnost neće biti više osigurana. Dolazi do njihanja energije, što za posljedicu ima raspad elektroenergetskog sustava na širem području ili moguća oštećenja postrojenja korisnika ili prijenosne mreže [8].

Za razliku od statičke stabilnosti koja je posljedica malih promjena, prijelazna stabilnost posljedica je velikih poremećaja poput ispada velikih jedinica proizvodnje. Prijelazna stabilnost uzrokuje velike promjene kuta generatora. Stabilnost sustava tada ovisi o početnom stanju sustava, težini poremećaja i njegovoj topologiji.

Prijelazna stabilnost više ne postoji ukoliko, nakon otklanjanja poremećaja u mreži prijenosa, jedna ili više jedinica proizvodnje rade asinkrono s ostatkom elektroenergetskog sustava. Prilikom asinkronog pogona između prijenosne mreže i generatora dolazi do velikih promjena

frekvencije i napona, kao i do velikih struja izjednačenja. Takvo stanje može bitno ugroziti stanje elektroenergetskog sustava.

4.2. Naponska stabilnost

Naponska stabilnost je sposobnost sustava da u normalnom pogonu, pa čak i nakon poremećaja održi vrijednost napona unutar zadanih granica. Nemogućnost sustava za isporukom potrebne količine jalove energije glavni je uzrok naponske nestabilnosti. Posljedica toga je propad i na kraju sloma napona [8].

Kako bi kriterij naponske stabilnosti bio ispunjen, za svako pogonsko stanje sustava, odnosno za svaku točku u sustavu vrijedi da svakim porastom napona u bilo kojoj točki odgovara injekcija jalove energije u tu točku. Ako postoji jedna točka za koju injekcija jalove snage znači smanjenje napona, sustav je naponski nije stabilan. Naponska nestabilnost također za posljedicu može imati i ispad iz sinkronizma pojedinih generatora (velike kutne razlike).

S obzirom na duljinu vremena promatranja sustava postoje srednjoročne i dugoročne stabilnosti sustava. Dugoročna stabilnost u obzir uzima primjerice dinamiku kotlova turbogeneratora, relejnu zaštitu, zasićenje transformatora itd.. Srednjoročna stabilnost nalazi se između prijelazne i dugoročne stabilnosti. Ona uključuje pojave poput FACTS uređaja, regulacijskih preklopki transformatora itd..

Vremenski periodi koji karakteriziraju pojedinu stabilnost sustava [8]:

- Prijelazna stabilnost: 0 do 10 sekundi

- Srednjoročna stabilnost: 10 sekundi do nekoliko minuta

- Dugoročna stabilnost: nekoliko minuta do 10-ak minuta

Uz pojavu naponske stabilnosti usko je povezan i pojam naponskog sloma. Naponski slom je proces u kojem naponski nestabilan sustav doživljava nekontrolirani pad napona. Kada dođe do naponskog sloma operatori sustava izgube kontrolu vrijednostima napona i nad tokovima snaga u pojedinim dijelovima sustava ili u cijelom sustavu.

Prema vrsti poremećaja naponsku stabilnost možemo podijeliti na naponsku stabilnost s malim poremećajima i naponsku stabilnost pri velikim poremećajima.

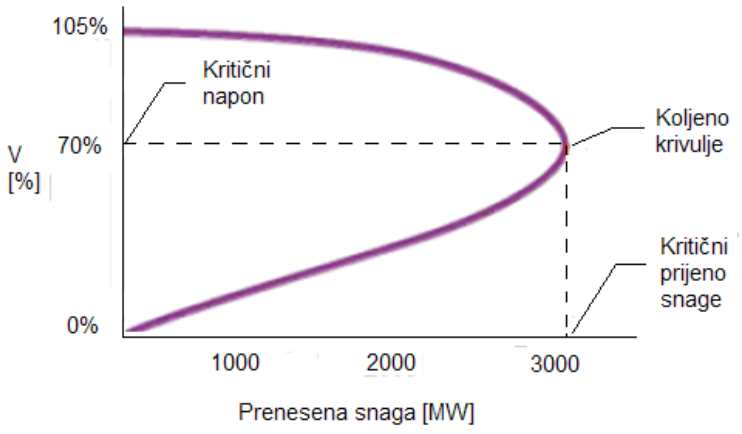
Održavanje napona pri malim poremećajima u sustavu poput kontinuiranog porasta opterećenja sustava spada u naponsku stabilnost s malim poremećajima. Problem naponske stabilnosti pri malim poremećajima može se promatrati i sa stacionarnog stajališta na način da se radnoj točki linearizira dinamičke jednadžbe sustava.

Održavanje napona pri velikim poremećajima poput ispada proizvodnih jedinica, opterećenja ili visoko opterećenih dalekovoda pripadaju naponskoj stabilnosti pri velikim poremećajima. Dinamika ove vrste naponske stabilnosti uključuje promatranje elemenata poput limitera struje uzbude generatora ili regulacijske preklopke transformatora. Ovako nastala pojava proučava se pravilnim modeliranjem elemenata mreže, a njena simulacija izvodi se u nelinearnoj vremensko-frekvencijskoj domeni.

Prema vrsti promatranja naponsku stabilnost s velikim poremećajima možemo podijeliti na prijelaznu i dugoročnu.

Karakter prijenosnog sustava pri promatranju naponske stabilnosti najbolje se opisuju P-Vi Q-V krivuljama [8].

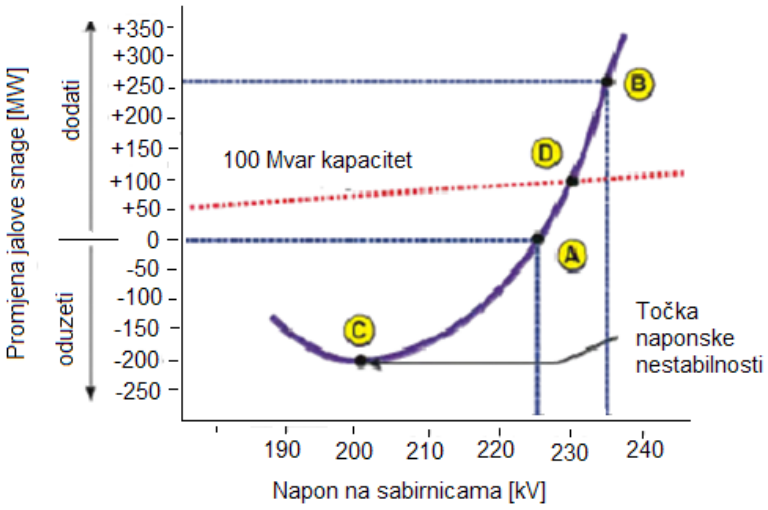
P-V krivulje (Sl.4.3) prikazuju ovisnost napona o injektiranoj djelatnoj snazi u promatrano čvorište.



Sl.4.3 Primjer P-V krivulje [8]

Iz krivulje možemo vidjeti da je odnos dvije spomenute veličine (napona i djelatne snage) nelinearan. Porast prijenosa snage, odnosno injektirane djelatne snage u čvorište dovodi do smanjenja napona. Koljeno P-V krivulje je točka na krivulji kojoj odgovaraju kritični napon, odnosno kritični prijenos snage (Sl.4.3.). Ukoliko bi opterećenje u promatranom čvorištu prešlo vrijednost kritične vrijednosti prijenosa snage tada dolazi do opadanja prijenosa snage te do iznenadnog opadanja napona. To dovodi do nestabilnosti, a za posljedicu može imati naponski slom (donji dio krivulje).

Osim P-V krivulja, za proučavanje naponske stabilnosti u elektroenergetskom sustavu koriste se i Q-V krivulje (Sl.4.4). One se razvijaju za sabirnice koje smatramo kritičnim, odnosno za one sabirnice koje su najpodložnije naponskoj nestabilnosti ili čak i naponskom slomu.



Sl.4.4 Prikaz Q-V krivulje [8]

Svaka Q-V krivulja (Sl.4.4.) prikazuje koliko jalove snage (MVAr) moramo dodati u sabirnički čvor kako bi napon u tom čvoru održali unutar zadanih granica pri konstantnoj injekciji radne snage. Kao što možemo vidjeti, Q-V krivulje u stvari prikazuju kolika je granična vrijednost jalove snage injektirane u čvor, a da ne dođe do naponskog sloma.

Mjere za održavanje naponske stabilnosti sustava čine hijerarhijsku cjelinu i zasnivaju se na [8]:

- automatskoj primarnoj regulaciji napona

- tercijarnoj regulaciji napona

- izvanrednim mjerama unutar operativnog nadzora i vođenja sustava

Kako bi se električna oprema u prijenosnom sustavu zaštitila od nedozvoljenog napona, svi vodovi nazivnog napona 400 kV trebaju biti opremljeni zaštitom od trajnog povišenja pogonskog napona. Ostale mjere zaštite od visokih napona su uključivanje prigušnica, isključivanje kondenzatorskih baterija i slabo opterećenih vodova, izdavanje naloga elektranama za maksimalno preuzimanje jalove snage.

U slučaju pojave niskih napona ispod dozvoljenih granica operator prijenosnog sustava isključuje prigušnice, uključuje kondenzatorske baterije, isključuje kupce, izdaje nalog elektranama za maksimalnu proizvodnju jalove snage, blokira rad regulacijskih sklopki transformatora 110/x kV.

Mjere za održavanje naponske stabilnosti su obavezne za sve korisnike prijenosne mreže.

5. SUSTAVI ZA OTKLANJANJE POREMEĆAJA

5.1. Moderni sustavi za otklanjanje poremećaja

Sustavi za nadzor i upravljanje danas su u široj primjeni poznatiji pod nazivom SCADA sustavi (eng. *Supervisory Control And Data Acquisition*- SCADA) [9].

SCADA je računalni sustav za sakupljanje i analizu podataka u realnom vremenu [9]. Sustavi SCADA raspodijeljeni su sustavi kojima se podaci iz različitih objekata širom sustava prikupljaju i dostavljaju upravljačkom centru. Iz tih prikupljenih podataka operator dobiva uvid u cjelokupnu sliku rada sustava što mu omogućuje pravovremeno donošenje odluka i intervenciju ako je to potrebno.

U udaljenim mjernim pretvornicima koji prikupljaju podatke s procesnih objekata započinje postupak prikupljanja podataka. Nadzor kritičnih čvorišta prijenosnih mreža se izvodi upotrebom kvazidinamičkih ili statičkih podataka na osnovu mjerenja efektivne vrijednosti napona i struje - RMS mjerenja. Prikupljeni se podaci iz mjernih uređaja dostavljaju u poslužitelj sustava SCADA kao centralno mjesto prikupa podataka. Poslužitelji dostavljaju podatke dalje klijentima SCADA sustava. Najčešća namjena klijenta je vizualiziranje trenutnog stanja u sustava [9].

Od suvremenih sustava SCADA očekuje se da budu vrlo fleksibilni kako bi se mogli prilagoditi i ostvariti komunikaciju s već zastarjelim, ali još uvijek zastupljenim uređajima na cijelom području sustava, ali ujedno i imati mogućnost iskoristiti nove nadolazeće tehnologije. S obzirom na brojne zahtjeve koji se postavljaju pred SCADA sustave, jedan od svakako najbitnijih je otvorenost. Odnosno mogućnost prilagođavanja sustava posebnim primjenama pisanjem vlastitog programskog koda od strane korisnika. S vremenom su razvijeni i prihvaćeni razni standardi čija je osnovna namjena standardiziranje načina povezivanja različitih komponenti sustava SCADA. Standardizacijom se otvaraju nove mogućnosti koje uključuju i mogućnost izrade sustava SCADA kombinacijom proizvoda različitih proizvođača. Time je postignuta višestruka korist: prestaje ovisnost o samo jednom proizvođaču opreme, a kombinacijom različitih proizvoda moguće je postizanje željene optimalne funkcionalnost sustava SCADA kao cjeline [9].

