

# Ugradnja kondenzatorskih baterija u svrhu upravljanja naponskim prilikama s ciljem sprječavanja naponskog sloma

---

Pejičić, Goran

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:487600>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**UGRADNJA KONDENZATORSKIH BATERIJA U SVRHU  
UPRAVLJANJA NAPONSKIM PRILIKAMA S CILJEM  
SPRJEČAVANJA NAPONSKOG SLOMA**

Rijeka, rujan 2024.

Goran Pejičić

0069070554

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**UGRADNJA KONDENZATORSKIH BATERIJA U SVRHU**

**UPRAVLJANJA NAPONSKIM PRILIKAMA S CILJEM**

**SPRJEČAVANJA NAPONSKOG SLOMA**

Mentor: Prof. dr. sc. Alfredo Višković

Rijeka, rujan 2024.

Goran Pejičić

0069070554

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Elektroenergetski sustavi**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Goran Pejičić (0069070554)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Ugradnja kondenzatorskih baterija u svrhu upravljanja naponskim prilikama s ciljem sprječavanja naponskog sloma / Installation of capacitor banks for the purpose of voltage management in order to prevent voltage breakdown**

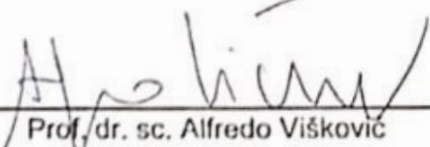
### Opis zadatka:

Zadatak predmetnog diplomskog rada je opisati 'moguće alate' za upravljanje naponskim prilikama (regulacijski transformatori, pogonska karata generator, prigušnice i kondenzatorske baterije). Posebnu pozornost potrebno je posvetiti kondenzatorskim baterijama i mogućnostima (lokacijama) njihove ugradnje u elektroenergetski podsustav Istre. Nadalje, potrebno je u nekom od softverskih alata (npr. Siemens PSS) napraviti simulacije s ciljem određivanja broja i snage kondenzatorskih baterija s ciljem osiguranja sigurnosti pogona elektroenergetskog podsustava Istre u skladu s važećim Mrežnim pravilima.


Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
Prof. dr. sc. Alfredo Višković

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
Prof. dr. sc. Viktor Sučić

## **IZJAVA**

Sukladno s člankom 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2020. godine, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Ugradnja kondenzatorskih baterija u svrhu upravljanja naponskim prilikama s ciljem sprječavanja naponskog sloma“ uz konzultacije s mentorom prof. dr. sc. Alfredom Viškovićem i asistentom dr.sc. Vladimirom Valentićem.

Rijeka, rujan 2024.

Goran Pejičić

---

## **ZAHVALA**

Ovim putem želio bih se zahvaliti svom mentoru prof. dr. sc. Alfredu Viškoviću i asistentu Vladimiru Valentiću na stručnom mentorstvu, prenesenom znanju i savjetovanju tijekom izrade ovog diplomskog rada. Neizmjernu zahvalu dajem svojoj obitelji i svojoj djevojci na podršci.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....	2
2.1. Vrste stabilnosti elektroenergetskog sustava .....	4
2.2. Stabilnost kuta rotora.....	4
2.3. Naponska stabilnost .....	5
2.4. Frekvencijska stabilnost .....	6
2.5. Mrežna pravila prijenosnog sustava za napon i jalovu snagu .....	7
3. NAPONSKI SLOM.....	10
4. POGONSKA KARTA GENERATORA .....	16
5. PRIGUŠNICE .....	20
5.1. Paralelne prigušnice.....	20
5.1.1. Regulacijske paralelne prigušnice za visokonaponske mreže .....	21
5.2. Serijske prigušnice.....	21
5.2.1. Problem testiranja serijskih prigušnica .....	22
6. REGULACIJSKI TRANSFORMATORI .....	24
6.1. Transformatori s uzdužnom regulacijom.....	27
6.2. Transformatori s poprečnom regulacijom .....	28
6.3. Regulacijske sklopke .....	31
6.3.1. Regulacijska sklopka pod opterećenjem s prijelazom reaktora .....	33
6.3.2. Regulacijska sklopka pod opterećenjem s preklopnim prekidačima .....	34
6.3.3. Reaktorski tip regulacijske sklopke s vakuumskim prekidačem .....	35
6.3.4. Regulacijske sklopke s otpornicima.....	37
7. KONDENZATORSKE BATERIJE.....	40
8. SPRJEČAVANJE NAPONSKOG SLOMA UGRADNJOM KONDENZATORSKIH BATERIJA NA PRIMJERU ELEKTROENERGETSKOG PODSUSTAVA ISTRE .....	44
8.1. Simulacija podsustava Istre u Neplan programskom paketu.....	46
8.2. Simulacija podsustava pri različitim faktorima snage TE Plomin .....	49
8.3. Analiza i rezultati simulacija .....	52
9. ZAKLJUČAK .....	61
10. LITERATURA.....	62
11. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	64
12. ABSTRACT AND KEYWORDS.....	65

## 1. UVOD

U periodu od zadnjih nekoliko godina se pojavila veća potreba za pravilnim kontroliranjem naponskih prilika u elektroenergetskom sustavu. Uzrok tome, prema literaturi [1], je značajno povećavanje udjela obnovljivih izvora energija u proizvodnji električne energije i liberalizacija tržišta električne energije. S obzirom da obnovljivi izvori energije nemaju konstantnu proizvodnju javlja se povećana doza nepredvidivosti u elektroenergetskoj mreži. Posljedica promjenjivosti u proizvodnji energije obnovljivih izvora energije su neočekivani kompenzacijski tokovi aktivne snage. Takvi tokovi kao i tokovi reaktivne snage ugrožavaju sigurnost, smanjuju kapacitet i povećavaju gubitke prijenosnih mreža na državnoj i europskoj razini. Elementi koji se najviše naprežu u tim slučajevima su energetske transformatori i prijenosni vodovi. [1]

Za ostvarivanje stabilnosti električne energije u elektroenergetskom sustavu potrebno je osloniti se na upotrebu određenih alata koji će to aktivno održavati. Neki od tih alata uključuju regulacijske transformatore, pogonske karte generatora, prigušnice i kondenzatorske baterije. U radu će biti obrađena tema stabilnosti elektroenergetskog sustava, te će se staviti naglasak na naponsku stabilnost i naponski slom. Istaknut će se mrežna pravila prijenosnog sustava vezana za naponsku stabilnost i jalovu energiju u sustavu. Potom će biti opisani zasebno svaki od navedenih alata za održavanje stabilnosti. Na kraju će biti prikazana simulacija elektroenergetskog podsustava Istre u programskom paketu Neplan. Pomoću simulacija će se pokušati analizirati elektroenergetski podsustav Istre i odrediti optimalna lokacija ili lokacije za ugradnju kondenzatorskih baterija kako bi se poboljšale naponske prilike podsustava.

