Prijedlog algoritma optimalne uspostave elektroenergetskog sustava

Sušec, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:507831

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište
Sjever

Završni rad br. 474/EL/2020

Prijedlog algoritma optimalne uspostave elektroenergetskog sustava

Mateo Sušec, 1477/336

Varaždin, rujan 2020. godine



Sveučilište
Sjever

Odjel za Elektrotehniku

Završni rad br. 474/EL/2020

Prijedlog algoritma optimalne uspostave elektroenergetskog sustava

Student

Mateo Sušec

Mentor

Izv. prof. dr. sc. Srđan Skok

Varaždin, rujan 2020. godine

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR-42000 Varaždin

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za elektrotehniku

STUDIJ preddiplomski stručni studij Elektrotehnika

PRISTUPNIK Mateo Sušec | MATIČNI BROJ 1477/336

DATUM 10.09.2020. | KOLEGIJ Zaštita u elektroenergetskim postrojenjima

NASLOV RADA Prijedlog algoritma optimalne uspostave elektroenergetskog sustava

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Proposal of Algorithm for Power System Restoration

Power System Flexibility

MENTOR Izv.prof.dr.sc. Srđan Skok | ZVANJE Izvanredni profesor

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Ladislav Havaš, dipl.ing.el.
2. doc.dr. sc. Dunja Srpak, dipl.ing.el., predavač
3. Izv.prof.dr.sc. Srđan Skok
4. mr.sc. Ivan Šumiga, dipl.ing.el., viši predavač, - rezervni član
5.

Zadatak završnog rada

BROJ 474/EL/2020

OPIS

U Mrežnim pravilima prijenosnog sustava (NN 67/2017) u članku 48., stavak 3. navodi se da operator prijenosnog sustava donosi plan obrane elektroenergetskog sustava od velikih poremećaja u kojem, između ostalog, treba biti obuhvaćen plan ponovne uspostave elektroenergetskog sustava i smjernice za djelovanje radi ponovne uspostave napajanja. Planom obrane elektroenergetskog sustava od velikih poremećaja definiran je plan ponovne uspostave sustava, te osnovna načela strategije za ponovno uključivanje na napon svih dijelova prijenosnog sustava u cilju uspostave napajanja prema tzv. Principima „odozgo prema dolje" (eng. top-down method), te „odozdo prema gore" (eng. bottom-up method). Zadatak rada je izraditi prijedlog postupka za uspostavu sustava nakon djelomičnog ili potpunog raspada elektroenergetskog sustava na način da se u konačnici smanji ukupno vrijeme potrebno za uspostavljanje sustava obzirom na postojeće procedure. Rad treba dati jednoznačne procedure potkrijepljene teorijskim podlogama o uspostavljanju sustava sa definiranim koracima terećenja. Uz gore navedeno u elaboratu bi se trebala općenito obraditi priprema elemenata prijenosne mreže u trafostanicama za ponovnu uspostavu sustava, te utjecaj distribuiranih izvora i karaktera potrošnje na uspostavu sustava.

ZADATAK URUČEN 11.09.2020. | POTPIS MENTORA

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE SJEVER

Predgovor

Ponajprije bih se htio srdačno zahvaliti cijenjenom profesoru i mentoru, izv. prof. dr. sc. Srđanu Skoku, na ukazanom povjerenju, pruženoj pomoći te danim smjernicama prilikom izrade mog završnog rada. Također bih se zahvalio svim profesorima na Sveučilištu Sjever koji su mi tijekom mog studijskog obrazovanja prenijeli znanje iz struke koje će mi uvelike koristiti u budućnosti. Zahvaljujem se i mojim roditeljima koji su mi omogućili obrazovanje te cjelokupnoj obitelji, djevojci i prijateljima na ukazanoj podršci tokom tog obrazovanja.

Sažetak

U ovom završnom radu teorijski je obrađena tematika vezana uz poremećaje u prijenosnom elektroenergetskom sustavu, te smjernice za ponovnu uspostavu stabilnog pogonskog stanja u slučaju eventualnog raspada sustava. Glavni dio rada je izrada prijedloga postupka za uspostavu elektroenergetskog sustava nakon djelomičnog ili potpunog raspada na način da se u konačnici smanji ukupno vrijeme potrebno za uspostavljanje sustava obzirom na postojeće procedure. Cilj ovog rada bio je opisati proceduru ponovne uspostave sustava, prikazati što sve može utjecati na rad sustava, kakve će to posljedice ostaviti na sustav, te mjere koje se mogu ili moraju poduzeti kako bi se poremećaj izbjegao ili ograničio.

Ključne riječi: prijenosni elektroenergetski sustav, stabilnost elektroenergetskog sustava, vrste poremećaja i kvarova

Abstract

This final paper theoretically deals with the topic related to disturbances in the transmission power system, and guidelines for the restoration to a stable operating state in the event of a possible breakdown. The main part of the paper drafted a proposal for the procedure for the adoption of the system after the partial or complete breakdown in a way that ultimately reduces the total time required to establish the system in the existing procedure. The aim of this paper was to describe the system re-establishment procedure, show what all can affect the operation of the system, and what consequences will be left to the system, and the measures that can be taken to avoid or limit disruptions.

Tags: transmission power system, stability of power system, types of disturbances and failures

Popis korištenih oznaka i kratica

APU	Automatski ponovni uklop
DV	Dalekovod
EES	Elektroenergetski sustav
FACTS	Flexible AC Transmission System
HE	Hidroelektrana
HEP	Hrvatska elektroprivreda
HOPS	Hrvatski operator prijenosnog sustava
HVDC	High voltage direct current
NDC	Nacionalni dispečerski centar
NN	Niskonaponska mreža
ODS	Operator distribucijskog sustava
OPS	Operator prijenosnog sustava
RH	Republika Hrvatska
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SN	Srednjonaponska mreža
TE	Termoelektrana
TS	Transformatorska stanica
UCTE	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity
Un	Nazivni napon
VN	Visokonaponska mreža
WAMS	Wide Area Monitoring System

Sadržaj

1. UVOD 1

2. PREGLED PRIJENOSNOG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA (EES) 2

2.1. Rasklopna postrojenja 3

2.2. Gubici i značajke prijenosne mreže 7
2.2.1 Utjecaj distribuiranih izvora na gubitke u mreži 9
2.2.2 Utjecaj distribuiranih izvora na kvalitetu električne energije 10

3. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA 11

3.1. Definicija stabilnosti elektroenergetskog sustava 11
3.1.1 Analiza naponske stabilnosti u prijenosnoj mreži 13

3.2. Pogonska stanja elektroenergetskog sustava 16
3.3.1 Sigurnosne razine kod procjene stanja elektroenergetskog sustava 18

3.3. Regulacija u elektroenergetskom sustavu 19

4. UTJECAJ KARAKTERISTIKA TERETA NA USPOSTAVU SUSTAVA 23

4.1. Statički modeli 24
4.1.1 ZIP model 24
4.1.2 Eksponencijalni model 25
4.1.3 Model ovisan o frekvenciji 26

4.2. Dinamički modeli 26
4.2.1 Asinkroni motor (IM) 26
4.2.2 Model tereta s eksponencijalnim oporavkom (eng. Exponential Recovery Load – ERL) 27

5. PONOVNA USPOSTAVA SUSTAVA NAKON RASPADA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA 29

5.1. Teorijske osnove ponovne uspostave elektroenergetskog sustava 29

5.2. Metode ponovne uspostave sustava 34

6. ISKUSTVA POJEDINIH OPERATORA PRIJENOSNOG SUSTAVA U USPOSTAVI EES-A 36

6.1. Poremećaj elektroenergetskog sustava u dijelovima južne Švedske i istočne Danske 36

6.2. Poremećaj elektroenergetskog sustava u Italiji 38

7. ZAKLJUČAK 41

8. LITERATURA 42

1. Uvod

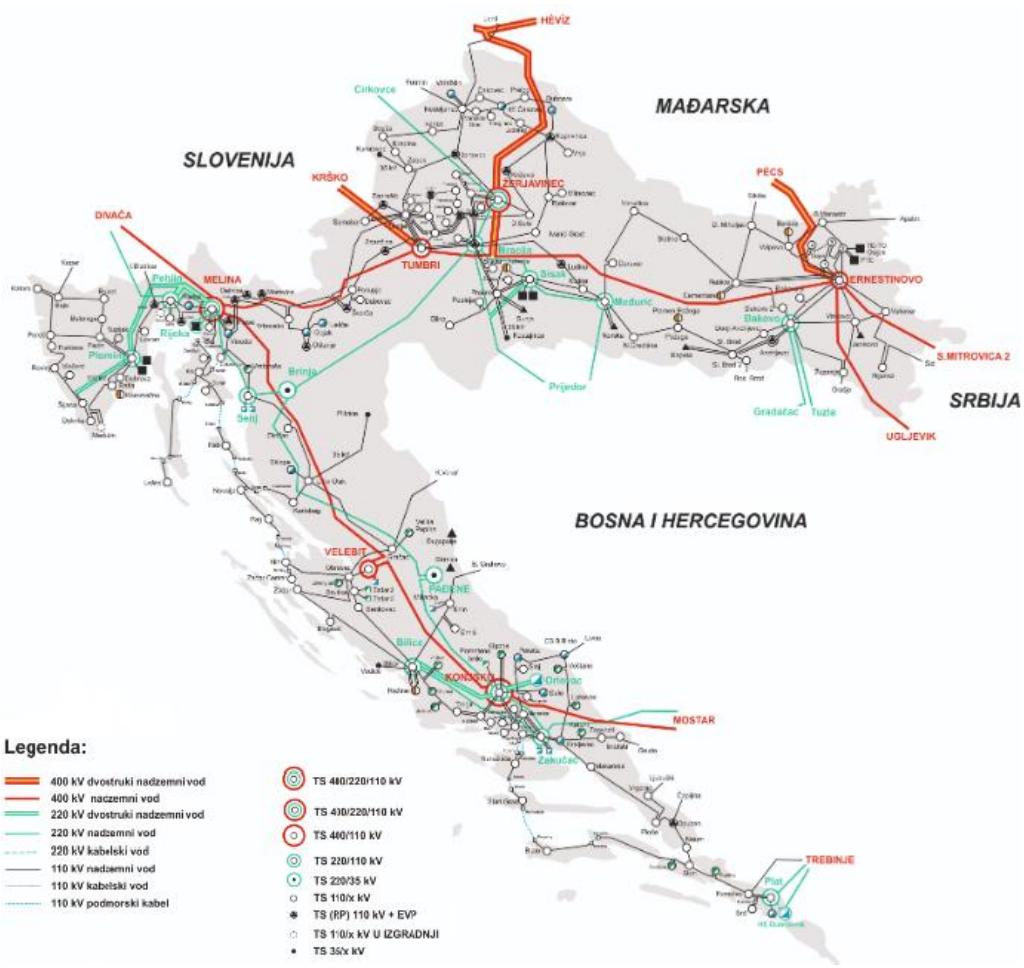
Moderan život nezamisliv je bez električne energije. Elektroenergetski sustavi imaju ključnu ulogu u proizvodnji i prijenosu električne energije. U posljednjih nekoliko desetljeća, elektroenergetski sustavi postali su strukturno složeniji i kompleksniji te time doveli u pitanje vlastitu sigurnost i pouzdanost. Kao i svaki sustav, elektroenergetski sustav je podložan kvarovima, te u konačnici može dovesti do potpunog raspada koji uzrokuje prestanak napajanja potrošača električnom energijom.