Analize nestabilnosti i poremećaja u EES-u omogućuju bolje razumijevanje mogućih specifičnih stanja. Primjena sistemskog nadzora koji postoji započela je nakon što su zadovoljene teorijske

podloge o specifičnim poremećajima u EES-u te tehnički uvjeti dostupnosti uređaja. Razvoj tehnologije doveo je do ubrzanja izvedbe konkretnih tehničkih rješenja za sistemske izvedbe sustava vođenja u elektroprivredama.

Liberalizacijom i nastajanjem otvorenog tržišta električne energije stvoreni su novi uvjeti za vođenje, nadzor i zaštitu u elektroenergetskom sustavu (EES-u). Naglasak je posebno dan na ekonomski aspekt nadzora, vođenja te zaštite sustava, dok je u drugi plan stavljen tehnički dio. Iz tog razloga postao je trend osmisliti algoritme za nadzor, zaštitu i vođenje sustava u realnom vremenu, da bi se izbjegli veliki poremećaji [9].

Dosadašnji nadzor i vođenje sustava provodi se temeljem lokalnih mjerenja statičkih procesnih veličina sustava (napon, snaga, frekvencija ...). Proteklih godina, nakon velikih raspada, počinju se intenzivno primjenjivati i razvijati sustavi za nadzor, vođenje i zaštitu sustava na osnovu trenutnih vrijednosti procesnih veličina, tzv. Wide Area Monitoring (WAM) sustavi. WAM sustav zasnovan je na ugrađenim uređajima za mjerenje fazora struje i napona u točkama sustava od posebne važnosti, u realnom vremenu (PMU uređaji – eng. Phasor Measurement Unit) [9]. WAM platforma omogućuje realnu dinamičku sliku EES-a, veću točnost mjerenja, bržu razmjenu podataka te koordinaciju i pravovremeno upozorenje u slučaju pojave nestabilnosti koje omogućavaju algoritmi u primijenjenim aplikacijama.

Važno je da sve zemlje regije s procesom liberalizacije i deregulacije sustava paralelno provode i implementaciju WAM sustava.

Zbog specifičnosti svakog sustava konfiguraciju WAM sustava nije moguće kopirati iz drugih elektroenergetskih sustava. Analiza mjerenih vrijednosti fazora napona i struja također treba biti prilagođena svakom EES-u, tj. potrebno je nadograditi postojeće programske pakete ili razviti izvorni programski paket koji će biti prilagođen predmetnom elektroenergetskom sustavu.

Povećanjem razvoja WAM sustava u svijetu dolazi do proširenja sustava u vidu zaštite i upravljanja. S ciljem ugradnje u mrežne centre takve sustave nazivamo Sistemska Zaštita (eng. Wide Area Protection) i Sistemsko Upravljanje (eng. Wide Area Control) [9].

2003. godine u Hrvatskoj su ugrađena dva PMU uređaja za nadzor 400 kV voda Žerjavinec – Tumbri i jedno računalo za prikupljanje podataka. Sustav je predstavljao prvu fazu razvoja WAM sustava u Hrvatskoj. 2007. godine došlo je do proširenja sustava te nabave novih PMU uređaja. U skladu s time, sustav je proširen na ukupno 5 PMU uređaja ugrađenih u stanice Tumbri, Melina, Žerjavinec, Konjsko i Ernestinovo, te s pripadnom programskom podrškom. Time je ostvaren nadzor 400 kV mreže u Hrvatskoj u vidu nadzora frekvencijske i naponske stabilnosti u realnom vremenu. Navedenim proširenjem WAM sustav u Hrvatskoj je doveden na

novu razinu te je Hrvatski Operator Prijenosnog Sustava (HOPS) tako stavio uz bok europskim i svjetskim elektroprivredama. Prepoznaje se vrijednost sistemskog nadzora te ga se koristi u svakodnevnom, suvremenom načinu nadzora i vođena elektroenergetskog sustava.

WAM sustav predstavlja tehnologiju začetu osamdesetih godina prošlog stoljeća. Omogućuje u potpunosti drukčiji način vođenja sustava. Ovaj način temelji na mjerenjima u realnom vremenu što do tada nije bilo moguće. Mjerenjem WAM sustava dobivaju se teorijske post-mortem analize poremećaja koje daju dobru podlogu za bolje razumijevanje specifičnih stanja elektroenergetskih sustava.

Arhitektura sustava WAM se sastoji od nekoliko osnovnih elemenata. Tri glavna elementa su [9]:

- sinkronizirane mjerne jedinice (PMU),
- centralni sustav prikupljanja podataka (eng. Phasor Data Concentrator PDC) i
- telekomunikacijska infrastruktura

Sistemski nadzor primjenjuje se u vođenju elektroenergetskog sustava s implementiranim skupom aplikacija i funkcija koje dispečerima/operaterima sustava služe kao pomoć pri donošenju odluka. Pri maksimalnim opterećenjima vođenje sustava postaje rizično i kompleksno, te se zbog toga razvija skup sustava za pomoć (eng. Decision Support System DSS) koji kombiniran sa sistemskim nadzorom omogućava slijedeće [9]:

- Sigurnije vođenje EES-a;
- Nadzor EES-a u realnom vremenu;
- Signaliziranje dinamičkih pojava;
- Pomoć pri planiranju i unapređenju rada sustava relejne zaštite;
- Pomoć pri određivanju dinamičkog preopterećenja i dinamičkih granica ;
- Pomoć kod restauracije EES-a;
- Automatski nadzor tokova snaga u realnom vremenu.

5.2. Prikaz poremećaja u realnom sustav

U ovom dijelu rada biti će prikazani realni problemi koji se mogu pojaviti u elektroenergetskom sustavu sa stvarnim podacima dobivenim od Operatora prijenosnog sustava [5].

Prvi primjer prikazuje Plan podfrekvencijskog rasterećenja Hrvatskog EES-a.

Stupanj	Proradna frekvencija [Hz]	PrP Osijek				PrP Rijeka			
		Rasterećenje		Ukupno rasterećenje		Rasterećenje		Ukupno rasterećenje	
		[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]
I.	49,20	10	38,20	10	38,20	10	54,52	10	54,52
II.	48,80	15	57,30	25	95,50	15	81,78	25	136,29
III.	48,40	15	57,30	40	152,79	15	81,78	40	218,07
IV.	48,00	15	57,30	55	210,09	15	81,78	55	299,84

Stupanj	Proradna frekvencija [Hz]	PrP Split				PrP Zagreb			
		Rasterećenje		Ukupno rasterećenje		Rasterećenje		Ukupno rasterećenje	
		[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]
I.	49,20	10	78,79	10	78,79	10	131,99	10	131,99
II.	48,80	15	118,19	25	196,98	15	197,99	25	329,98
III.	48,40	15	118,19	40	315,17	15	197,99	40	527,97
IV.	48,00	15	118,19	55	433,36	15	197,99	55	725,95

Tab.5.1. Plan podfrekvencijskog rasterećenja Hrvatskog EES-a [5]

U tablici 5.1. prikazan je plan podfrekvencijskog rasterećenja Hrvatskog EES-a u 2010. godini. Hrvatski prijenosni sustav podijeljen je na četiri prijenosna područja: prijenosno područje Osijek, Rijeka, Split i Zagreb. Tablica 5.1. prikazuje rasterećenje te ukupno rasterećenje za svako prijenosno područje za pojedine proradne frekvencije. Prema Mrežnim pravilima HOPS-a kada frekvencija padne na 49 Hz pri radu pogona u interkonekciji nastupa stanje izvanrednog pogona mreže. Kada do toga dođe, bez prethodne obavijesti doći će do automatskog isključenja opterećenja. To isključenje zahtijevano je Planom podfrekvencijskog rasterećenja.

Kako bi se spriječio potpuni ili djelomični raspad sustava u izoliranom pogonu mora se postupiti prema Planu podfrekvencijskog rasterećenja danog u Tablici 5.1.

Kako bi se utvrdila realizacija plana svako od navedenih prijenosnih područja mora što hitnije dostaviti ostvarenja podfrekvencijske zaštite po stupnjevima proradne frekvencije.

U sljedećem primjeru dan je prikaz Plana ograničenja potrošnje električne energije, odnosno hitnog rasterećenja Hrvatskog EES-a za ljetno razdoblje u 2010. godini.

Za raspon manjkajuće snage od 100 do 1000 MW plan je preventivnog karaktera, te je izrađen radi pripreme mjera obrane EES-a ako dođe do ispada angažiranih proizvodnih jedinica i/ili otkazivanje ugovorne nabave električne energije u opsegu u kojem nije moguće supstituirati ukupni manjak električne energije [5]. Iz tih razloga moglo bi doći do ugrožavanja sigurnosti pogona sustava s velikim posljedicama u opskrbi kupaca električne energije.

DISTR.PODRUČJE i veliki potrošači	UDIO %	KOD NEDOSTATKA SNAGE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU OD [MW]:									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
		ZADANO OGRANIČENJE SA SNAGOM [MW]									
ELEKTROSLAVONIJA OSIJEK	5,67	5,67	11,34	17,01	22,68	28,35	34,02	39,69	45,36	51,03	56,70
ELEKTRA POŽEGA	1,07	1,07	2,14	3,21	4,28	5,35	6,42	7,49	8,56	9,63	10,70
ELEKTRA VINKOVCI	2,72	2,72	5,44	8,16	10,88	13,60	16,32	19,04	21,76	24,48	27,20
ELEKTRA SLAVONSKI BROD	2,28	2,28	4,56	6,84	9,12	11,40	13,68	15,96	18,24	20,52	22,80
ELEKTROLIKA GOSPIĆ	1,52	1,52	3,04	4,56	6,08	7,60	9,12	10,64	12,16	13,68	15,20
ELEKTROISTRA PULA	7,81	7,81	15,62	23,43	31,24	39,05	46,86	54,67	62,48	70,29	78,10
ELEKTROPRIMORJE RIJEKA	9,14	9,14	18,28	27,42	36,56	45,70	54,84	63,98	73,12	82,26	91,40
ELEKTRODALMACIJA SPLIT	10,88	10,88	21,76	32,64	43,52	54,40	65,28	76,16	87,04	97,92	108,80
ELEKTRA ZADAR	4,56	4,56	9,12	13,68	18,24	22,80	27,36	31,92	36,48	41,04	45,60
ELEKTRA ŠIBENIK	2,73	2,73	5,46	8,19	10,92	13,65	16,38	19,11	21,84	24,57	27,30
ELEKTROJUG DUBROVNIK	2,90	2,90	5,80	8,70	11,60	14,50	17,40	20,30	23,20	26,10	29,00
ELEKTRA KARLOVAC	2,94	2,94	5,88	8,82	11,76	14,70	17,64	20,58	23,52	26,46	29,40
ELEKTRA SISAK	2,50	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00
ELEKTRA ZAGREB	23,53	23,53	47,06	70,59	94,12	117,65	141,18	164,71	188,24	211,77	235,30
ELEKTRA BJELOVAR	1,70	1,70	3,40	5,10	6,80	8,50	10,20	11,90	13,60	15,30	17,00
ELEKTRA ČAKOVEC	2,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00
ELEKTRA KOPRIVNICA	2,07	2,07	4,14	6,21	8,28	10,35	12,42	14,49	16,56	18,63	20,70
ELEKTRA KRIŽ	2,88	2,88	5,76	8,64	11,52	14,40	17,28	20,16	23,04	25,92	28,80
ELEKTRA VARAŽDIN	3,09	3,09	6,18	9,27	12,36	15,45	18,54	21,63	24,72	27,81	30,90
ELEKTRA VIROVITICA	1,15	1,15	2,30	3,45	4,60	5,75	6,90	8,05	9,20	10,35	11,50
ELEKTRA ZABOK	2,50	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00
Belišće d.d.ener.	0,18	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
Cementara Našice	0,67	0,67	1,34	2,01	2,68	3,35	4,02	4,69	5,36	6,03	6,70
Koromačno (HOLCIM)	0,43	0,43	0,86	1,29	1,72	2,15	2,58	3,01	3,44	3,87	4,30
DINA Omišalj	0,61	0,61	1,22	1,83	2,44	3,05	3,66	4,27	4,88	5,49	6,10
Istarski vodovod	0,08	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72	0,80
Dalmacija Cement	0,97	0,97	1,94	2,91	3,88	4,85	5,82	6,79	7,76	8,73	9,70
TLM- TVP Ražine	0,41	0,41	0,82	1,23	1,64	2,05	2,46	2,87	3,28	3,69	4,10
INA Petrok. Kutina	0,03	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30
Željezara (Metalval) Sisak	0,22	0,22	0,44	0,66	0,88	1,10	1,32	1,54	1,76	1,98	2,20
Željezara Split	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
HŽ DP Vinkovci	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HŽ DP Slavonski brod	0,18	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
HŽ DP Elektroprimorje Rijeka	0,02	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
HŽ DP Elektrodalmacija Split	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
HŽ DP Elektra Karlovac	0,14	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70	0,84	0,98	1,12	1,26	1,40
HŽ DP Elektra Sisak	0,02	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
HŽ DP Elektra Zagreb	0,20	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
HŽ DP ElektraBjelovar	0,04	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40
HŽ DP Elektra Koprivnica	0,04	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40
HŽ DP Elektra Križ	0,11	0,11	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,77	0,88	0,99	1,10
U K U P N O	100,01	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

% OGRANIČENJA SNAGE U ODNOSU NA DNEVNI MAX. (Treća srijeda 15.07.2009. u 22-om satu):									2550	[MW]
% OGRANIČENJA	4	8,0	12,0	16,0	20,0	24,0	27,0	31,0	35,0	39,0

Tab.5.2. Ograničenje snage

U tablici 5.2. prikazana je apsolutna veličina snage izražena u MW koju kupac, odnosno distribucija mora ograničiti u razdoblju od 00-24 sata. To ograničenje ovisi o postotku udjela u vršnoj snazi sustava.