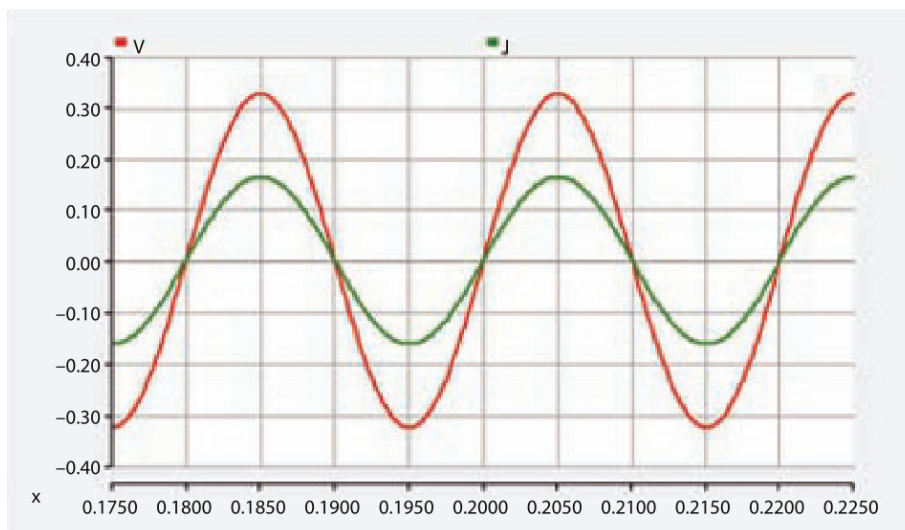


## 2. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

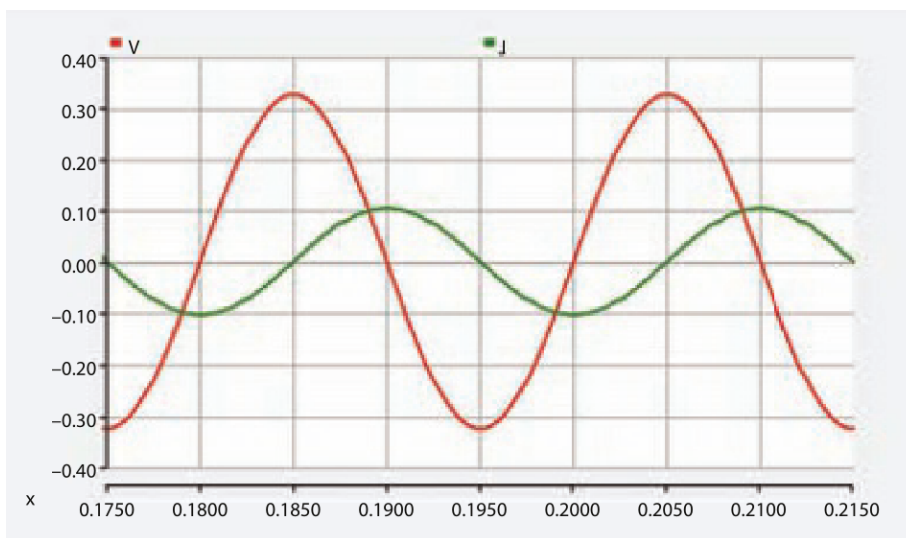
Struja koja se koristi u elektroenergetskom sustavu je izmjeničnog oblika. Korištenjem izmjenične struje možemo ju efikasnije prenositi i lakše prilagođavati iznose napona sukladno potrebama okolnosti. Izmjenični oblik znači da struja periodično izmjenjuje svoj smjer i iznos. U elektroenergetskom prijenosnom sustavu se primarno koristi izmjenična trofazna struja. Korištenjem električnih komponenti poput zavojnice i kondenzatora s izmjenčnom strujom javljaju se određeni efekti kašnjenja napona za strujom ili obrnuto. Ti efekti i njihova ravnoteža u elektroenergetskom sustavu su neophodni za stabilno funkcioniranje mreže.

Zavojnica je izolirani vodič oblikovan u petlju koji upravo zbog svog oblika ima sposobnost pohranjivanja magnetske energije kada kroz njega teče električna struja. Na idućim slikama je prikazan strujni krug sa zavojnicom i graf međusobnog odnosa napona i struje čiji efekt izaziva zavojnica. U elektroenergetskoj mreži se koriste zavojnice velikih veličina i služe za regulaciju napona, ograničavanje struje kvara ili za kompenzaciju jalove snage.

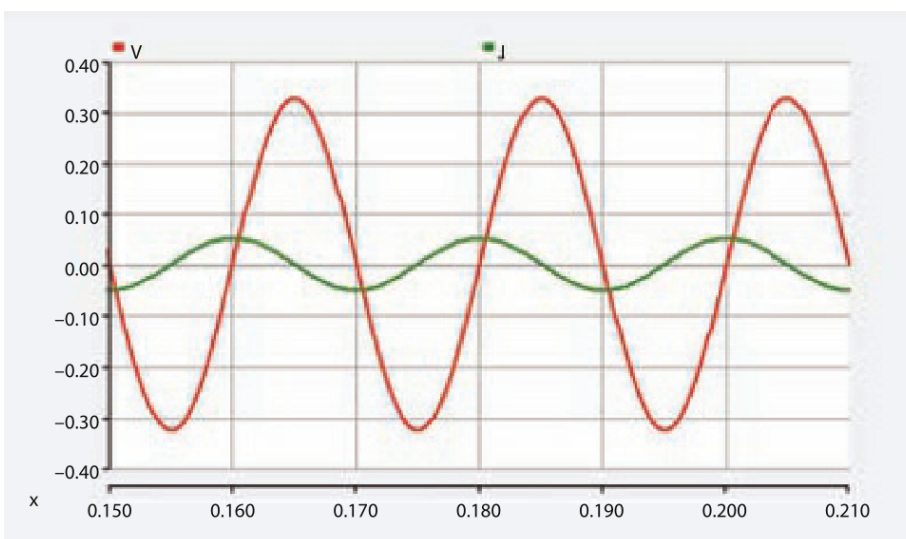
Kondenzator je komponenta koja se sastoji od dvije vodljive površine koje su međusobno odvojene izolirajućim materijalom. Dizajn kondenzatora omogućava da se pohranjuje električna energija nakupljanjem električnog naboja na navedenim površinama. Na idućim slikama je prikazan strujni krug s kondenzatorom i graf međusobnog odnosa napona i struje čiji efekt izaziva kondenzator. U elektroenergetskoj mreži se koriste kondenzatori velikih veličina u svrhu kompenzacije induktivnih trošila.



Slika 2.1. Strujni krug s otporom [2]



Slika 2.2. Strujni krug s zavojnicom [2]

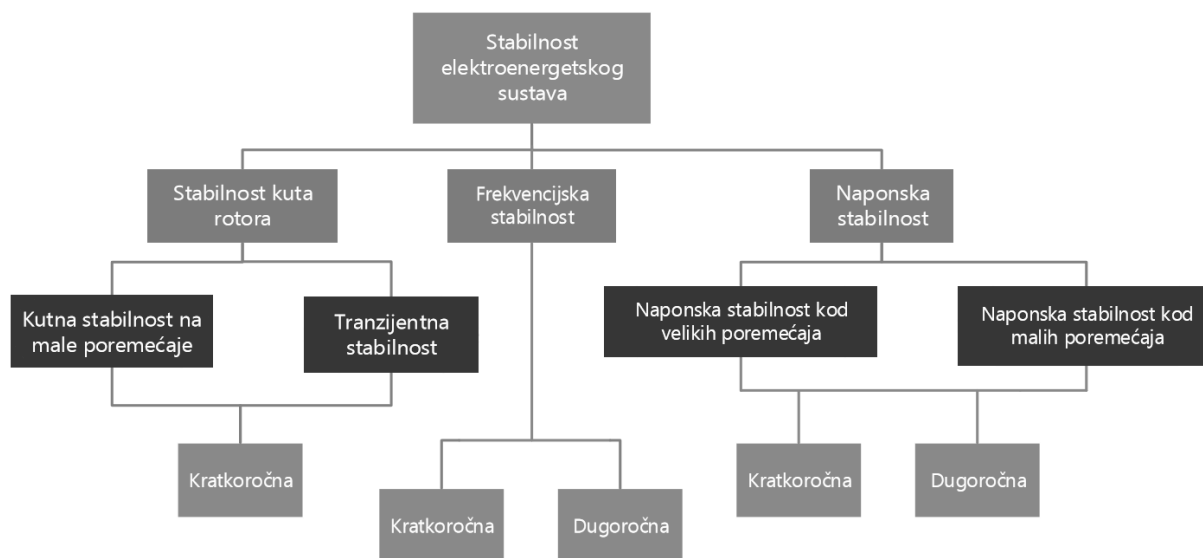


Slika 2.3. Strujni krug s kondenzatorom [2]

