

# Algoritmi restauracije elektroenergetskog sustava nakon raspada

---

Ivanković, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:977252>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad br. 457/EL/2020**

**ALGORITMI  
RESTAURACIJE  
ELEKTROENERGETSKOG  
SUSTAVA NAKON  
RASPADA**

**Matej Ivanković, 2031/336**

Varaždin, lipanj 2020. godine





**Sveučilište  
Sjever**

**Odjel za elektrotehniku**

**Završni rad br. 457/EL/2020**

# **Algoritmi restauracije elektroenergetskog sustava nakon raspada**

**Student**

Matej Ivanković, 2031/336

**Mentor**

izv. prof. dr. sc. Srđan Skok

## Prijava završnog rada

### Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODIEL Odjel za elektrotehniku

STUDIJ preddiplomski studij Elektrotehnika

PRESTUPNIK Malej Ivanković

NAČELNIK STUDIJ 2031/336

DATUM 12.06.2020.

KOLLOVIJ Zaštita u elektroenergetskim postrojenjima

NASLOV RADA Algoritmi restauracije elektroenergetskog sustava nakon raspada

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Restoration Algorithms of Power System After Blackout

MENTOR Izv.prof.dr.sc. Srđan Skok

ZVANJE Izvanredni profesor

ČLANOVI PUVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Ladišlav Havaš, dipl.ing.el.
2. 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.

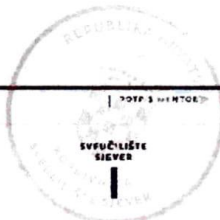
### Zadatak završnog rada

BROJ 457/EL/2020

OPIS

U završnom radu je potrebno teorijski obraditi zaštite elektroenergetskog sustava od raspada s posebnim osvrtom na podfrekvencijsko rasterećenje. Također je potrebno obraditi naponski i frekvencijski slom elektroenergetskog sustava kao i njegove uzroke. Cilja rada je izraditi algoritam za ponovnu uspostavu elektroenergetskog sustava po principu "odozgo-prema-dolje" i "odozdo-prema-gore". Predložene algoritme potrebno je provjeriti na dijelu prijenosne elektroenergetske mreže Prijenosno područje Rijeka, koristeći programski paket NEPLAN.

ZADATAK UPUĆEN 29.06.2020.



## **Predgovor**

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Srđanu Skoku na vođenju i velikoj pomoći prilikom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se Sveučilištu Sjever na prenesenom znanju, te svima profesorima koji su uvijek stajali na usluzi za sva postavljena pitanja.

Također se zahvaljujem roditeljima na bezuvjetnoj podršci tijekom cijelog perioda studiranja.

## Sažetak

U ovom radu se obradila tematika ponovne uspostave elektroenergetskog sustava nakon raspada, te procedure optimalne restauracije napajanja potrošača. Sukladno tome opisana su svojstva elektroenergetskog sustava, njegova stabilnost, te algoritmi za ponovnu uspostavu istog. Na primjeru prijenosnog područja Rijeke opisana je ponovna uspostava sustava po principu „odozdo-prema gore“. Za pravilnu uspostavu PrP Rijeka prikupljeni su podaci o pojedinim dijelovima mreže, uspostava sustava je simulirana u programskome paketu NEPLAN pomoću funkcije tokova snaga, te podjelom sustava na otoke (otočni način rada HE Vinodol i HE Senj).

Također je opisana teorijska osnova o ponovnoj uspostavi sustava na različite načine:

- Odozdo-prema gore
- Odozgo-prema dolje
- Iznutra-prema-van
- Zajednička uspostava

Problem koji se može pojaviti kod ponovne uspostave sustava je taj što može doći do preopterećenja generatora. To se događa ako su trafostanice koje se uključuju u sustav pod velikim opterećenjem. Taj problem je riješen na način da se provodi rasterećenje sustava do razine koja odgovara uvjetima za ponovni uklop.

**KLJUČNE RIJEČI:** elektroenergetski sustav  
prijenosna mreža  
ponovna uspostava EES-a  
stabilnost EES-a  
crni start elektrana

## Summary

The final paper describes the operation of re-establishment of the power system after the breakdown, and the procedure of optimal restoration of consumer power supply. Accordingly, the properties of the power system, its stability, and algorithms for its re-establishment are described. The re-establishment of the system according to the principle of "bottom-up" is described on the example of the transmission area of Rijeka. For the proper establishment of PrP Rijeka, data on individual parts of the network were collected, the establishment of the system was simulated in the NEPLAN software package using the power flow function, and the division of the system into islands (island mode HPP Vinodol and HPP Senj). The theoretical basis for re-establishing the system in different ways is also described:

- Bottom-up
- Top-down
- Build-Inward

The problem that can occur when re-establishing the system is that the generator can be overloaded. This happens if the substations that are connected to the system are under heavy load. This problem is solved by unloading the system to a level appropriate to the conditions for reconnection.

### KEY WORDS:

power system  
transmission network  
re-establishment of the power system  
power system stability  
black start power plant



## Popis korištenih kratica

<b>EES</b>	Elektroenergetski sustav
<b>AVR</b>	Automatski regulator napona
<b>NPV</b>	Negativna povratna veza
<b>SOGL</b>	System Operation Guidelines
<b>OPS</b>	Operatori prijenosnog sustava
<b>ODS</b>	Operatori distribucijskog sustava
<b>ZKM</b>	Značajni korisnici mreže
<b>SGU</b>	Significant Grid Users
<b>LFC</b>	Load – Frequency Control
<b>HOPS</b>	Hrvatski operator prijenosnog sustava
<b>EEM</b>	Elektroenergetske mreže
<b>I</b>	Struja
<b>U</b>	Napon
<b>Z</b>	Impedancija
<b>U<sub>n</sub></b>	Nazivni napon
<b>f<sub>n</sub></b>	Nazivna frekvencija
<b>P<sub>n</sub></b>	Nazivna radna snaga
<b>Q<sub>n</sub></b>	Nazivna jalova snaga
<b>R<sub>s</sub></b>	Statički djelatni otpor
<b>R<sub>r</sub></b>	Rotorski djelatni otpor
<b>DI</b>	Distribuirani izvori
<b>OIE</b>	Obnovljivi izvori energije
<b>DI</b>	Distribuirani izvori
<b>APU</b>	Automatski ponovni uklop
<b>PrP</b>	Prijenosno područje
<b>NE</b>	Nuklearna elektrana
<b>HE</b>	Hidroelektrana
<b>TP</b>	Transformatorska polja

<b>VE</b>	Vjetroelektrane
<b>EVP</b>	Elektrovučne podstanice
<b>PTE</b>	Plinsko-turbinska elektrana
<b>RHE</b>	Reverzibilna hidroelektrana

# Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....	3
2.1 Općenito o stabilnosti elektroenergetskog sustava .....	3
2.2 Definicija stabilnosti EES-a .....	5
2.3 Proces gubitka stabilnosti EES-a .....	5
2.4 Pogon EES-a .....	6
3. RESTAURACIJA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA .....	9
3.1 Teorijske osnove ponovne uspostave EES-a.....	11
3.1.1 Planovi ponovne uspostave sustava.....	12
3.1.2 Općenit pristup izradi planova ponovne uspostave sustava .....	15
3.1.3 Tehnički uvjeti ponovne uspostave sustava.....	16
3.1.4 Utjecaj karakteristika tereta na uspostavu sustava .....	18
3.1.5 Odnos distribuirane proizvodnje i ponovne uspostave sustava .....	21
4. RESTAURACIJA PRIJENOSNOG PODRUČJA RIJEKA.....	23
4.1 Sinkroček uređaji .....	25
4.1.1 Ugradnja sinkroček uređaja u PrP-u Rijeka .....	26
4.1.2 HE Vinodol.....	27
4.1.3 HE Senj.....	27
4.2 Programski alat NEPLAN.....	28
4.2.1 Upotreba programskog alata .....	29
4.3 Ponovna uspostava PrP Rijeka – odozdo prema gore.....	32
4.3.1 Provjera algoritma na dan 25.07.2019. u 13:30h .....	34
4.3.2 Provjera algoritma na dan 23.01.2020. u 19:30h .....	38
4.3.3 Provjera algoritma na dan 13.04.2020. u 12:30h .....	40
5. ZAKLJUČAK .....	42
6. LITERATURA.....	44
Popis slika .....	47
Popis tablica.....	47

# 1.UVOD

U Mrežnim pravilima prijenosnog sustava (NN 67/2017) u članku 48., stavak 3. navodi se da je za sprečavanje širenja velikih poremećaja u elektroenergetskim sustavima odgovoran Operator prijenosnog sustava (OPS). Operator također treba osmisлити plan obrane elektroenergetskog sustava, te smjernice za djelovanje zbog ponovne uspostave sustava nakon raspada. U planu obrane trebaju biti obuhvaćene sljedeće stavke:

- način objave velikog poremećaja
- način aktiviranja plana obrane od velikog poremećaja
- mjere i postupci obrane EES-a
- plan podfrekvencijskog rasterećenja EES-a
- plan ograničenja potrošnje energije i hitnog rasterećenja EES-a
- plan ponovne uspostave EES-a
- obavještenje operatora susjednih EES-a

Sastavni je dio plana obrane EES-a od velikih poremećaja definiranje plana ponovne uspostave sustava. Također, pod time se smatraju osnovna načela strategije za ponovno uključenje pod napon svih dijelova prijenosnog sustava. Koriste se tzv. principi „odozgo prema dolje“ (eng. *top-down method*), te „odozdo prema gore“ (eng. *bottom-up method*).

Zadatak je završnog rada „Algoritmi restauracije elektroenergetskog sustava nakon raspada“ izraditi prijedlog postupka za ponovnu uspostavu EES-a nakon potpunog ili djelomičnog raspada. Cilj je naći način da se smanji potrebno ukupno vrijeme za uspostavljanje sustava s obzirom na postojeće procedure. Smanjenje ukupnog potrebnog vremena se pokušava dobiti na način da se tereti više stanica istovremeno. To znači da se pokušavaju istovremeno uklopiti vodovi na 110 kV razini, te tereti u TS 110/35 kV i 110/10(20) kV. Kod takvog uklapanja treba obratiti pozornost na samu mogućnost, tj. radnu snagu određenih elektrana koje se nalaze u tzv. otopnom načinu rada. Takve elektrane trebaju biti provjerene za takav uklop, te moraju imati mogućnost crnog starta. Poseban naglasak treba staviti na prijedlog optimalnog sekcioniranja prijenosne mreže ovisno o vremenskom razdoblju i karakter potrošnje. Prvenstveno

treba dati prijedlog uklapanja većih dijelova mreže i transformatora 110/x kV pod teretom. Rad treba dati jednoznačne odgovore na temelju teorije o uspostavi sustava s definiranim koracima terećenja.

Također je potrebno u programskom paketu Neplan provjeriti sam rad algoritma „odozdo prema gore“ na prijenosnome području Rijeke.

## 2. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

### 2.1 Općenito o stabilnosti elektroenergetskog sustava

Elektroenergetski sustav (EES) je dinamički, nelinearni regulacijski sustav kod kojeg dolazi do neprestanog mijenjanja pogonskog stanja zbog konstantnog mijenjanja potrošnje, topologije mreže, uvrštenosti strojeva. Takve pojave dovode do promjene ključnih parametara mreže. Kada se u EES-u pojavi poremećaj, stabilnost sustava ovisi o početnome pogonskom stanju i o samoj prirodi poremećaja. Poremećaji se općenito dijele na velike i male. U slučaju malih poremećaja, kao što je promjena kontinuirane potrošnje, EES se mora neprestano prilagođavati te održavati zadovoljavajuće parametre samog sustava. Isto tako, sustav mora ostati stabilan i prilikom brojnih značajnih poremećaja različite prirode. Neke od promjena mogu biti: kratki spoj na prijenosnome vodu, gubitak neke proizvodne jedinice. Veliki poremećaj može prouzrokovati promjene u strukturi mreže nakon izdvajanja elemenata mreže u kvaru. EES u nekom skupu neravnotežnih stanja može biti stabilan u odnosu na neki veliki poremećaj, ili može biti nestabilan u odnosu na neki drugi poremećaj. S obzirom na stabilnost, za svaki mogući ispad nekog elementa u mreži ne isplati se projektirati svaki EES zasebno. To bi bilo nepraktično i neekonomično. Projektiranje novog sustava prema ispadima pomoću kriterija (n-1) temelji se na izboru najvjerojatnijeg elementa kod kojeg je mogući ispad. Iz takvog načina projektiranja slijedi činjenica da se stabilnost sustava pri velikim poremećajima uvijek istražuje s obzirom na određene pretpostavljene scenarije poremećaja. Veliki poremećaji djeluju na stabilnost sustava tako da uzrokuju nelinearne učinke što onemogućuje linearizaciju sustava jednadžbi prilikom istraživanja istog.

Ukoliko se sustav prateći prijelazne poremećaje, zadržava u novom ravnotežnom stanju bez oštećenja preostalog dijela sustava, tj., sa svim preostalim generatorima i potrošačima uz zadovoljen kriterij sigurnosti (n-1), utoliko je sustav stabilan. Djelovanje automatskih regulatora i operatora (prikazano u Neplanu) može sustav vratiti u normalno pogonsko stanje. S druge strane, ako je sustav nakon poremećaja nestabilan, može doći do pojave različitih vrtnja rotora strojeva, što može uzrokovati raspad sustava zbog povećanja kutne razlike rotora proizvodnih jedinica u odnosu na kut rotora stroja u referentnom čvorištu, ili dovesti do progresivnog pada napona u pojedinim čvorovima

mreže. Takvo nestabilno stanje sustava može nadalje dovesti do kaskadnih ispada što može izazvati ispad važnih elemenata iz mreže. U slučaju takvog scenarija, može se očekivati potpuni raspad EES-a. Na samu stabilnost sustava općenito utječu mehaničke i električne konstante generatora i pripadnih pogonskih strojeva, kao što su regulatori uzbude generatora i turbinski regulatori. Osim navedenog, na stabilnost sustava utječu i veze između pojedinih generatora, koji rade paralelno u sustavu. Konkretno to označava konstante dalekovoda i njihove dužine. Iz teorije je poznato da električni spoj dva paralelna sinkrona stroja (konstantna brzina vrtnje) elastične prirode. Tim sustavom ne mogu se prenositi po volji velike snage. Kod analize veze javlja se problem računanja granične snage koja se tim sustavom može prenositi, a da sustav ostane stabilan. Kod elastičnosti spoja može doći do njihanja stroja, te je sama posljedica gubitak stabilnosti.

Nakon drugog svjetskog rata, na početku šezdesetih godina, javlja se razvoj i rast elektroenergetskih sustava. Slijedom toga su se u praksi počele sve češće uočavati pojave nestabilnog ponašanja elektroenergetskog sustava. Problem nestabilnosti se pokušao riješiti:

- smanjenjem broja sinkronih strojeva koji rade sinkrono; to se postiglo izgradnjom istosmjernih veza među dva ili više sustava ili unutar samo jednog sustava;
- izgradnjom dodatnih trofaznih vodova između dva ili unutar pojedinog EES-a (ovakvo rješenje je skupo, ali ima jako dobar učinak);
- korištenjem visokog stupnja automatizacije EES-a, uz daljnje usavršavanje regulacijskih (npr. AVR – automatski regulator napona) i zaštitnih uređaja (npr. releji, itd.). To obuhvaća automatsko podfrekvencijsko i podnaponsko rasterećenje EES-a, sinkrono i asinkrono ponovno automatsko uključivanje, automatsko reguliranje uzbude (posebna metoda forsiranja uzbude), primjena asinkronog rada, osiguranje uvjeta rezultatne stabilnosti, dijeljenje sustava na više dijelova koji ne rade u sinkronizmu itd.;
- uvođenjem dodatne povratne veze (NPV – negativne povratne veze) u regulatore napona nekih sinkronih generatora u sustavu. Uvođenjem dopunskih regulacijskih signala u regulator napona sinkronog generatora, na umjetan se način mogu stvoriti prigušni momenti koji eliminiraju ili prigušuju oscilacije među sustavima ili među strojevima (asinkronim i sinkronim).