DISTR.PODRUČJE i veliki potrošači	UDIO %	KOD NEDOSTATKA SNAGE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU OD [MW]:									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
		ZADANO OGRANIČENJE SA SNAGOM [MW]									
ELEKTROSLAVONIJA OSIJEK	5,67	136,08	272,16	408,24	544,32	680,40	816,48	952,56	1088,64	1224,72	1360,80
ELEKTRA POŽEGA	1,07	25,68	51,36	77,04	102,72	128,40	154,08	179,76	205,44	231,12	256,80
ELEKTRA VINKOVCI	2,72	65,28	130,56	195,84	261,12	326,40	391,68	456,96	522,24	587,52	652,80
ELEKTRA SLAVONSKI BROD	2,28	54,72	109,44	164,16	218,88	273,60	328,32	383,04	437,76	492,48	547,20
ELEKTROLIKA GOSPIĆ	1,52	36,48	72,96	109,44	145,92	182,40	218,88	255,36	291,84	328,32	364,80
ELEKTROISTRA PULA	7,81	187,44	374,88	562,32	749,76	937,20	1124,64	1312,08	1499,52	1686,96	1874,40
ELEKTROPRIMORJE RIJEKA	9,14	219,36	438,72	658,08	877,44	1096,80	1316,16	1535,52	1754,88	1974,24	2193,60
ELEKTRODALMACIJA SPLIT	10,88	261,12	522,24	783,36	1044,48	1305,60	1566,72	1827,84	2088,96	2350,08	2611,20
ELEKTRA ZADAR	4,56	109,44	218,88	328,32	437,76	547,20	656,64	766,08	875,52	984,96	1094,40
ELEKTRA ŠIBENIK	2,73	65,52	131,04	196,56	262,08	327,60	393,12	458,64	524,16	589,68	655,20
ELEKTROJUG DUBROVNIK	2,90	69,60	139,20	208,80	278,40	348,00	417,60	487,20	556,80	626,40	696,00
ELEKTRA KARLOVAC	2,94	70,56	141,12	211,68	282,24	352,80	423,36	493,92	564,48	635,04	705,60
ELEKTRA SISAK	2,50	60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00
ELEKTRA ZAGREB	23,53	564,72	1129,44	1694,16	2258,88	2823,60	3388,32	3953,04	4517,76	5082,48	5647,20
ELEKTRA BJELOVAR	1,70	40,80	81,60	122,40	163,20	204,00	244,80	285,60	326,40	367,20	408,00
ELEKTRA ČAKOVEC	2,00	48,00	96,00	144,00	192,00	240,00	288,00	336,00	384,00	432,00	480,00
ELEKTRA KOPRIVNICA	2,07	49,68	99,36	149,04	198,72	248,40	298,08	347,76	397,44	447,12	496,80
ELEKTRA KRIŽ	2,88	69,12	138,24	207,36	276,48	345,60	414,72	483,84	552,96	622,08	691,20
ELEKTRA VARAŽDIN	3,09	74,16	148,32	222,48	296,64	370,80	444,96	519,12	593,28	667,44	741,60
ELEKTRA VIROVITICA	1,15	27,60	55,20	82,80	110,40	138,00	165,60	193,20	220,80	248,40	276,00
ELEKTRA ZABOK	2,50	60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00
Belišće d.d.ener.	0,18	4,32	8,64	12,96	17,28	21,60	25,92	30,24	34,56	38,88	43,20
Cementara Našice	0,67	16,08	32,16	48,24	64,32	80,40	96,48	112,56	128,64	144,72	160,80
Koromačno (HOLCIM)	0,43	10,32	20,64	30,96	41,28	51,60	61,92	72,24	82,56	92,88	103,20
DINA Omišalj	0,61	14,64	29,28	43,92	58,56	73,20	87,84	102,48	117,12	131,76	146,40
Istarski vodovod	0,08	1,92	3,84	5,76	7,68	9,60	11,52	13,44	15,36	17,28	19,20
Dalmacija Cement	0,97	23,28	46,56	69,84	93,12	116,40	139,68	162,96	186,24	209,52	232,80
TLM- TVP Ražine	0,41	9,84	19,68	29,52	39,36	49,20	59,04	68,88	78,72	88,56	98,40
INA Petrok. Kutina	0,03	0,72	1,44	2,16	2,88	3,60	4,32	5,04	5,76	6,48	7,20
Željezara (Metalval) Sisak	0,22	5,28	10,56	15,84	21,12	26,40	31,68	36,96	42,24	47,52	52,80
Željezara Split	0,01	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	1,68	1,92	2,16	2,40
HŽ DP Vinkovci	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HŽ DP Slavonski brod	0,18	4,32	8,64	12,96	17,28	21,60	25,92	30,24	34,56	38,88	43,20
HŽ DP Elektroprimorje Rijeka	0,02	0,48	0,96	1,44	1,92	2,40	2,88	3,36	3,84	4,32	4,80
HŽ DP Elektrodalmacija Split	0,01	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	1,68	1,92	2,16	2,40
HŽ DP Elektra Karlovac	0,14	3,36	6,72	10,08	13,44	16,80	20,16	23,52	26,88	30,24	33,60
HŽ DP Elektra Sisak	0,02	0,48	0,96	1,44	1,92	2,40	2,88	3,36	3,84	4,32	4,80
HŽ DP Elektra Zagreb	0,20	4,80	9,60	14,40	19,20	24,00	28,80	33,60	38,40	43,20	48,00
HŽ DP ElektraBjelovar	0,04	0,96	1,92	2,88	3,84	4,80	5,76	6,72	7,68	8,64	9,60
HŽ DP Elektra Koprivnica	0,04	0,96	1,92	2,88	3,84	4,80	5,76	6,72	7,68	8,64	9,60
HŽ DP Elektra Križ	0,11	2,64	5,28	7,92	10,56	13,20	15,84	18,48	21,12	23,76	26,40
U K U P N O	100,01	1600,16	3200,32	4800,48	6400,64	8000,8	9600,96	11201,1	12801,3	14401,4	16001,6

% OGRANIČENJA EL.ENERGIJE u odnosu na razinu potrošnje treće srijede (15.07.2009.)									49542	[MWh]
% OGRANIČENJA	3,0	6,0	10,0	13,0	16,0	19,0	23,0	26,0	29,0	32,0

Tab.5.3. Dnevno ograničenje potrošnje el. energije

Tablica 5.3. prikazuje zadanu energije (MWh) koja se ograničava za svakog pojedinog kupca (pod kupac smatra se distribucijsko područje ili veći kupac) u vremenu od 00-24 sata.

Tablica 5.4. daje nam prikaz dnevno dozvoljene količine električne energije za svakog pojedinog kupca. Podaci ove tablice proizvedeni su iz Tablica 5.2. i 5.3..

DISTR.PODRUČJE	UDIO	KOD NEDOSTATKA SNAGE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU OD [MW]:									
i veliki potrošači	%	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
		DNEVNO DOZVOLJENA POTROŠNJA [MWh]									
ELEKTROSLAVONIJA OSIJEK	5,67	2672,9	2536,8	2400,7	2264,6	2128,5	1992,5	1856,4	1720,3	1584,2	1448,1
ELEKTRA POŽEGA	1,07	503,6	477,9	452,2	426,5	400,9	375,2	349,5	323,8	298,1	272,5
ELEKTRA VINKOVCI	2,72	1280,1	1214,9	1149,6	1084,3	1019,0	953,7	888,5	823,2	757,9	692,6
ELEKTRA SLAVONSKI BROD	2,28	1075,6	1020,9	966,2	911,5	856,7	802,0	747,3	692,6	637,9	583,1
ELEKTROLIKA GOSPIĆ	1,52	718,0	681,5	645,0	608,5	572,1	535,6	499,1	462,6	426,1	389,7
ELEKTROISTRA PULA	7,81	3681,8	3494,4	3307,0	3119,5	2932,1	2744,6	2557,2	2369,8	2182,3	1994,9
ELEKTROPRIMORJE RIJEKA	9,14	4306,6	4087,3	3867,9	3648,6	3429,2	3209,8	2990,5	2771,1	2551,8	2332,4
ELEKTRODALMACIJA SPLIT	10,88	5128,5	4867,4	4606,3	4345,2	4084,0	3822,9	3561,8	3300,7	3039,6	2778,4
ELEKTRA ZADAR	4,56	2148,2	2038,7	1929,3	1819,9	1710,4	1601,0	1491,5	1382,1	1272,7	1163,2
ELEKTRA ŠIBENIK	2,73	1286,3	1220,8	1155,3	1089,7	1024,2	958,7	893,2	827,7	762,1	696,6
ELEKTROJUG DUBROVNIK	2,90	1367,2	1297,6	1228,0	1158,4	1088,8	1019,2	949,6	880,0	810,4	740,8
ELEKTRA KARLOVAC	2,94	1386,6	1316,0	1245,5	1174,9	1104,3	1033,8	963,2	892,7	822,1	751,5
ELEKTRA SISAK	2,50	1176,5	1116,5	1056,5	996,5	936,5	876,5	816,5	756,5	696,5	636,5
ELEKTRA ZAGREB	23,53	11093,9	10529,2	9964,4	9399,7	8835,0	8270,3	7705,6	7140,8	6576,1	6011,4
ELEKTRA BJELOVAR	1,70	802,4	761,6	720,8	680,0	639,2	598,4	557,6	516,8	476,0	435,2
ELEKTRA ČAKOVEC	2,00	943,2	895,2	847,2	799,2	751,2	703,2	655,2	607,2	559,2	511,2
ELEKTRA KOPRIVNICA	2,07	974,5	924,8	875,2	825,5	775,8	726,1	676,4	626,8	577,1	527,4
ELEKTRA KRIŽ	2,88	1359,3	1290,2	1221,1	1152,0	1082,9	1013,7	944,6	875,5	806,4	737,3
ELEKTRA VARAŽDIN	3,09	1455,2	1381,0	1306,9	1232,7	1158,6	1084,4	1010,2	936,1	861,9	787,8
ELEKTRA VIROVITICA	1,15	540,0	512,4	484,8	457,2	429,6	402,0	374,4	346,8	319,2	291,6
ELEKTRA ZABOK	2,50	1178,6	1118,6	1058,6	998,6	938,6	878,6	818,6	758,6	698,6	638,6
Belišće d.d.ener.	0,18	86,7	82,4	78,0	73,7	69,4	65,1	60,8	56,4	52,1	47,8
Cementara Našice	0,67	314,4	298,4	282,3	266,2	250,1	234,0	218,0	201,9	185,8	169,7
Koromačno (HOLCIM)	0,43	204,6	194,3	184,0	173,7	163,4	153,0	142,7	132,4	122,1	111,8
DINA Omišalj	0,61	286,4	271,8	257,2	242,5	227,9	213,2	198,6	184,0	169,3	154,7
Istarski vodovod	0,08	36,1	34,2	32,2	30,3	28,4	26,5	24,6	22,6	20,7	18,8
Dalmacija Cement	0,97	179,3	156,0	132,7	109,4	86,2	62,9	39,6	16,3	-7,0	-30,2
TLM- TVP Ražine	0,41	192,7	182,9	173,0	163,2	153,4	143,5	133,7	123,8	114,0	104,2
INA Petrok. Kutina	0,03	12,4	11,7	10,9	10,2	9,5	8,8	8,1	7,3	6,6	5,9
Željezara (Metalval) Sisak	0,22	105,2	100,0	94,7	89,4	84,1	78,8	73,6	68,3	63,0	57,7
Željezara Split	0,01	2,5	2,2	2,0	1,7	1,5	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3
HŽ DP Vinkovci	0,00	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
HŽ DP Slavonski brod	0,18	86,7	82,4	78,1	73,8	69,5	65,1	60,8	56,5	52,2	47,9
HŽ DP Elektroprimorje Rijeka	0,02	7,3	6,8	6,3	5,9	5,4	4,9	4,4	3,9	3,5	3,0
HŽ DP Elektrodalmacija Split	0,01	5,2	5,0	4,7	4,5	4,3	4,0	3,8	3,5	3,3	3,1
HŽ DP Elektra Karlovac	0,14	66,2	62,9	59,5	56,2	52,8	49,4	46,1	42,7	39,4	36,0
HŽ DP Elektra Sisak	0,02	11,4	10,9	10,4	9,9	9,4	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0
HŽ DP Elektra Zagreb	0,20	96,7	91,9	87,1	82,3	77,5	72,7	67,9	63,1	58,3	53,5
HŽ DP ElektraBjelovar	0,04	18,5	17,5	16,6	15,6	14,6	13,7	12,7	11,8	10,8	9,8
HŽ DP Elektra Koprivnica	0,04	18,6	17,6	16,7	15,7	14,7	13,8	12,8	11,9	10,9	9,9
HŽ DP Elektra Križ	0,11	52,3	49,7	47,1	44,4	41,8	39,1	36,5	33,9	31,2	28,6
U K U P N O	100,01	46862,5	44462,3	42062,0	39661,8	37261,5	34861,3	32461,1	30060,8	27660,6	25260,3