U posljednjih dvadesetak godina širom svijeta zabilježen je velik broj rasprostranjenih raspada sustava. Primjerice, nestanak električne energije u Sjevernoj Americi 14. kolovoza 2003. prouzročio je ogroman gubitak, a obnova napajanja električnom energijom trajala je gotovo dva tjedna. Zbog nestanka električne energije u Europi 4. studenoga 2006. godine pogođeno je 15 milijuna ljudi te je oporavak trajao puna dva sata. Brazil i Paragvaj doživjeli su također veliki poremećaj 10. studenoga 2009. Nuklearna elektrana Fukushima ugašena je hitnim intervencijama nakon prirodnih nepogoda 11. ožujka 2011., a njezina vanjska snaga i snaga za slučaj nužde nisu bile dovoljne da podrže hlađenje sustava te je uzrokovano ispuštanje zračenja i druge katastrofalne posljedice. Najveći prekid električne energije u sjevernom dijelu Indije, čije je opterećenje mreže bilo 50 GW, pogodio je 670 milijuna ljudi i trajao je od 30. do 31. srpnja 2012. [1]

Ponovna uspostava sustava jedan je od značajno važnih zadataka pri djelomičnom ili potpunom raspadu elektroenergetskog sustava bez kojeg se ne bi postiglo ponovno stanje normalnog pogona. Ispravan plan obnove, zajedno sa dozom odgovornosti, znanja i kompetentnosti, učinkovito može pridonijeti uspješnijoj i bržoj sanaciji poremećaja ili kvara. Zbog složenosti suvremenih elektroenergetskih sustava, restauracija može biti također prilično kompleksni proces. Prilikom ponovne uspostave sustava treba uzeti u obzir mnoge čimbenike koji doprinose smanjenju ukupnog vremena potrebnog za uspostavljanje sustava. Svakodnevne analize i istraživanja, radi bržeg i učinkovitijeg uspostavljanja sustava, također su od velikog značaja, i u budućnosti će zasigurno omogućiti naprednije i brže metode za ponovnu uspostavu elektroenergetskog sustava. [2]

2. Pregled prijenosnog elektroenergetskog sustava (EES)

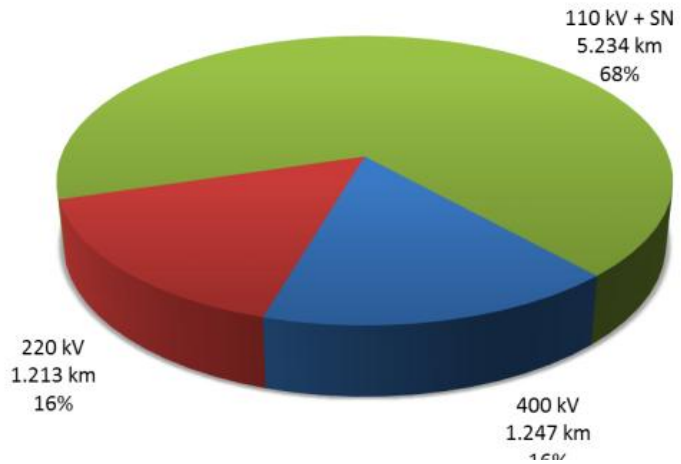
Prijenosni elektroenergetski sustav je sustav sa zadatkom prijenosa električne energije od mjesta proizvodnje do sučelja sa distribucijskom mrežom ili napajanja „velikih potrošača“. Dio je elektroenergetskog sustava i sastoji se od rasklopnih prijenosnih postrojenja, transformatorskih stanica te zračnih vodova i kabela. Električna se energija u hrvatskoj prijenosnoj mreži prenosi naponskim razinama od 400 kV, 220 kV i 110 kV. Operatori prijenosnog sustava odgovorni su za upravljanje prijenosnom mrežom, odnosno, imaju zadatak nadzora i kontrole trenutne topologije mreže (položaj prekidača i sklopki unutar mreže) i regulacije napona u svim dijelovima prijenosne mreže. Na slici 2.1 prikazan je prijenosni elektroenergetski sustav u Hrvatskoj.



Slika 2.1 Shema visokonaponske mreže u Hrvatskoj 2019. godine [3]

Hrvatski elektroenergetski sustav povezan je naponskim razinama 400 kV, 220 kV i 110 kV sa sustavima susjednih zemalja. Dalekovodima 400 kV naponske razine (ukupno sedam dalekovoda od čega su tri dvostruka, a četiri jednostruka) povezan je elektroenergetski sustav RH sa sustavima: [4]

- Bosne i Hercegovine (DV 400 kV Ernestinovo - Ugljevik i DV 400 kV Konjsko - Mostar),
- Srbije (DV 400 kV Ernestinovo – Sremska Mitrovica 2),
- Mađarske (DV 2x400 kV Žerjavinec – Heviz, DV 2x400 kV Ernestinovo – Pecs) i
- Slovenije (DV 2x400 kV Tumbri – Krško, DV 400 kV Melina – Divača)



Slika 2.2 Udjeli prijenosnih dalekovoda u pogonu u vlasništvu HOPS-a, po naponskim razinama u hrvatskom EES-u, 2017. godine [4]

2.1. Rasklopna postrojenja

Budući da se radi o visokim naponima i strujama, nije moguće ostvariti razgranjivanje struje i transformaciju bez posebnih postrojenja. Taj zadatak preuzimaju rasklopna postrojenja. To su točke elektroenergetskog sustava u kojima se električna energija šalje iz generirajućih izvora, distribuira i transformira te isporučuje do mjesta opterećenja. One su međusobne povezane i time čine elektroenergetski sustav jednom velikom mrežom. To povećava pouzdanost sustava napajanja, pružanjem alternativnih puteva za protok električne energije koji vode računa o bilo

kakvim nepredviđenim situacijama, i omogućava da se generatori ne suočavaju s nikakvim prekidima rada.

Rasklopno postrojenje u pravilu treba postojati unutar svakog čvorišta mreže, bez obzira postoji li u tom čvorištu transformacija ili ne. Stoga, rasklopna postrojenja nalaze se u elektranama gdje imaju zadatak raspodjele električne energije proizvedene u generatorima na vodove koji povezuju elektranu s mrežom. I u većih potrošača postoje rasklopna postrojenja koja služe za preuzimanje električne energije iz mreže, za transformaciju i razvod te same energije. [5]

Unutar rasklopnog postrojenja nalaze se sljedeći elementi:

- sabirnički i spojni vodiči, izolatori,
- kabeli u postrojenjima,
- rastavljači, prekidači, sklopke, osigurači,
- odvodnici prenapona,
- mjerni transformatori (naponski i strujni),
- energetski transformatori u postrojenjima,
- prigušnice, kondenzatori, otpornici



Slika 2.3 Dvostupni rastavljač sa središnjim rastavljanjem (Un 60 – 400 kV) [6]

Prema smještaju možemo razlikovati rasklopna postrojenja sa unutarnjom i vanjskom izvedbom. Postrojenja sa unutarnjom izvedbom, nalaze se u zgradama, najčešće konstruiranim i

predviđenim za tu svrhu. Aparati i elementi unutar postrojenja kod unutarnje izvedbe zaštićeni su od vanjskih utjecaja (atmosferskih, prašine i sl.), pa su pojedini dijelovi (izolatori, kabelske glave i dr.) jednostavnije konstrukcije. Postrojenja kod unutarnje izvedbe zahtijevaju posebne zgrade, koje u slučaju vrlo visokih napona moraju biti velike, što uvjetuje visoke troškove izgradnje. Zbog toga se pri vrlo visokim naponima prelazi na postrojenja vanjske izvedbe, a elementi postrojenja moraju biti tako konstruirani da mogu ispravno funkcionirati i kad su izloženi vanjskim utjecajima. [5]



Slika 2.4 Rasklopno postrojenje od 110 kV [7]

Transformatorske stanice (rasklopna postrojenja) važan su dio prijenosnog elektroenergetskog sustava, također, zbog zadatka transformacije napona sa višeg na niži ili obratno. Ako je napon viši, bit će manje gubitaka u transportu električne energije te se zbog toga transport obavlja na višim naponima od onih napona koji su prisutni u samih potrošača. Prijenosna transformatorska stanica prima električnu energiju iz obližnjeg proizvodnog pogona i koristi veliki energetski transformator koji povećava naponsku razinu za daljnji prijenos na veće udaljenosti. Također se koriste i transformatori za snižavanje napona u prijenosu. Prijenosna sabirnica koristi se za raspodjelu električne energije na jedan ili više dalekovoda. Transformatorske stanice također sadrže prekidače koji se koriste za uključivanje i isključivanje proizvodnih i prijenosnih krugova

prema potrebi ili za nužne slučajeve koji zahtijevaju isključivanje strujnog kruga ili preusmjeravanje napajanja.

Hrvatski prijenosni sustav trenutno sadrži ukupno 6 transformatorskih stanica razine 400 kV, te ukupno 15 transformatorskih stanica razine 220 kV. Na naponskoj razini od 110 kV priključeno je ukupno 162 rasklopnih postrojenja 110 kV i transformatorskih stanica 110/x kV. [8]

Prijenosno područje	Broj trafostanica (kom.)				Broj polja s prekidačima (kom.)			
	400/x	220/x	110/x	Ukupno	400	220	110	Ukupno
Osijek	1	1	21	23	9	5	162	176
Rijeka	1	5	40	46	7	40	233	280
Split	2	6	47	55	11	48	275	334
Zagreb	2	3	54	59	18	27	378	423
Hrvatska	**6**	**15**	**162**	**183**	**45**	**120**	**1.048**	**1.213**

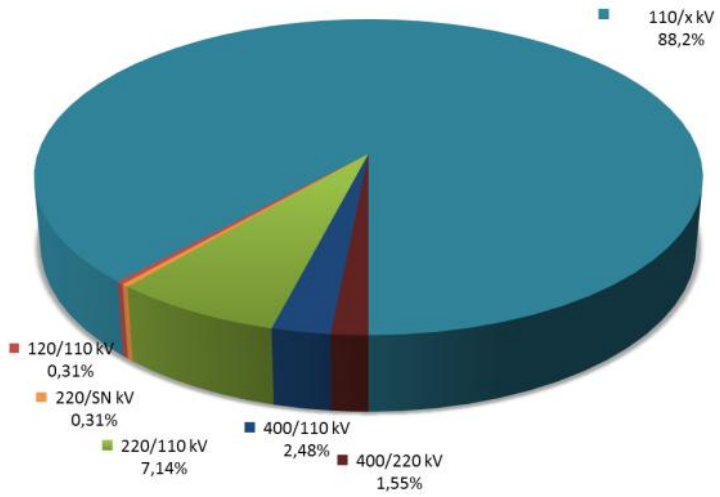
Prijenosno područje	Broj transformatora (kom.)				Instalirana snaga (MVA)			
	400/x	220/x	110/x	Ukupno	400/	220/	110/	Ukupno
Osijek	2	2	33	37	600	300	1.162	2.062
Rijeka	2	9	29	40	800	1.270	780	2.850
Split	3	8	42	53	1.100	1.200	1.622	3.922
Zagreb	6	5	45	56	1.900	800	1.581	4.281
Hrvatska	**13**	**24**	**149**	**186**	**4.400**	**3.570**	**5.145**	**13.115**

Slika 2.5 Prikaz trenutnog broja transformatorskih stanica i transformatora u prijenosnom sustavu u Hrvatskoj [8]

Za hrvatski prijenosni sustav karakteristična je visoka instalirana snaga u VN transformaciji. Pojedinačne snage instaliranih transformatora iznose: [4]

- 400 MVA (400/220 kV), 300 MVA (400/110 kV),
- 150 MVA (220/110 kV),
- 63 MVA, 40 MVA, 31.5 MVA, 20 MVA, 16 MVA (110/x kV)

Transformatori su dijelom izvedeni kao tronamotni, pri čemu se tercijar u pravilu ne koristi za prijenos električne energije. Svi energetski transformatori 400/x kV i 220/x kV izvedeni su kao regulacijski; kod transformatora 220/110 kV pod teretom, a pojedini transformatori 400/110 kV imaju mogućnost vršenja regulacije ili u beznaponskom stanju ili pod teretom. Regulacijske sklopke su uglavnom smještene na primarnim stranama s mogućnošću promjene prijenosnog omjera u opsegu od ±2 x 2,5 % ili 12 x 1,25 % (400/110 kV), te ±12 x 1,25 % (220/110 kV), a regulira se napon sekundarne strane. Transformator 400/220 kV u TS 400/220/110 kV Žerjavinec i transformator 220/110 kV u TS 220/110/35 kV Senj imaju ugrađenu mogućnost regulacije kuta/djelatne snage. TS 400/110 kV Ernestinovo opremljena je s dva regulacijska transformatora 400/110 kV. Transformacija 120/110 kV instalirana je u TS Donji Miholjac (80 MVA; 1999. godina), a tereti se samo kad je potrebno interventno napajanje po vodu Donji Miholjac-Siklos (HU; 120 kV).[4]



Slika 2.6 Udjeli broja pojedinih transformacija u ukupnom broju transformatorskih stanica u hrvatskom EES-u (samo transformatori u vlasništvu HOPS-a) [4]

2.2. Gubici i značajke prijenosne mreže

Mreža za prijenos električne energije trebala bi biti učinkovita, sigurna i istodobno ekonomična. Imajući to na umu, snaga se prenosi visokim naponom iz sljedećih razloga:

- da bi se smanjili gubici snage,
- da bi se smanjili troškovi prijenosa energije,

- da bi se poboljšala učinkovitost prijenosa snage

Gubici snage u dalekovodima proporcionalni su struji koja kroz njih teče. Dalekovodi su obično izrađeni od bakra, aluminija ili njegovih legura. Gubitku energije najviše pridonosi sam otpor dalekovoda. Gubici snage u vodovima zbog otpora nazivaju se gubici u bakru i što su trenutno manji, manji će biti gubici snage. Stoga se, tijekom prijenosa snage, napon podiže kako bi se smanjila struja. Za prijenos iste količine energije na daljinu, gubici snage bit će veći ako se prenose nižim naponom.