Treba naglasiti da se sa povišenjem naponskih razina prijenosa (veća vrijednost napona), općenito može povećati i prijenosna moć i granica stabilnosti.

## **2.2 Definicija stabilnosti EES-a**

Stabilnost nekog EES-a je sposobnost, uz zadane početne uvjete, ponovnog vraćanja u pogonsku ravnotežnu točku nakon pojave neke vrste fizičkog poremećaja, a da pri tome varijable stanja sustava ostanu unutar granica koje osiguravaju potpunu stabilnost EES-a. Integritet sustava bit će praktično očuvan ako preostali dio EES-a ostane cjelovit bez daljnjih ispada proizvodnih jedinica ili potrošnje, izuzimajući ispale elemente u mreži, a s ciljem izolacije ili namjernog isključenja pojedinih elemenata sustava. To se radi zbog očuvanja preostalog dijela pogona EES-a. Pod stabilnošću jednog generatora, koji radi na velikom sustavu, misli se na sposobnost toga generatora da unatoč smetnji drži korak, tj. ostane u sinkronizmu sa sustavom. Gubitak stabilnosti, tj. ispad iz sinkronizma sa pogona EES-a, jednog generatora znači da će se povećati opterećenje ostalih generatora. Ako ti generatori već rade na „rubu stabilnosti“ (blizu maksimalnog opterećenja), postoji velika mogućnost da će i oni također ispasti iz sinkronizma, što može u konačnici dovesti do potpunog raspada EES-a. Raspad EES-a je najteži kvar koji se može dogoditi, stoga uvijek treba poduzimati sve radnje da se takav scenarij izbjegne.

## **2.3 Proces gubitka stabilnosti EES-a**

Proces gubitka stabilnosti odvija se tako da u EES-u pojedini generatori postupno gube sinkronizam, a pojedini se vodovi rednim djelovanjem zaštite isključuju iz mreže. Ako se poremećaj ne bi pravodobno odvojio (isključio) od ostatka sustava, poremećaj bi se dalje lančano proširio na cijeli sustav, u kojem bi konačno došlo do potpunog raspada. Posljedica takvog stanja, tj. tijekom zbivanja jest da elektroenergetski sustav prestane u cijelosti funkcionirati ako se pravodobno ne spriječi širenje, ili pak sustav ostane u pogonu samo djelomično. Kod takvog načina rada uobičajeno je da je poremećen i pogon u dijelu koji dalje radi. Takvo stanje, s potpunim prekidom opskrbe potrošača u jednom dijelu sustava i s nezadovoljavajućom kvalitetom električne energije u preostalom dijelu, često potraje više sati, pa i više desetaka sati. Poznato je kako se u načelu može spriječiti sama pojava ili kako se pak mogu ublažiti posljedice ovakvih neželjenih zbivanja u EES-u ako



se žele izbjeći neekonomične redukcije potrošnje, što je po ekonomskim posljedicama slično raspadu sustava. Povoljnije stanje u tome pogledu je kada je prijenosna mreža što izdašnije dimenzionirana i sa što više paralelnih vodova (povoljno djeluje što više paralelnih prijenosnih veza, ali i ograničavajući faktor povećanje jakosti struja kratkog spoja u sustavu) ako je elektroenergetska oprema kvalitetnija (najviše ovisi kvaliteta njezine električne izolacije jer će tada biti manji broj kratkih spojeva u sustavu), također ako je ugrađena odgovarajuća zaštita od poremećaja i kratkih spojeva, što se primarno odnosi i na regulacijske naprave u sustavu, te ako se uvijek raspolaže s dovoljnom količinom energije i snage u elektranama s obzirom na zahtjeve sveukupne potrošnje sustava.

Stabilnost sustava može se podijeliti na:

- kutnu stabilnost (približno jednak fazni pomak)
- naponska stabilnost (da se ne javlja razlika potencijala)
- frekvencijska stabilnost (ista brzina rotiranja vektora)

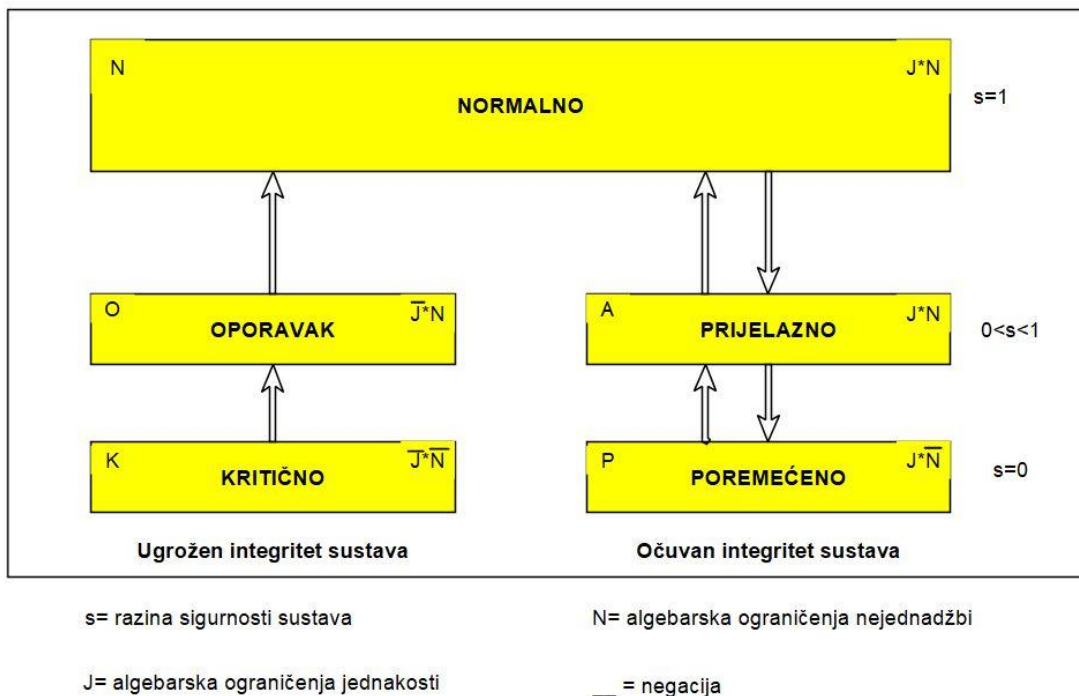
## **2.4 Pogon EES-a**

Pogon EES-a može se opisati pomoću triju sustava jednadžbi:

- dva sustava algebarskih jednadžbi koje uključuju ograničenja tipa jednakosti, koja se također odnose na ravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije i tipa nejednadžbi, koje se odnose na pogonsko-tehničke značajke elemenata EES-a
- jednog sustava diferencijalnih jednadžbi kojima se opisuje dinamičko ponašanje pojedinih elemenata u EES-u.

Pogon EES-a može se opisati s pet pogonskih stanja (slika 2.1):

- normalno
- prijelazno
- poremećeno
- kritično
- oporavak.



Slika 2.1 Pogonska stanja elektroenergetskog sustava

U normalnom pogonskom stanju EES-a (eng. *NORMAL*) sva algebarska ograničenja jednakosti i nejednadžbi (uvjeti opisani iznad) su zadovoljena, sve radne točke elemenata tog sustava dovoljno su daleke od graničnih vrijednosti, sva je potrošnja podmirena dovoljnom proizvodnjom energije, te postoji zadovoljavajuća razina sigurnosti sustava. Kod normalnog pogonskog stanja opći uvjeti su povoljni, sve komponente u sustavu su raspoložene, postoji dovoljan broj primarnih izvora za rad elektrana, te su same meteorološke prilike povoljne.

U prijelaznom pogonskom stanju EES-a (eng. *ALERT*) algebarska su ograničenja jednakosti i nejednadžbi još uvijek zadovoljena, ali je udaljenost radnih točaka približena graničnim vrijednostima, čime je snižena razina sigurnosti sustava. Potrebne su preventivne protumjere za povratak sustava u normalno pogonsko stanje.

U poremećenom pogonskom stanju EES-a (eng. *EMERGENCY*) algebarska ograničenja jednakosti su još uvijek zadovoljena, ali su ograničenja nejednadžbi narušena. Radne točke elemenata jako su blizu ili na graničnim vrijednostima, te je

razina sigurnosti sustava svedena na minimum. Za vraćanje sustava u normalno ili prijelazno pogonsko stanje potrebne su brze korektivne protumjere.

EES prelazi u kritično pogonsko stanje (eng. *INEXTREMIS*) ako preventivne i korektivne protumjere nisu poduzete pravodobno, ili nisu dale željene rezultate. Algebarska su ograničenja jednakosti i nejednadžbi narušena, te je ugrožen integritet sustava. EES se dijeli na izolirane otoke i moguće je jedino poduzimati protumjere, kako bi se što veći dio sustava zadržao u pogonu i da bi se tako spriječio potpuni raspad sustava.

Pogonsko stanje ponovne uspostave EES-a (eng. *RESTORATION*) započinje nakon zaustavljanja razvoja poremećaja s ciljem ponovne uspostave integriteta sustava kako bi se ponovno osigurala potrebna opskrba električne energije isključenim potrošačima, te prijelaz u normalno ili prijelazno pogonsko stanje EES-a.

### 3. RESTAURACIJA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Trenutni važeći plan obrane EES-a od velikih poremećaja u koji je implementiran i Plan ponovne uspostave elektroenergetskog sustava, donesen je u prosincu 2018. Navedeni planovi doneseni su na temelju Mrežnih pravila prijenosnog sustava [1] (NN 67/2017), članku 48., stavak 3. gdje se navodi da Operator prijenosnog sustava donosi plan obrane EES-a od velikih poremećaja u kojem također treba biti obuhvaćen plan ponovne uspostave elektroenergetskog sustava i smjernice za djelovanje radi ponovne uspostave napajanja.

Plan obrane EES-a od velikih poremećaja, a time i plan ponovne uspostave elektroenergetskog sustava temelji se na sljedećim odredbama:

- Zakonu o energiji (Narodne novine, br. 120/12, 14/14, 102/15, 68/18),
- Zakonu o tržištu električne energije (Narodne novine, br. 22/13, 102/15, 68/18),
- Zakonu o regulaciji energetske djelatnosti (Narodne novine, br. 120/12, 68/18),
- Općim uvjetima za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom (Narodne novine, br. 85/15),
- Mrežnim pravilima prijenosnog sustava (Narodne novine, br. 67/17)
- Mrežnim pravilima distribucijskog sustava (Narodne novine, br. 74/18),
- Pravilima organiziranja tržišta električne energije (Narodne novine, br. 121/15 i 48/16)
- ENTSO-E priručniku za vođenje
- Uredbi Komisije (EU) 2017/1485, vrijedi od 2. kolovoza 2017. o uspostavljanju smjernica za pogon elektroenergetskog prijenosnog sustava
- Uredbi Komisije (EU) 2017/2196, vrijedi od 24. studenoga 2017. o uspostavljanju mrežnog kodeksa za poremećeni pogon i ponovnu uspostavu elektroenergetskih sustava.

Uredbom Europske komisije (EU) 2017/1485 [2] (eng. *System Operation Guideline* - SOGL) o uspostavljanju smjernica o radu prijenosnog elektroenergetskog sustava utvrđuju se usklađena pravila za Operatore prijenosnog sustava (OPS), Operatore distribucijskog sustava (ODS) i značajne korisnike mreže - ZKM (eng. *Significant Grid Users* – SGU) kako bi se osigurao pravni okvir za rad međusobno povezanih

prijenosnog sustava (npr. Regionalna suradnja) za održavanje sigurnosti sustava i postizanje drugih ciljeva na razini Unije.

Uredba posebno ističe sljedeće:

- Treba ustvrditi usklađena pravila za pogon sustava za operatore prijenosnog sustava (OPS-ove), operatore distribucijskog sustava (ODS-ove) i značajne korisnike mreže kako bi se mogao osigurati jasan pravni okvir za priključivanje na mrežu, olakšala trgovina električnom energijom širom Unije, osigurala sigurnost sustava, osigurali dostupnost i razmjena potrebnih podataka i informacija među OPS-ovima i ODS-ovima i drugim dionicama, olakšala integracija obnovljivih izvora električne energije, omogućilo učinkovitije iskorištavanje same mreže te povećala konkurencija u korist potrošača (jeftinija električna energija za potrošača).
- Regulacija frekvencije i snage razmjene jedan je od najkritičnijih procesa u osiguravanju pogonske vrijednosti s visokom razinom pouzdanosti i kvalitete. Djelotvorna regulacija može se omogućiti samo ako OPS-ovi i ODS-ovi s priključenim pružateljem rezervi imaju obvezu surađivati kako bi međusobno povezani prijenosni sustavi radili kao cjelina i ako moduli za proizvodnju električne energije (dalje u tekstu: proizvodni moduli) i postrojenja kupca imaju obvezu ispunjavati odgovarajuće minimalne tehničke zahtjeve.
- Zbog zaštite pogonske sigurnosti, frekvencije, kvalitete i učinkovitog korištenja međusobno povezanog sustava i resursa, ovom se Uredbom utvrđuju temeljne smjernice o:
  - (a) zahtjevima i načelima u pogledu pogonske sigurnosti;
  - (b) pravilima i odgovornostima za koordinaciju i razmjenu podataka među OPS-ovima, među OPS-ovima i ODS-ovima te među ODS-ovima, ODS-ovima i ZKM-ovima u planiranju pogona i u pogonu u gotovo stvarnom vremenu;
  - (c) pravilima za osposobljavanje i certifikaciju zaposlenika operatora sustava;
  - (d) zahtjevima u pogledu koordinacije isključenja;

- (e) zahtjevima u pogledu planiranja razmjene između regulacijskih područja OPS-a
- (f) pravilima kojima se nastoji uspostaviti okvir Unije za LFC i rezerve.  
Svaki OPS određuje opseg razmjene podataka u koordinaciji sa ZKM-ovima i ODS-ovima na temelju sljedećih kategorija:
  - (a) strukturni podaci u skladu s člankom 48.;
  - (b) podaci o predviđanjima i planiranoj razmjeni u skladu s člankom 49.;
  - (c) podaci u stvarnom vremenu u skladu s člancima 44., 47. i 50.;
  - (d) odredbe u skladu s člancima 51., 52. i 53.

Nužno je bilo utvrditi usklađene zahtjeve za tehničke i organizacijske mjere u cilju sprječavanja širenja ili pogoršanja incidenata u nacionalnom sustavu i sprečavanja širenja poremećaja i raspada na ostale sustave. Nadalje, nužno je utvrditi i usklađene postupke koje bi OPS-ovi trebali primjenjivati kako bi ponovno uspostavili stanje ugroženog normalnog pogona ili stanje normalnog pogona nakon širenja poremećaja ili raspada.