DOZVOLJENA POTROŠNJA EL.ENERGIJE u odnosu na razinu treće srijede (15.07.2009.)									49542	[MWh]
% DOZVOLJENO-radni dan	95,0	90,0	85,0	80,0	75,0	70,0	66,0	61,0	56,0	51,0

Tab.5.4. Dnevno dozvoljena potrošnja el. energije

Odnos raspodjele ograničenja (UDIO %) prikazan u prethodne tri tablice određen je na temelju podataka o ostvarenoj potrošnji prikazan u tablici 5.5.

DISTR.PODRUČJE i veliki potrošači	Ostvareno "Treće srijede" 15.07.2009.	
	Energija [MWh]	Max.snaga[MW]
ELEKTROSLAVONIJA OSIJEK	2809	
ELEKTRA POŽEGA	529	
ELEKTRA VINKOVCI	1345	
ELEKTRA SLAVONSKI BROD	1130	
PRIJENOSNO PODRUČJE OSIJEK	5814	
ELEKTROLIKA GOSPIĆ	754	
ELEKTROISTRA PULA	3869	
ELEKTROPRIMORJE RIJEKA	4526	
PRIJENOSNO PODRUČJE RIJEKA	9150	
ELEKTRODALMACIJA SPLIT	5390	
ELEKTRA ZADAR	2258	
ELEKTRA ŠIBENIK	1352	
ELEKTROJUG DUBROVNIK	1437	
PRIJENOSNO PODRUČJE SPLIT	10436	
ELEKTRA KARLOVAC	1457	
ELEKTRA SISAK	1236	
ELEKTRA ZAGREB	11659	
ELEKTRA BJELOVAR	843	
ELEKTRA ČAKOVEC	991	
ELEKTRA KOPRIVNICA	1024	
ELEKTRA KRIŽ	1428	
ELEKTRA VARAŽDIN	1529	
ELEKTRA VIROVITICA	568	
ELEKTRA ZABOK	1239	
PRIJENOSNO PODRUČJE ZAGREB	21975	
PRIJENOSNA PODRUČJA UKUPNO	47374	
Belišće d.d.energetika	91	
Cementara Našice	331	
Koromačno (HOLCIM)	215	
DINA Petrokemija (RI ADRIA)	301	
Istarski vodovod	38	
TLM- TA TVP Ražine	203	
Dalmacija Cement	482	
INA Kutina	13	
Željezara (Metalval) Sisak	111	
Željezara SPLIT	3	
HŽ DP Vinkovci	0	
HŽ DP Slavonski brod	91	
HŽ DP Elektroprimorje Rijeka	8	
HŽ DP Elektrodalmacija Split	5	
HŽ DP Elektra Karlovac	70	
HŽ DP Elektra Sisak	12	
HŽ DP Elektra Zagreb	102	
HŽ DP ElektraBjelovar	19	
HŽ DP Elektra Koprivnica	20	
HŽ DP Elektra Križ	55	
Veliki potrošači	2168	

Tab.5.5. Osnovica za dnevno ograničenje snage i potrošnje el. energije

Mjere ograničenja energije i snage Hrvatskog EES-a provode su krajnjoj nuždi zbog održanja normalnog pogona. Izvršenje naloga izdaje Sektor za vođenje sustava (HOPS), a nalog se mora

provesti bez odlaganja. U slučaju potrebe provođenja mjera ograničenja voditelj sustava Sektora za vođenje sustava HOPS-a hitno će obavijestiti Mrežne centre u pojedinim prijenosnim područjima (Osijek, Zagreb, Rijeka i Split). Mrežni centri su dužni o tome hitno obavijestiti operatore svojih distribucijskih područja.

6. SIMULACIJA ISPITIVANJA n-1 KRITERIJA

U posljednjem poglavlju rada odrađena je simulacija na testnom primjeru IEEE sustava od 14 sabirnica. Simulacija je odrađena u programu Power World Simulator-u. IEEE sustav se sastoji od 14 sabirnica, 5 generatora i 11 opterećenja [10].

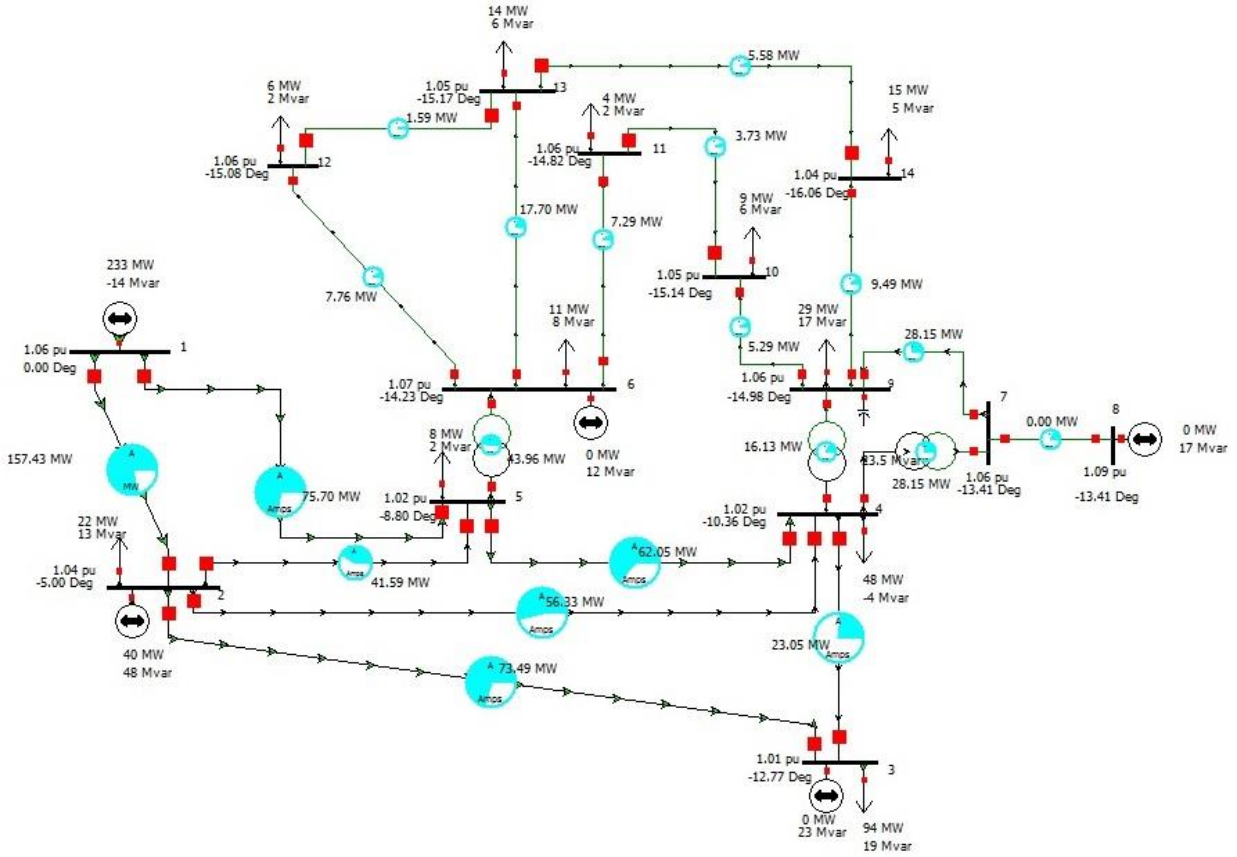
Tablica 6.1. prikazuje podatke korištene u simulaciji ispitivanja n-1 kriterija:

Sabirnica	Napon (kV)	Opterećenje (MW)	Opterećenje (MVAr	Generator (MW)	Generator (MVAr)
1	138			233.13	-13.71
2	138	21.7	12.7	40	48.08
3	138	94.2	19	0	23.42
4	138	47.8	-3.9		
5	138	7.6	1.6		
6	69	11.2	7.5	0	11.99
7	69				
8	69			0	16.86
9	69	29.5	16.6		
10	69	9	5.8		
11	69	3.5	1.8		
12	69	6.1	1.6		
13	69	13.5	5.8		
14	69	14.9	5		

Tab.6.1. Prikaz podataka za simulaciju na IEEE testnom sustavu

Za svaku sabirnicu pojedinačno isključivali smo pojedine vodove i transformatore, te promatrali što se događa s ostatkom mreže. Odnosno drugim rječima, odradili smo n-1 analizu sigurnosti sustava. N-1 kriterij nam govori o raspoloživosti distribucijske mreže. Kako bi kriterij bio ispunjen niti jedan element mreže (na ovom primjeru transformator ili vod) ne smiju biti preopterećeni, te napon koji se osigurava korisniku ne smije prelaziti izvan propisanih granica. Dozvoljeno odstupanje napona za mrežu distribucijskog napona iznosi +/-10%. Kriterij n-1 nije ispunjen ukoliko ispadom bilo kojeg elementa mreže (vod, transformator) preostala mreža ne može osigurati napon potrošačima. Osim n-1 kriterija raspoloživosti mreže, sustav mora ispunjavati i sigurnost opskrbe. Analiza sigurnosti temelji se na dva kriterija koji moraju biti ispunjeni: niti jedan element mreže (transformator ili vod) ne smiju biti preopterećeni u redovnom pogonskom stanju, te svakom korisniku mreže mora biti osiguran napon unutar propisanih granica [2].

Na slici 6.1. prikazan je sustav s unesenim parametrima.