Ako se u strujnom krugu sa izmjeničnim izvorom nalazi zavojnica ili kondenzator, pojavljuje se reaktivna snaga. Reaktivna ili jalova snaga je snaga koja se vraća natrag izvoru i ne obavlja nikakav koristan rad. Problem nastaje u činjenici da reaktivna snaga opterećuje vodove, te ju je potrebno smanjivati kako bi se održavala stabilnost elektroenergetskog sustava. Smanjivanje reaktivne snage se postiže međusobnim poništavanjem induktivne reaktivne snage i kapacitivne reaktivne snage.

## 2.1. Vrste stabilnosti elektroenergetskog sustava

Stabilnost elektroenergetskog sustava je sposobnost sustava da ostane u funkcionalnom stanju nakon izloženosti poremećaju. Sustav može biti izložen nestabilnostima različitih oblika, te stoga postoji podjela vrsta stabilnosti elektroenergetskog sustava. Na slici niže se može vidjeti ta podjela.



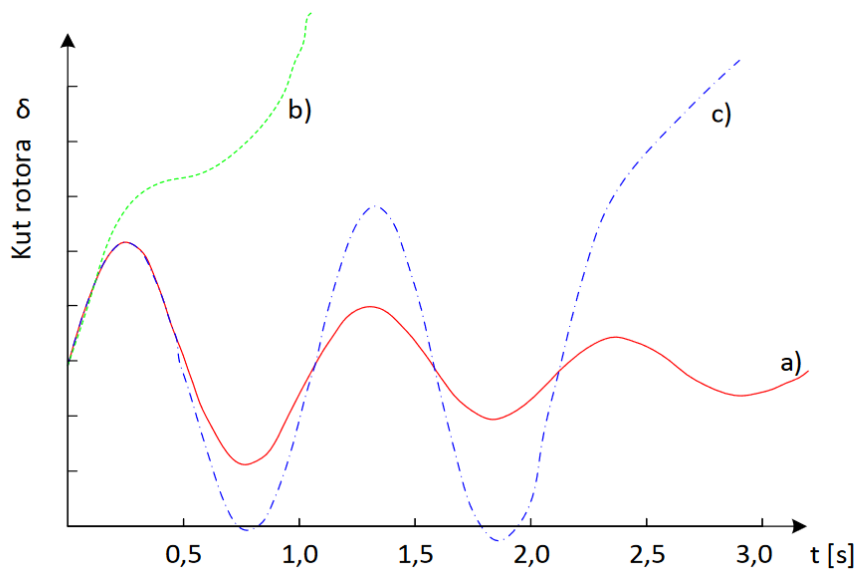
Slika 2.4. Podjela vrsta stabilnosti elektroenergetskog sustava [3]

## 2.2. Stabilnost kuta rotora

Stabilnost kuta rotora predstavlja sposobnost sinkronih generatora u povezanom elektroenergetskom sustavu da budu u sinkronizmu nakon pojave poremećaja. Kako bi se lakše analizirali problemi stabilnosti kuta rotora uvedena je podjela na stabilnost pri malim poremećajima i stabilnost pri velikim poremećajima koja je također poznata kao tranzijentna stabilnost. Tokom analize stabilnosti pri malim poremećajima nelinearne diferencijalne jednačbe se mogu linearizirati u točki ravnoteže. Međutim, veliki poremećaji se moraju analizirati pomoću nelinearnih diferencijalnih jednačbi. Stabilnost kuta rotora pri malim poremećajim kao i stabilnost kuta rotora pri velikim poremećajima se smatraju kratkoročnom pojavom.[3,4]

Mali poremećaji u stabilnosti kuta rotora mogu biti neperiodična nestabilnost uzrokovana manjkom momenta rotora i povećana oscilatorna nestabilnost uzrokovana manjkom prigušnog momenta. Period vremena u kojem se proučava stabilnost kuta rotora pri malim poremećajim je 10 do 20 sekundi nakon pojave poremećaja u sustavu. [3, 4]

Stabilnost kuta rotora pri velikim poremećajima je sposobnost sustava da ostane u sinkronizmu nakon što pretrpi veliki poremećaj kao što može biti kratki spoj dalekovoda. Podjelu nestabilnosti kod velikih poremećaja također možemo podijeliti na dvije vrste: neperiodična nestabilnost i oscilatorna nestabilnost. Za analizu kod velikih poremećaja s neperiodičnom nestabilnošću se proučava vremenski period od 3 do 5 sekundi nakon pojave poremećaja. Kod velikih poremećaja s oscilatornom nestabilnošću se proučava vremenski period od 10 do 20 sekundi nakon pojave poremećaja. [3, 4]



Slika 2.5. Graf odziva kuta rotora generatora na prijelazni poremećaj [3]

### 2.3. Naponska stabilnost

Naponska stabilnost je sposobnost svih sabirnica da održavaju određeni napon nakon izloženosti poremećaju. Dijeli se na naponsku stabilnost pri velikim poremećajim i naponsku stabilnost pri malim poremećajima. Poremećaji mogu biti i dugoročni i kratkoročni.

Velikim poremećajim se smatraju kvarovi u sustavu, ispad generatora i ispad dalekovoda. Vremenski period proučavanja za analizu je između par sekundi i par desetaka minuta nakon pojave poremećaja. Malim poremećajim se smatraju događaji poput povećanja tereta. [4]

Kratkoročna naponska stabilnost se proučava u periodu od nekoliko sekundi i usko je vezana s dinamikom opterećenja asinkronog motora brzog odziva, opterećenjem elektronike i HVDC (eng. High Voltage Direct Current) pretvaračem. [4]

Dugoročna naponska stabilnost se proučava u periodu od nekoliko minuta i usko je vezana sa sporim dinamičkim uređajim, ograničenjem struje uzbude generatora i stalnim temperaturnim opterećenjem. [4]

## **2.4. Frekvencijska stabilnost**

Frekvencijska stabilnost je sposobnost sustava da zadrži određenu frekvenciju nakon izloženosti poremećaju. Dijeli se na kratkoročnu i dugoročnu pojavu.