Osnovna je svrha Plana obrane EES-a od velikih poremećaja (u daljnjem tekstu: Plan obrane) osigurati sprječavanje narušavanja stabilnog i sigurnog pogona EES-a Hrvatske, odnosno ukoliko i dođe do narušavanja, što brži povratak u normalan pogon. Iz ovoga proizlazi da je svaki operater prijenosnog sustava, pa tako i HOPS, dužan izraditi Plan obrane u dogovoru sa relevantnim ODS-ovima, ZKM-ovima, nacionalnim regulatornim tijelima, drugim nadležnim tijelima, susjednim OPS-ovima i ostalim OPS-ovima na njegovu sinkronom području.

### **3.1 Teorijske osnove ponovne uspostave EES-a**

Ponovna uspostava elektroenergetskog sustava (EES-a) prepoznata je kao jedna od značajnijih funkcija u vođenju za elektroenergetske mreže (EEM). Uz međusobno povezivanje elektroenergetskih mreža, raspad EES-a može imati veliki utjecaj na potrošače u širokom području napajanja električnom energijom. Sukladno [3-5] negativan učinak raspada sustava određenog područja povećava se eksponencijalno s trajanjem ponovne uspostave EES-a. Iz ovoga je vidljivo da sama pouzdanost EES-a uvelike ovisi o učinkovitosti ponovne uspostave sustava.

Za poboljšanje pouzdanosti EES-a, važno je razviti alate za podršku odlučivanju prilikom ponovne uspostave EES-a, što bi u konačnici moglo dovesti do *on-line* ponovne obnove sustava.

Sada se planovi ponovne uspostave sustava izrađuju prema rezultatima proračuna osnovnih alata za analizu EES-a, kao što su tokovi snaga, dinamička simulacija pogonskih stanja [4-6], i tranzijentne elektromagnetske pojave [7,8]. Na osnovu navedenih analiza izrađuju se planovi uspostave sustava izvan stvarnog vremena (*off-line* ili teorijske analize). Ti podaci se koriste kao smjernice za dispečere u stvarnom vremenu [9,10]. Na temelju navedenih smjernica, za potrebe dispečera razvijaju se strategije ponovne uspostave sustava na temelju karakteristika raspada sustava i raspoloživih resursa za ponovnu uspostavu sustava.

Strategije ponovne uspostave sustava usko su povezane sa specifičnim karakteristikama sustava [11,12], prvenstveno s obzirom na karakteristike tereta i proizvodnih jedinica. Pošto se karakteristike EES-a ili njihovih pojedinih dijelova razlikuju, strategije ponovne uspostave ne mogu se generalizirati. Ipak, postoje općenite metode pristupu ponovne uspostave sustava, koje su se razvile 1980-tih godina i obuhvaćaju pitanja koja se odnose na analizu i generalizaciju ponovne uspostave sustava na razini prijenosne mreže i razvoj alata koji bi podržali dispečerske odluke o obnovi sustava nakon velikih poremećaja, tj. raspada.

Na temelju tih zaključaka identificirane su glavne faze ponovne uspostave sustava s različitom strukturom proizvodnih jedinica uzimajući u obzir redoslijed puštanja postrojenja u pogon. Ponovna uspostava sustava može se matematički formulirati kao niz optimizacijskih problema.

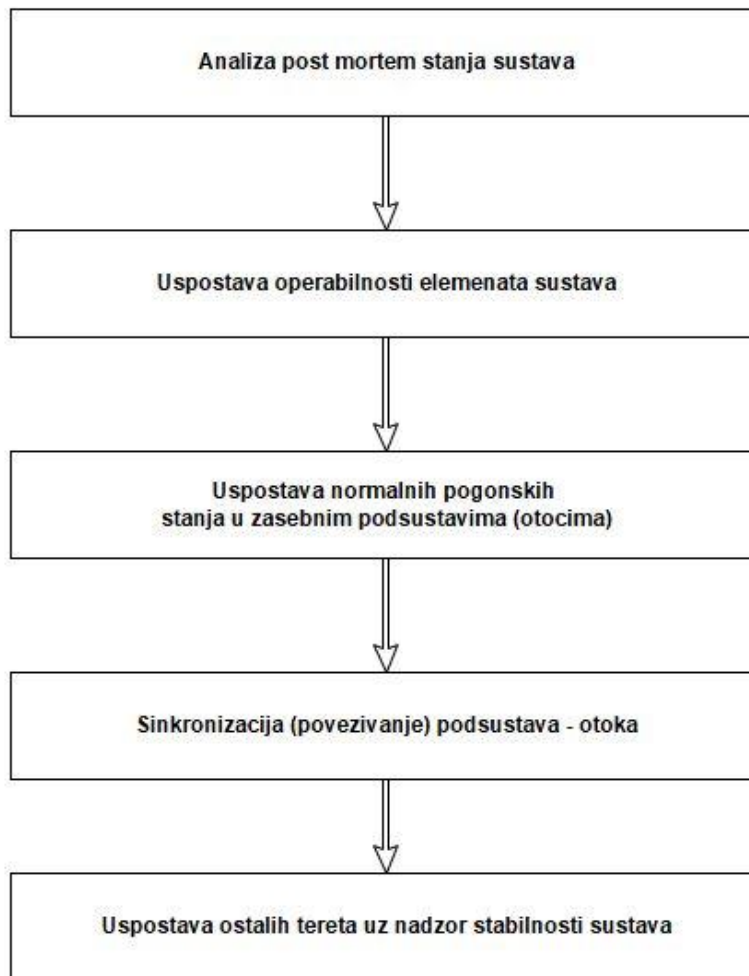
### **3.1.1 Planovi ponovne uspostave sustava**

Kaskadni poremećaji ( izvanredna pogonska stanja uzrokovana početnim kvarom sa propagacijom) u EES-u i u slučaju stabilnih i dobro povezanih EES-a, može se dogoditi raspad dijela ili cijelog sustava, dok se ostali dio sustava dijeli na skup nepovezanih otočnih pogona. Da bi se povećala sama robusnost EES-a, važan alat je zaštita i upravljanje cjelokupnim sustavom (primjerice – prijenosni sustav Republike Hrvatske) i predstavlja ga plan obrane EES-a od velikih poremećaja (razmatranje općenitog plana obrane kako je prikazano u [13]). U cilju izbjegavanja kaskadnog raspada sustava, u

planu obrane predlaže se analiza u stvarnom vremenu i komunikacija između glavnih subjekata EES-a, analiza raspada sustava, procjena osjetljivosti sustava na raspad (eng. *vulnerability*) i mogućnost prolaska kroz izvanredna pogonska stanja (eng. *self-healing*). Postupak ponovne uspostave sustava uključuje procjenu stanja sustava, optimizaciju proizvodnih kapaciteta i uključivanje tereta po transformatorskim stanicama. Javljaju se dva osnovna pitanja u razvoju planova za ponovnu uspostavu sustava. Prvo se pitanje odnosi na općenitost planova za ponovnu uspostavu sustava, tj. ti planovi bi trebali biti jednaki s mogućnošću prijenosa sa sustava na sustav s obzirom na osnovne postupke koji su opisani na slici 3.1. Pregledom dostupne literature, otkriva se da su razlike u „strategijama“ planova ponovne uspostave usko povezane s razlikama u karakteristikama pojedinog EES-a. Na temelju tih činjenica, teško je razviti jedinstven plan ponovne uspostave sustava koji bi bio „univerzalan“ za širok raspon „različitih“ sustava, već se trebaju koristiti isti algoritmi za izračun i podešenja različitih planova uzimajući u obzir specifičnosti pojedinih EES-a.

Drugi problem koji se javlja kod uspostavljanja učinkovitih planova česta je nedostupnost učinkovitih alata za optimizaciju. Kod problema ponovne uspostave sustava treba uzeti u obzir brojna praktična razmatranja (*post-mortem* analize različitih poremećaja) i prema tome, ne može ga se uzeti, tj. formulirati kao jedinstven problem optimizacije.





*Slika 3.1 Općenit pristup izradi planova ponovne uspostave sustava*

Na slici 3.1. prikazan je općenit prikaz dijagrama toka izrade planova ponovne uspostave EES-a.

*Analiza post mortem* (nakon raspada) stanja sustava uključuje sljedeće korake:

- detekcija elemenata sustava spremnih za normalan pogon;
- procjena pogonskih parametara mreže, proizvodnih jedinica i opterećenja;
- analiza pogonskog stanja sustava s obzirom na stupanj opasnosti za ljude, elektroenergetske objekte, potrošače, itd.;
- procjena operabilnog stanja objekata u različitim dijelovima sustava;
- procjena dostupnosti komunikacije između elektroenergetskih objekata i električne povezanosti podsustava (otoka);
- procjena spremnosti pojedinih elemenata sustava za pogon i preuzimanje tereta.

Sljedeća faza uspostave sustava uključuje provjeru varijabli stanja (frekvencija, napon, opterećenje prijenosnih vodova) u odvojenim podsustavima (otocima). Prelazak u fazu sinkronizacije podsustava (otoka) omogućuje sama uspostava sustava, odnosno uspostava varijabli stanja. Za dijelove pojedine mreže s distribuiranom proizvodnjom sinkronizacija se provodi prema glavnim proizvodnim jedinicama (ukoliko postoje u otoku) ili s dijelom susjednog otoka. Nakon provedbe navedene faze stvoreni su uvjeti za uspostavu napajanja ostalih potrošača u sinkroniziranim podsustavima (otocima).

### 3.1.2 Općenit pristup izradi planova ponovne uspostave sustava

Postupak ponovne uspostave [4,14] ima tri faze:

- **priprema**
- **uspostava sustava**
- **uspostava opterećenja.**

U tim fazama osnovna je razlika između pripremne faze i faze uspostave sustava to što je tijekom faze pripreme potrebno poduzeti hitne radnje, dok je u fazama pripreme i uspostave sustava kontrola opterećenja sredstvo za održavanje stabilnosti sustava. U fazi uspostave opterećenja primarni je cilj ponovno napajanje tereta [14,15].

Prema navedenim općim fazama uspostave sustava, strategije se mogu svrstati u pet idućih tipova [15], tj. „odozdo-prema-gore“, „odozgo-prema dolje“, „izvana-prema-unutra“, „iznutra-prema-van“ i „zajednička uspostava“, što se može opisati kao:

**Odozdo-prema-gore** (eng. *Bottom-Up*): Ovakva strategija se temelji na predefiniranim otočnim pogonima EES-a (otoci) s mogućnostima crnog starta (*black-start*) proizvodnih jedinica unutar otoka. Crni start znači da proizvodna jedinica unutar nekog otoka može krenuti sama od sebe, tj. da otok ima agregat koji će jedinicu vratiti u pogon. Otoci se sinkroniziraju u jedinstven EES nakon ponovne uspostave svakog pojedinog otoka. Glavne zadaće ovakve metode su pokretanje proizvodnih jedinica koje imaju mogućnost crnog starta, pokretanje proizvodnih jedinica koje nemaju mogućnost crnog starta, uspostava otoka i sinkronizacija svih otoka u jedinstven EES.

**Odozgo-prema-dolje** (eng. *Top-Down*): Ovakva strategija temelji se na ponovnom uspostavljanju proizvodnih jedinica koje imaju mogućnost crnog starta, a nakon prorade tih jedinica angažiraju se ostale jedinice bez mogućnosti crnog starta. Glavni koraci

uključuju pokretanje *black-start* proizvodnih jedinica, uspostavljanje prijenosne mreže (stavljanje mreže pod napon) i pokretanje jedinica bez mogućnosti crnog starta.

**Izvana-prema-unutra** (eng. *Build-Inward*): Ovakav tip strategije se primjenjuje za elektroenergetske sustave s dostupnom pomoćnom vezom prema ostalim sustavima. Uklapanjem pomoćnih dalekovoda uspostavljaju se veze sa vanjskim sustavom u cilju ponovnog pokretanja proizvodnih jedinica s mogućnošću crnog starta. Iz ovog osnovnog sustava i izvora električne energije kreće u proces ponovne uspostave sustava. Ovakva se strategija provodi kroz nekoliko koraka, poput ponovnog uspostavljanja dalekovoda, ponovnog povezivanja prijenosnih mreža i pokretanja proizvodnih jedinica koje nemaju mogućnost crnog starta.

**Iznutra-prema-van** (eng. *Build-Outward*): Ideja ove strategije je ponovno uspostaviti vanjski prsten prijenosne mreže bez korištenja veza prema drugim interkonekcijama. Ponovna uspostava sustava mora ići od prstena prema vanjskoj mreži. Glavna je zadaća ove strategije pokretanje *black-start* proizvodnih jedinica, uspostava vanjskog prstena prijenosne mreže i pokretanje *non-black-start* proizvodnih jedinica.

**Zajednička uspostava** (eng. *Build-Together*): U ovoj strategiji prijenosna mreža uspostavlja se u fazama kako bi se osigurala dovoljna snaga za uklapanje opterećenja, te se nakon toga pokreću proizvodne jedinice bez mogućnosti crnog starta, a nalaze se u blizini opterećenja.

### **3.1.3 Tehnički uvjeti ponovne uspostave sustava**

Kako bi se ostvarili planovi ponovne uspostave sustava, potrebno je provjeriti njihovu tehničku izvedivost kako u normalnom pogonskom stanju tako i u poremećenim pogonskim uvjetima [16]. Tehnička izvedivost planova ponovne uspostave sustava uključuje sljedeće:

**Ravnoteža radne snage i frekvencije.** Tijekom postupka ponovne uspostave sustava 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.

**Ravnoteža jalove snage i napona.** Za održavanje napona sustava unutar dozvoljenih granica, tijekom postupka uspostave sustava poduzimaju se sljedeće operacije: uspostavljanje napajanja visokonaponskih vodova na napon koji je niži od nazivnog, rad generatora na minimalno dozvoljenim razinama napona, isključenje statičkih kondenzatora, uklapanje prigušnica, prepodešenje regulacijskih transformatora i podizanje tereta s induktivnim faktorima snage [17].

**Pojava prijelaznih prenapona.** Prilikom crnog starta 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 [7].

**Samouzbuda.** Postoji mogućnost samouzbuđivanja proizvodnih jedinica ukoliko je struja uzbuđivanja relativno velika u odnosu na snagu proizvodne jedinice. Rezultat samouzbuđivanja 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 samouzbuđivanja je gubitak napajanja na strani tereta.

**Uklapanje tereta u hladnom stanju.** Ako je napajanje tereta isključeno nekoliko sati ili duže, struja kod ponovnog pokretanja može biti (8-10) puta veća od nazivne vrijednosti. U navedenoj skupini trošila podrazumijeva se rasvjeta, visokonaponski motori, termostatski kontrolirana trošila poput klima-uređaja, hladnjaka, zamrzivača, peći i električne grijalice [18].

**Stabilnost sustava.** Tijekom postupka ponovne uspostave sustava potrebno je održavati naponsku i kutnu stabilnost. Općenito se kutna stabilnost provjerava kada se u fazama ponovne uspostave sustava koristi više proizvodnih jedinica, dok je stabilnost frekvencije glavno pitanje u procjeni izvedivosti plana ponovne uspostave sustava.