Pri određivanju optimalnog napona prijenosa uzimaju se u obzir čimbenici kao što su snaga koja se prenosi i udaljenost potrebna za prijenos. Dalekovodi su dimenzionirani na temelju maksimalne struje koju mogu podnjeti. Ako se količina energije prenosi na nižem naponu, potrebna je površina vodiča mnogo veća od one potrebne za prijenos snage pri višim naponima.

Iz gore navedenog, prijenos snage pod visokim naponom može poboljšati učinkovitost prijenosa snage. Kao rezultat, prijenosni tornjevi (stupovi) ne trebaju biti projektirani tako da podnose težinu žica koje bi prenosile visoku struju. Ova razmatranja čine visokonaponski prijenos na velikim udaljenostima ekonomičnim rješenjem. [9]
Na slici 2.7 prikazan je klasičan primjer visokonaponskog prijenosa električne energije.



Slika 2.7 Visokonaponski prijenos električne energije [9]

2.2.1 Utjecaj distribuiranih izvora na gubitke u mreži

Rastuće svjetske potrebe za energijom i sve veća cijena energenata uzrokovale su veću brigu oko energetske efikasnosti energetskih sustava. Stoga je utjecaj distribuiranih izvora na gubitke u mreži jedan od najbitnijih faktora prilikom njihovog planiranja. Cilj distribuiranih izvora je decentralizacija proizvodnje i djelomično napuštanje izgradnje velikih elektrana gdje se energija prenosi na velike udaljenosti što stvara gubitke u elektroenergetskom sustavu. Distribuirana proizvodnja bi trebala rasteretiti prijenosnu mrežu te na taj način povećati efikasnost sustava. S obzirom da se radi o malim proizvodnim jedinicama koje su priključene na srednjenaponsku (SN) ili niskonaponsku (NN) mrežu, prilikom planiranja bi trebalo osigurati da se proizvedena energija i potroši na istoj ili na nižim naponskim razinama. U suprotnom bi došlo do povećanja gubitaka u mreži te bi korist od takve proizvodnje imao samo vlasnik elektrane kojem je u cilju proizvesti što više energije po poticajnoj cijeni. [10]

Iz podataka u tablici 2.1, vidljivo je da pri snazi elekrane od 30 kVA gubici u mreži postaju veći nego što su u slučaju kad elektrana nije priključena u mrežu. Stoga je prilikom dimenzioniranja elektrane potrebno odrediti vršnu snagu elektrane koja se smije priključiti na mrežu, a da pri tom ne povećava gubitke u mreži. Na taj način se spriječava zlouporaba sustava poticaja za stjecanje financijske dobiti privatnih investitora te se distribuirana proizvodnja usmjerava ka povećanju efikasnosti elektroenergetskog sustava.

Tablica 2.1 Gubici mreže ovisno o snazi solarne elektrane [10]

Snaga solarne elektrane (kVA)	Gubici (kVA)
0	**1,069**
5	**0,811**
10	**0,666**
15	**0,63**
20	**0,699**
25	**0,87**

30	**1,14**
35	**1,504**
40	**1,961**
45	**2,508**
50	**3,141**

2.2.2 Utjecaj distribuiranih izvora na kvalitetu električne energije

Utjecaj distribuiranih izvora na gubitke i naponske prilike se može predvidjeti na temelju proračuna u koji se uvrštavaju realni podaci dobiveni mjerenjem. Međutim, utjecaj distribuiranih izvora na kvalitetu električne energije moguće je odrediti jedino mjernim uređajima. Stoga se provodi mjerenje na mjestu priključenja elektrane prije i nakon priključenja elektrane na mrežu. Prilikom mjerenja promatra se utjecaj elektrane na: [11]

- Frekvenciju
- Harmonijsko izobličenje
- Flickere
- Naponsku nesimetriju
- Faktor snage

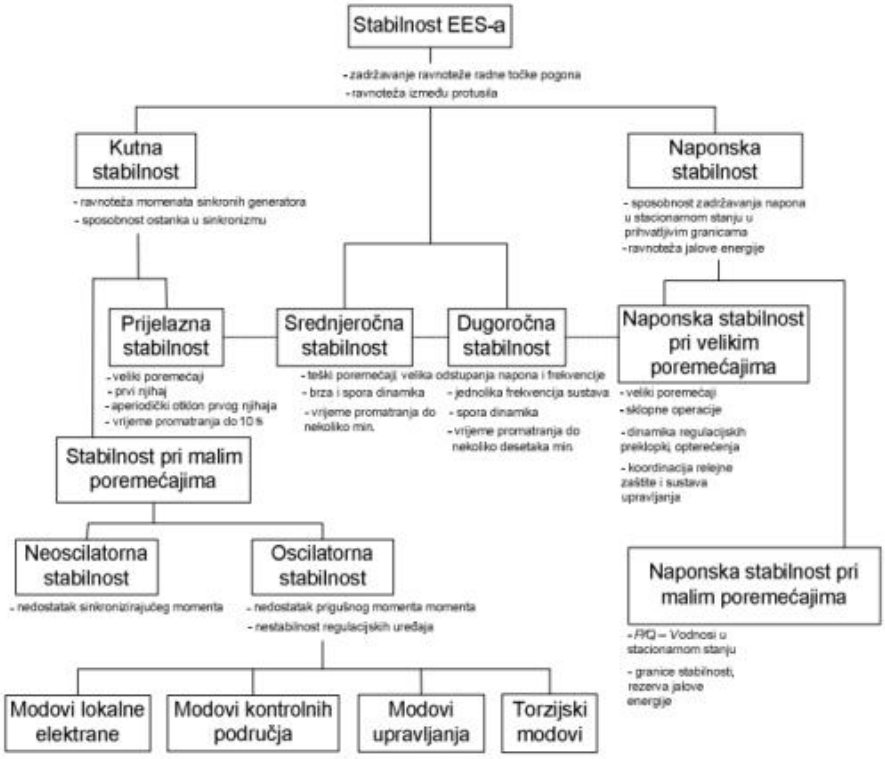
Svi mjereni parametri moraju biti u skladu s važećom normom EN 50160 koja definira kvalitetu električne energije.

3. Stabilnost elektroenergetskog sustava

3.1. Definicija stabilnosti elektroenergetskog sustava

Definicija stabilnosti se može definirati na sljedeći način: Stabilnost je, odnoseći se na elektroenergetski sustav, svojstvo sustava ili jednog njegovog dijela koje ga čini sposobnim razviti među svojim elementima povratne sile veće ili jednake silama poremećaja uspostavljajući ponovno stanje ravnoteže među elementima. [12]

Stabilnost se dijeli na kutnu i naponsku stabilnost, a na slici 3.1. prikazana je klasifikacija stabilnosti elektroenergetskog sustava.



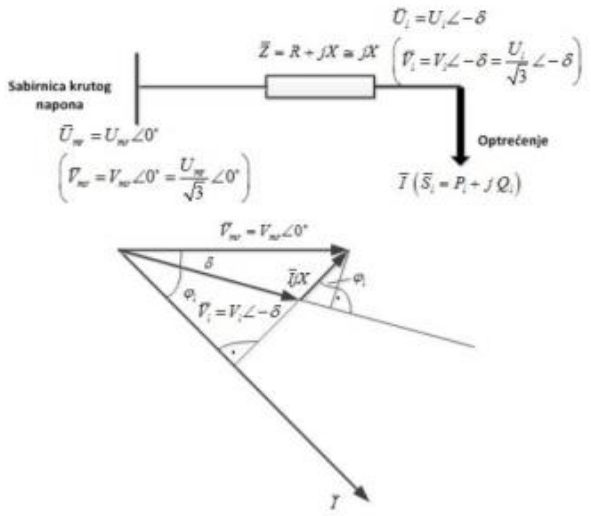
Slika 3.1 Stabilnost elektroenergetskog sustava [11]

Pojam naponske stabilnosti se može definirati kao sposobnost elektroenergetskog sustava da održi prihvatljive vrijednosti napona u svim čvorištima sustava, kako u normalnom pogonu tako i nakon nastanka poremećaja. Glavni uzrok pojave naponske nestabilnosti je nemogućnost elektroenergetskog sustava da isporuči potrebne količine jalove energije što uzrokuje propadanje napona, a naposljetku i slom napona.

S obzirom na dinamički odaziv sustava na veće poremećaje uvode se pojmovi prijelazne, srednjoročne i dugoročne stabilnosti sustava. Ozbiljniji i veći poremećaji uzrokuju fluktuacije frekvencije, napona i tokova snaga što za posljedicu ima djelovanje raznih procesa, regulacijskih mehanizama i zaštita koji nisu modelirani u klasičnim modelima analize prijelazne stabilnosti. Tako se kod prijelazne stabilnosti u obzir uzimaju elementi elektroenergetskog sustava s vrlo brzim odzivom na promjenu napona, dok dugotrajna stabilnost uključuje modeliranje elemenata elektroenergetskog sustava sa sporim odzivom na promjene napona poput dinamike kotlova turbogeneratora, zasićenje transformatora itd. Srednjoročna stabilnost je smještena između prijelazne i dugoročne stabilnosti te uključuje pojave poput djelovanja regulacijskih preklopki transformatora, FACTS uređaja itd. [12]

Naponska stabilnost pri velikim poremećajima je mogućnost održavanja napona u propisanim granicama nakon što je sustav izložen poremećajima kao što su ispad proizvodne jedinice, opterećenja ili visoko opterećenog dalekovoda. Dinamika naponske stabilnosti pri velikim poremećajima uključuje promatranje elemenata kao što su regulacijska preklopka transformatora ili limiter struje uzbude generatora. Ova pojava se proučava pravilnim modeliranjem elemenata mreže, a simulira se u nelinearnoj vremensko – frekvencijskoj domeni te se koristi dinamička analiza. Može se još dodatno podijeliti na prijelaznu i dugoročnu. Naponska stabilnost pri malim poremećajima odnosi se na sposobnost sustava da održi napone u propisanim granicama pri malim poremećajima u sustavu poput kontinuiranog poremećaja sustava. Stabilnost pri malim poremećajima određena je karakteristikama trošila i djelovanjem raznih uređaja za upravljanje u jednom zadanom trenutku. Osnovne pojave koje doprinose nestabilnosti pri malim poremećajima su u suštini stacionarnog karaktera, stoga se ova problematika može promatrati sa stacionarnog stajališta na način da se u radnoj točki linearizira dinamičke jednadžbe sustava. Naponska nestabilnost je u osnovi lokalni problem, ali se može inicirati niz događaja koji dovode do progresivnog i nekontroliranog sniženja napona u znatnom dijelu sistema pri čemu se napon snižava ispod prihvatljivih vrijednosti. Ova pojava se naziva naponski slom ili naponski kolaps. [10] U slučaju naponskog sloma operatori sustava gube kontrolu nad tokovima snaga i vrijednostima napona u pojedinim dijelovima ili cijelom sustavu.

Na slici 3.2 prikazan je jednostavni sustav prijenosa te fazorski dijagram prikazanog sustava gdje se opterećenje opskrbljuje iz krute mreže preko dalekovoda.