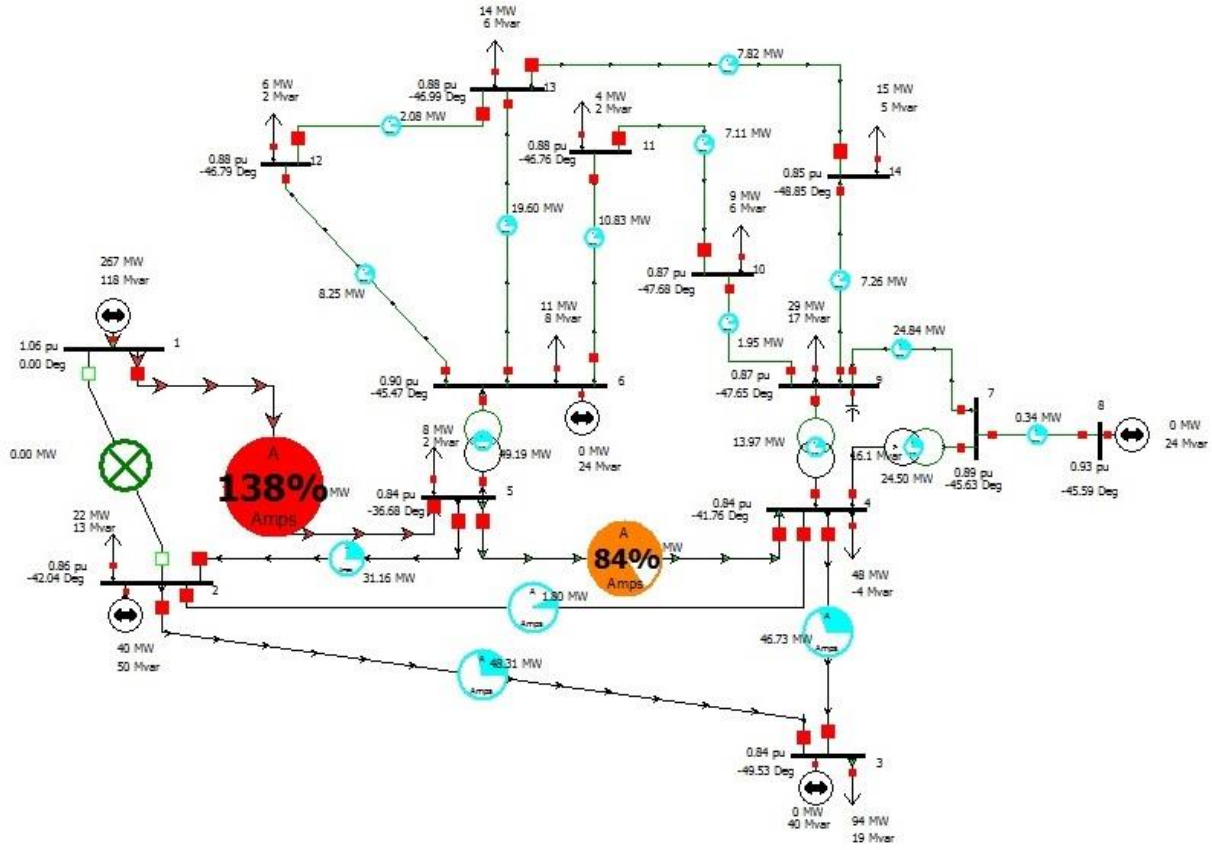
Sl.6.1. IEEE testni sustav od 14 sabirnica prikazan u programskoj podršci Power World [10]

Sada ćemo za svaku pojedinu sabirnicu isključivati vodove i transformatore spojene na nju te promatrati što se događa s ostatkom mreže.

Taj postupak naziva se analiza n-1 kriterija sigurnosti elektroenergetskog sustav.

ISPADI VODOVA:

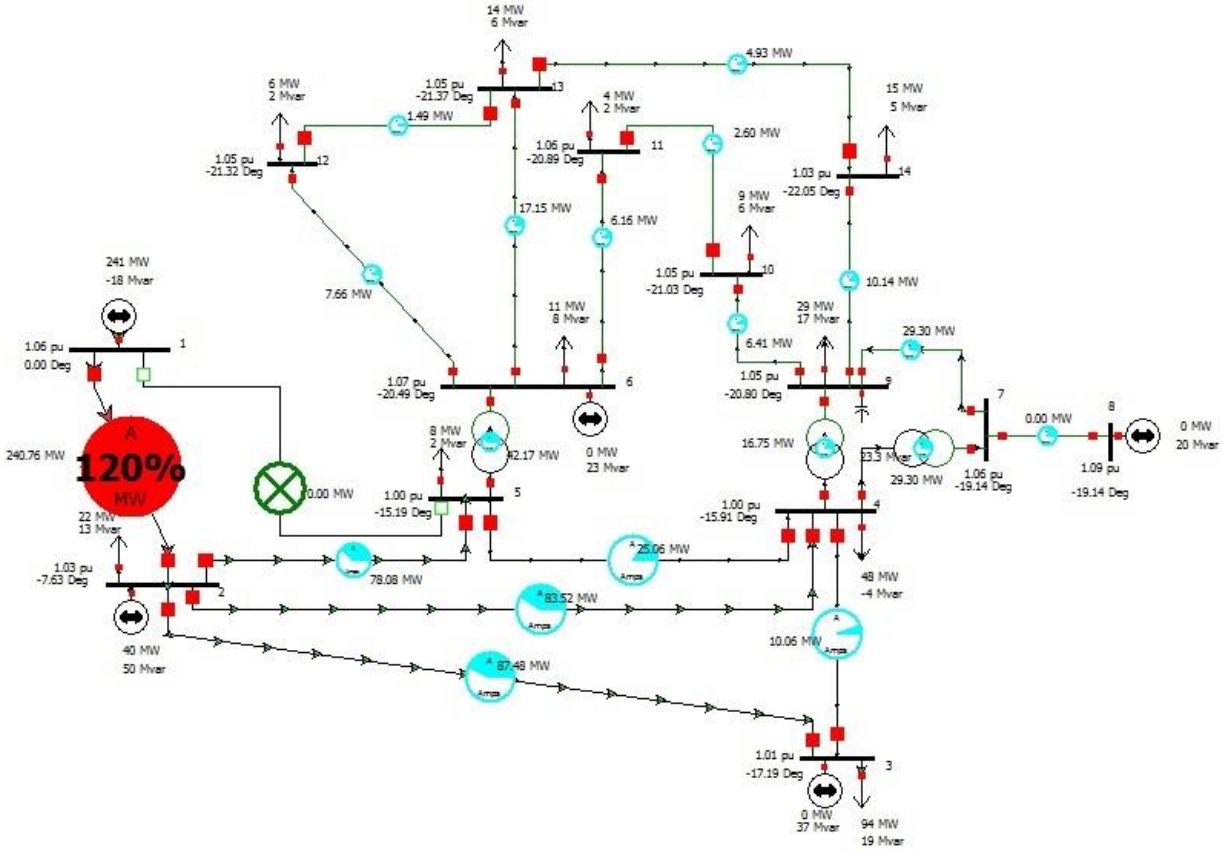
Isključen vod 1-2:



Sl.6.2. Isključen vod 1-2

Isključenjem voda 1-2 sustav izlazi iz kriterija sigurnosti. Iz slike 6.2. možemo vidjeti da u tom slučaju dolazi do preopterećenja voda 1-5, jer se sva snaga koju proizvodi generator 1 u tom slučaju prenosi upravo tim vodom. Pošto je vod 1-5 ograničen maksimalnom snagom od 200 MVA, a generator 1 proizvodi snagu koja premašuje tu vrijednost, dolazi do preopterećenja voda. Ovakav sustav ne može se nikakvim djelovanjem dispečera vratiti u sigurno stanje.

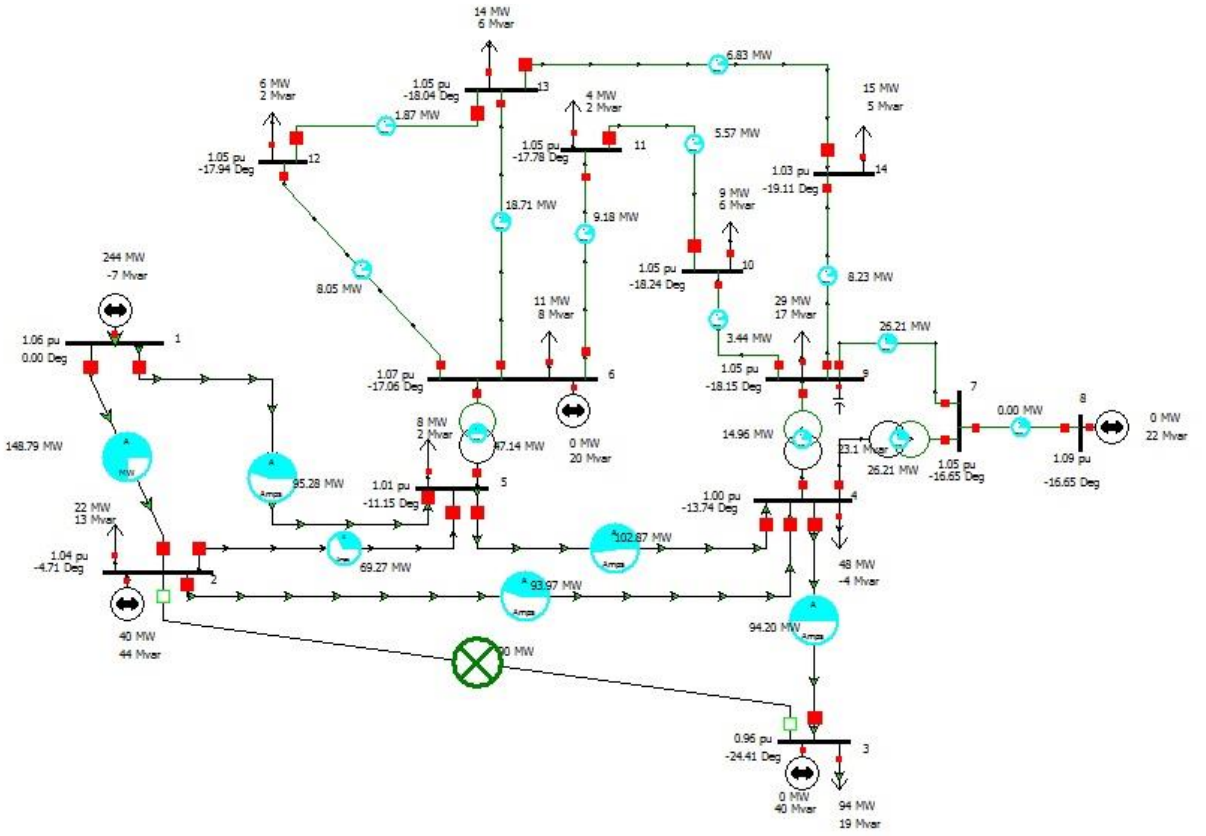
Isključen vod 1-5:



Sl.6.3. Isključen vod 1-5

Slika 6.3. prikazuje nam situaciju u sustavu ukoliko isključimo vod 1-5. Iz dobivenih rezultata možemo vidjeti da i u ovom slučaju kriterij n-1 nije ispunjen. U ovom slučaju dolazi do preopterećenja voda 1-2. Razlog ovakvih rezultata je taj što je sustav prikazan simulacijom gotovo u potpunosti napajan od strane generatora 1. Djelatna snaga koju proizvodi generator 1 iznosi 241 MW. Ako znamo da je svaki vod na 138 kV strani limitiran snagom od 200 MVA, isključenjem, odnosno ispadom bilo kojeg od ta dva voda sustav ne ispunjava se n-1 kriterij.