**Planovi podešenja relejne zaštite i nadzor 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.

**Podjela EES-a na otoke.** Da bi se cjelokupni sustav što brže uspostavio, neophodno je podijeliti sustav na otoke, ali pri tome treba zadovoljiti sljedeće kriterije [19]:

- svaki otok treba imati dovoljnu snagu za crni start;
- svaki otok treba imati dovoljno veza između proizvodnih jedinica s mogućnošću crnog starta prema proizvodnim jedinicama koje nemaju tu mogućnost kako bi se mogle ponovno uspostaviti;
- svaki otok bi trebao imati mogućnost usklađivanja (reguliranja) frekvencije proizvodnih jedinica i opterećenja u propisanim granicama.
- svaki otok bi trebao imati odgovarajući nadzor napona u stvarnom vremenu u cilju održavanja odgovarajućeg naponskog profila;
- sva čvorišta u otoku koja graniče sa susjednim otocima trebaju biti opremljena uređajima za sinkronizaciju;
- svi otoci bi trebali moći međusobno razmjenjivati podatke;

### **3.1.4 Utjecaj karakteristika tereta na uspostavu sustava**

Modeli tereta mogu se razvrstati u dvije glavne kategorije: statički i dinamički modeli [20]. Modeliranje tereta odnosi se na matematički prikaz odnosa snage i napona u sabirnici tereta [19]. Kod same uspostave sustava, tj. njezina trajanja, napon i frekvencija dinamički će se mijenjati sve dok se ne uspostavi stacionarno pogonsko stanje dijela sustava (otoka) i u konačnici cijele interkonekcije. Zbog različitih tereta koji su priključeni u čvorištima prijenosne mreže, i njihovoj ovisnosti o naponu i frekvenciji, potrebno je uzeti u obzir dinamičke promjene opterećenja tijekom trajanja uspostave sustava. U nastavku su opisani osnovni modeli tereta sustava.

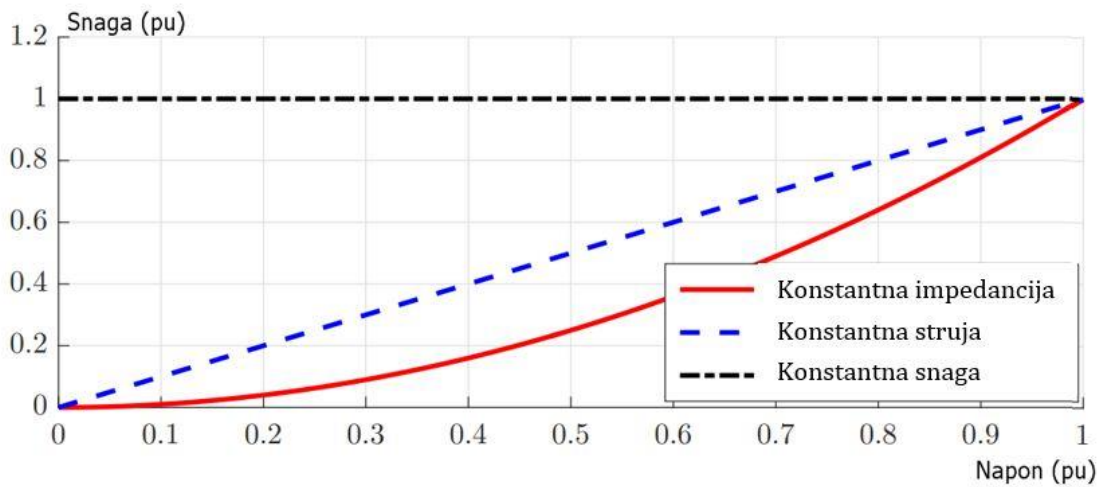
#### **3.1.4.1 Statički modeli**

Statički modeli tereta izražavaju radnu i jalovu snagu u vremenskoj domeni kao funkcije amplitude napona i frekvencije sabirnice na koju je spojen teret.

##### **1) ZIP MODEL**

ZIP model uobičajeno se koristi u stacionarnim i dinamičkim studijama [19]. Ovaj model predstavlja odnos između amplitude napona i snage u polinomnoj jednadžbi koja

kombinira komponente konstantne impedancije (Z), struje (I) i snage (P) tereta [19]-ZIP (slika 3.2.).



Slika 3.2 Karakteristika ZIP tereta

## 2) Eksponencijalni model

Eksponencijalni model opisuje snagu i napon na sabirnici tereta eksponencijalnim jednačbama. Ovaj model predstavlja relativno jednostavne izraze i obično se koristi za predstavljanje mješovitih vrsta tereta priključenih na istu sabirnicu [20].

Eksponecijalni model opisan je u sljedećim izrazima:

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_{pf}} \quad (3.1)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_{qf}} \quad (3.2)$$

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

### 3) Model ovisan o frekvenciji

Model tereta ovisnog o frekvenciji predstavlja kombinaciju tri vrste karakteristika prikazanih na slici 3.2., te se opisuje jednačbama (3.3) i (3.4).

$$P = P_n \left[ Z_p \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + I_p \left( \frac{U}{U_n} \right) + P_p \right] (1 + k_{pf} \Delta f) \quad (3.3)$$

$$Q = Q_n \left[ Z_q \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + I_q \left( \frac{U}{U_n} \right) + P_q \right] (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (3.4)$$

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 konstantne snage. Izraz:

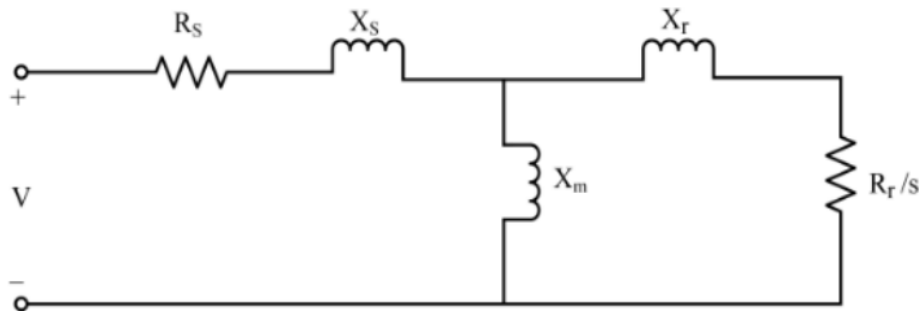
$$(1 + k_{pf} \Delta f) \quad (3.5)$$

odražava frekvencijsku stabilnost modela. Treba uočiti da je izraz (3.5) Taylorova aproksimacija izraza  $\left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_{pf}}$  prikazanog u (3.1) i (3.2). Taylorov red koristi se za prikazivanje funkcije kao beskonačnog reda članova iz derivacija funkcije u samo jednoj

točki. Pored toga je  $\Delta f = \frac{f - f_n}{f_n}$ , gdje je „f<sub>n</sub>“ nazivna frekvencija, a „f“ frekvencija u sabirnici [20].

### 3.1.4.2 Dinamički modeli

Dinamički modeli tereta izražavaju radnu i jalovu snagu kao funkciju napona i vremena. Primjeri korištenja dinamičkog modela na primjeru asinkronog motora:



Slika 3.3 Model asinkronog motora

U dinamičkim modelima radna i jalova snaga predstavljena je funkcijom amplitude napona i frekvencije na sabirnicama na kojima je priključen motor. Ova vrsta modela obično se izvodi iz nadomjesnog kruga asinkronog motora kao što je prikazano na slici 3.2. gdje su  $R_s$  i  $R_r$  statički i rotorski djelatni otpori,  $X_s$ ,  $X_r$  i  $X_m$  su statička, rotorska i magnetna reaktancija, odnosno  $s$  je klizanje (postotno kašnjenje brzine rotora za brzinom okretnog polja statora) rotora.

### 3.1.5 Odnos distribuirane proizvodnje i ponovne uspostave sustava

Razvoj modernih EES-a praćen je visokom primjenom distribuiranih izvora (DI) i ugradnjom napredne opreme za nadzor, zaštitu i vođenje, što u konačnici dovodi do složenijih i nepredvidljivih pogonskih stanja. Pod utjecajem DI, najčešće obnovljivih izvora energije (OIE) i tržišnih čimbenika povećava se vjerojatnost ozbiljnih raspada sustava, koje karakterizira kaskadni razvoj izvanrednih pogonskih stanja, a obuhvaćaju znatan dio EES-a. Kod takve situacije je moguća podjela na izolirane podsustave, također ispade elektrana što rezultira gubitkom napajanja potrošača i izoliranim EES-ovima.



Raspadi sustava koji su se dogodili u intervalu od 2000. godine do danas, uzrokovali su značajne posljedice za sustave i potrošače. To ujedno potvrđuje važnost izrade učinkovitih planova za ponovnu uspostavu EES-a.

Kao zaključak se nameće da veliki udio distribuirane proizvodnje u EES-u otežava proces ponovne uspostave sustava nakon raspada.

### **3.1.5.1 Metodologija matematičkog modeliranja i vođenja agregiranih DI u ODS-u**

Agregacija distribuirane proizvodnje i tereta igra ključnu ulogu u budućim mrežama gdje se predviđa veliki broj aktivnih čvorova zbog povećane penetracije distribuiranih obnovljivih izvora. Izbor optimalnog područja agregacije za danu mrežu može se odrediti pomoću prostorne raspodjele proizvodnje i opterećenja. Određivanje strateških lokacija za agregaciju provodi se pomoću optimizacijskih metoda u cilju agregiranja malih, raspodijeljenih fleksibilnih resursa (DI), ne zanemarujući pritom i opterećenje određenog područja.

Optimizacijske metode uglavnom se svode na redukciju mreže Thevenin-ovim teoremom za izračunavanje agregirane proizvodnje i potrošnje. Na koncu toga pojednostavljene mreža s velikim brojem čvorišta na ekvivalentnu mrežu s malo agregirane proizvodnje i potrošnje, čime se značajno smanjuje vrijeme računanja. Agregirana mreža (posebno na sučelju prijenosne i distribucijske mreže) pomaže operatorima sustava u donošenju operativnih odluka blizu stvarnom vremenu (obično se koristi naziv pseudo stvarno vrijeme – eng. pseudo-real time). Agregacija operatorima koristi za bolje operativno planiranje razumijevanjem u koje će doba dana biti potrebna fleksibilnost, iz kojeg određenog područja i u kojem iznosu, te omogućava da se sa fleksibilnim, raspodijeljenim resursima može trgovati na raznim tržištima električne energije.

## **4. RESTAURACIJA PRIJENOSNOG PODRUČJA RIJEKA**

Hrvatski EES čine proizvodni objekti i postrojenja, prijenosna i distribucijska mreža, te potrošači električne energije na području Republike Hrvatske. Ukupna instalirana snaga nešto je veća od 4468 MW, što uključuje i hrvatski dio NE Krško [21].

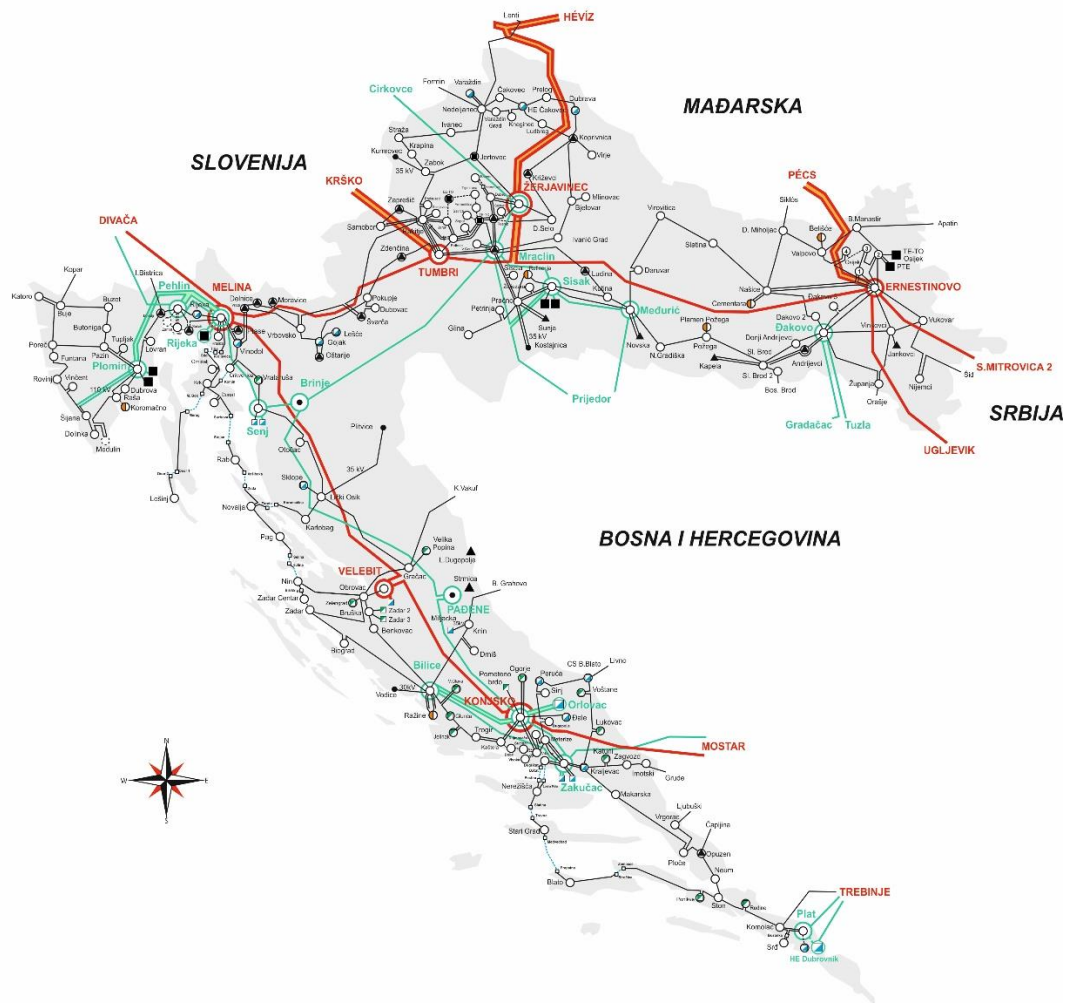
Hrvatski EES može se podijeliti na četiri prijenosna područja prema regionalnoj podjeli nadležnosti vođenja:

- PrP Zagreb
- PrP Osijek
- PrP Split
- PrP Rijeka

Prikaz cijelog prijenosnog područja Hrvatske od strane HOPS-a [22]:



# HRVATSKA PRIJENOSNA MREŽA



**Legenda:**

- |                                 |                          |                        |                               |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| — 400 kV dvostruki nadzemni vod | ⊙ TS 400/220/110 kV      | ⊙ TS (RP) 220 kV + HE  | ▲ EVP                         |
| — 220 kV dvostruki nadzemni vod | ⊙ TS 400/220/110 kV      | ⊙ TS (RP) 220 kV + HE  | ■ TE                          |
| — 220 kV nadzemni vod           | ⊙ TS 400/110 kV          | ⊙ TS (RP) 110 kV + VE  | □ HE                          |
| --- 220 kV kabelski vod         | ⊙ TS 220/110 kV          | ⊙ TS (RP) 110 kV + HE  | ⊙ TS (RP) 110 kV + TE         |
| --- 110 kV nadzemni vod         | ⊙ TS 220/35 kV           | ⊙ TS (RP) 110 kV + TE  | ⊙ TS (RP) 110 kV kupca        |
| --- 110 kV kabelski vod         | ⊙ TS 110x kV             | ⊙ TS (RP) 110 kV kupca | ○ 110 kV Kabelsko postrojenje |
| --- 110 kV podmorski kabel      | ⊙ TS (RP) 110 kV + EVP   |                        |                               |
|                                 | ⊙ TS 110x kV u IZGRADNJI |                        |                               |
|                                 | • TS 35x kV              |                        |                               |