Ako se u nekom danom trenutku poveća zahtjevana aktivna snaga u mreži, generatori će se vrtjeti manjom brzinom kako bi nadoknadili potrebnu snagu. Manja brzina znači manja frekvencija u mreži. U slučaju rasterećenja tereta se povećava brzina generatora, a time i frekvencija. Kako bi se održavala potrebna ravnoteža snaga i normirana frekvencija od 50 Hz potrebno je adekvatno regulirati sustav. [5]

Podjela metoda regulacije koje se primjenjuju za stabilnost frekvencije je:

- primarna regulacija,
- sekundarna regulacija i
- tercijarna regulacija.

Primarna regulacija podrazumijeva reguliranje snage korištenjem ulaznih ventila na turbinama za što su zaduženi turbinski regulatori brzine vrtnje. Ova regulacija djeluje nekoliko sekundi nakon pojavljivanja poremećaja i uravnotežuje proizvodnju snage s traženom snagom potrošnje. Sekundarna regulacije djeluje nakon primarne regulacije i ispravlja nedostatke. Nakon što primarna regulacija uravnoteži snagu, dolazi do smanjenja frekvencije. Sekundarna regulacija je zadužena za povrat frekvencije na nominalnu vrijednost i djeluje 30 sekundi nakon pojavljivanja poremećaja. Tercijarna regulacija podrazumijeva aktivaciju rezervi snaga u sustavu kako bi se rasteretila sekundarna regulacija i kako bi se vršilo ekonomično vođenje svih elektrana unutar sustava. [5]

U slučaju da frekvencija mreže padne na iznos od 49,20 Hz mreža se smatra da je u stanju poremećenog pogona, a padom na iznos frekvencije od 49 Hz dolazi do podfrekvencijskog rasterećivanja mreže od potrošača. U slučaju nastavka pada frekvencije se dodatno isključuju određeni postotci potrošača pri defeniranim iznosima frekvencije mreže. [5]

## 2.5. Mrežna pravila prijenosnog sustava za napon i jalovu snagu

Prema Mrežnim pravilima prijenosnog sustava se definiraju iduća pogonska stanja elektroenergetskog sustava:

- normalni pogon,
- ugroženi normalni pogon,
- poremećeni pogon,
- raspad elektroenergetskog sustava i
- ponovna uspostava napajanja.

Pogonsko stanje u kojem nije ispunjen kriterij (n-1) se smatra ugroženim normalnim pogonom i operator prijenosnog sustava je zadužen da ga vrati u normalno pogonsko stanje korekcijskim djelovanjem sukladno načelu minimalnih troškova. Kriterij (n-1) je pravilo koje navodi da nakon što se dogodi ispad u mreži preostali elementi koji nastavljaju raditi u regulacijskom području operatora prijenosnog sustava moraju biti sposobni za prilagodbu novoj pogonskoj situaciji, a da se ne prekorače granične vrijednosti. U prijenosnoj mreži je kriterij (n-1) ispunjen ako nakon jednokratnog ispada jedinice prijenosne mreže se: ne narušavaju trajno granične vrijednosti pogonskih veličina, nema prekida ili promjene dugoročno ugovorenih prijenosa, ne prekida se napajanje korisnika prijenosne mreže i nema daljnjeg isključivanja jedinica sustava osim ako su izravno zahvaćene poremećajem. Korekcijskim djelovanjem se smatra promjena uklopnog stanja prijenosne mreže, redispečing elektrana u vlastitom regulacijskom području ili interkonekcija i/ili ograničavanje potrošnje krajnjih kupaca, ograničavanje dodjele i korištenja prekograničnog prijenosnog kapaciteta na sučeljima sa susjednim elektroenergetskim sustavima. [5]

Poremećnim pogonom se smatra svako odstupanje elektroenergetskog sustava od normalnog pogona, a operator prijenosnog sustava je zadužen da poduzme sve neophodne mjere kako bi se spriječilo širenje neželjenih posljedica poremećenog pogonskog stanja. [5]

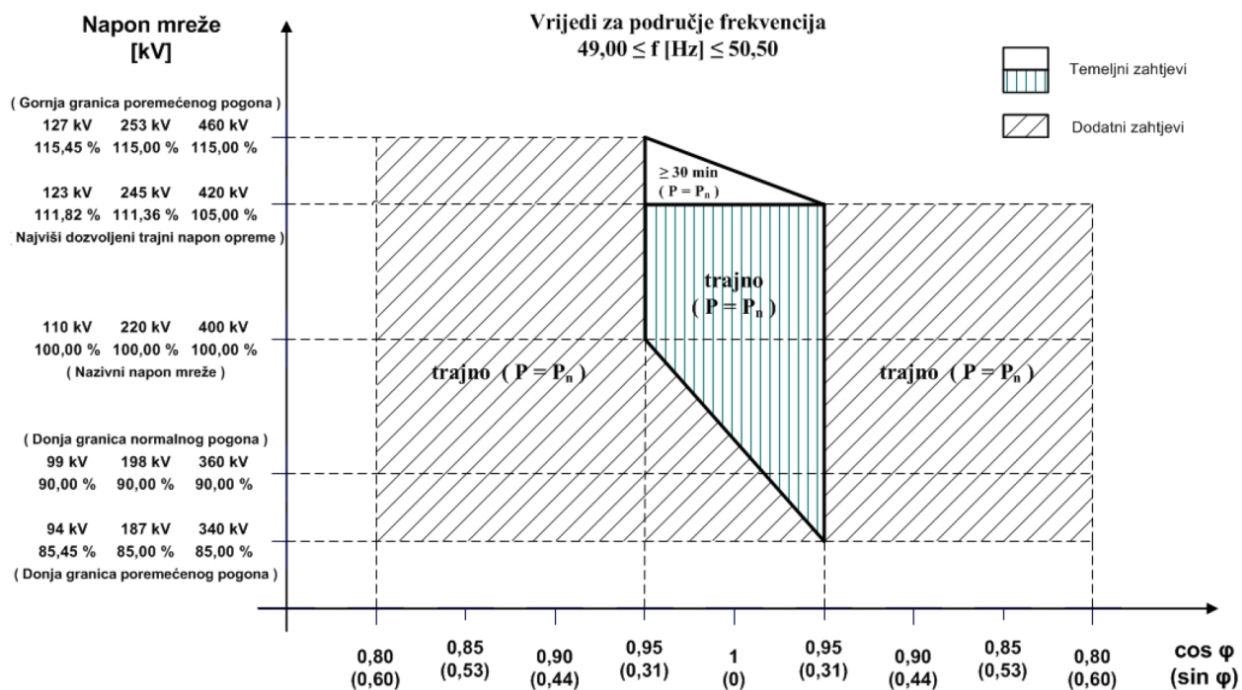
Raspadom elektroenergetskog sustava se smatra nestanak napona u cijelom ili većem dijelu elektroenergetskog sustava, a posljedica su gubitci tereta i/ili ispadi proizvodnih jedinica s mreže. U slučaju raspada operator prijenosnog sustava je dužan jasno identificirati stanje u kojem se sustav nalazi, te primjenjuje potrebne postupke u planu ponovne uspostave napajanja. [5]

Pri ponovnoj uspostavi napajanja operator prijenosnog sustava mora imati osigurane mjere za izvođenje takve operacije, te mu može biti pružena pomoć od strane operatora susjednih prijenosnih sustava. [5]