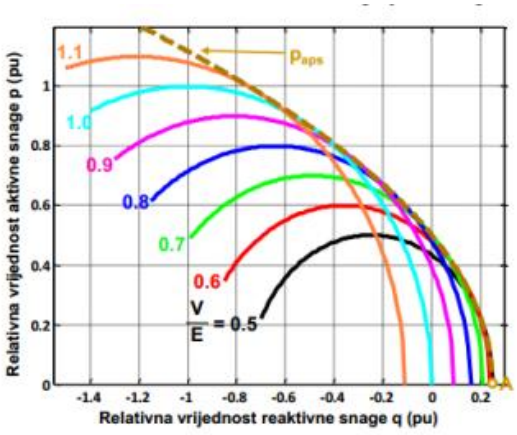


Slika 3.2 Jednostavni prijenosni sustav i pripadajući fazorski dijagram [14]

3.1.1 Analiza naponske stabilnosti u prijenosnoj mreži

Analiza naponske stabilnosti pojedinih sabirnica i vodova u prijenosnoj mreži vrši se uz pomoć P – V i Q – V karakteristika prijenosa i određivat će se za sustav prema slici 3.3. Prikazane karakteristike opisane su sljedećim relacijama:

$$p = \frac{X_L P}{E^2} \qquad q = \frac{X_L Q}{E^2} \qquad v = \frac{V}{E}$$

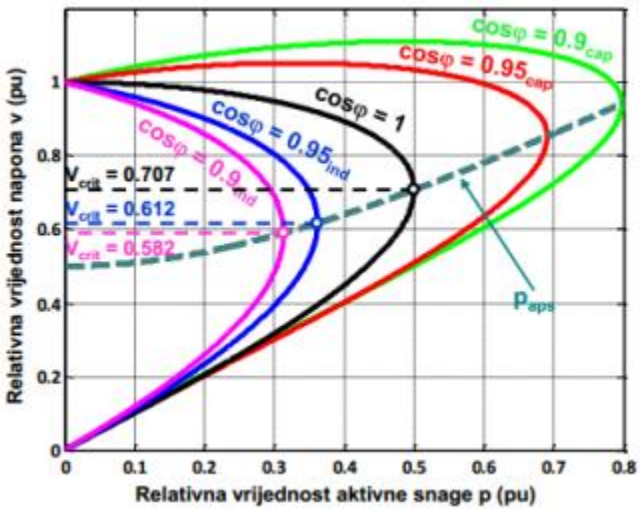


Slika 3.3 P – Q karakteristike prijenosnog sustava [15]

Slika 3.3 pokazuje da je potrebno izvršiti kompenzaciju jalove snage prilikom većih prijenosa aktivne snage za uobičajene odnose napona V i E. Svakoj radnoj točki unutar parabole

odgovaraju dvije moguće vrijednosti napona na sabirnicama trošila. Točki koja leži na samoj envelopi odgovara samo jedna vrijednost napona. Izvan envelope ne postoje radne točke.

P – V krivulje pokazuju ovisnost napona o injektiranoj radnoj snazi u promatranom čvorištu.



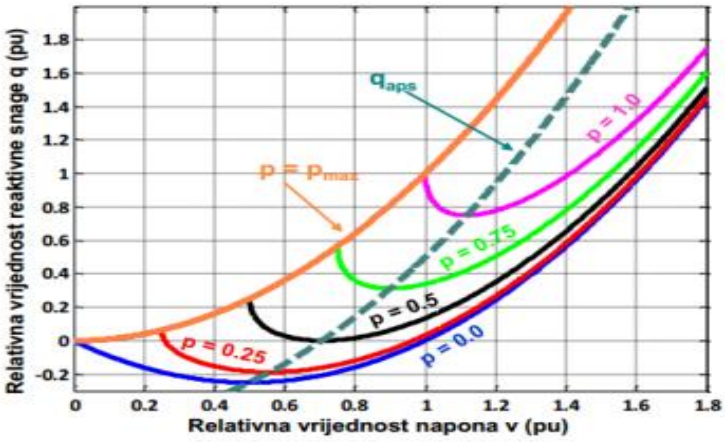
Slika 3.4 P – V karakteristike prijenosnog sustava s različitim faktorom snage [15]

Iz krivulje se primjećuje nelinearan odnos dvaju promatranih veličina. S obzirom da je elektroenergetski sustav radno – induktivnog ili radnog karaktera, primjećuje se da se za takve karaktere opterećenja pri injektiranju snage na sabirnicu potrošača, napon sabirnice opada. Točka kojoj odgovara kritični prijenos snage naziva se koljeno P – V krivulje. Na slici 3.4 može se vidjeti da za cosφ = 1 prijenos aktivne snage na koljenu krivulje iznosi 0.5, dok vrijednost napona iznosi oko 70 %. Kada bi na promatranoj sabirnici opterećenje naraslo iznad 0.5, došlo bi do pada prijenosa snage i naglog pada napona što dovodi do nestabilnosti sustava i mogućnosti pojave naponskog sloma. Prilikom velikog opterećenja javljaju se velike struje, a posljedica toga su i veliki gubici koji su proporcionalni kvadratu struje i stvaraju velike padove napona.

Jedno od rješenja koje se implementira u prijenosni sustav je ugradnja kompenzacijskih uređaja poput kondenzatorskih baterija koje predstavljaju jeftin izvor reaktivne snage. Sa slike 3.4 može se vidjeti da priključenjem sve više kondenzatorskih baterija koljeno P – V krivulje pomiče u desnu stranu i prema gore. Može se zaključiti da se povećavaju napon i maksimalna snaga prijenosa. Takva situacija može biti neugodna iz razloga jer se maksimalna vrijednost snage prijenosa postiže pri naponima koji se malo razlikuju u odnosu na nazivnu vrijednost. [12]

Ta negativna posljedica dodavanja velikog broja kondenzatorskih baterija naziva se maskiranje koljena P – V karakteristike i njome nestaje najvažniji pokazatelj naponske nestabilnosti, a to je nagli pad napona. Isto tako, na slici 3.4 se može primijetiti da na obje karakteristike kojima je opterećenje u kapacitivnom području postoji dio karakteristike u kojemu napon raste s povećanjem opterećenja na iznose većih od nazivnih. Taj problem se može riješiti ugradnjom poprečnog FACTS kompenzacijskog uređaja s mogućnošću regulacije napona koji će održavati napon na potrošačkoj sabirnici na iznosu od 1.

Q – V krivulje se razvijaju za sabirnice koje se smatraju kritičnim odnosno najpodložnijim naponskoj nestabilnosti pa čak i naponskom slomu. Ove karakteristike pokazuju reaktivnu osjetljivost, odnosno ovisnost promjene reaktivne snage od varijacija napona na promatranim sabirnicama. Svaka Q – V krivulja prikazuje koliko je dodatne reaktivne snage potrebno injektirati u sabirnicu kako bi se napon te sabirnice održao u propisanim granicama pri konstantnoj injekciji aktivne snage. [12]



Slika 3.5 Q – V karakteristike prijenosnog sustava [15]

Rezerva reaktivne snage, koja označava blizinu naponske nestabilnosti, izražava se preko razlike reaktivne snage u radnoj točki sustava i minimuma Q – V karakteristike. Ako je rezerva reaktivne snage negativna tada sistem ne može raditi bez injektiranja dodatne reaktivne snage. Takva situacija se javlja kada uslijed poremećaja dođe do povećanja reaktancije sistema.

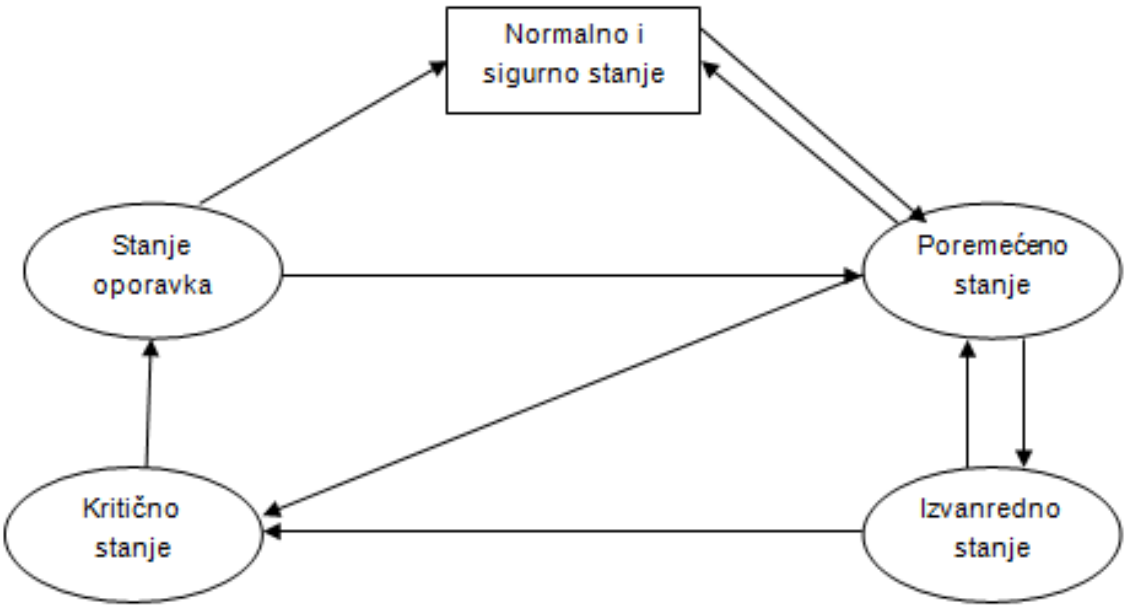
Kombinacija P – V i Q – V krivulja koristi se radi lakšeg dobivanja informacija vezanih za naponsku stabilnost sustava. Nakon identifikacije kritične sabirnice, za tu sabirnicu se određuje P

– V karakteristika te utvrđuje vrijednost aktivne snage na koljenu krivulje te se odabire radna točka koja je zbog sigurnosnih razloga na manjoj snazi nego koljeno karakteristike. Tada se za tu radnu točku kreira Q – V karakteristika putem koje se utvrđuje kolika reaktivna snaga je potrebna za održavanje stabilnosti napona na sabirnici i utvrđuje se rezerva reaktivne snage. [16]

3.2. Pogonska stanja elektroenergetskog sustava

Na temelju sigurnosnih razina elektroenergetskog sustava njegova operativna stanja možemo podijeliti na: normalno i sigurno radno stanje, poremećeno stanje, izvanredno stanje, kritično (izuzetno, ekstremno) stanje i stanje oporavka sustava. [17]

Pogonska stanja elektroenergetskog sustava prikazana su na slici 3.6 i nadalje su pobliže objašnjena.



Slika 3.6 Pogonska stanja elektroenergetskog sustava [17]

Normalno stanje

U normalnom stanju ravnoteža proizvedene snage i opterećenja je zadovoljavajuća i nikakva oprema nije preopterećena. Svi naponi su u normalnim granicama, stoga sustav ima dovoljnu sigurnosnu granicu da izdrži bilo kakve nepredviđene događaje.

Poremećeno stanje

U ovom stanju ravnoteža između proizvedene snage i opterećenja je također zadovoljavajuća kao i u prethodnom stanju. Nikakva oprema nije preopterećena. Nijedan napon nije izvan svojih granica. Međutim, ukoliko dođe do ozbiljnijih nepredviđenih situacija, oprema u sustavu će se preopteretiti i doći će do narušavanja napona.

Izvanredno stanje

Balans između proizvedene snage i opterećenja i dalje je zadovoljen. Međutim, u izvanrednom stanju, ili se preopterećuje napon, ili se on prekida. Ukoliko se poduzmu odgovarajuće korektivne radnje, stanje se i dalje može vratiti u normalno i sigurno radno stanje ili barem u stanje uzbune.

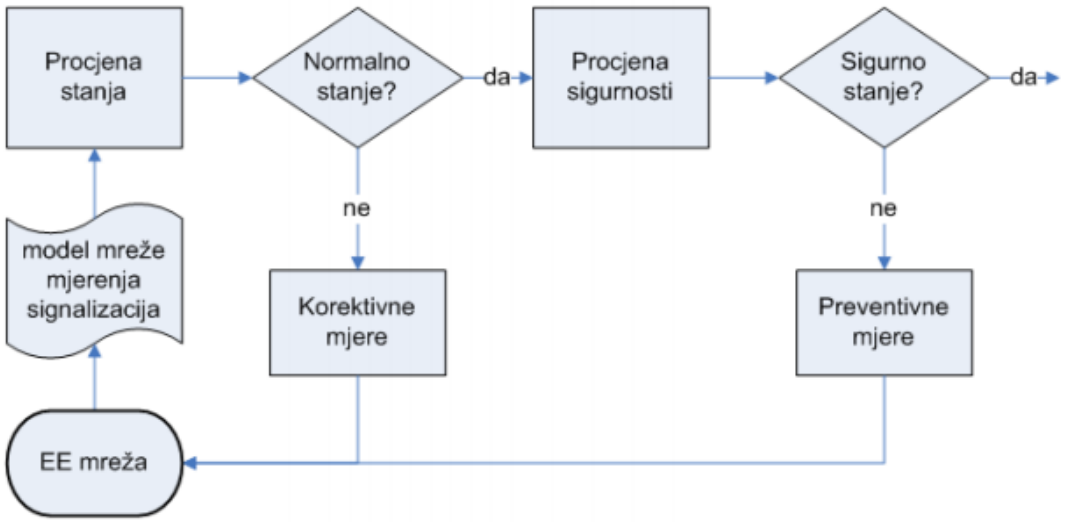
Kritično stanje

U ovom stanju ravnoteža između proizvedene snage i opterećenja nije balansirana. Dolazi do narušavanja napona i neka oprema je preopterećena. U tom stanju nastaju kaskadni ispadi. Može se rasteretiti opterećenje kako bi se uštedjelo onoliko sustava koliko je moguće.