Studeni, 2019.  
www.hops.hr

Slika 4.1 Hrvatska prijenosna elektroenergetska mreža

## 4.1 Sinkroček uređaji

Za povezivanje različitih dijelova sustava koriste se tzv. sinkroček uređaji. Takvi uređaji služe za povezivanje pojedinih dijelova mreže (npr. HE Vinodol i HE Senj). Njihova svrha je provjeriti razlike napona, frekvencija i kutova na mjestu povezivanja proizvodne jedinice na EES, povezivanja dvaju dijelova EES-a koji nisu sinkroni, uspostava veze između dviju točaka jednog EES-a i EES-a u interkonekciji. Funkcija sinkro-provjere omogućuje zatvaranje prekidača, odnosno povezivanje sustava samo ako naponi s obje strane prekidača ispunjavaju zadane uvjete:

- iste amplitude
- iste faze
- iste frekvencije

Primjer ABB-ovog sinkroček uređaja SPAU 140 C je prikazan na slici ispod [23]:



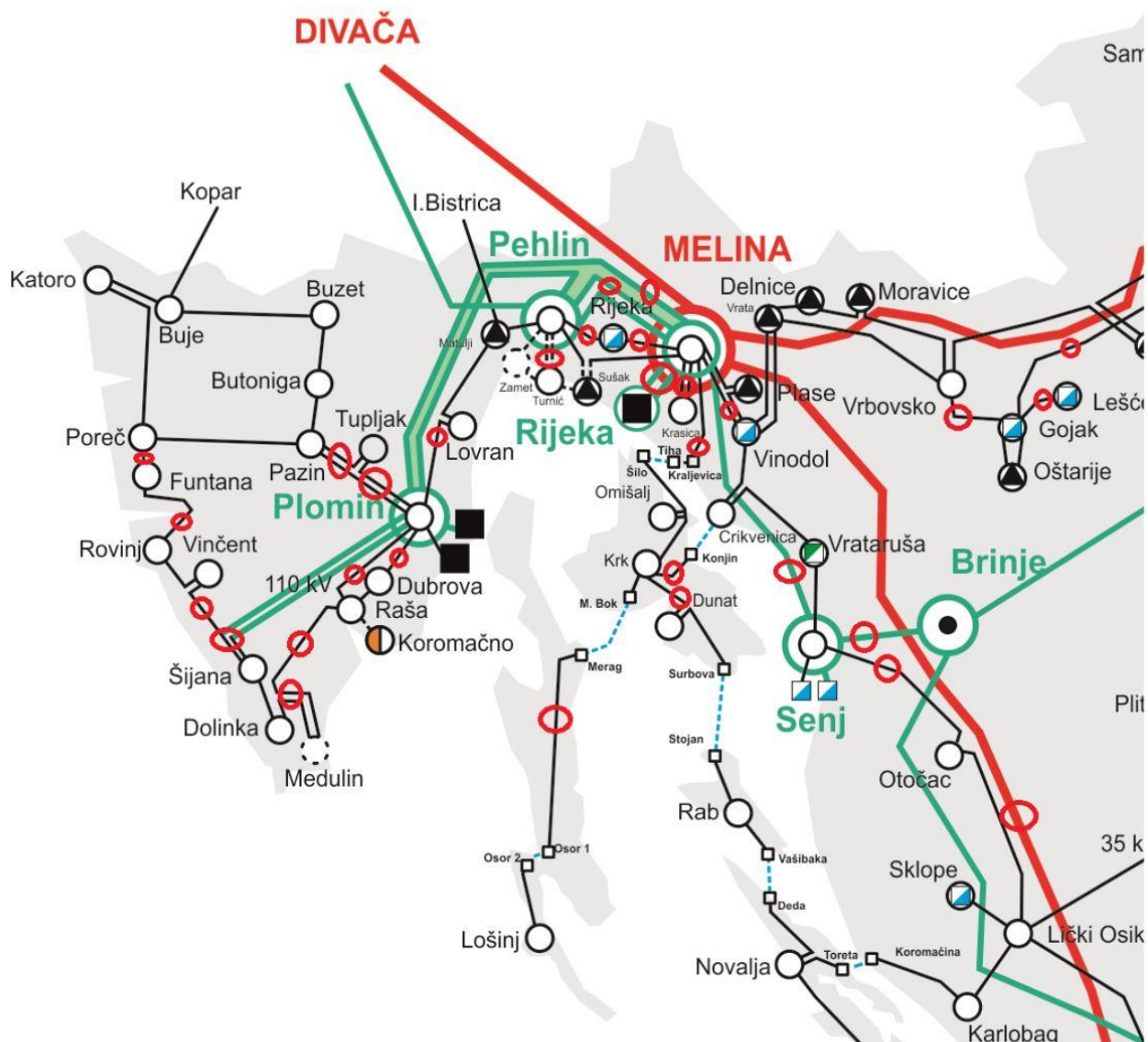
Slika 4.2 Primjer ABB-ovog sinkroček uređaja

Sinkroček uređaj se obično pridodaje uređaju za sinkronizaciju. Uređaji za sinkronizaciju se najčešće koriste u hidroelektranama za povezivanje generatora na mrežu. Takvi uređaji mogu biti ručni (sinkronizator, svijetli ili tamni spoj) ili automatski

(automatika obavlja uklapanje na mrežu). U današnje vrijeme se koriste samo automatski uređaji zbog lakše sinkronizacije.

Sinkroček uređaji se ne koriste na transformatorskim poljima (TP), vjetroelektranama (VE), te na elektrovučnim podstanicama (EVP). Sinkroček uređaji se spajaju tako da se u svakome otoku nalazi jedna elektrana ( ali ne VE). Oni se spajaju na 400 kV, 220 kV i 110 kV razini.

#### 4.1.1 Ugradnja sinkroček uređaja u PrP-u Rijeka



Slika 4.3 Prijenosno područje Rijeka

Restauracija dijela EES-a pod nadležnosti PrP-a Rijeka moguća je pružanjem usluge crnog starta iz elektrane:

- HE Vinodol (3 x 30 MW)

#### **4.1.2 HE Vinodol**

Hidroelektrana Vinodol je izgrađena 1952. godine. Prvotno ime HE Vinodol je bilo Hidroelektrana Nikola Tesla. Ona je dio hidroenergetskog sustava Vinodol koji se sastoji od HE Vinodol, CHE Fužine te RHE Lepenica. To je akumulacijska visokotlačna elektrana snage 90 MW. Elektrana koristi vode sliva rijeke Lokvare (Lokvarsko jezero s potokom Križ) i Ličanke ( tri umjetna jezera: Potkoš, Bajer i Lepenica). Prema geografskom položaju HE Vinodol je smještena u Triblju, u Primorsko-goranskoj županiji, u zaleđu Crikvenice.

Područje akumuliranih voda se nalazi na nadmorskoj visini od oko 700 metara, bruto pad sa slivnog područja Gorskog kotara na HE Vinodol je 658 metara. To je jedan od najviših ostvarenih padova u hidroenergetskim postrojenjima u Europi, zbog čega je dobivena velika hidroenergetska vrijednost ovog sustava.

U samoj elektrani su instalirana 3 agregata, od kojih se svaki sastoji od dvije horizontalne Pelton turbine (turbina koja se koristi za velike padove (preko 200 metara), te manje protoke vode) i generatora instalirane snage 31,5 MW. Elektrana sa ovakvom snagom godišnje proizvede prosječno 141 GWh električne energije.

Za vlastitu potrošnju elektrane, u strojarnici se nalazi i jedan kućni agregat sa Pelton turbinom i generatorom snage 470 kVA.

Elektrana obavlja usluge proizvodnje električne energije, pomoćne usluge automatske sekundarne regulacije, tercijarne regulacije, crni start te otočni pogon.

Ovo je akumulacijska, derivacijska, visokotlačna HE koja je izrazito bitna u Hrvatskome EES-u (spaja se na 100kV vod koji je u nadležnosti HOPS-a) [24].

#### **4.1.3 HE Senj**

Hidroelektrana Senj izgrađena je 1965.godine. HE se nalazi u Ličko-senjskoj županiji, u blizini mjesta Sveti Juraj. Instalirani volumni protok HE Senj je 60 m<sup>3</sup>/s. Vodu za rad elektrane uzima iz rijeka Like i Gacke. Bruto pad elektrane je oko 70 metara.

Spojne vode Like i Gacke teku do Gusić polja, pa se potom iskoristi pad do Jadranskog mora (oko 437 m).

HE Senj je visokotlačno derivacijsko postrojenje snage 216 MW, koja se dijeli na A, B i C postrojenja. U elektrani se nalaze tri agregata pojedinačne snage 72 MW. Koristi se Francis-ova turbina ( najčešće korišteni tip turbine u hidroelektranama, pogodna je za veliki raspon djelovanja u odnosu na visinu fluida, te ima veliki stupanj iskoristivosti kapaciteta s preko 90 %).

U HE Senj su izgrađena tri rasklopna postrojenja koja se razlikuju po naponskoj razini i namjeni.

Uloga HE Senj u EES-u Republike Hrvatske je značajna i višestruka. Godišnje proizvede oko 10% ukupne električne energije u RH i oko 30 % električne energije proizvedene u HE.

Elektrana obavlja usluge kao što su sekundarna regulacija snage, crni start te otočni rad.

Elektrana prosječno proizvede oko 970 GWh električne energije, dok je maksimalna proizvodnja bila 1474 GWh, 2014.godine [25].

## **4.2 Programski alat NEPLAN**

*NEPLAN AG* osnovan je 1988.godine i razvija visokokvalitetni programski alat za električne, plinske, vodovodne i daljinske sustave grijanja. Također nudi i specijalizirane usluge u tim područjima. Glavni ured kompanije smješten je u blizini Zurich-a u Švicarskoj. Tvrtka je ustrojena kao potpuno privatna i nezavisna, također je postala jedna od vodećih na tržištu softverskog inženjerstva EES-a.

*NEPLAN Electricity* je softverski alat za analizu, planiranje, optimizaciju i simulaciju EES-a. Prednost ovog softvera je u izuzetnom korisničkom sučelju s opsežnom bibliotekom mrežnih elemenata, zaštitnih uređaja, te upravljačkih krugova. Takav skup alata omogućuje korisniku vrlo učinkovito obavljanje studijskih slučajeva. Softver također sadržava modularni koncept zasnovan na međunarodnim standardima, kao što su IEC, ANSI, IEEE, itd. Primjenjuju se u sustavima kao što su:

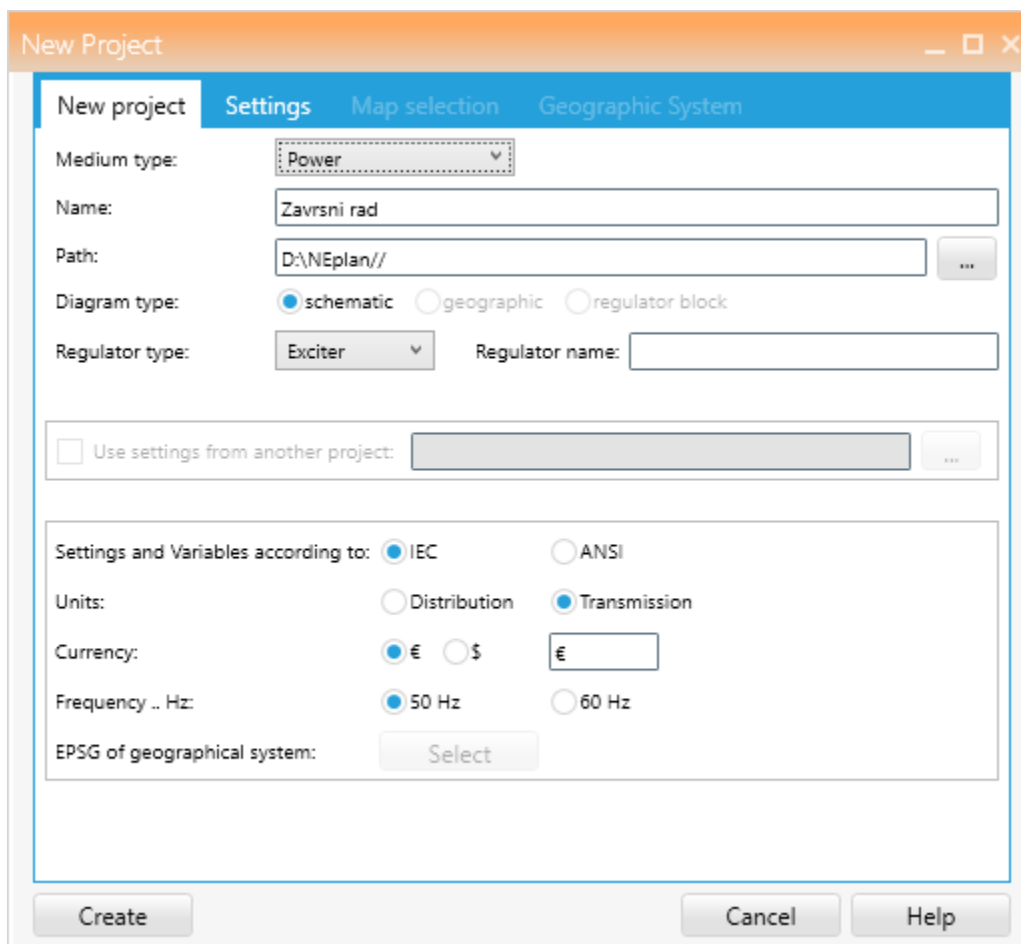
- Prijenosni sustavi
- Distribucijski sustavi
- Proizvodni sustavi

- Industrijski sustavi
- Obnovljivi izvori energije
- Smart-Grid aplikacije

Programski alati su temeljito bazirani na području obnovljivih izvora energije te skladištenju istih. Najčešće se koriste za izradu modela, analizu ili proračun elektrana, nadzemnih vodova, prijenosnih mreža, električnih mreža, uzemljenja, te za zaštitu od strujnog udara (jednopolni, dvopolni, tropolni kratki spojevi sa uzemljenjem ili bez njega). To je vrsta alata koji se koriste u elektrotehnici za transformiranje mrežnih problema (nacrtanih u grafičkome sučelju) u matematičke izraze [26].