Pri normalnom pogonu je od iznimne važnosti da su sve fizikalne veličine u sustavu održavane u dozvoljenim granicama. Operator prijenosnog sustava je odgovoran za održavanje napona kako bi se osigurala kvalitetna i sigurna opskrba električnom energijom. Također je odgovoran za balansirano upravljanje reaktivnom snagom kako bi se održao napon svih čvorišta prijenosne mreže u dopuštenim granicama. Napon u mreži od 400 kV se održava između 360 kV i 420 kV. U mreži od 220 kV se održava između 198 kV i 242 kV. U mreži od 110 kV se održava između 99 kV i 123 kV. Na priključku mreže od 35(30) kV se održava između 29,8(25,5) kV i 40,2(34,5) kV. [5]

U normalnom pogonu je neophodno i da postoje dovoljne rezerve jalove snage, a faktor snage  $\cos\varphi$  mora biti veći ili jednak 0,95 bez obzira je li induktivno ili kapacitivno. Stoga operator mora imati kompenzacijske uređaje u mreži na raspolaganju kao i dovoljne kapacitete za proizvodnju jalove snage u priključenim elektranama za područje  $\cos\varphi < 0,95$ . Očekuje se od svake elektrane da upravlja pogonom s faktorom snage koji uvjetuje operator prijenosnog sustava. Kod novih ili revitaliziranih jedinica za proizvodnju se zahtjeva da faktor snage bude minimalno unutar granica od 0,85 induktivno do 0,9 kapacitivno, a generatori moraju biti u stanju da pri nazivnoj djelatnoj snazi prođu kroz cijelo projektirano područje faktora snage u periodu od nekoliko minuta. Hidro proizvodne jedinice snagom veće od 10 MW i termo proizvodne jedinice snagom veće od 30 MW su obavezne ispuniti zahtjev za proizvodnju jalove snage sukladno slici niže. Sve elektrane spojene na prijenosnu mrežu moraju imati aktualnu pogonsku kartu kod operatora prijenosne mreže za svaku proizvodnu jedinicu. Također, proizvođač je dužan ugraditi regulator jalove snage elektrane ili neki drugi uređaj koji omogućava korištenje proizvodne jedinice u regulaciji napon/jalova snaga elektroenergetskog sustava ukoliko to zahtjeva operator prijenosnog sustava. [5]

Korisnici koji pružaju pomoćne usluge za predaju jalove snage s  $\cos\varphi < 0,95$  (induktivno ili kapacitivno) dogovaraju uvjete pomoću međusobnog ugovora s operatorom prijenosnog sustava. Takvi korisnici moraju izvještavati operatora prijenosnog sustava o raspoloživosti i stanju svih uređaja s kojima predaju jalovu snagu. [5]



Slika 2.6. Zahtjevi za isporuku jalove snage u prijenosnu mrežu proizvodne jedinice [5]

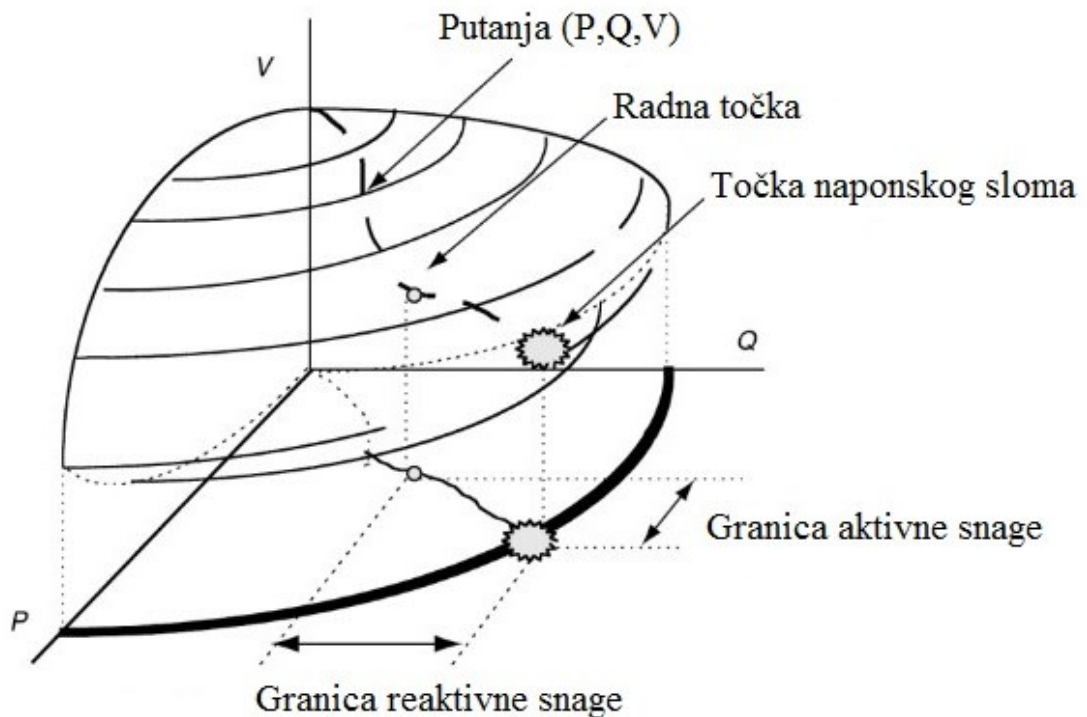


### 3. NAPONSKI SLOM

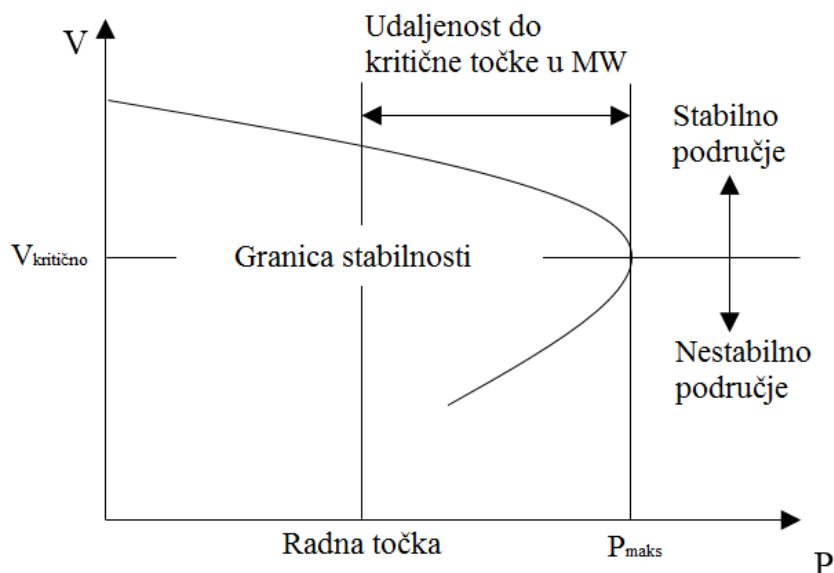
Naponska stabilnost je sposobnost sustava da održava određenu vrijednost napona u sustavu nakon što je sustav izložen poremećajima, a manjak naponske stabilnosti može dovesti do naponskog sloma. Naponski slom je proces u kojem iznosi napona padaju na vrlo nisku razinu i dolazi do gubitka napajanja u značajnom dijelu elektroenergetske mreže. Najčešće se događa u mrežama koje su preopterećene, imaju kvarove ili im nedostaje jalove snage. Naponski slom se dogodi naglo nakon perioda između par sekundi i par sati tipičnih događaja prije naponskog sloma. Problem može biti dodatno popraćen okidanjima zaštita koje time još brže dovode do naponskog sloma. Oporavak sustava od takvog događaja je dugotrajan i ostavlja veliki dio korisnika bez opskrbe. [6]

Na idućoj slici je trodimenzionani prikaz putanja točke iznosa napona tereta prema točki naponskog sloma. Može se primjetiti da iznosi promjene radne i jalove snage prije naponskog sloma ovise o početnom položaju radne točke. Navedeno se može lakše uočiti na slikama nakon.