Stanje oporavka

U ovom stanju operateri vrše kontrolne radnje za obnavljanje sustava i vraćanje svih njegovih prethodnih opterećenja. Ovisno o različitim slučajevima, sustav se može ponovno vratiti ili u normalno i sigurno radno stanje ili u stanje uzbune.

3.3.1 Sigurnosne razine kod procjene stanja elektroenergetskog sustava



Slika 3.7 Procjena stanja elektroenergetskog sustava [18]

Prema slici 3.7 možemo vidjeti da se prvo procjenom stanja utvrđuje da li je stanje normalno. 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. [11]

Sigurnosni nadzor

Koriste se postupci mjerenja pomoću računalnog sustava za nadzor, mjerenje i upravljanje (SCADA), procjenjuje se stanje i utvrđuje da li je sustav u normalnom radnom i sigurnom stanju ili nije.

Sigurnosna analiza

Analiza sigurnosti koristi se za provjeru sposobnosti sustava da podnese smetnje. Ako je sustav u normalnom radnom stanju, analiza izvanrednih situacija koristi se za testiranje same sigurnosti

sustava. Ako se u analizi nepredviđenih slučajeva prekrši jedno ili više operativnih ograničenja, sustav postaje nesiguran. U protivnom je siguran.

Određivanje sigurnosne granice

Za određeno radno stanje, određivanje sigurnosnih granica pomoću nekih odabranih varijabli koristi se za samu procjenu razine sigurnost sustava. Te su granice također vrlo važne u segmentu tržišne okoline. U tom slučaju operateri znaju koliko povećanje opterećenja može biti prihvatljivo prije nego što sustav postane nesiguran.

3.3. 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. [12]

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

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.[12]

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.

Zadaća sekundarne regulacije je kompenzacija 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 kojem 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 normalnom pogonu, odnosno bez poremećaja, tokovi snaga između područja slijede unaprijed dogovoreni plan. [12]

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.

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:

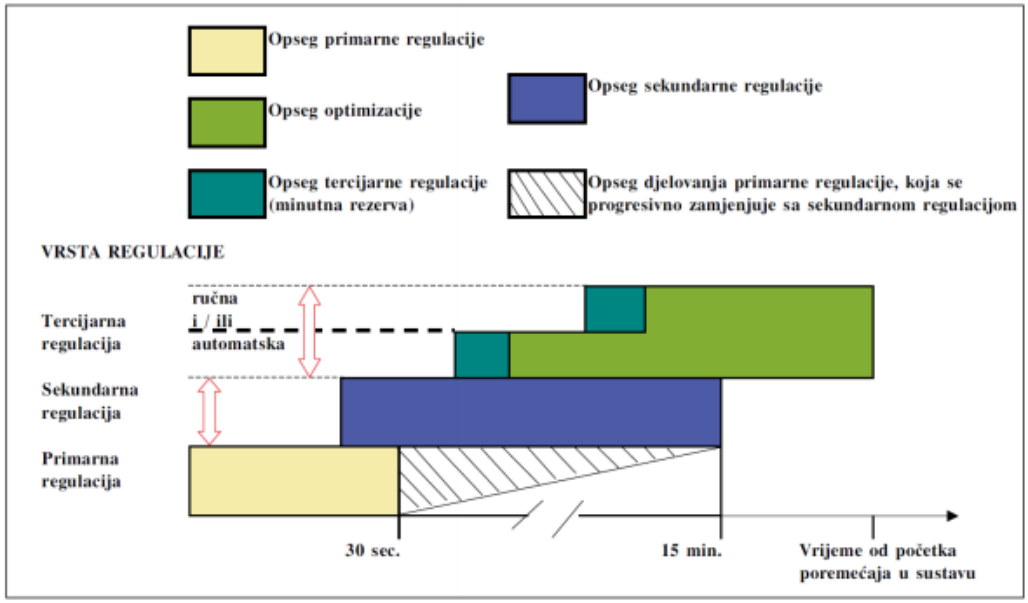
- uključenjem elektrana koje se lako pokreću
- upravljanjem potrošnjom
- promjenom plana razmjene ili
- preraspodjelom snage regulacijskih elektrana

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 je vrlo zahtjevna. 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. [16]



Slika 3.8 Prikaz trajanja pojedinih regluacija [19]

4. Utjecaj karakteristika tereta na uspostavu sustava

U dosadašnjem razmatranju, pri određivanju P – V i Q – V karakteristika, snaga opterećenja se mijenjala kao neovisan parametar ne vodeći pri tome računa o priključenom trošilu. U realnom slučaju, snaga trošila ovisna je o naponu te sabirnice i takva funkcija se naziva naponskom karakteristikom opterećenja.

Kod ponovne uspostave sustava, stalna promjena konfiguracije EES-a i pogonskih stanja može dovesti do neželjene prorade relejne zaštite. U slučajevima kada dolazi do naglog pada frekvencije potrebno je provesti rasterećenje sustava, odnosno aktiviranje planova podfrekvencijskog rasterećenja kako bi se izbjegao ponovni raspad sustava.

Tijekom postupka ponovne uspostave sustava, za ravnotežu između radne snage i frekvencije, potrebno je održavati frekvenciju sustava u dopuštenim granicama koristeći silu proizvodnih jedinica (posebice turbine) i postavkama zaštite. Takvo se stanje postiže uspostavom (ili podizanjem) opterećenja u koracima koji se mogu prilagoditi inerciji cijelog sustava i odzivu sinkroniziranog sustava.

Za održavanje ravnoteže između napona i jalove snage, te tijekom postupka uspostave sustava poduzimaju se sljedeće operacije: rad generatora na minimalno dozvoljenim razinama napona, uspostavljanje napajanja visokonaponskih vodova na napon koji je niži od nazivnog, isključenje statičkih kondenzatora, uklapanje prigušnica, prepodešenje regulacijskih transformatora i podizanje tereta s induktivnim faktorima snage [20].

Prilikom samopokretanja (crni start) može doći do pojave prenapona u određenim dijelovima sustava. Prijelazni prenaponi mogu nastati i kao posljedica djelovanja prekidača, odnosno nastaju sklopni prenaponi. Stoga treba paziti da se uklapa veći dio sustava relativno brzo da bi se izbjegao rizik od oštećenja izolacije [21].

Ako je napajanje tereta isključeno nekoliko sati ili duže, struja kod ponovnog pokretanja (uklapanje u hladnom stanju) može biti (8-10) puta veća od nazivne vrijednosti. U navedenoj skupini trošila podrazumijevaju se termostatski kontrolirana trošila poput klima-uređaja, hladnjaka, zamrzivača, peći i električne grijalice, visokonaponski motori te rasvjeta [22].

Postoji mogućnost samouzbude proizvodnih jedinica ukoliko je struja uzbude relativno velika u odnosu na snagu proizvodne jedinice. Rezultat samouzbude može biti nekontrolirani porast napona i može rezultirati oštećenjem primarne opreme u krugu proizvodne jedinice. Samouzbuđivanje se može dogoditi i sa strane tereta. Posljedica takve samouzbude je gubitak napajanja na strani tereta.

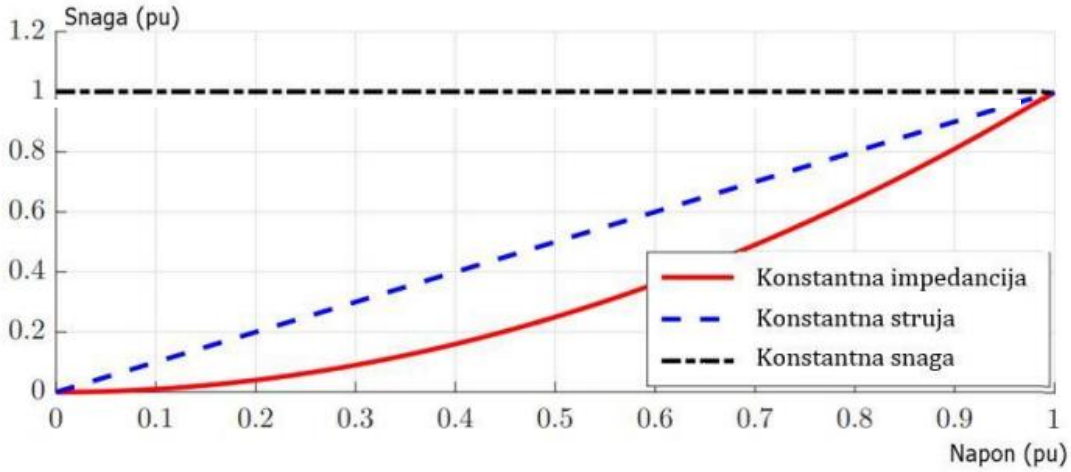
Modeliranje tereta (opterećenja) odnosi se na matematičko prikazivanje odnosa napona i snage u sabirnici tereta [23]. Modeli tereta mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije: statički i dinamički modeli [24]. Pri trajanju uspostave sustava frekvencija i napon će se dinamički mijenjati sve do uspostave stacionarnog pogonskog stanja dijela sustava (otoka), a u konačnici i cijele interkonekcije. Utjecaj različitih tereta priključenih u čvorištima prijenosne mreže, te njihova međusobna ovisnost o frekvenciji i naponu, izazivaju potrebu uzimanja u obzir dinamičkih promjena opterećenja prilikom trajanja uspostave sustava. Osnovni modeli tereta opisanu su u nastavku.

4.1. Statički modeli

Statički modeli tereta izražavaju radnu i jalovu snagu u vremenskoj domeni kao funkcije amplitude napona i frekvencije sabirnice koja je spojena sa teretom.

4.1.1 ZIP model

Zip model najčešće se koristi kod stacionarnih i dinamičkih studija [23]. Ovaj model predstavlja odnos između amplitude napona i snage u polinomnoj jednadžbi sa kombiniranim komponentama konstantne impedancije (Z), struje (I) i snage (P) tereta [23] – ZIP (slika 4.1).



Slika 4.1 Karakteristika ZIP tereta [23]

4.1.2 Eksponencijalni model

Eksponencijalnim modelom opisani su snaga i napon na sabirnici tereta eksponencijalnim jednadžbama. Ovaj model predstavlja relativno jednostavne izraze i obično je korišten kod predstavljanja mješovitih vrsta opterećenja priključenih na istu sabirnicu. [25]

Eksponencijalni model opisan je sljedećim relacijama:

$$P = P_n\left(\frac{U}{U_n}\right)^{k_{pu}}\left(\frac{f}{f_n}\right)^{k_{pf}} \tag{4.1}$$

$$Q = Q_n\left(\frac{U}{U_n}\right)^{k_{qu}}\left(\frac{f}{f_n}\right)^{k_{qf}} \tag{4.2}$$

Konstante k_{pu}, k_{qu}, k_{pf} i k_{qf} parametri su modela trošila i razlikuju se kod svakog pojedinog trošila. Također su još i poznati kao faktori osjetljivosti, koji izražavaju radnu i jalovu snagu s obzirom na napon i frekvenciju, a u odnosu na nazivni napon U_n i nazivnu frekvenciju f_n. P_n i Q_n su nazivne radne i jalove snage.