#### 4.2.1 Upotreba programskog alata

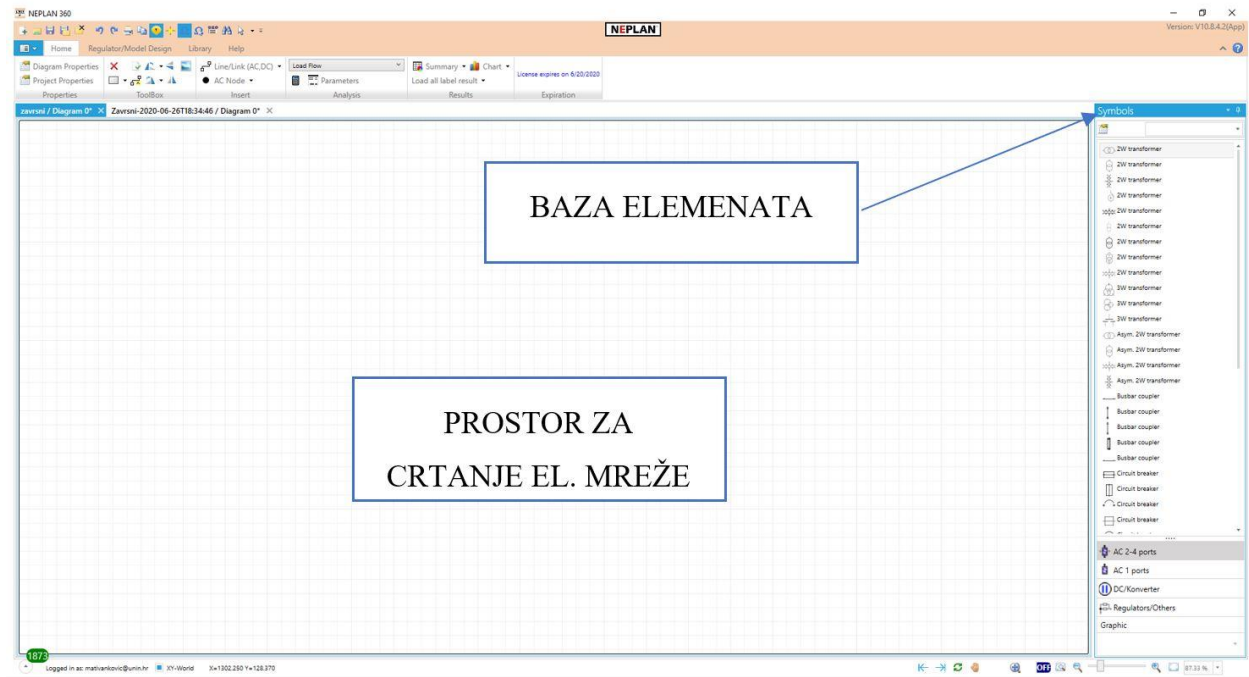
Nakon instalacije programskog paketa NEPLAN 360, sljedeći korak je stvoriti novi projekt. Novi projekt se stvara kako je prikazano na slici 4.4:



Slika 4.4 Otvaranje novog projekta

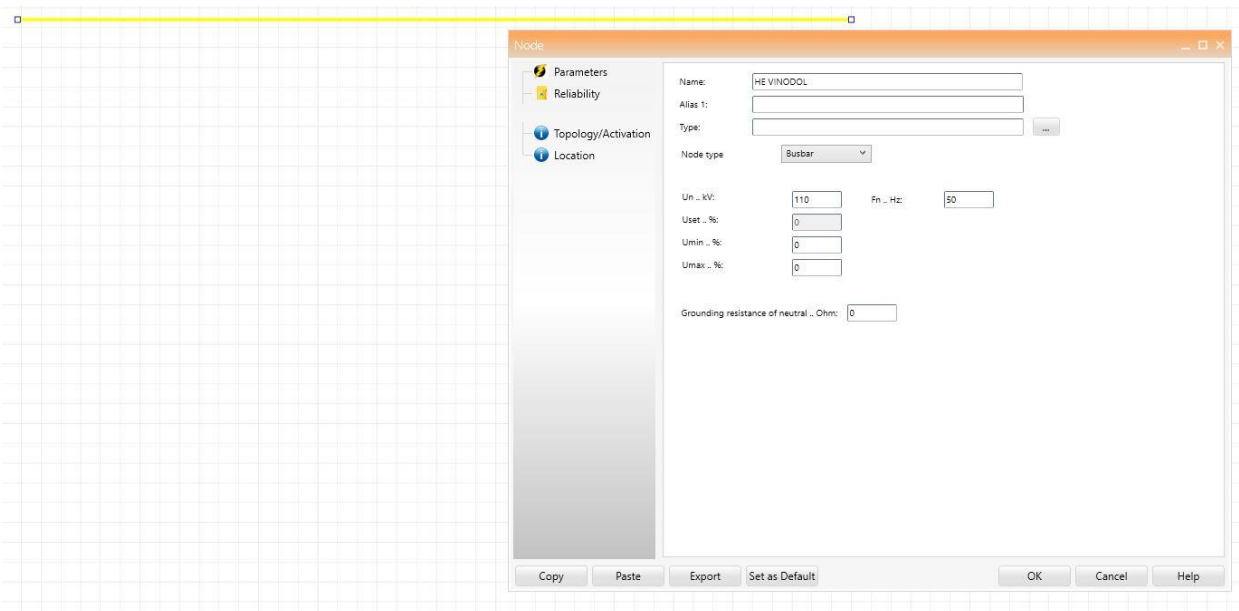


Nakon zadavanja imena projekta, odabira standarda, valute i frekvencije pritiskom na „Create“ otvara se novi projekt, s praznim poljem predviđenim za smještanje elemenata električne mreže. Elemente se u projekt dodaje prema principu „drag&drop“ iz trake koja je prikazana na slici 4.5:



*Slika 4.5 Nova stranica projekta*

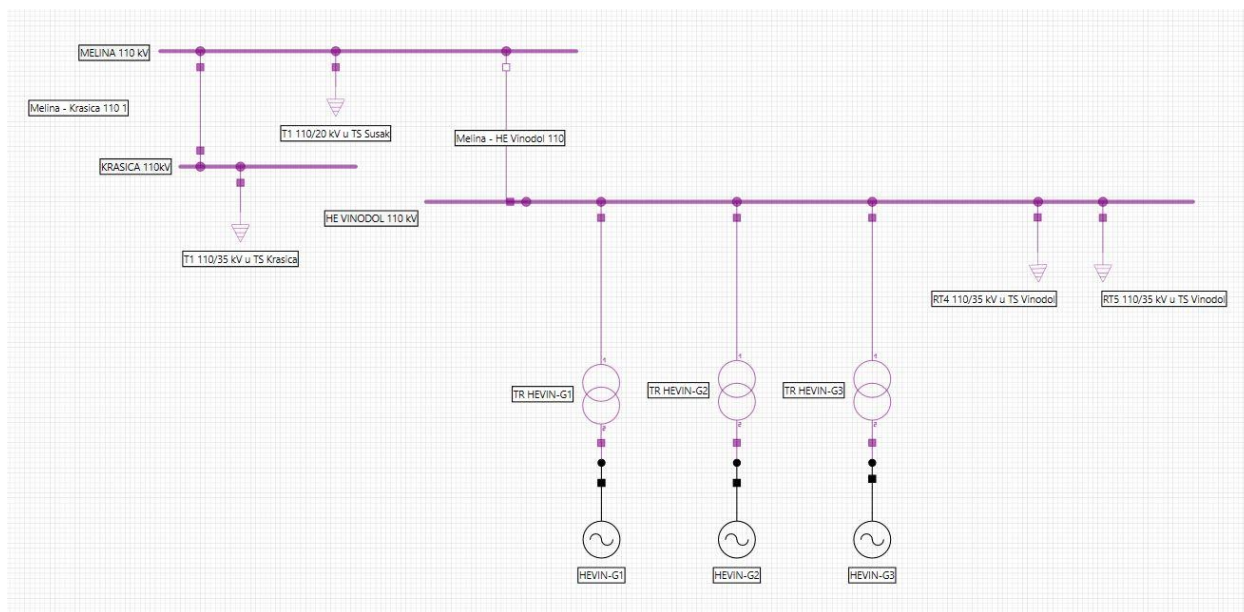
Nakon što je projekt otvoren, slijedi ubacivanje elemenata te njihovo povezivanje. U shemu EES-a se mogu umetati generatori, transformatori, vodovi, asinkroni motori, sabirnice, tereti, aktivna mreža, itd. Kod umetanja elemenata treba upisati sve potrebne podatke (ime, nazivni napon) kao na slici 4.6:



*Slika 4.6 Umetanje elemenata u NEPLAN-u*

Važna napomena kod zadavanja vrijednosti unutar programskog alata NEPLAN je ta da je potrebno koristiti točku, a ne decimalni zarez. Ukoliko se koristi decimalni zarez, NEPLAN odbacuje sve brojeve iza decimalnog zareza i zaokružuje na cjelobrojnu vrijednost.

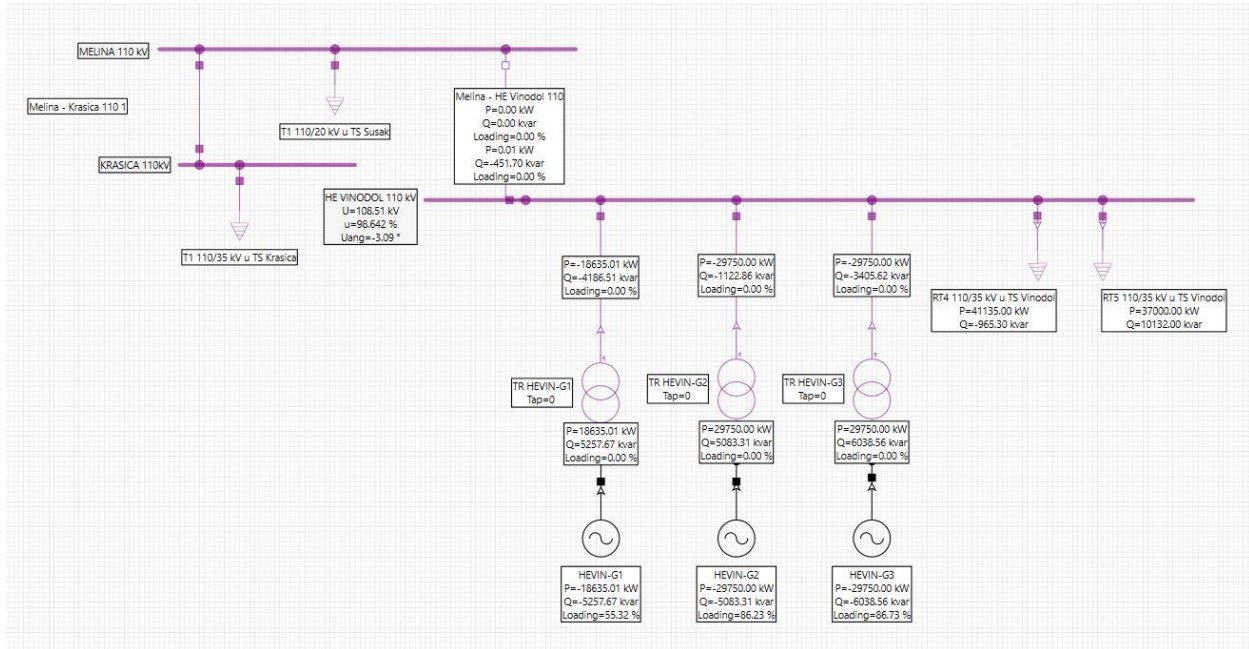
Nakon što je nacrtana željena shema, te ako su uneseni svi podaci mogu se izvršiti potrebni proračuni.



*Slika 4.7 Izgled radne plohe nakon umetanja svih elemenata*

Mogu se izvršiti različiti tipovi proračuna kao što su:

- proračun kratkog spoja (jednopolni, dvopolni, trolpolni)
- proračun tokova snaga (load flow)
- proračun stabilnosti
- proračun nadstrujne zaštite



Slika 4.8 Primjer izračuna tokova snaga

Programski paket NEPLAN također ima mogućnost izrade tablice rezultata, dijagrama i grafikona.

### 4.3 Ponovna uspostava PrP Rijeka – odozdo prema gore

Prijenosno područje Rijeka biti će restaurirano pomoću metode „odozdo prema gore“.

Algoritam za restauraciju će biti provjeren za tri različita scenarija:

- 25.07.2019. u 13:30h
- 23.01.2020. u 19:30h
- 13.04.2020. u 12:30h (uskrsni ponedjeljak)

Algoritam ponovne uspostave EES-a uključuje korake iz tablice 4.1:

Tablica 4.1 Algoritam ponovne uspostave PrP Rijeka

Broj koraka	Opis
1.	Pokretanje generatora HEVIN-G1, HEVIN-G2, HEVIN-G3 ( $P_{\max}= 3 \cdot 30$ MW) u HE Vinodol iz crnog starta do nazivne brzine vrtnje
2.	Sinkronizacija HEVIN-G1, HEVIN-G2, HEVIN-G3 na prazne sabirnice (110 kV) u transformatorskoj stanici Vinodol
3.	Uklop radnih tereta (RT4 i RT5) 110/35 kV u transformatorskoj stanici Vinodol, te postepeno terećenje potrošača na srednjenaponskoj razini
4.	Uklop dalekovoda Vinodol-Crikvenica (110 kV), stavljanje pod napon sabirnica u transformatorskoj stanici Crikvenica (110 kV)
5.	Uklop transformatora 110/20 kV u transformatorskoj stanici Crikvenica, te postupno terećenje potrošača na srednjenaponskoj razini
6.	Uklop dalekovoda Melina-Vinodol (110 kV), stavljanje pod napon sabirnica 110 kV u transformatorskoj stanici Melina
7.	Uklop dalekovoda Melina-Krasica1 (110 kV), stavljanje pod napon sabirnica 110 kV u transformatorskoj stanici Krasica
8.	Uklop transformatora 110/35 kV u transformatorskoj stanici Krasica, te postupno terećenje potrošača na srednjenaponskoj razini
9.	Uklop dalekovoda Melina-Sušak (110 kV), stavljanje pod napon sabirnica 110 kV u transformatorskoj stanici Sušak
10.	Uklop transformatora 110/20 kV u transformatorskoj stanici Sušak, te postupno terećenje potrošača na srednjenaponskoj razini
11.	Uklop dalekovoda Crikvenica-Vrataruša (110 kV), stavljanje pod napon sabirnica u transformatorskoj stanici Vrataruša (110 kV), blokirani automatski uklop VE Vrataruša
12.	Uklop dalekovoda Vrataruša-Senj (110 kV), stavljanje pod napon sabirnica 110 kV u transformatorskoj stanici Senj
13.	Sinkronizacija HESE-G1, HESE-G2 na 110 kV sabirnice u HE Senj ( $PG_{\min}=35$ MW, $PG_{\max}=72$ MW)

Datum 25.07.2019. u 13:30h je odabran za provjeru algoritma iz razloga što u posljednje vrijeme raste ljetna potrošnja, odnosno ljetno maksimalno opterećenje sustava zbog velikog broja klima uređaja i potrošnje električne energije za hlađenje prostora.

Datum 23.01.2020. u 19:30h je odabran za provjeru algoritma iz razloga što su najveća opterećenja Hrvatskog EES-a zabilježena najčešće u prosincu i siječnju, između 18 i 20 sati. Razlog tome je što veliki broj korisnika koristi električnu energiju za grijanje prostora.

Datum 13.04.2020. u 12:30h je odabran iz razloga što je zbog blagdana tada najviše korisnika električne energije kod kuće.

Kod izrade algoritma, uzeti su datumi i vremena sa vršnim vrijednostima, da se može procijeniti sa kojim vršnim opterećenjima se može opteretiti sustav kod ponovne uspostave po algoritmu iz tablice 4.1. Ako se sustav može restaurirati kod vršnih vrijednosti, onda se može i svakog drugog dana u godini.