Pokušaji predviđanja naponskog sloma se svode na mjerenja stanja određenog sistema pod opterećenjem i izmjenjivanjem pojedinih parametara kako bi se utvrdila stabilnost sustava. [6]

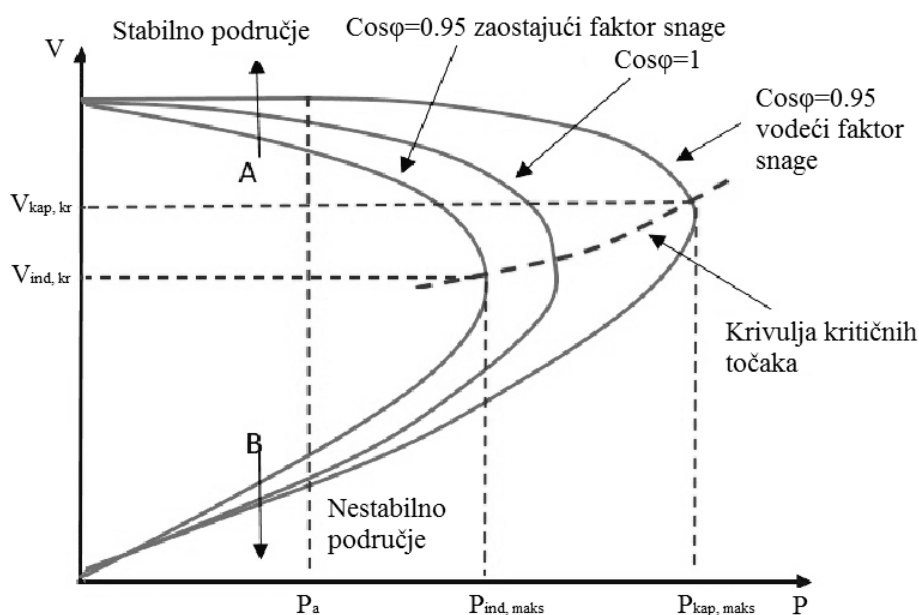


Slika 3.1. Međudnos napona, aktivne i jalove snage opterećenja i naponskog sloma [6]



Slika 3.2. Primjer PV krivulje [7]

PV krivulja prikazuje međuodnos aktivne snage isporučene potrošačima i napona na sabirnicama pri konstantnom iznosu faktora snage. Graf se dijeli na stabilno i nestabilno područje, a rub krivulje koji se nalazi na desnoj strani grafa je pozicija kritične točke. Kako se sustav opterećuje i potražnja snage raste tako napon sukladno PV krivulji se pomiče s lijevoga, gornjeg dijela prema desnom kraju grafa tj. napon opada. Kritična točka je pozicija maksimalne snage koja se može dostaviti potrošačima. Ako sustav dođe do pozicije kritične točke i potražnja nastavi rasti sustav prelazi u nestabilno područje iz kojeg nema povratka. U nestabilnom području napon drastično pada kao i snaga. Na idućoj slici se može vidjeti utjecaj faktora snage na položaj PV krivulje.



Slika 3.3. Utjecaj reaktivne snage na PV krivulju [8]

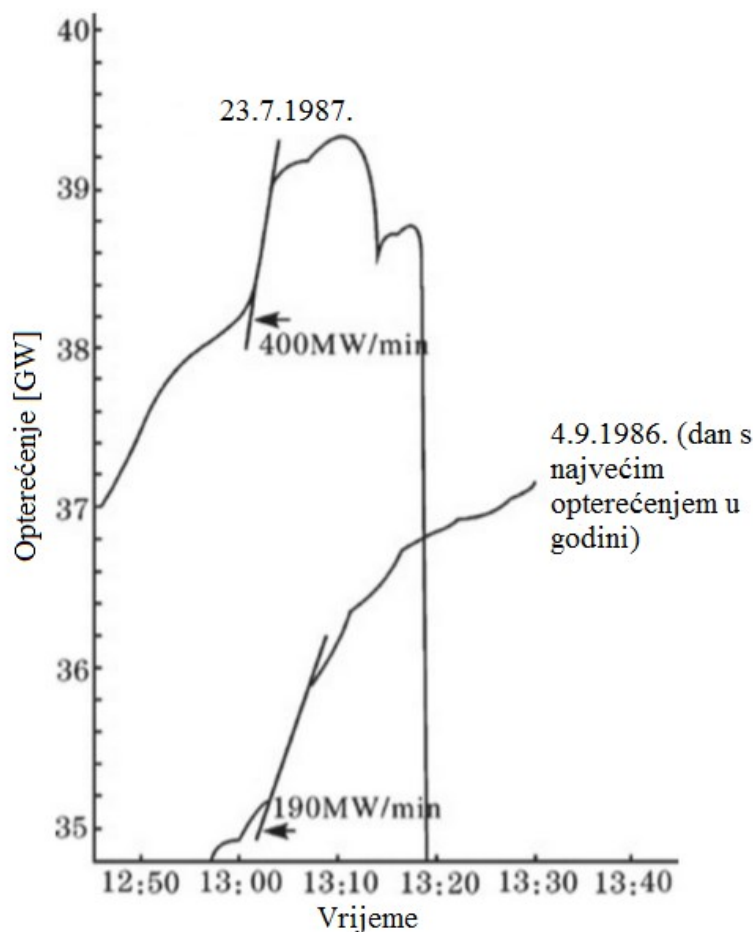
U svijetu se od 1970-ih godina dogodilo mnogo uzastopnih nesreća nestanka struje povezanih s naponskim slomom. Primjere možemo vidjeti navedene u tablici 3.1. Zajedničke karakteristike navedenih slučajeva su iznenadnost i neočekivanost. To predstavlja značajan problem operaterima sustava u poduzimanju protumjera jer je teško predvidjeti rane stadije naponskog sloma. Povratak u normalno stanje nakon naponskog sloma je iznimno teško, te proces traje satima. Posljedice su veliki ekonomski i društveni udarac. [4]

Tablica 3.1. Popis značajnih naponskih slomova [4]

Br.	Država	Vrijeme događaja	Nesreća	Iznos snage nestanka struje/MW	Vrijeme nestanka struje
1	SAD	1977-07-13	Potpuni nestanak struje u New York Cityu	5868	25 h 59 min
2	Francuska	1978-12-19	Potpuni nestanak struje u Francuskoj	29 000	8 h 30 min
3	Belgija	1982-08-04	Potpuni nestanak struje u Belgiji	2400	1 h 28 min
4	Kanada	1982-12-14	Potpuni nestanak struje u Quebecu	15 473	5 h 30 min
5	Švedska	1983-12-27	Potpuni nestanak struje u Švedskoj	11 400	5 h 20 min
6	Francuska	1987-01-12	Potpuni nestanak struje u Francuskoj	1500	6-7 min
7	Japan	1987-07-23	Potpuni nestanak struje u Tokiju	8168	3 h 21 min
8	Kanada	1989-03-13	Potpuni nestanak struje u Quebecu	9450	2 h 45 min
9	SAD	1996-07-02	WSCC poremećaj u SAD-u	1.5 do 2 milijuna korisnika	1.5-3 h