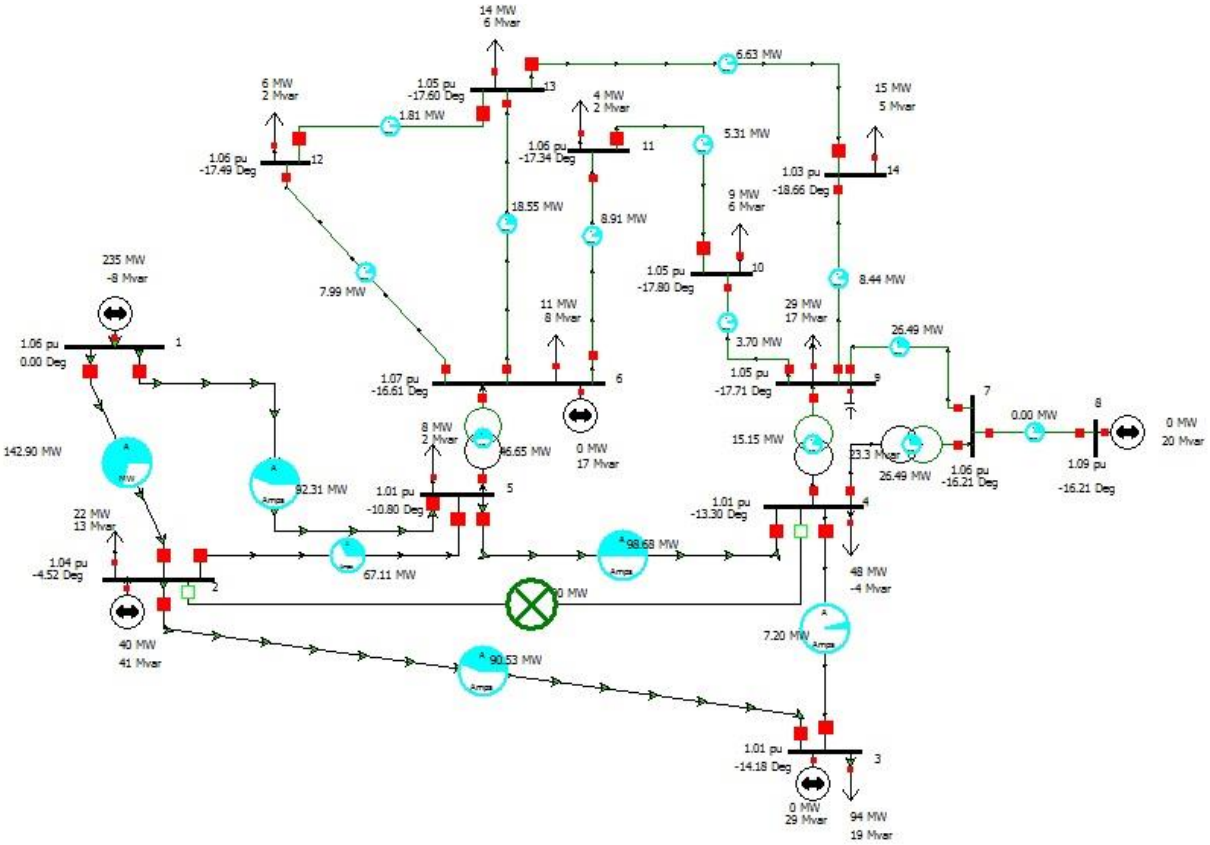
Isključen vod 2-3:



Sl.6.4. Isključen vod 2-3

U ovom slučaju isključili smo vod 2-3. Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti kako isključenjem ovog voda ne dolazi do značajne promjene u ostatku sustava. Ostali vodovi u sustavu preuzeli su snagu koja se prenosila vodom 2-3, te je kriterij n-1 ostao ispunjen. Sustav je i dalje siguran uz povećanje opterećenja ostalih vodova u odnosu na početno stanje.

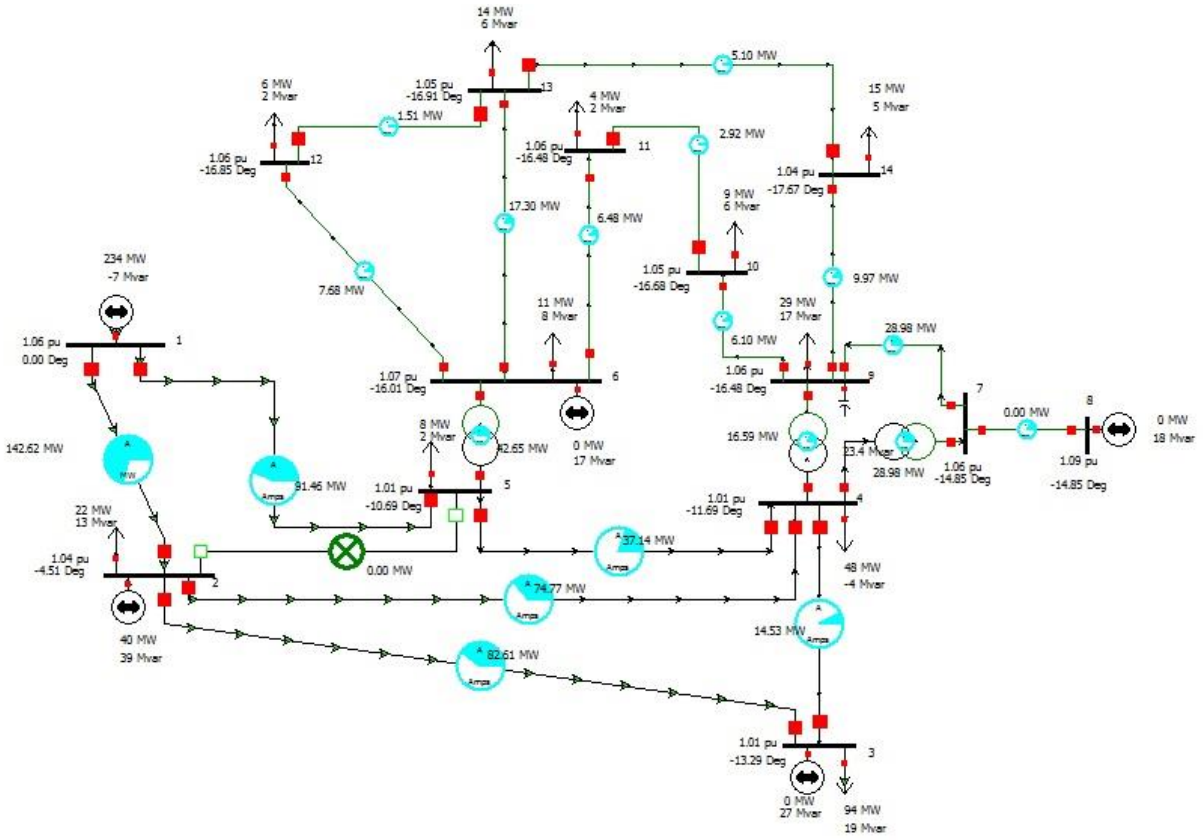
Isključen vod 2-4:



Sl.6.5. Isključen vod 2-4

Kao i u prethodnom slučaju, i pri isključenju voda 2-4 ne dolazi do značajne promjene u radu sustava. Razlog tome je što generator 2 ne proizvodi veliku snagu koju predaje sustavu. Ispadom ovog voda, snaga koju je on prenosio raspoređuje se na vodove 2-3 i 2-5, te sustav nastavlja normalno raditi. Kriterij n-1 je ispunjen i sustav je siguran.

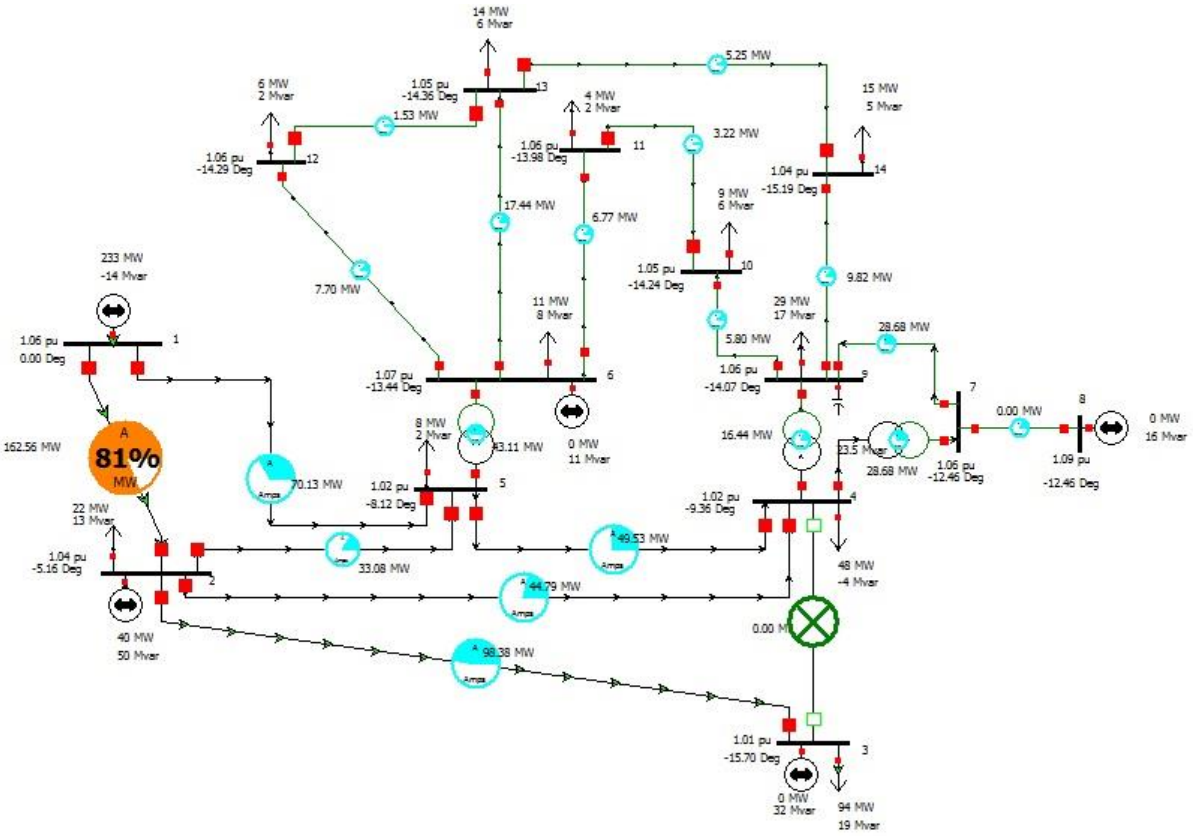
Isključen vod 2-5:



Sl.6.6. Isključen vod 2-5

Isključivanjem ovog voda sustav je ostao unutar granica kriterija sigurnosti. Snagu od oko 41 MW koju je taj vod prenosio preuzeli su vodovi 2-3 i 2-4. Snaga tih vodova povećala se, ali ne u tolikoj mjeri kako bi oni postali preopterećeni. I u ostatku sustava dolazi do promjena opterećenja vodova, ali svi vodovi ostaju unutar granica te nema potrebe za reakcijom dispećera. Sustav je siguran.