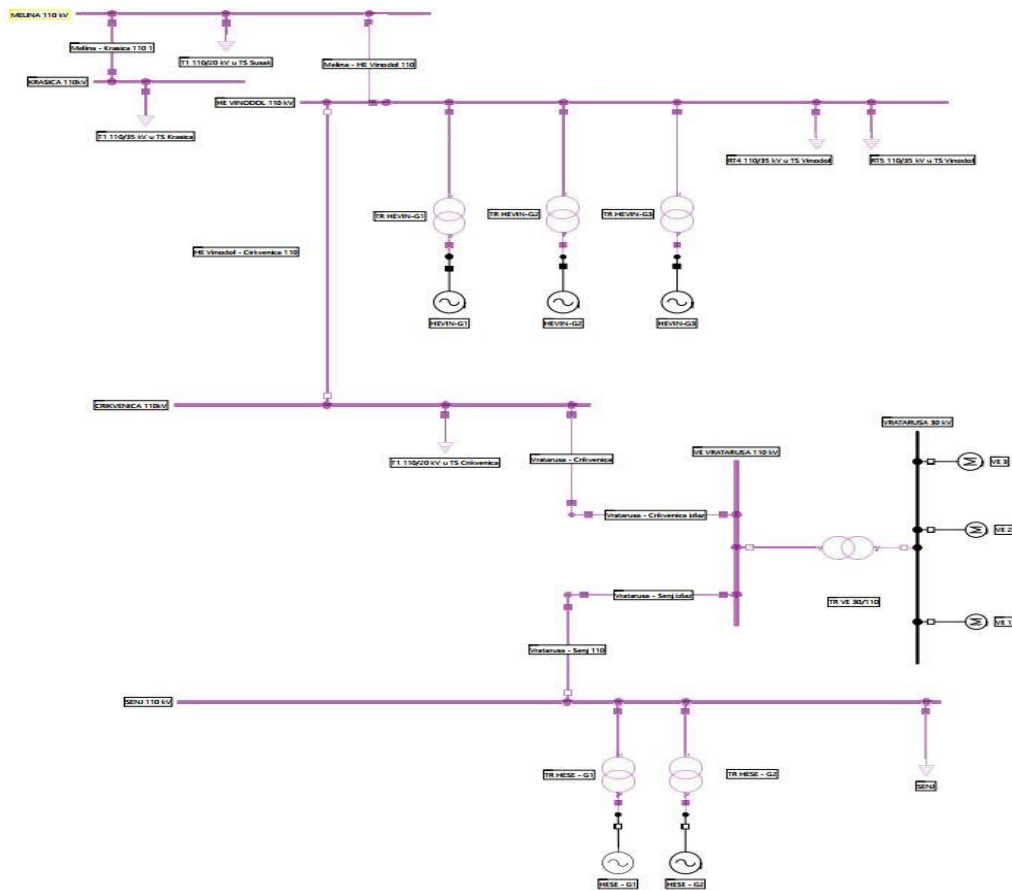
#### 4.3.1 Provjera algoritma na dan 25.07.2019. u 13:30h

Tereti za provjeru algoritma ponovne uspostave EES-a su dani u tablici 4.2:

*Tablica 4.2 Tereti na dan 25.07.2019. u 13:30h*

<b>Ime sabirnice</b>	<b>Pload(MW)</b>	<b>Qload(Mvar)</b>
RT4	11.00	-1.27
RT5	11.00	-2.75
Sušak	13.00	1.36
Krasica	13.15	-7.41
Crikvenica	15.00	-0.88
Senj	2.94	-0.9193

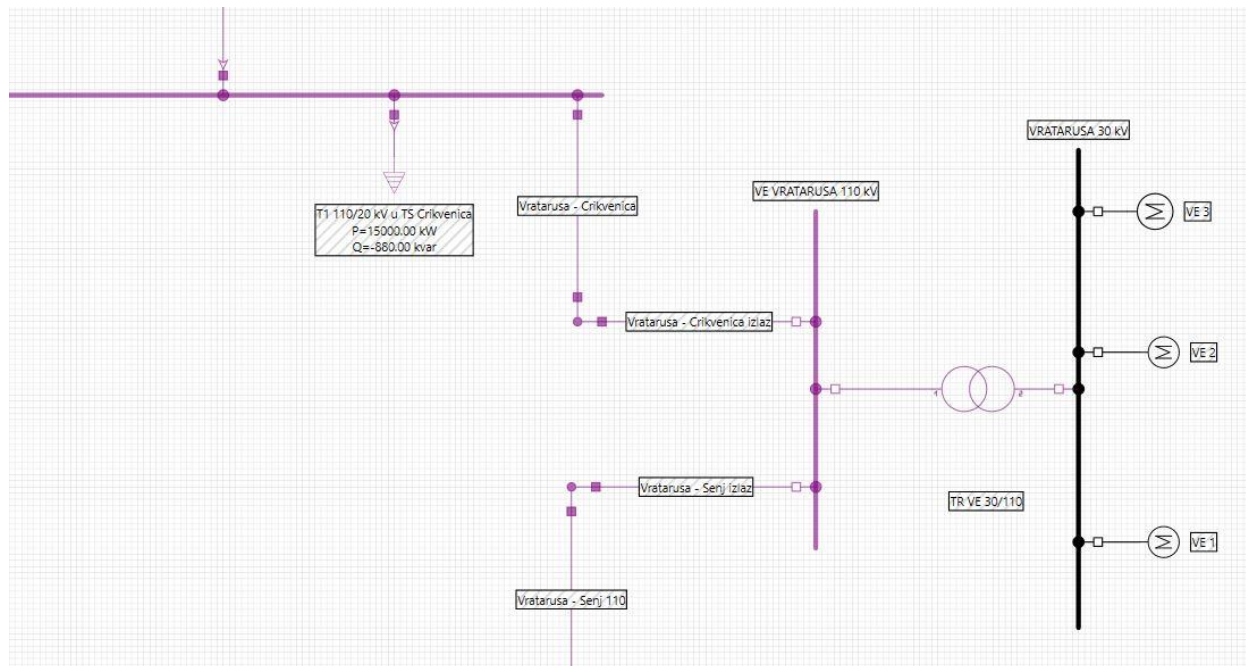
Za provjeru algoritma koristi se programski alat NEPLAN koji je opisan u poglavlju 4.2. Topologija mreže je prikazana na slici ispod:



Slika 4.9 Topologija PrP Rijeka

Restauracija započinje tako da HE Vinodol (opisana u poglavlju 4.1.2) kreće iz crnog starta do nazivne brzine vrtnje i uzbuđivanja generatora. Nakon toga se sinkroniziraju generatori na prazne sabirnice 110 kV u TS Vinodol. Sljedeći korak je uklapanje RT4 i RT5 sa teretima iz tablice 4.2. Uklapanje se može postići jer generatori nisu preopterećeni. Sljedeći korak je uklapanje dalekovoda HE Vinodol – Crikvenica. Nakon uklapanja transformatora u TS Crikvenica, vrši se postupno terećenje uklopom potrošača na srednjenaponskoj razini (do 15 MW). Nakon uspješnog terećenja, ide se na sljedeći korak, a to je uklop dalekovoda Melina – Vinodol, te dalekovoda Melina – Krasica1. Nakon uklopa dalekovoda, uklapa se transformator u TS Krasica, te se postupno tereti uklopom potrošača na srednjenaponskoj razini (do 14 MW). Sljedeći korak je uklop dalekovoda Melina – Sušak, te uklop transformatora u TS Sušak. Nakon uklopa transformatora kreće postupno terećenje uklopom potrošača na srednjenaponskoj

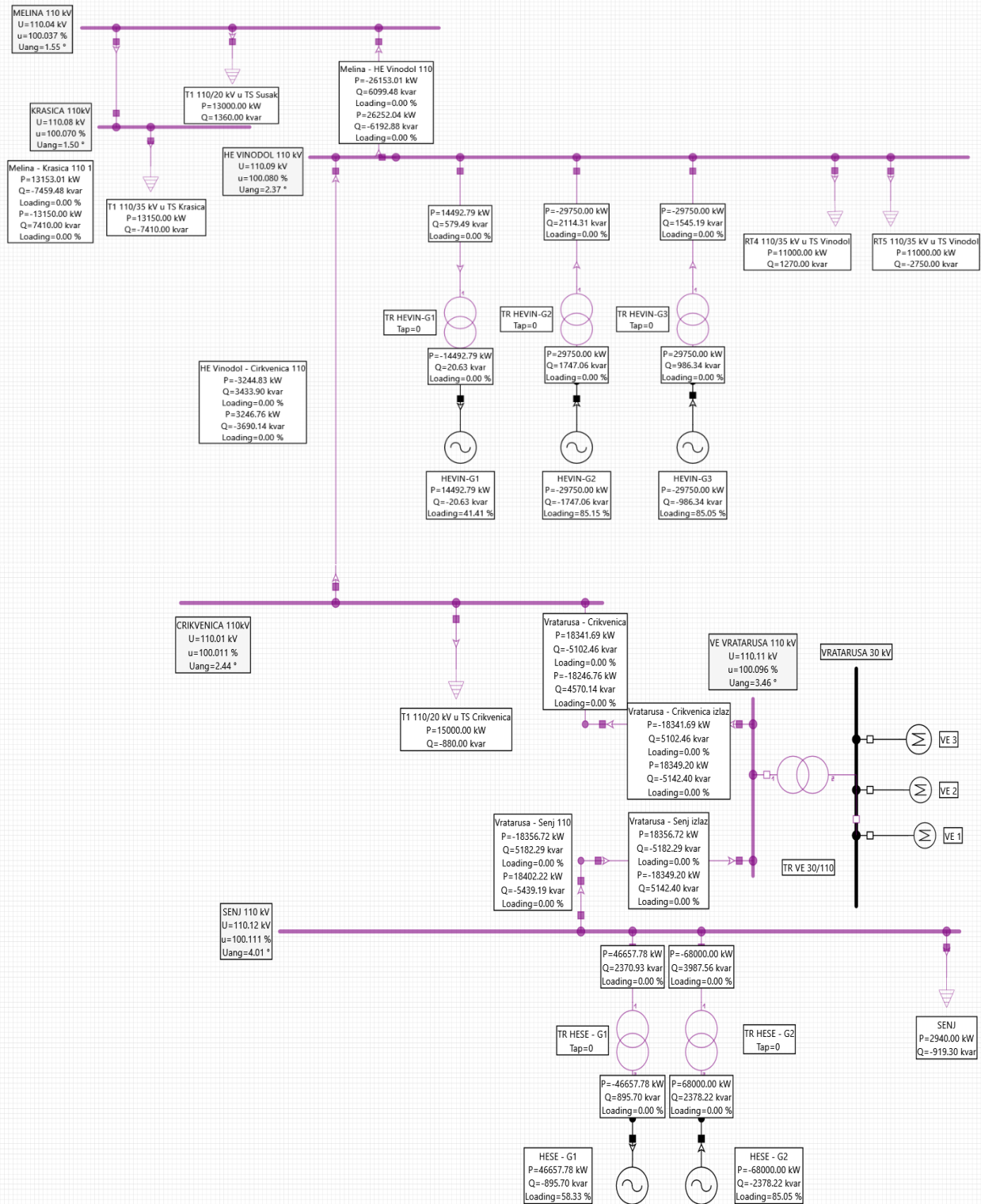
razini (do 17 MW). Nakon uspješnog uklopa, sljedeći korak je uklop dalekovoda Crikvenica – Vrataruša. Kod stavljanja sabirnica pod napon u TS Vrataruša, treba blokirati automatski ulazak VE Vrataruša na mrežu. Taj postupak je prikazan na slici 4.10:



Slika 4.10 Blokiranje ulaska VE Vrataruša na mrežu

Isto kao i HE Vinodol, HE Senj (opisana u poglavlju 4.1.3) kreće iz crnog starta te radi u otočnom načinu rada. Nakon uspješnog spajanja Vrataruše i Senja na 110 kV sabirnice u TS Senj, sljedeći korak u HE Senj je sinkronizacija generatora na 110 kV sabirnice. Sada su stvoreni uvjeti za spajanje preko sinkroček uređaja (prikazano na slici u poglavlju 4.1.1). Nakon uspješnog spajanja HE Vinodol i HE Senj podizanje PrP Rijeka je završeno. Za opterećenja navedena u tablici 4.1 algoritam ponovne uspostave EES-a funkcionira. Vrijednosti su prikazane na slici ispod:





Slika 4.11 Prikaz rezultata na dan 25.07.2019.



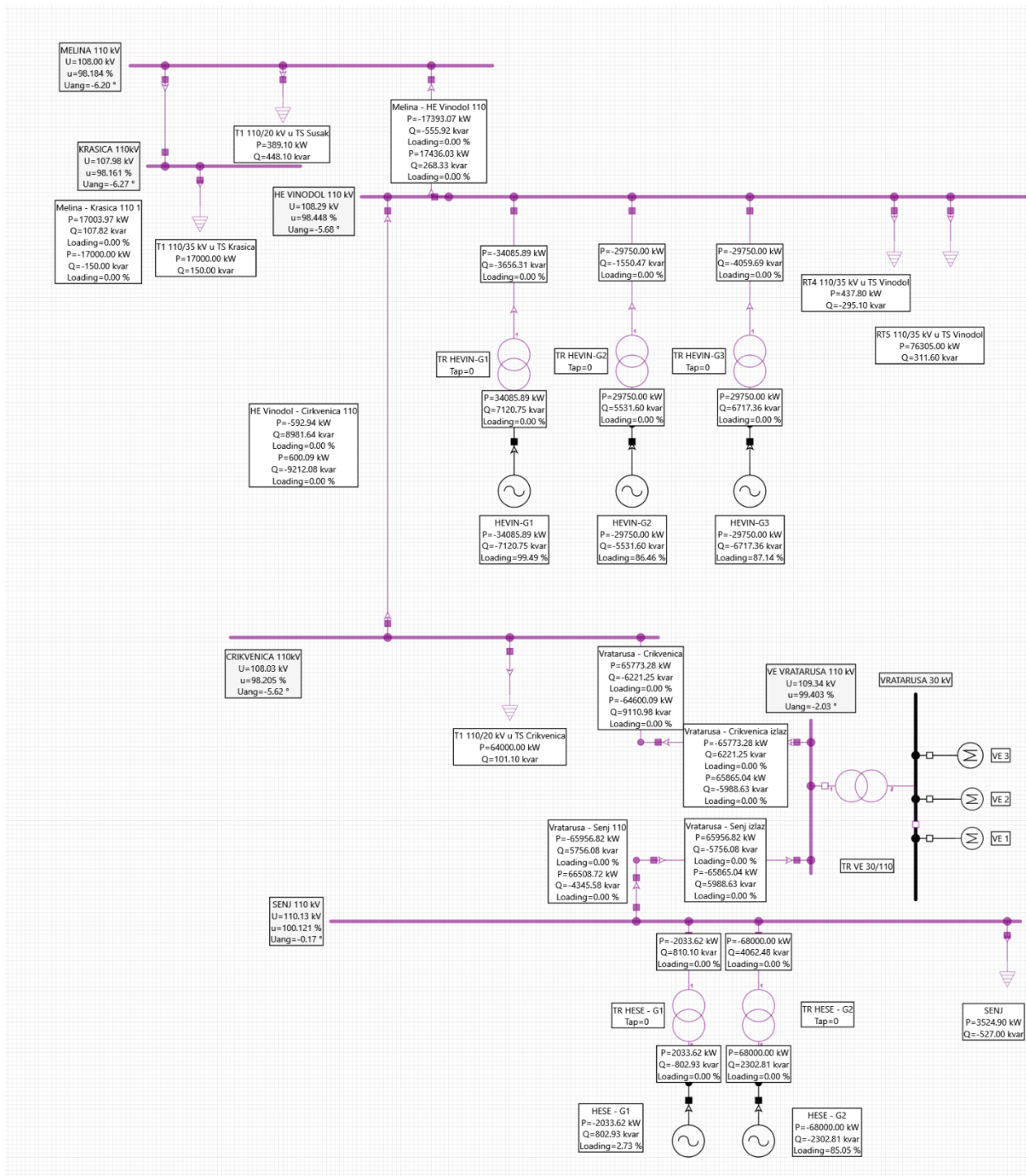
#### 4.3.2 Provjera algoritma na dan 23.01.2020. u 19:30h

Tereti za provjeru algoritma za ponovnu uspostavu EES-a na dan 23.01.2020. u 19:30h su dani u tablici 4.3:

*Tablica 4.3 Tereti na dan 23.01.2020. u 19:30h*

<b>Ime sabirnice</b>	<b>Pload(MW)</b>	<b>Qload(Mvar)</b>
RT4	0.4378	-0.2951
RT5	76.305	0.3116
Sušak	0.3891	0.4481
Krasica	29.650	0.3156
Crikvenica	155.892	0.1011
Senj	35.249	-0.5270

Algoritam ponovne uspostave EES-a se ponovno provodi prema tablici 4.1. Od 1-7 koraka uklapanje sustava ide prema planu. Kod uklopa TS Krasica dolazi do preopterećenja generatora HEVIN-G1 (136.53 %). Na TS Krasica treba smanjiti opterećenje da ne dođe do ispada generatora iz mreže. Opterećenje na TS Krasica treba smanjiti na: Pload= 17 MW, Qload=0.15 Mvar, da generator HEVIN-G1 ne bi bio preopterećen (99.61 %). Uklop prema koracima 9,10 i 11 ide prema planu. Za uklop daljnjih koraka treba u TS Crikvenica smanjiti opterećenje na: Pload=64 MW, Qload=0.1011 Mvar. Nakon smanjenja opterećenja u TS Crikvenica uklop cijelog sustava se može uspješno završiti, te se mogu povezati preko sinkroček uređaja HE Vinodol i HE Senj.