4.1.3 Model ovisan o frekvenciji

Model tereta ovisnog o frekvenciji prikazan je i opisan izrazima (4.3) i (4.4):

$$P = P_n\left[Z_p\left(\frac{U}{U_n}\right)^2 + I_p\left(\frac{U}{U_n}\right) + P_p \right]\left(1 + k_{pf}\Delta f\right) \quad (4.3)$$

$$Q = Q_n\left[Z_q\left(\frac{U}{U_n}\right)^2 + I_q\left(\frac{U}{U_n}\right) + P_q \right]\left(1 + k_{qf}\Delta f\right) \quad (4.4)$$

Gdje su Z_p, I_p, P_p, Z_q, I_q i P_q parametri modela koji predstavljaju postotne vrijednosti konstantne impedancije, konstantne struje i konstantnu snagu. Nadalje, izraz:

$$\left(1 + k_{pf}\Delta f\right) \quad (4.5)$$

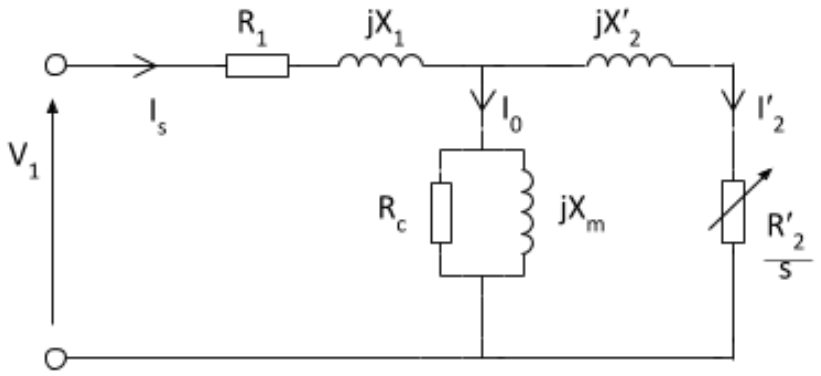
odražava frekvencijsku ovisnost modela. Potrebno je uočiti da je izraz (4.5) Taylorova aproksimacija izraza: $\left(\frac{f}{f_n}\right)^{k_{pf}}$ prikazanog u (4.1) i (4.2). Pored toga je $\Delta f = \frac{f - f_n}{f_n}$, gdje je f_n nazivna frekvencija, a f frekvencija u sabirnici. [26]

4.2. Dinamički modeli

Dinamički modeli tereta izražavaju radnu i jalovu snagu kao funkciju napona i vremena. Primjeri široko korištenih dinamičkih modela prikazani su u nastavku.

4.2.1 Asinkroni motor (IM)

U dinamičkim modelima radna i jalova snaga predstavljena je funkcijom amplitude napona i frekvencije na sabirnicama na koju je priključen motor. Ova vrsta modela obično se izvodi iz ekvivalentnog kruga asinkronog motora [23], prikazanog na slici 4.2, gdje su Rs i Rr statički i rotorski djelatni otpori, Xs, Xr i Xm su statička, rotorska i magnetizirajuća reaktancija, odnosno s je klizanje rotora. [27]



Slika 4.2 Model asinkronog motora [28]

4.2.2 Model tereta s eksponencijalnim oporavkom (eng. Exponential Recovery Load – ERL)

ERL model tereta pogodan je za korištenje prilikom analize uspostave sustava te predstavlja odzive radne i jalove snage u odnosu na stupnjevanje poremećaja napona u čvorištu. Ovaj se model obično koristi za terete koji se vremenski oporavljaju u rasponu od nekoliko sekundi do nekoliko desetaka minuta. ERL se također koristi za modeliranje regulacijske preklopke u automatskim regulacijskim transformatorima (eng. On-Line tap Changer - OLTC) pri uspostavi nominalnog napona čvorišta nakon poremećaja. Model je razvijen kao nelinearna jednadžba prvog reda za predstavljanje odziva tereta, kao što je prikazano u izrazima (4.6) - (4.9). [27], [29]

$$T_p \frac{dx_p}{dt} = -x_p + P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{ps}} - P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}} \tag{4.6}$$

$$P_d = x_p + P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}} \tag{4.7}$$

$$T_q \frac{dx_q}{dt} = -x_q + Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qs}} - Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qt}} \tag{4.8}$$

$$Q_d = x_q + Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qt}} \tag{4.9}$$

pri čemu su x_p i x_q varijable stanja povezane s dinamikom radne i jalove snage, T_p i T_q su vremenske konstante eksponencijalnog odziva oporavka, N_{ps} i N_{qs} su konstante povezane s odzivom tereta u stacionarno stanje, N_{pt} i N_{qt} su konstante povezane s odzivom tereta u prijelaznom stanju.

ERL model može biti dodatno proširen kao adaptivni dinamički model. Model ima iste karakteristike kao i eksponencijalni model oporavka, ali snaga je u funkciji napona pomnoženog s varijablama stanja. [30]

$$T_p \frac{dx_p}{dt} = -x_p\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{ps}} + P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}} \tag{4.10}$$

$$P_d = x_p\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}} \tag{4.11}$$

$$T_q \frac{dx_q}{dt} = -x_q\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qs}} + Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qt}} \tag{4.12}$$

$$Q_d = x_p\left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qt}} \tag{4.13}$$

5. Ponovna uspostava sustava nakon raspada elektroenergetskog sustava

5.1. Teorijske osnove ponovne 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. [31]

Nacionalni dispečerski centar (NDC) kontrolira samu uspostavu. Kada poremećaj obuhvati područje odgovornosti operatora prijenosnog sustava (npr. HOPS), te jednog ili više susjednih operatora prijenosnog sustava, mora se odrediti dva voditelja:

- Voditelja frekvencije, koji će samostalno regulirati i održavati frekvenciju,
- Voditelja rezonancije, koji koordinira voditelje frekvencije prilikom spajanja sa susjednim sinkronim područjima.

Havarije mogu dovesti do djelomičnog ili potpunog raspada elektroenergetskog sustava. Kada dođe do raspada u sustavu, to znači da je došlo do nestanka napona u cijelom elektroenergetskom sustavu ili u njegovom velikom dijelu. Posljedica toga je gubitak tereta (opterećenja), i/ili ispadi proizvodnih jedinica sa mreže, odnosno dolazi do njihovog prijelaza u rad u praznom hodu i napajanja 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 bi 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 kvara. 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 iz vlastite proizvodnje. Kako je već spomenuto, havarije, odnosno djelomični i potpuni raspad elektroenergetskog sustava dovodi 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. [31]

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 uništenja opreme. Ponekad takve lokalne akcije i radnje mogu privremeno narušiti trenutnu sigurnost sustava.

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

Ukoliko dođe do djelomičnog ili potpunog raspada EES-a, osnovni cilj operatora sustava u suradnji s ostalim sudionicima koji sudjeluju u uspostavi sustava je određivanje prioriteta i smjernica za ponovnu uspostavu kontrolnog područja. To podrazumjeva sljedeće: [32]

- objavljuje se izvanredno stanje kako bi se službeno obavijestili svi sudionici u sustavu,

- aktiviranje plana djelovanja u izvanrednim okolnostima,
- izdavanje uputa svim operatorima nižeg ranga (centri vođenje – mrežni centri prijenosne mreže, operatori distribucijskih mreža, operatori u elektranama),
- obavještavanje i dogovor s operatorima susjednih sustava,
- određivanje osnovnih smjernica za djelovanje sa svrhom ponovne uspostave sustava,
- upućivanje radnih procedura,
- aktiviranje procedura za raspodjelu opterećenja potrošača u izvanrednim okolnostima,
- formiranje ekipa za hitne slučajeve (po potrebi),
- izvještavanje o događajima i službene objave.

Stanje u sustavu mora se odrediti prije početka radova na prespajanju sustava ili ponovnoj uspostavi sustava za isporuku električne energije. Prilikom određivanja stanja u sustavu treba imati u vidu ograničenja koja mogu usporiti proces ponovne uspostave sustava, te ih poštivati prilikom ponovne uspostave. Određivanje stanja u proizvodnji podrazumijeva: [32]

- određivanje stanja i energetskih potreba TE i HE,
- određivanje koje proizvodne jedinice rade:
    - odvojeno i podržavaju svoje pomoćne pogone,
    - odvojeno unutar drugog kontrolnog područja, izolirano od opterećenja,
    - određivanje koje proizvodne jedinice imaju dodatne i dostupne kapacitete,
    - određivanje koje proizvodne jedinice su van pogona i energetske potrebe za njihovo pokretanje.

Iako bi se sa ponovnom uspostavom sustava trebalo započeti što je prije moguće, prije toga bi trebalo odrediti uzrok poremećaja, budući da su mjere opreza vrlo važne ako je uzrok nepoznat. Također, u slučaju elementarnih nepogoda (potres, poplava, požar i dr.), prilikom ponovne uspostave sustava potrebno je poslati osoblje da zbog mogućih oštećenja provjeri stanje postrojenja bez posade/nadzora.

Osnovni načini ponovne uspostave sustava su:

a) pomoću interkonektivnih vodova prema susjedni EES-ima

b) preko vlastitih elektrana koje se mogu pokrenuti bez vanjskog napajanja

Uspostava sustava pomoću interkonektivnih vodova pogodna je za brzo postizanje napona uz stabilnu frekvenciju. Dispečerski centri, odnosno operator sustava u koordinaciji s ostalim sudionicima u uspostavi sustava, zaduženi su za pronalaženje mogućnosti za dobivanje napona od operatora sustava susjednih EES-a i postizanje dogovora o potrebnoj snazi ispomoći. Operator sustava, u dogovoru sa susjednim operatorima, određuje potrebne radnje i približno potrebnu snagu (uz postepeno pokretanje vlastitih proizvodnih postrojenja) kako bi se u graničnim trafostanicama postigao zadovoljavajući napon u stanju bez opterećenja. Zbog toga operator sustava mora izraditi detaljan plan djelovanja, te usuglasiti operativne sporazume s operatorima susjednih EES-a sustava kojima su predviđene potrebne mjere i procedura u ovakvim slučajevima. Navedene mjere sadrže: [32]

- principe i prioritete primjenjive za uspostavu opskrbe u graničnim područjima,
- osnovna upozorenja za upravljanje,
- površinu povezanih područja,
- tehničke i organizacijske podatke o elektranama i trafostanicama.

Operator sustava donosi odluku o uključenju pojedinačnih dalekovoda 400, 200 i 110 kV, mrežnih transformatora i kompenzacijskih uređaja, izrađuje 'slijepu' shemu, i u suradnji s distribucijskim operatorima, postepeno sinkronizira i povezuje dijelove sustava. Ponovno uključenje interkonektivnih prijenosnih vodova traži posebno pažljiv pristup, pri čemu je potrebno: [32]

- provjeriti da li je razmjena na nuli preko otvorenih interkonekcija,
- koordinirati ponovno usklađivanje (sinkronizaciju) interkonekcija na svim razinama upravljanja prijenosnom mrežom,
- provjeriti usklađenost kuteva i razina napona,
- uskladiti opterećenje prihvaćanja s drugim postrojenjima i kontrolirati pouzdanost.

Uspostava sustava pomoću vlastitih elektrana moguća je preko elektrana koje imaju mogućnost pokretanja bez mrežnog (vanjskog) napona, što je nužno u slučaju da nije moguće preuzeti napon iz vanjskih sustava. Ovakva uspostava sustava je teža i duže traje, ali uz razrađene procedure, obučenost osoblja i suradnju svih sudionika može se izvesti bez većih problema. Interesantno je napomenuti da su za vrijeme domovinskog rata bila 42 totalna raspada na području otočnog rada

Dalmacije i BiH, a uspostava sustava uz sva ograničenja u proizvodnji, prijenosnoj mreži i potrošnji električne energije obično je trajala 15 do 30 minuta.

Da bi se osigurala ponovna uspostava sustava, svi proizvodni kapaciteti trebaju imati upute odnosno proceduru rada (emergency code definiran od strane operatora sustava) za vrijeme ponovne uspostave sustava. Nakon pokretanja proizvodnih kapaciteta, daljnju uspostavu sustava treba graditi na ponovnoj uspostavi što većeg dijela mreže, prije potpune uspostave potrošačkog opterećenja, koje podrazumjeva: [33]

- uključenje opterećenja potrošača potrebnog za kontrolu frekvencije, napona i stabilnosti proizvodnje,
- ponovno usklađivanje dostupne proizvodnje s opterećenjem potrošača kada to omogućava stanje u mreži,
- nakon djelomičnog raspada (izolirana područja) koristi se mreža, kad je to moguće, za usmjeravanje energije (slanje napona) za ponovno pokretanje isključene proizvodnje i ponovna uspostava interkonekcija unutar kontrolirane mreže i prema susjednim kontrolnim područjima.

Ponovna uspostava opterećenja potrošača, u što kraćem roku, vrlo je važna karika uspostave sustava, a i potvrđivanje povratnog kapaciteta povezanih proizvodnih postrojenja prije preuzimanja većih opterećenja potrošača. Pri tome treba voditi računa da se: [33]

- uključe dodatni učinci gubitaka u prijenosnoj mreži,
- osiguraju dovoljne količine izravno povezane proizvodnje,
- izolirani proizvodni kapaciteti bitno prelaze količinu opterećenja koju trebaju prihvatiti,
- frekvencija može povećati iznad 50 Hz u očekivanju prihvata povećanog početnog opterećenja,
- ne dozvoli prevelika izravna povezana proizvodnja bez opterećenja potrošača
- sustav treba stabilizirati prihvaćanjem malog i kontroliranog opterećenja potrošača.