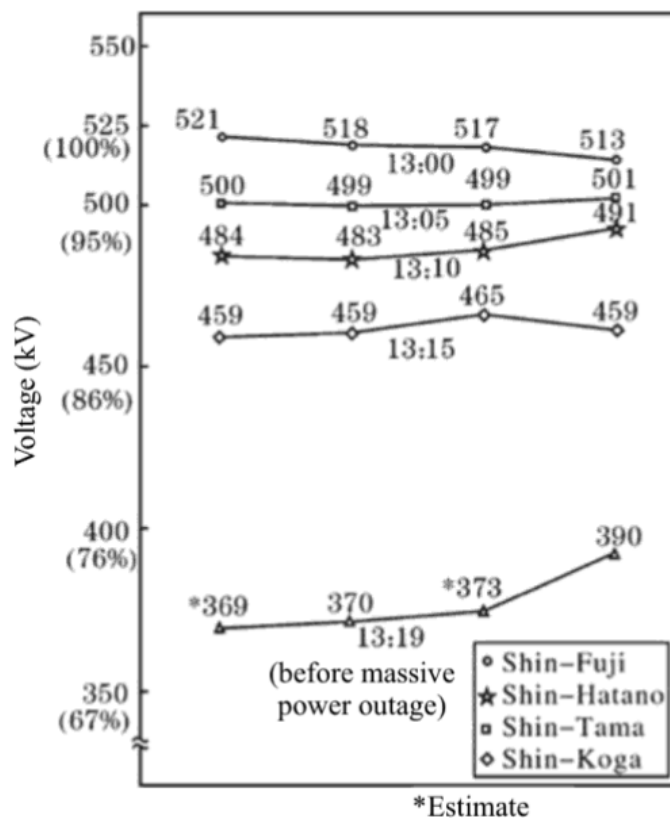
Kod mnogih nesreća nestanka struje se u istom vremenskom okviru dogodi naponska nestabilnost i nestabilnost kuta rotora. Osnova analiziranja mehanizama naponskog sloma su definiranje poveznica između naponske nestabilnosti i nestabilnosti kuta rotora. Neke od karakteristika naponskog sloma se mogu definirati pregledom zajedničkih poveznica naponskih slomova koji su se već dogodili. Prije nego što se dogodi naponski slom sustav je često pod velikim opterećenjem, rezerve za aktivnu, a pogotovo reaktivnu snagu su male, te su snage protoka vodova blizu maksimalnog dopuštenog iznosa. Uzroci naponskog sloma su razni i mogu biti: postepeno povećavanje opterećenja, ispad generatora, iznenadni veliki poremećaji, jako opterećeni vodovi i greške operatera kod nestandardnih radnih uvjeta. Česti uzrok znaju biti poteškoće prijenosa reaktivne snage teško opterećenim vodovima u područja s kvarom ili kontinuirano rastućom potrebom za reaktivnom snagom zbog povećanja opterećenja. Još jedan od čestih uzroka je lakačano reagiranje zaštita. Primjećeno je da pri pojavi niskog napona se aktivira impedantna zaštita vodova, limitator uzbude generatora, te potom i regulacijska sklopka pod opterećenjem pokušava oporaviti napon na sekundarnoj strani i time dodatno smanjuje napon na primarnoj strani. Nerijetko je u takvim slučajevima sustav opterećen nepogodnim teretima poput asinkronih motora i DC pretvaračima. Naponski slom se može dodatno pogoršati prekomjernom upotrebom paralelnih kondenzatora za kompenzaciju. [4, 9]

Za primjer kako može izgledati slijed događaja, kada se dogodi naponski slom, je opisan slučaj iz 1987. godine u Tokiju. Dana 23.7.1987. godine u periodu između podne i jedan sat se potrošnja kontinuirano povećavala, te dosegla rast od 400 MW/min. Ukupna potražnja je iznosila oko 39 300 MW i dosegla granične vrijednosti. S obzirom da je potražnja rasla prebrzo izvor reaktivne snage nije bio u stanju kompenzirati na vrijeme. Izvor reaktivne snage je bio kontroliran pomoću regulatora kvalitete napona (eng. VQC) i automatskog regulatora napona (eng. AVC). Posljedica je bila pad napona na dvije sabirnice od 500 kV. Prije samog naponskog sloma napon je dosegnuo razinu od 370 kV. Dodatno nakon reagiranja zaštita sabirnica izbačena su iz rada 4 dalekovoda od 275 kV i 4 275 kV/66 kV transformatora. Kako bi se spriječilo širenje nesreće TEPCO (eng. Tokyo electric power company) je isključio potrošnju u iznosu od 8168 MW sa sabirnicama. To je bilo 21% ukupnog opterećenja mreže. Nesreća je utjecala na 2.8 milijuna korisnika, a sustav se oporavio tek nakon 3 sata i 21 minute. Na grafu ispod može se vidjeti rekordna brzina rasta potražnje električne energije. Najveći iznos porasta opterećenja u godini prije naponskog sloma je bio 190 MW po minuti, a na dan naponskog sloma je taj iznos bio 400 MW po minuti. [4]



Slika 3.4. Krivulja promjene opterećenja na dan naponskog sloma [4]

Iz navedenog događaja je TEPCO definirao nekoliko zaključaka. Rast potrošnje je bio previše brz i premašio je očekivane vrijednosti. Rukovoditelji rada mreže nisu bili u mogućnosti da shvate stanje koje se odvija zbog manjka opreme za nadzor sabirnice od 500 kV. Prije događaja nesreće nisu poduzete pravilne protumjere za slučajeve naponske nestabilnosti. Nedostatak u upravljanju automatskog regulatora napona i reaktivne snage kojim su se upravljali paralelna prigušnica i paralelni kondenzatori je doveo do širenja nesreće. S obzirom da Tokio ima neravnomjerno raspodijeljene elektrane protok snage je previše opterećivao mrežu u smjeru s istočnog centra za napajanje na zapadni centar opterećenja. Dodatni problem su predstavljale dvije elektrane koje nisu bile u pogonu na dan nesreće. Situacija koja se dogodila je potaknula elektroprivredu da unaprijedi svoje metode upravljanja i poboljša svoju infrastrukturu. Jedan od elemenata koji je temelj za obavljanje raznovrsnih funkcija je procjena stanja naponske stabilnosti. Kao protumjeru od budućih mogućih problema TEPCO je povećao nadzor naponske stabilnosti i poboljšao dinamičku naponsku podršku. [4]