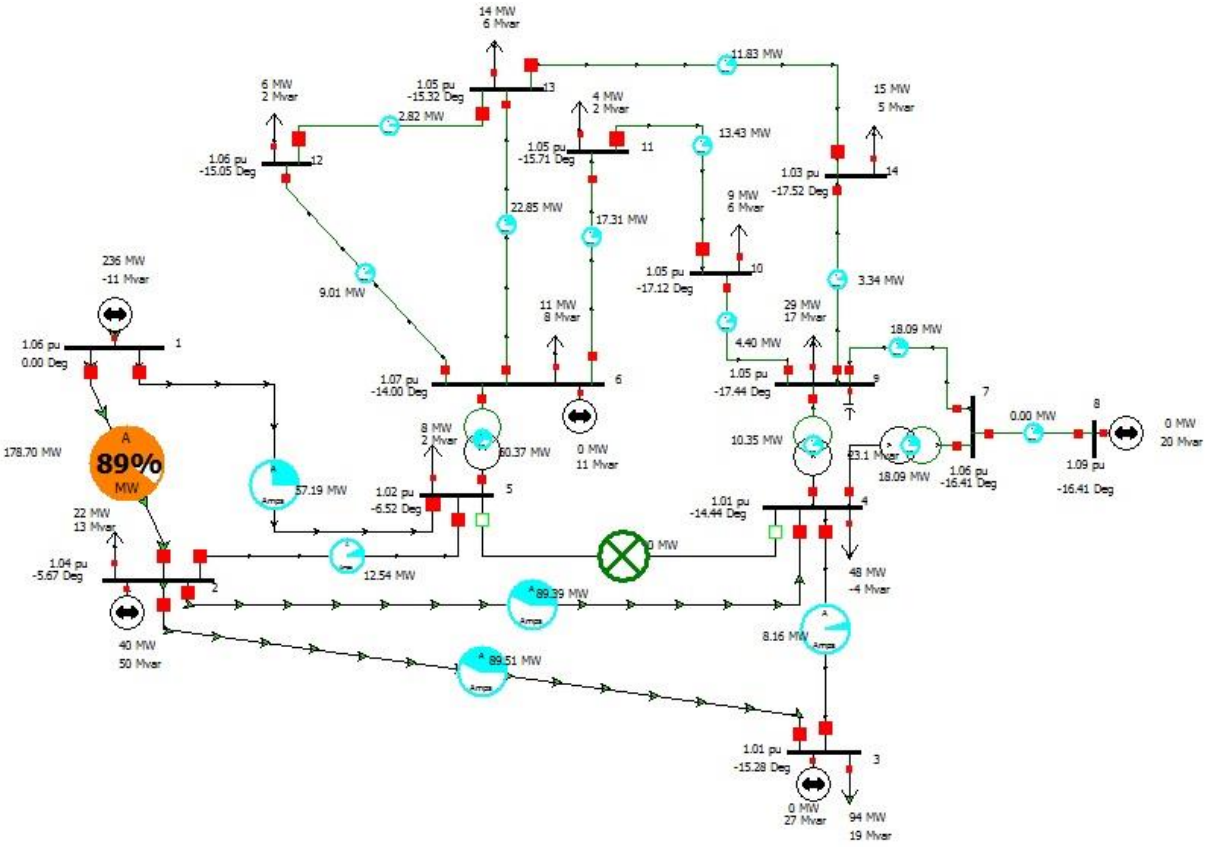
Isključen vod 3-4:



Sl.6.7. Isključen vod 3-4

Isključenjem voda 3-4 dolazi do povećanja opterećenja voda 1-2. Povećanje opterećenja voda iznosi 81% što nije kritično za sam vod, odnosno sustav je i dalje siguran i ispunjen je n-1 kriterij. Ostatak sustava može se nesmetano napajati bez obzira na isključenje voda 3-4. Ukoliko želimo smanjiti opterećenje voda 1-2 to možemo postići regulacijom napona i jalove snage sinkronog kompenzatora 3.

Isključen vod 4-5:



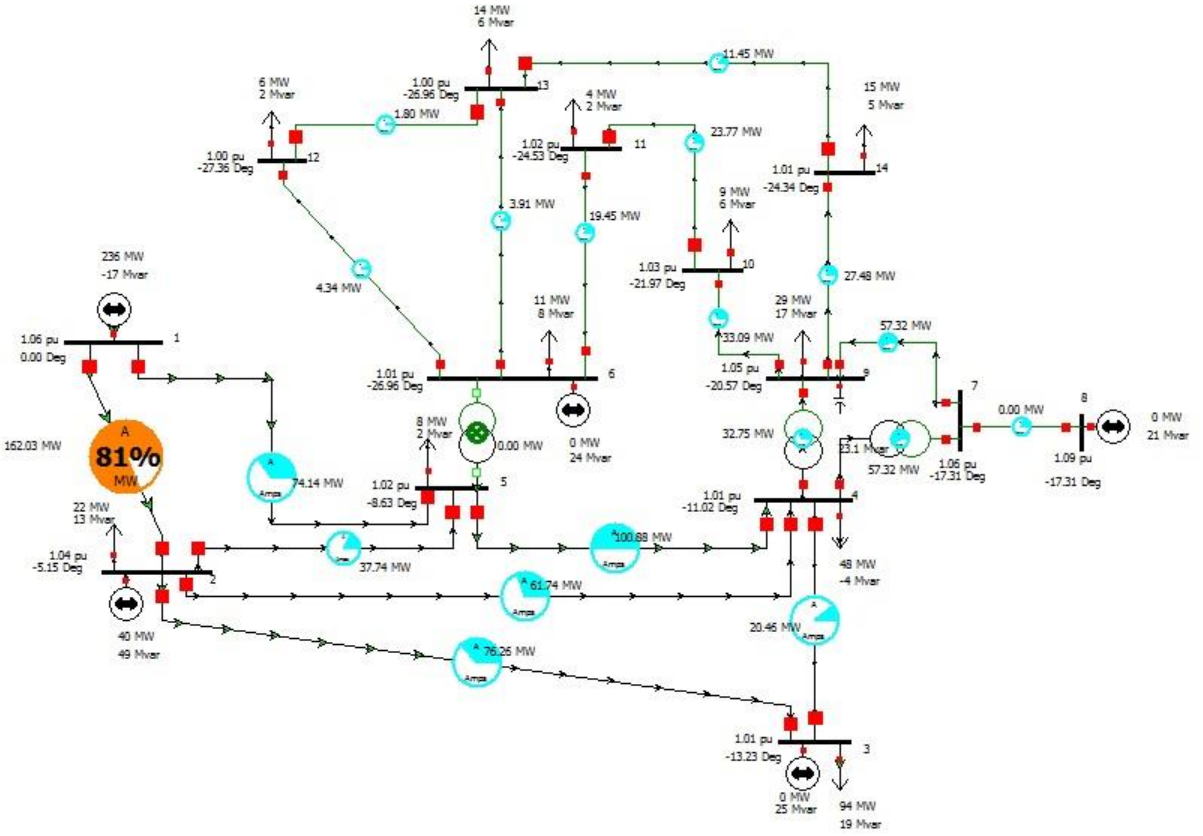
Sl.6.8. Isključen vod 4-5

Isključenjem voda 4-5 dolazi do povećanja opterećenja voda 1-2. Do povećanja opterećenja dolazi jer se djelatna snaga koju proizvodi generator 1 ne može prenijeti između sabirnica 5 i 4, već se prenosi preko sabirnice 2. Pošto generator 1 ima veliku djelatnu snagu koja se u normalnom radu prenosi vodovima 1-2 i 1-5, sada se većina te snage prenosi vodom 1-2, te se njegovo opterećenje povećava. Povećanja iznosi 89% od maksimalne vrijednosti opterećenja, što znači da vod nije preopterećen, odnosno ispunjen je kriterij sigurnosti.

U prethodnim slučajevima prikazani su ispadi vodova na 138 kV strani. Simulacija je provedena i za vodove na 69 kV strani, no zbog puno manjih snaga koju vodovi na 69 kV strani prenose nije dolazilo do značajne promjene u ostatku sustava.

ISPADI TRANSFORMATORA:

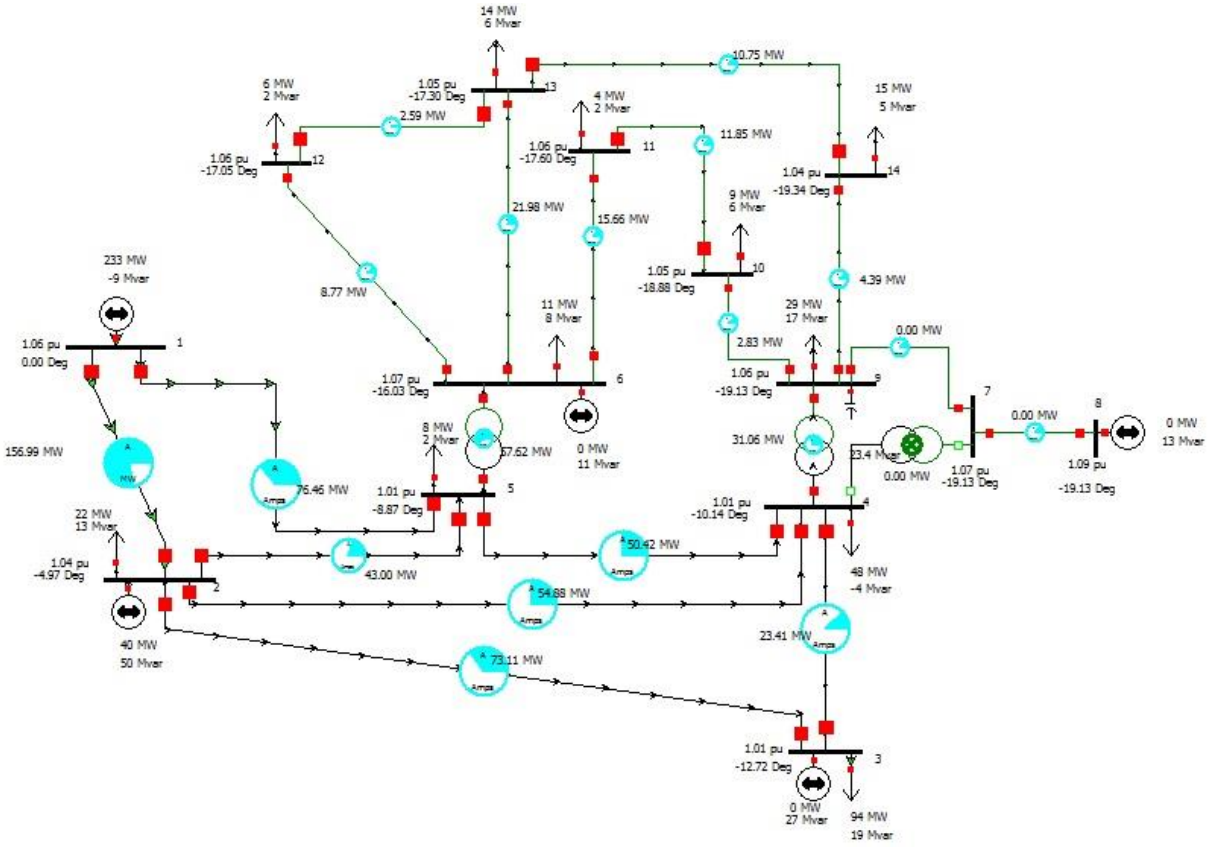
Isključen transformator 5-6:



Sl.6.9. Isključen transformator 5-6

U ovom dijelu simulacije iz pogona smo isključili transformator 5-6. Isključenjem tog transformatora dolazi do povećanja opterećenja voda 1-2, jer se sada sva snaga koju proizvodi generator 1 s 138 kV strane transformira na 69 kV stranu preko transformatora 4-9 i 4-7. Pošto su ti transformatori spojeni preko voda 1-2 dolazi do povećanja opterećenja voda. Povećanje opterećenja voda nije preveliko, te n-1 kriterij sigurnosti nije narušen. Ukoliko želimo smanjiti opterećenje voda, to možemo postići regulacijom napona i jalove snage sinkronih kompenzatora u sustavu.