Slika 4.12 Prikaz rezultata na dan 23.01.2020.

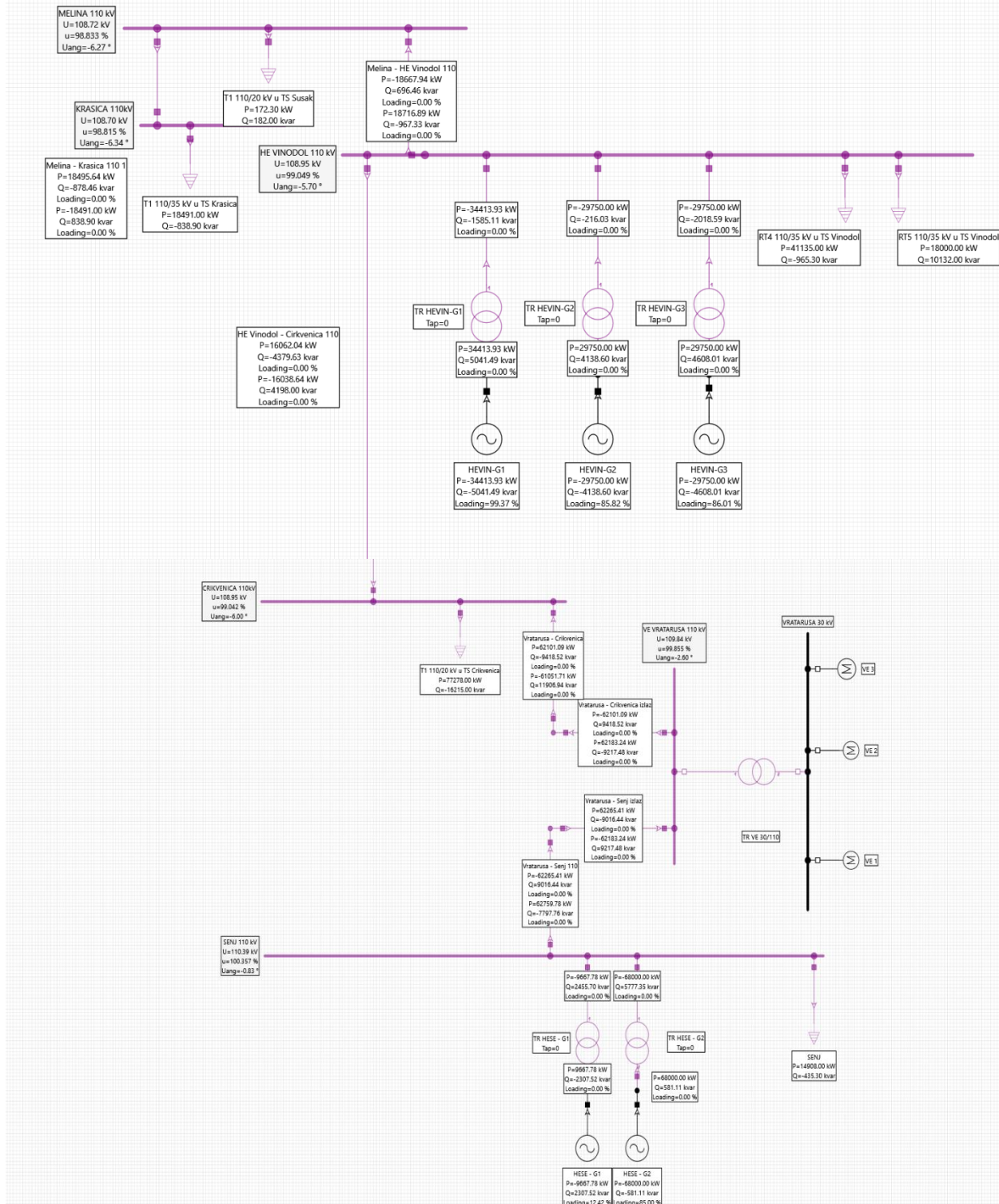
### 4.3.3 Provjera algoritma na dan 13.04.2020. u 12:30h

Tereti za provjeru algoritma ponovne uspostave EES-a na dan 13.04.2020. u 12:30h su dani u tablici 4.4:

*Tablica 4.4 Tereti na dan 13.04.2020. u 12:30h*

<b>Ime sabirnice</b>	<b>Pload(MW)</b>	<b>Qload(Mvar)</b>
RT4	41.135	-0.9653
RT5	79.139	10.132
Sušak	0.1723	0.1820
Krasica	18.491	-0.8389
Crikvenica	77.278	-16.215
Senj	14.908	-0.4353

Da bi se proveo algoritam ponovne uspostave EES-a po koracima od 1-13 iz tablice 4.1 potrebno je smanjiti opterećenje u TS Vinodol (RT5) na: Pload= 18 MW, Qload=10.132 Mvar, da bi generator bio na 99.83% opterećenja (u dopuštenim granicama da ne ispadne iz sustava). Nakon smanjenja opterećenja u TS Vinodol, uklop cijelog sustava se može uspješno završiti, te se mogu povezati preko sinkroček uređaja HE Vinodol i HE Senj.



Slika 4.13 Prikaz rezultata na dan 13.04.2020.

## 5. ZAKLJUČAK

Stabilnost EES-a uvelike ovisi o dobrom vođenju sustava, isto kako i o dobrom projektiranju sustava. Teško je očekivati da se u sustavu neće pojaviti nikakvi kvarovi zbog same njegove prirode, te konstantnih mijenjanja parametara same dinamike sustava (konstantno mijenjanje potrošnje, topologije mreže, uvrštenosti strojeva). Upravo zbog tih karakteristika je restauracija EES-a vrlo bitan korak kod samog projektiranja te održavanja sustava. Potrebno je imati razvijen algoritam pomoću kojeg će se sustav moći vratiti u normalno pogonsko stanje u što kraćem vremenu. Uz brzu ponovnu uspostavu sustava dolazi do manjih ekonomskih gubitaka kako za distributera tako i za potrošače.

U završnom radu cilj je teorijski opisati EES, te izraditi algoritam ponovne uspostave dijela elektroenergetskog sustava, PrP-u Rijeka po principu „odozdo – prema gore“. Kod izrade algoritma potrebno je poštovati preporuke koji su navedene u trećem poglavlju. Za brzu uspostavu sustava terećene su istovremeno trafostanice 110/10(20) kV. Prvi kriterij za takvu uspostavu je podjela EES-a na otoke, kako bi se cjelokupni sustav što brže uspostavio. Na prijenosnome području Rijeke, sustav je podijeljen na dva otoka: HE Vinodol i HE Senj. Obje hidroelektrane imaju dovoljnu snagu za crni start, dovoljno veza između proizvodnih jedinica s mogućnošću crnog starta prema jedinicama koje nemaju tu mogućnost. Također svaki otok ima mogućnost usklađivanja (reguliranja) frekvencije proizvodnih jedinica i opterećenja u propisanim granicama (sinkroček uređaji). Provjera predloženih algoritama ponovne uspostave EES-a je rađena na tri scenarija sa različitim opterećenjima (opterećen, rasterećen i vršno opterećen sustav). Iz dobivenih rezultata se može vidjeti da se kod malog opterećenja sustav može podići bez ikakvih rasterećenja pojedinih potrošača. Sa druge strane kod velikih opterećenja treba opterećenja smanjiti na prihvatljivu razinu, da ne dođe do ispada generatora. Zbog toga je u tablici 4.1 za ponovnu uspostavu sustava navedeno da se vrši postupno terećenje uklopom potrošača na srednjenaponskoj razini. Podaci su testirani do vršnih vrijednosti, tj. do samoga ruba ispada generatora iz sinkronizma (do 100% opterećenosti) tako da bi znali koje maksimalno opterećenje smijemo priključiti na pojedini otok.

U Varaždinu, \_\_\_\_\_



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, Matej Ivanković (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom Algoritmi restauracije elektroenergetskog sustava nakon raspada te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

Matej Ivanković  
(*vlastoručni potpis*)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti 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, Matej Ivanković (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog rada pod naslovom Algoritmi restauracije elektroenergetskog sustava nakon raspada čiji sam autor.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

Matej Ivanković  
(*vlastoručni potpis*)



## 6.LITERATURA

- [1] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2017\\_07\\_67\\_1585.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2017_07_67_1585.html), dostupno od 15.lipnja 2020.
- [2] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R1485>, dostupno od 15.lipnja 2020.
- [3] L. H. Fink and K. Carlsen, "Operating under Stress and Strain," IEEE Spectrum, March 1978, pp. 48-53
- [4] M. M. Adibi, J. N. Borkoski, and R. J. Kafka, "Power System Restoration - The Second Task Force Report," IEEE Trans. Power Syst., vol. 2, no. 4, pp. 927-932, Nov. 1987.
- [5] M. Adibi, P. Clelland, L. Fink, H. Happ, R. Kafka, J. Raine, D. Scheurer, and F. Trefny, "Power System Restoration – A Task Force Report," IEEE Trans. Power Syst., vol. 2, no. 2, pp. 271-277, 1987.
- [6] S. Spreng, H. Weber, and M. Hladky, "Investigation of the dynamic behaviour of hydro power plants for restoration scenarios," Int. J. Elec. Power, vol. 25, no. 8, pp. 615-621, 2003.
- [7] 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.
- [8] D. Lindenmeyer, H. W. Dommel, A. Moshref, and P. Kundur, "A framework for black start and power system restoration," in Proc. Electrical and Computer Engineering, 2000 Canadian Conference on, 2000.
- [9] C. Y. Teo and S. Wei, "Development of an interactive rule-based system for bulk power system restoration," IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, no. 2, pp. 646-653, 2000.
- [10] M.-S. Tsai, "Development of an Object-Oriented Service Restoration Expert System Whit Load Variations," IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 1, pp. 219-225, Feb. 2008.
- [11] R. J. Kafka, "Review of PJM restoration practices and NERC restoration standards," in Proc. Power and Energy Society General Meeting IEEE, 2008.

- [12] F. Levesque, S. T. Phan, A. Dumas, and M. Boisvert, "Restoration plan — The Hydro-Quebec experience," in Proc. Power and Energy Society General Meeting IEEE, 2008.
- [13] H. Li, G. W. Rosenwald, J. Jung, and C.-C. Liu, "Strategic power infrastructure defense," Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 5, pp. 918-933, 2005.
- [14] M. M. Adibi and L. H. Fink, "Overcoming restoration challenges associated with major power system disturbances - Restoration from cascading failures," Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 4, no. 5, pp. 68-77, 2006.
- [15] L. H. Fink, K.-L. Liou, and C.-C. Liu, "From generic restoration actions to specific restoration strategies," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 745-752, 1995.
- [16] M. M. Adibi and R. J. Kafka, "Power system restoration issues," Computer Applications in Power, IEEE, vol. 4, no. 2, pp. 19-24, 1991.
- [17] M. M. Adibi, Power System Restoration : Methodologies & Implementation Strategies New York: IEEE Computer Society Press 2000.
- [18] J. W. Feltes and C. Grande-Moran, "Black start studies for system restoration," in Proc. Power and Energy Society General Meeting IEEE, 2008.
- [19] P. Kundur, Power system stability and control, EPRI series, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [20] 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
- [21] <http://www.nemis.hr/index.php/energetske-svrhe/hrvatski-elektroenergetski-sustav.html>, dostupno 17.lipnja 2020.
- [22] <https://www.hops.hr/shema-ees-a>, dostupno 17.lipnja 2020.
- [23] <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/protection-relay-services/legacy-relays-and-related-devices-and-tools/synchro-check-relay-spau-140-c>, dostupno 18.lipnja 2020.



- [24] <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-zapad/he-vinodol/1536> , dostupno 19.lipnja 2020.
- [25] <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-zapad/he-senj/1540>, dostupno 19.lipnja 2020.
- [26] <https://www.neplan.ch/en-company/>, dostupno 19.lipnja 2020.

## Popis slika

Slika 2.1 Pogonska stanja elektroenergetskog sustava .....	7
Slika 3.1 Općenit pristup izradi planova ponovne uspostave sustava .....	14
Slika 3.2 Karakteristika ZIP tereta .....	19
Slika 3.3 Model asinkronog motora .....	21
Slika 4.1 Hrvatska prijenosna elektroenergetska mreža.....	24
Slika 4.2 Primjer ABB-ovog sinkroček uređaja .....	25
Slika 4.3 Prijenosno područje Rijeka .....	26
Slika 4.4 Otvaranje novog projekta .....	29
Slika 4.5 Nova stranica projekta.....	30
Slika 4.6 Umetanje elemenata u NEPLAN-u .....	31
Slika 4.7 Izgled radne plohe nakon umetanja svih elemenata.....	31
Slika 4.8 Primjer izračuna tokova snaga .....	32
Slika 4.9 Topologija PrP Rijeka .....	35
Slika 4.10 Blokiranje ulaska VE Vrataruša na mrežu .....	36
Slika 4.11 Prikaz rezultata na dan 25.07.2019. ....	37
Slika 4.12 Prikaz rezultata na dan 23.01.2020. ....	39
Slika 4.13 Prikaz rezultata na dan 13.04.2020. ....	41

## Popis tablica

Tablica 4.1 Algoritam ponovne uspostave PrP Rijeka.....	33
Tablica 4.2 Tereti na dan 25.07.2019. u 13:30h .....	34
Tablica 4.3 Tereti na dan 23.01.2020. u 19:30h .....	38
Tablica 4.4 Tereti na dan 13.04.2020. u 12:30h .....	40