Pri tome treba naglasiti da ponovno povezivanje izoliranih područja (naročito onih s izravno povezanom proizvodnjom) ima prednost pred uspostavom usluga za krajnje potrošače. Ako se utvrdi da će se zbog stanja sustava usklađivanje izoliranih sustava morati odgoditi, pojedinačnim će se područjima upravljati tako da se uspostavi ravnoteža s dostupnim proizvodnim

kapacitetima. Prioritet pred ponovnom uspostavom usluga za sve krajnje potrošače ima energija potrebna za pokretanje dostupnih proizvodnih kapaciteta, a onda opskrba velikih gradova. [33]

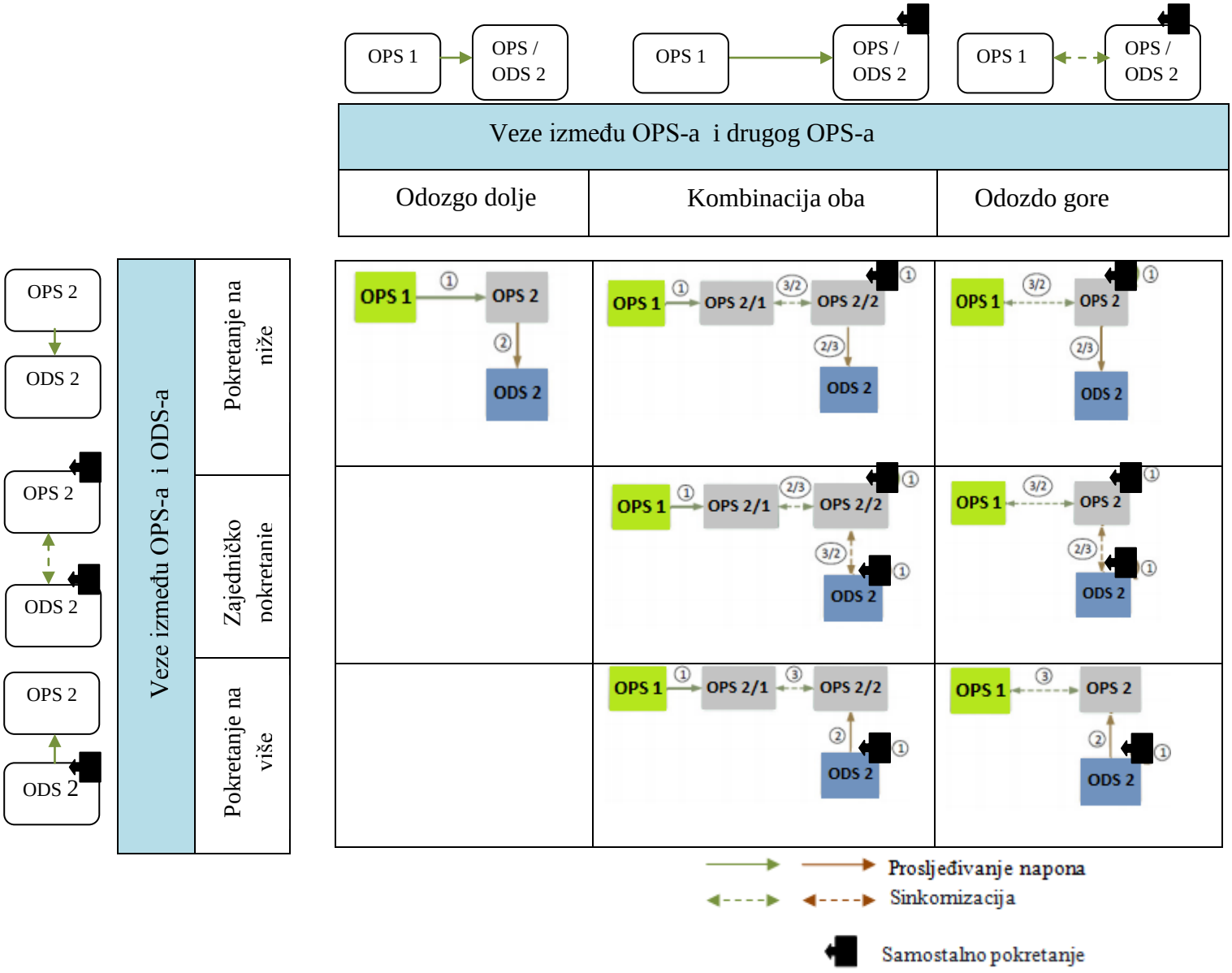
5.2. Metode ponovne uspostave sustava

U slučaju poremećaja i ispada cijelog sustava, moraju biti dostupne strategije obnove koje određuju i opisuju kako obnoviti elektroenergetski sustav. Prema članku mrežnog kodeksa za hitne slučajeve i obnovu mreže, svaki operator prijenosnog sustava ima pravo kombinirati ponovnu uspostavu energiju metodama:

- odozgo prema dolje (top-down method)
- odozdo prema gore (bottom-top method)
- kombinacija tih dviju metoda

Radi jasnoće, razlika između tih triju metoda opisana je u nastavku.

Strategija odozgo prema dolje zahtijeva pomoć susjednih OPS-a za ponovnu uspostavu električne energije. Strategija odozdo prema gore ne zahtijeva pomoć drugih OPS-a i izvora energije s samostalnim pokretanjem (crnim startom) nego je sposobnost ponovne uspostave dostupna u vlastitom kontrolnom području OPS-a ili podređenim ODS-ovima. Kombinacija strategija odozgo prema dolje i odozdo prema gore koristi pomoć drugih OPS-a i izvora napajanja s mogućnošću samostalnog pokretanja (crnog starta) koji su dostupni u vlastitom upravljačkom području OPS-a ili podređeni ODS-u za ponovnu uspostavu energiju. Strategije ponovne uspostave odozgo prema dolje i odozdo prema gore označavaju koordinirano djelovanje između OPS-ova iz različitih kontrolnih područja u stanju restauracije, međutim, u definiciji strategije odozdo prema gore nije definirano da li je omogućeno samostalno pokretanje (crni start) u mreži OPS-a, ODS-a ili oba operatora. Uvedene su, stoga, strategije pokretanja na niže (build down), pokretanja na više (build up) i zajedničkog pokretanja (build together) radi razjašnjenja odnosa između OPS-ova i relevantnih ODS-ova. Neke, ili sve, strategije mogu se primijeniti zajedno s strategijama odozgo prema dolje, odozdo prema gore ili njihovu kombinaciju. [34]



Slika 5.1 Matrica strategija obnove mreže [34]

Matrica koja predstavlja moguće kombinacije mrežnih strategija obnove prikazana je na slici 5.1. Slijed postupaka obnove, koji uključuju prosljeđivanje napona, crni start i resinkronizaciju, također je prikazan u matrici. Vidljivo je da se strategije pokretanja na niže (build down), pokretanja na više (build up) i zajedničkog pokretanja (build together) mogu kombinirati.

6. Iskustva pojedinih operatora prijenosnog sustava u uspostavi EES-a

6.1. Poremećaj elektroenergetskog sustava u dijelovima južne Švedske i istočne Danske

Sustav je, dana 23. rujna 2003. godine, bio umjereno opterećen prije nestanka električne energije, ali nekoliko komponenata sustava, uključujući dva dalekovoda od 400 kV i HVDC veze koje povezuju sustav Nordel s kontinentalnom Europom, nije bilo u funkciji zbog lošeg održavanja. U tom se razdoblju godine odvija značajna količina aktivnosti održavanja prije razdoblja vršnog opterećenja tijekom zime, međutim, ti dijelovi su propušteni. Prva nepredviđena situacija bila je gubitak nuklearne jedinice od 1200 MW na jugu Švedske zbog problema s parnim ventilom. To je rezultiralo povećanjem prijenosa snage sa sjevera. Sigurnost sustava i dalje je bila prihvatljiva nakon ove nepredviđene situacije. Pet minuta nakon ovog prekida dogodio se kvar oko 300 kilometara od mjesta aktivirane nuklearne jedinice. Zbog kvara dijela opreme trafostanice (rastavljač), uslijedio je dvostruki kvar sabirnice. To je rezultiralo gubitkom niza vodova i dviju nuklearnih jedinica od 900 MW, a kao posljedica je vrlo velikog prijenosa snage na sjever prema jugu na preostalim vodovima od 400 kV. Slijedom toga, sustav je doživio kolaps napona što je dovelo do odvajanja regija sustava južne Švedske i istočne Danske. U nekoliko sekundi ovom sustavu srušio se i napon i frekvencija, što je rezultiralo nestanak električne energije. Otočni sustav imao je samo ukupnu proizvodnju da pokrije nekih 30% svojih potreba, što je bilo daleko od dovoljnog da se omogući rad u otočnom pogonu. Ukupno je izgubljeno 4700 MW tereta u Švedskoj (pogođeno 1,6 milijuna ljudi) i 1850 MW u Danskoj (pogođeno 2,4 milijuna ljudi). [35]

Isključene su dvije nuklearne jedinice u Ringhalsu koje proizvode 1750 MW i gubitak prijenosnog puta duž zapadne obale. To je pokrenulo jake oscilacije snage u sustavu, vrlo niske napone i pad frekvencije do razine jednake 49 Hz, gdje se već koriste sheme rasterećenja podfrekvencijskog opterećenja. Mreža je bila jako preopterećena na preostalim jugoistočnim i južno-središnjim dijelovima. Nekih 90 sekundi nakon kvara sabirnice, oscilacije su nestale i činilo se da se sustav stabilizira. U međuvremenu se potražnja na tom području postupno oporavila od početnog smanjenja nakon pada napona djelovanjem brojnih regulacijskih

preklopki transformatora. To je dodatno smanjilo napon sa 400 kV do kritičnih razina. Na ovaj su sustav snažno utjecale prijelazne pojave u Švedskoj mreži koja se nije uspjela dovesti u stabilnu situaciju. [36]

Analize i preporuke kod poremećaja: [36]

- Analiza usmjerava pozornost na dizajn, inspekciju i preventivno održavanje sustava, posebno na ugroženim mjestima s velikim posljedicama u slučaju kvara.
- Treba uzeti u obzir odvajanje opterećenja kontroliranim naponom tijekom poremećaja u sustavu. To se primjenjuje posebno u područjima s nedostatkom proizvodnih kapaciteta.
- Bilo bi korisno da se Zealand istodobno odvoji od internih švedskih vodova. To zahtijeva napredne mjerne i kontrolne sustave u koje su integrirane informacije iz nekoliko područja i stanja sustava.
- Elektrane bi se trebale isključiti iz mreže i otići u otočni pogon prije nego što nestane napon. Postojeći zaštitni releji u elektranama nisu mogli registrirati kolaps u mreži do vrlo kasne faze.
- Potrebno je razviti zaštitne sustave koji će moći otkriti kolaps napona u cijelom sustavu. Strategije zaštite moraju se promatrati zajedno s cjelokupnom strategijom regulacije elektroenergetskog sustava.
- Razmotriti obnavljanje napona na prijenosnoj mreži, uključujući mogućnost obnavljanja napona iz elektrana koje su u otočnom radu. Uspostavljanje posebnih postrojenja posvećenih obnavljanju napona iz mreže bez električne energije.
- Prekid napajanja također daje osnovu za razmatranje da li razvoj tržišta električne energije uzrokuje promijenjene uvjete za rad sustava. Stoga postoji potreba za procjenom i, ako je potrebno, prilagodbom cijelog paketa tehničkih specifikacija za mrežne i proizvodne pogone.