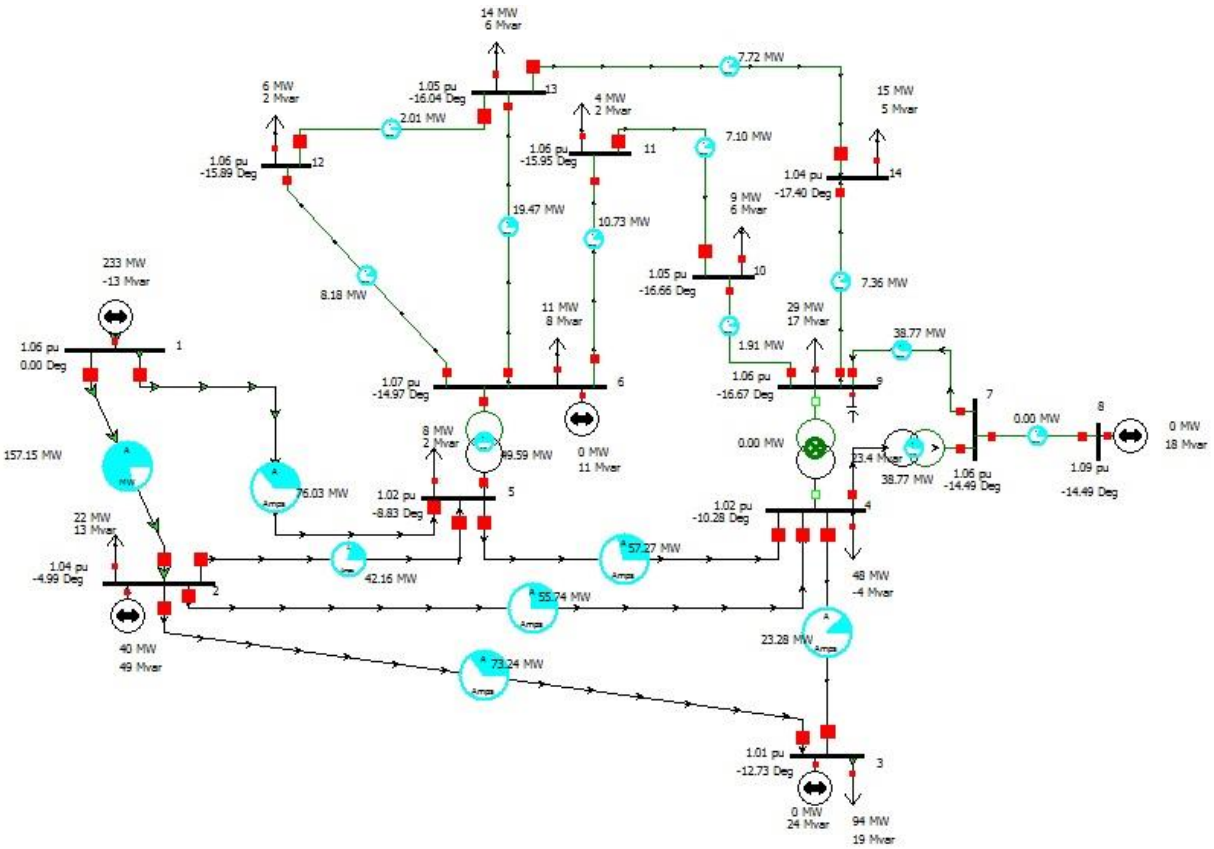
Isključen transformator 4-7:



Sl.6.10. Isključen transformator 4-7

Iz simulacije prikazane slikom 6.10 možemo vidjeti da se isključenjem transformatora 4-7 iz mreže u potpunosti isključuje kompenzator 8, te sabirnice 7 i 8. Ovim isključenjem u sustavu ne dolazi do značajnih promjena. Opterećenje vodova na 138 kV strani lagano opadne, dok se na 69 kV strani poveća. No svi vodovi u sustavu ostanu unutar granica opterećenja i sustav ostaje siguran.

Isključen transformator 4-9:



Sl.6.11. Isključen transformator 4-9

Isključenjem transformatora 4-9 dolazimo do slične situacije kao i kod isključenja transformatora 4-7. Sustav ostaje siguran, samo dolazi do blage promjene opterećenja vodova.

Iz pokusa ispada pojedinih transformatora možemo zaključiti da značajnu ulogu za sustav ima ispad transformatora 5-6, iako i u tom slučaju sustav ostaje u stabilnom stanju, odnsono kriterij n-1 ostaje ispunjen. Razlog tome je taj što transformator 5-6 prenosi na 69 kV stranu gotovo pola djelatne snage koju proizvodi generator 1. Kada dođe do njegovog ispada, sva snaga prebacuje se na preostala dva transformatora, što dovodi do povećanog opterećenja za vod koji napaja ta dva transformatora.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana su tipična stanja elektroenergetskog sustava. Elektroenergetski sustav, kao što smo u radu mogli i vidjeti može se nalaziti u četiri pogonska stanja, a to su: stacionarno stanje (normalan pogon), ugroženo stanje, poremećaji i havarije. Stacionarno stanje je stanje elektroenergetskog sustava u kojem se sve fizikalne veličine u sustavu nalaze unutar zadanih granica. Pri ugroženom stanju sve veličine su još unutar granica. U tom slučaju dispečer mora poduzeti sve mjere kako bi vratio sustav u normalno stanje. Glavni dio ovog rada bazirao se na poremećajima koji se mogu pojaviti u elektroenergetskom sustavu. Poremećaj je stanje elektroenergetskog sustava u kojem, zbog djelovanja nekog kvara ili drugih čimbenika, dolazi do odstupanja fizikalnih veličina sustava izvan dopuštenih granica. Poremećaji dovode elektroenergetski sustav u opasno stanje. Najčešći poremećaji koji se javljaju u elektroenergetskom sustavu, a koji mogu dovesti do opasnog stanja elektroenergetskog sustava su ispadi generatora, elektrana, odnosno proizvodnje, ispadi velikih tereta (opterećenja), ispadi vodova i transformatora, pojava kratkog spoja u sustavu, pogrešno djelovanje zaštite i slično. Kako bi se sustav zaštitio od poremećaja postoji tzv. Plan obrane od poremećaja. Osnovna svrha Plana obrane od velikih poremećaja je osigurati zaštitne procedure koje sprječavaju narušavanje stabilnog i sigurnog pogona elektroenergetskog sustava. Ukoliko ipak dođe do poremećaja, elektroenergetski sustav se mora vratiti u normalno stanje. Kako bi se sustav vratio u normalan pogon, provodi se Plan uspostave elektroenergetskog sustava. Osim o pogonskim stanjima elektroenergetskog sustava, rad govori i o regulaciji sustava (primarna, sekundarna i tercijarna) kao i ostabilnosti elektroenergetskog sustava (kutna i naponska stabilnost). Nadalje, dani su i moderni sustavi za otklanjanje poremećaja. Sustavi namijenjeni za nadzor i upravljanje danas su u širokoj primjeni poznatiji pod nazivom SCADA sustavi. Tako je razvijen i Sistemski nadzor, ili Wide Area Monitoring (WAM). Pomoću sistemskog nadzora poremećaji se, na temelju prethodno prikupljenih podataka, mogu predvidjeti, te na taj način mogu biti spriječeni ili biti ograničeni kako ne bi uzrokovali veće poteškoće u radu elektroenergetskog sustava. Na samom kraju rada odrađena je simulacija realnog elektroenergetskog sustava. Na sustavu od 14 sabirnica za svaku sabirnicu isključivali smo pojedine vodove i transformatore te promatrali što se događa s ostatkom sustava. Promatrali smo kriterij sigurnosti sustava, te za svaki slučaj kada je kriterij bio narušen, ukoliko je to bilo moguće pokušali smo pravilnim vođenjem sustava dati rješenje za vračanje sustava u sigurno stanje.

LITERATURA

[1] I. Pavić, Vođenje elektroenergetske mreže, zavodska skripta, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011. godine.

[2] Mrežna pravila prijenosnog sustava, Zagreb, 2016. godine.

[3] S. Nikolovski , Zaštita u elektroenergetskom sustava, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek: Grafika, Osijek, 2005. godine.

[4] L. Jozsa, Energetski procesi i elektrane, Interna skripta ETF Osijek, Osijek, 2005. godine.

[5] Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o., Plan obrane elektroenergetskog sustava od velikih poremećaja, Zagreb, 2010. godine.

[6] K. Vrdoljak, Primjena kliznog režima upravljanja u sekundarnoj regulaciji frekvencije i djelatne snage razmjene elektroenergetskih sustava, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009. godine.

[7] L. Jozsa, Osnove regulacije u EES, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2005. godine.

[8]J.Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power System Dynamics: Stabilityandcontrol, SecondEdition, JohnWiley&Sons, 2008. godine.

[9] S. Nenadić, Nadzor, zaštita i vođenje elektroenergetskog sustava zasnovano na WAM platformi, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2007.

[10] IEEE testni sustav, http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm

POPIS SLIKA I TABLICA

Sl.2.1 Pogonska stanja EES-a [1].....3

Sl.2.2 Pogonska stanja EES-a [1].....4

Sl.2.3 Trofazni kratki spoj [3].....9

Sl.2.4 Dvofazni kratki spoj [3].....10

Sl.2.5 Dvofazni kratki spoj sa zemljom [3].....10

Sl.2.6 Jednofazni kratki spoj [3].....11

Sl.4.1 Klasifikacija stabilnosti EES [8].....24

Sl.4.2 Dijagram snaga – kut [8].....25

Sl.4.3 Primjer P-V krivulje [8].....28

Sl.4.4 Prikaz Q-V krivulje [8].....29

Sl.6.1. IEEE testni sustav od 14 sabirnica prikazan u programskoj podršci Power World.....41
Sl.6.2. Isključen vod 1-2.....42
Sl.6.3. Isključen vod 1-5.....43
Sl.6.4. Isključen vod 2-3.....44
Sl.6.5. Isključen vod 2-4.....45
Sl.6.6. Isključen vod 2-5.....46
Sl.6.7. Isključen vod 3-4.....47
Sl.6.8. Isključen vod 4-5.....48
Sl.6.9. Isključen transformator 5-6.....49
Sl.6.10. Isključen transformator 4-7.....50
Sl.6.11. Isključen transformator 4-9.....51

Tab.5.1. Plan podfrekvencijskog rasterećenja Hrvatskog EES-a [5].....34

Tab.5.2. Ograničenje snage [5].....35

Tab.5.3. Dnevno ograničenje potrošnje el. energije [5].....36

Tab.5.4. Dnevno dozvoljena potrošnja el. energije [5].....37

Tab.5.5. Osnovica za dnevno ograničenje snage i potrošnje el. energije [5].....38

Tab.6.1. Prikaz podataka za simulaciju na IEEE testnom sustavu.....40

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisana su pogonska stanja elektroenergetskog sustava. Svako stanje zasebno je opisano. Glavni dio rada prikazuje poremećaje koji se mogu dogoditi u elektroenergetskom sustavu. Također su dani i primjeri poremećaja realnog elektroenergetskog sustava. Rad prikazuje i regulaciju sustava, kao i stabilnost elektroenergetskog sustava. U zadnjem poglavlju opisani su primjeri modernih sustava za predviđanje i otklanjanje poremećaja: SCADA i WAM. SCADA je računalni sustav namijenjen za analizu i prikupljanje podataka u realnom vremenu, dok je WAM sistemski nadzor analize poremećaja i nestabilnosti elektroenergetskog sustava. Cilj ovog rada bio je prikazati što sve može utjecati na rad sustava, kakve će to posljedice ostaviti na sustav, te mjere koje se mogu poduzeti kako bi se poremećaj izbjegao ili ograničio.

Ključne riječi: poremećaj, elektroenergetski sustav, regulacija sustava, stabilnost, SCADA, WAM

ABSTRACT

In this graduate work are described operating states of the power system. Each state are separately described. The main part of the work shows the disorder that may occurin the power system. It is also provided the examples of disorders of the real power system. Work also show system control and stability of power system. The last chapter describe examples of modern system for predicitng and delimination disorders: SCADA and WAM. SCADA is a computer system that collect and analyze data in real time, while the WAM is system control analysis of disorder and instability in the power system. The aim of this graduate work was to show what all can affect the system, what will it leave the system, and the measures that can be taken to avoid or limit the disorder.

Keywords: disorder, power system, system control, stability, SCADA, WAM

ŽIVOTOPIS

Filip Zečević rođen je 05.12.1991. u Zagrebu. Djetinjstvo provodi u Valpovu, gdje pohađa OŠ Matije Petra Katančića. Nakon završene OŠ, s odličnim uspjehom, upisuje srednju školu u Valpovu, smjer elektrotehničar. Srednju školu također završava s odličnim uspjehom te upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku, smjer energetika. 2014. završava preddiplomski studij elektrotehnike, smjer energetika, te upisuje diplomski studij. Komunikativan i sklon timskom radu. Za vrijeme studiranja radio je na raznim studentskim poslovima. Ima iskustva sa radom u AutoCAD-u, EasyPower-u i DigSilente-u.

Potpis

_____