Slika 6.1 prikazuje stanje mreže oko 10 sekundi nakon tog velikog kvara. Prekinuta mreža prikazana je isprekidanim crtama.,



Slika 6.1 Stanje mreže 10 sekundi nakon kvara [36]

6.2. Poremećaj elektroenergetskog sustava u Italiji

Slijed događaja koji su doveli do ovog kvara, dana 28. rujna 2003. godine, započeo je kad je drvo uzrokovalo prekid glavne veze između Italije i Švicarske. Veza nije ponovno uspostavljena jer su se automatske prekidačke sklopke odbijale ponovno isključiti. Razlika faznog kuta na toj dionici mreže bila je prevelika zbog uvoza velike snage u Italiju. To je rezultiralo velikim opterećenjem na paralelnim granama. Budući da se snaga nije preraspodijelila brzo i na odgovarajući način, drugi vod od 380 kV također se isključio na istoj granici (Italija - Švicarska). Ovaj kaskadni događaj se i dalje nastavio. U nekoliko sekundi deficit snage u Italiji bio je toliki da je Italija počela gubiti sinkronizam s ostatkom Europe, a vodovi između Francuske i Italije ostali su bez električne energije zbog impedancijskih releja. Isto se dogodilo i na vodovima od 220 kV između Italije i Austrije. Nakon toga, preostali koridor od 380 kV između Italije i

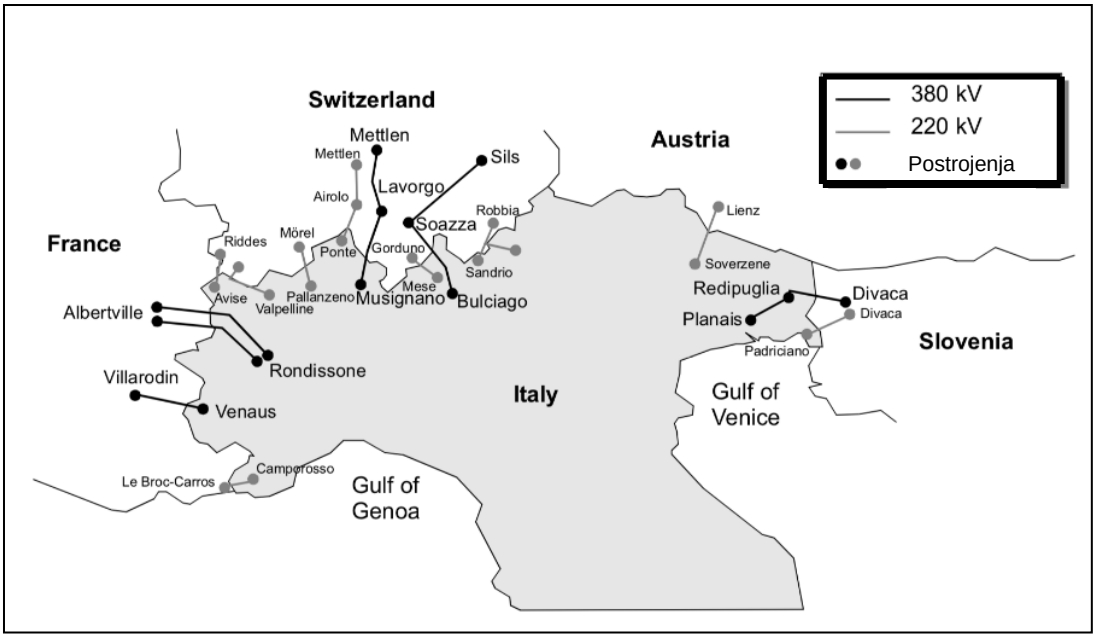
Slovenije postao je preopterećen i također je prekinut. Ti su prekidi rezultirali talijanskom sustavu nedostatak snage od 6400 MW, što je bio nivo uvoza prije prekida međusobno povezanih vodova. Propadanje frekvencije nije bilo kontrolirano na odgovarajući način kako bi se zaustavilo. Tako se, tijekom nekoliko minuta, cijeli talijanski sustav srušio uzrokujući nestanak električne energije u cijeloj državi. To je bio najgori poremećaj elektroenergetskog sustava u povijesti nacije. [35]

Analize i preporuke kod poremećaja: [36]

- Neuspješno ponovno zatvaranje linije Mettlen-Lavorgo zbog previsoke razlike faznih kutova.
- Nedostatak hitnog reagiranja zbog preopterećenja linije San Bernardino i neadekvatnih protumjera u Italiji.
- Nestabilnost kuta i pad napona u Italiji.

UCTE naglašava sljedeće potrebe: [36]

- Bolje upravljanje odnosima između OPS-a
- Bolje upravljanje sve većim opsegom međunarodnih deviznih promjena, koje proizlaze iz progresivne liberalizacije tržišta električne energije, u sigurnosnim uvjetima.
- Oblikovanje sigurnosnog plana za električnu mrežu.
- Zajedničke aktivnosti s drugim europskim OPS-ima za jačanje međunarodne organizacije za praćenje, kontrolu i odbranu elektroenergetskih mreža.



Slika 6.2 Prikaz prekinutih međunarodnih visokonaponskih vodova [37]

7. Zaključak

Problem sigurnosti rada EES-a tema je koja će dugo godina biti otvorena i za koju neće biti lako pronaći definitivna rješenja i modele. Iako velika količina istraživanja jača elektroenergetski sustav kako bi bio otporan na ispade (poremećaje), rizik od velikih poremećaja uvijek postoji. Ovaj rad govori o napretku i metodama obnove elektroenergetskog sustava. Učinjeno je mnogo posla i postignut je veliki napredak u smjeru brze i učinkovite obnove elektroenergetskog sustava. Suvremeni elektroenergetski sustavi postali su složeni tehnički sustavi zbog značajne integracije, varijabilne obnovljive energije, brzog razvoja pametne mreže i široke primjene tehnika u nastajanju. Mnogi novi faktori imaju mogućnost izazivanja kvarova. Iako su najsuvremenije tehnologije za obnovu tek dijelom ostvarile svoju primjenu, predstoji još jako dugi put kako bi se postigao automatski oporavak elektroenergetskog sustava. Korak po korak, dinamično odlučivanje SCADA-e i WAMS-a o situaciji, bez prisustva čovjeka, bit će ostvareno u bliskoj budućnosti učinkovitom primjenom brzo razvijajućih tehnologija umjetne inteligencije. Stoga je iznimno važno napraviti mnogo više istraživanja kako bi se postigla brza i pouzdana obnova kada se sustav suočava s povećanim rizikom od djelomičnog ili potpunog raspada.

8. Literatura

[1] https://link.springer.com/article/10.1007/s40565-016-0219-2, dostupno 28.5.2020.
[2] Rajan Kumar Mishra, K. Shanti Swarup, "Power System Restoration in Smart Grid Environment", Department of Electrical Engineering, IIT Madras, 2014.
[3] https://www.hops.hr/shema-ees-a, dostupno 22.9.2020.
[4] HOPS: „Desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže 2019.-2028., s detaljnom razradom za početno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje", rujan 2018.
[5] https://miljankotlaja.files.wordpress.com/2015/04/visokonaponska_raskj-postrojenja_h-pozar.pdf, dostupno 6.9.2020.
[6] https://docplayer.gr/77782999-Glavni-elementi-postrojenja-rastavljaci.html, dostupno 22.9.2020.
[7] https://www.koncar-ket.hr/vijesti/pustanje-rasklopnog-postrojenja-110-kv-u-cs-busko-blato-u-probni-pogon/, dostupno 6.9.2020.
[8] https://www.hops.hr/transformatorske-stanice, dostupno 14.9.2020.
[9] https://www.electricalclassroom.com/why-is-electricity-transmitted-at-high-voltages/, dostupno 6.9.2020.
[10] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control, John Wiley & Sons, Chippenham, Wiltshire, 2008.
[11] HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o., Mrežna pravila distribucijskog sustava, Narodne novine 36/06, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_03_36_907.html, dostupno 2.7.2020.
[12] 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.
[13] S. Ćurlin, Naponska stabilnost elektroenergetskog sustava, HEP – OPS d.o.o., Zagreb, Hrvatska, 2003.
[14] L. Jozsa, Predavanja iz kolegija Analiza elektroenergetskog sustava, 2013./2014.
[15] https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:947/preview, dostupno 26.6.2020.

[16] L. Jozsa, Osnove regulacije u EES, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2005. godine
[17] https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/118887/9/09_chapter%201.pdf, dostupno 7.9.2020.
[18] https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1454/datastream/PDF/view, dostupno 7.9.2020.
[19] https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A1186/datastream/PDF/view, dostupno 22.6.2020.
[20] M. M. Adibi, Power System Restoration: "Methodologies & Implementation Strategies New York," IEEE Computer Society Press 2000.
[21] M. M. Adibi, R. W. Alexander, and D. P. Milanicz, "Energizing high and extra-high voltage lines during restoration," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 3, pp. 1121- 1126, 1999.
[22]J. W. Feltes and C. Grande-Moran, "Black start studies for system restoration," in Proc. Power and Energy Society General Meeting IEEE, 2008.
[23] P. Kundur, Power system stability and control, EPRI series, New York: McGraw-Hill, 1994.
[24] J. V. Milanovic, K. Yamashita, S. Villanueva, S. Djokic and L. M. Korunovic, "International industry practice on power system load for modeling," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3038-3046, Aug. 2013.
[25] Kuo-Hsiung Tseng, Wen-Shiow Kao and Jia-Renn Lin, "Load model effects on distance relay settings," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 4, pp. 1140-1146, Oct. 2003
[26] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, pp. 1302-1313, 1995.
[27] D. Hill, "Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies," IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, no. 1, pp. 166-176, Feb. 1993.
[28] https://myelectrical.com/notes/entryid/251/induction-motor-equivalent-circuit, dostupno 17.9.2020.
[29] D. Karlsson, D.J. Hill, "Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol.9, no.1, pp.157-166, Feb 1994.
[30] W. Xu and Y. Mansour, "Voltage stability analysis using generic dynamic load models," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 1, pp. 479-493, Feb. 1994.
[31] Distribucija električne energije, Doc. Dr. Sc. Ranko Goić, dipl.ing.

[32] “Grid of the future“, White Paper on Review of Recent Reliability Issues and System Events, August 1999.
[33] R. Priddle, “Security of Supply in Liberalized Electricity Market“, Eurelectric conference, Leipzig, Germany, June 2002.
[34]https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2018/files/kf/Session_E1/KF_Torabi-Makhsos.pdf, dostupno 13.7.2020.
[35]https://www.academia.edu/17038823/Causes_of_the_2003_Major_Grid_Blackouts_in_North_America_and_Europe_and_Recommended_Means_to_Improve_System_Dynamic_Performance, dostupno 8.9.2020.
[36]https://www.researchgate.net/publication/224314032_Blackouts_in_North_America_and_Europe_Analysis_and_generalization, dostupno 8.9.2020.
[37] https://electricalpowerengineering.nl/Electric-Power-Systems/Blackouts, dostupno 9.9.2020.

Popis slika

Slika 2.1 Shema visokonaponske mreže u Hrvatskoj 2019. godine [3]
Slika 2.2 Udjeli prijenosnih dalekovoda u pogonu u vlasništvu HOPS-a, po naponskim razinama u hrvatskom EES-u, 2017. godine [4]
Slika 2.3 Dvostupni rastavljač sa središnjim rastavljanjem (Un 60 – 400 kV) [6]
Slika 2.4 Rasklopno postrojenje od 110 kV [7]
Slika 2.5 Prikaz trenutnog broja transformatorskih stanica i transformatora u prijenosnom sustavu u Hrvatskoj [8]
Slika 2.6 Udjeli broja pojedinih transformacija u ukupnom broju transformatorskih stanica u hrvatskom EES-u (samo transformatori u vlasništvu HOPS-a) [4]
Slika 2.7 Visokonaponski prijenos električne energije [9]
Slika 3.1 Stabilnost elektroenergetskog sustava [13]
Slika 3.2 Jednostavni prijenosni sustav i pripadajući fazorski dijagram [14]
Slika 3.3 P – Q karakteristike prijenosnog sustava [15]
Slika 3.4 P – V karakteristike prijenosnog sustava s različitim faktorom snage [15]
Slika 3.5 Q – V karakteristike prijenosnog sustava [15]
Slika 3.6 Pogonska stanja elektroenergetskog sustava [17]
Slika 3.7 Procjena stanja elektroenergetskog sustava [18]
Slika 3.8 Prikaz trajanja pojedinih regluacija [19]
Slika 4.1 Karakteristika ZIP tereta [23]
Slika 4.2 Model asinkronog motora [28]
Slika 5.1 Matrica strategija obnove mreže [34]
Slika 6.1 Stanje mreže 10 sekundi nakon kvara [36]
Slika 6.2 Prikaz prekinutih međunarodnih visokonaponskih vodova [37]

Popis tablica

Tablica 2.1 Gubici mreže ovisno o snazi solarne elektrane [10]

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, **Mateo Sušec** *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/~~diplomskog~~ (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom **Prijedlog algoritma optimalne uspostave elektroenergetskog sustava** *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Mateo Sušec
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, **Mateo Sušec** *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/~~diplomskog~~ (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom **Prijedlog algoritma optimalne uspostave elektroenergetskog sustava** *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Mateo Sušec
(vlastoručni potpis)