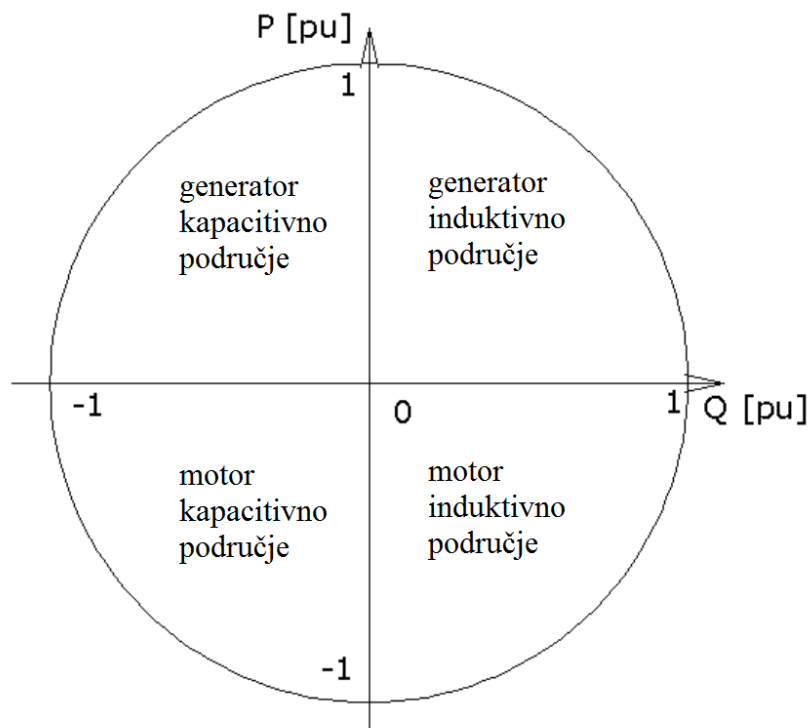


Slika 3.5. Krivulja promjene napona na 4 glavne trafostanice od 500 kV [4]

Na grafu iznad može se vidjeti promjena napona na trafostanicama sa iznosa oko 500 kV na iznose manje od 400 kV. Napon se smanjio na manje od 80% nazivne vrijednosti.

## 4. POGONSKA KARTA GENERATORA

Jedan od mogućih načina za prikazivanje fizikalnih veličina u sinkronom stroju je pomoću pogonske karte. One imaju veoma bitnu ulogu u analizi sustava i održavanju stabilnosti elektroenergetskih mreža. Koriste se za analizu stabilnog područja rada, definiranje radnih ograničenja, regulaciju naponskih prilika i planiranje proširenja sustava. Pogonska karta je graf koji pokazuje granice opterećenja generatora. Na ordinati se nalazi radna snaga  $P$ , na apscisi jalova snaga  $Q$ , te vrijedi podjela radnih područja prikazanih na slici niže. [10]



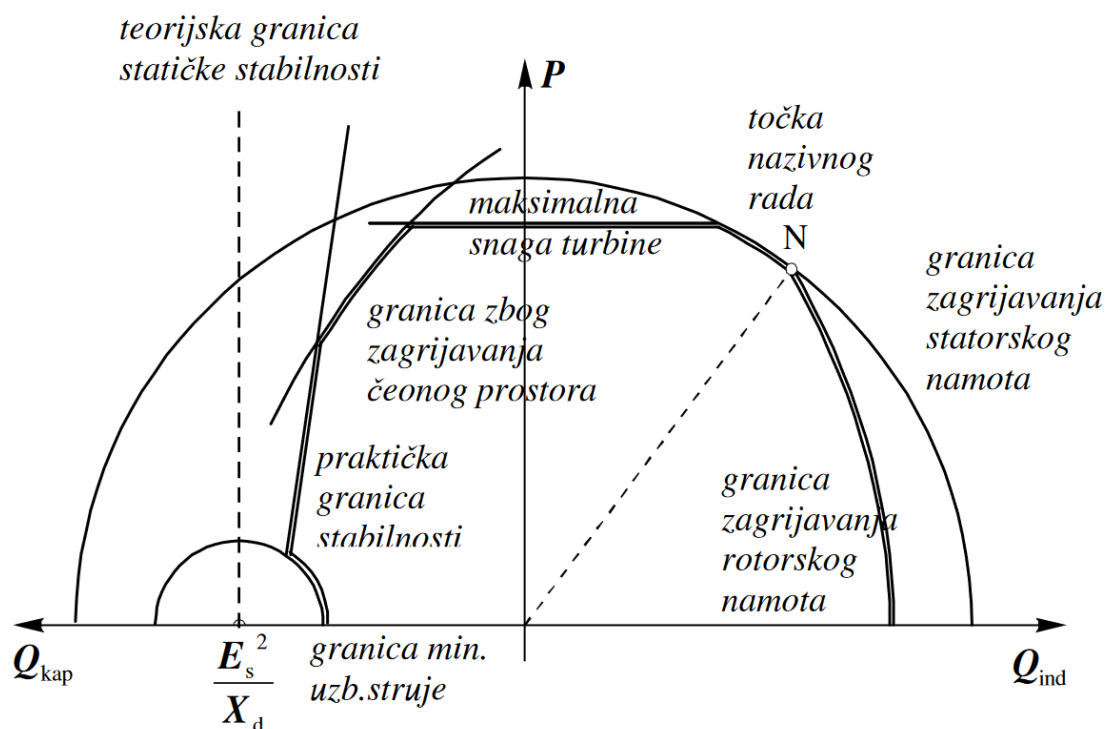
Slika 4.1. Podjela radnih područja [10]

Krivulja pogonske karte prikazuje granice aktivne i jalove snage koje je generator u stanju isporučiti bez prekoračenja specificiranih ograničenja.

Područje rada definiraju sljedeće granice:

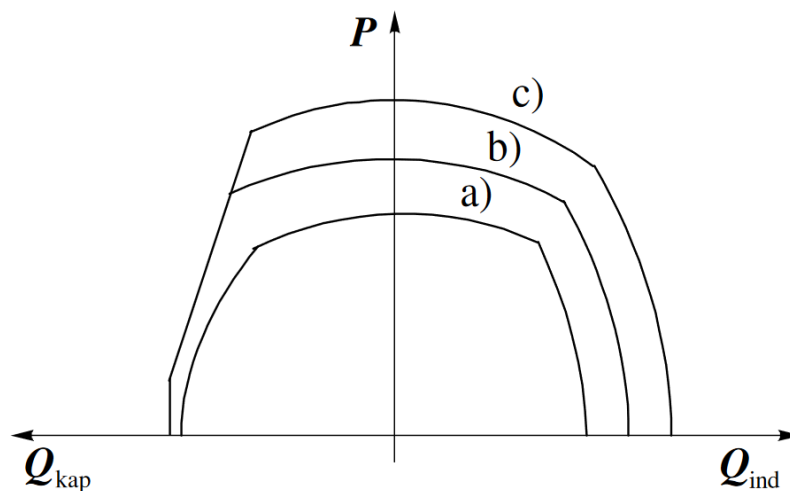
- zagrijavanje statorskog namota,
- zagrijavanje rotorskog namota,
- granica stabilnosti,
- minimum uzbudne struje,
- zagrijavanje čeonog prostora i
- maksimalna snaga turbine. [11]

Primjer pogonske karte sinkronog generatora se može vidjeti na idućoj slici.



Slika 4.2. Primjer pogonske karte generatora [11]

Može se primjetiti kako je veliki broj ograničenja povezan s zagrijavanjem. Time se dolazi do zaključka da poboljšanjem hlađenja dobivamo veće područje rada. Navedeno se može značajno primjetiti kod velikih turbogeneratorsa hlađenih vodikom pod pritiskom. S većim pritiskom je hlađenje efektivnije. Na idućoj slici je dana pogonska karta turbogeneratorsa s različitim razinama pritiska.



Slika 4.3. Pogonska karta turbogeneratorsa s različitim iznosima pritiska vodika: a)  $10^5$  Pa; b)  $2 \times 10^5$  Pa; c)  $4 \times 10^5$  Pa. [11]

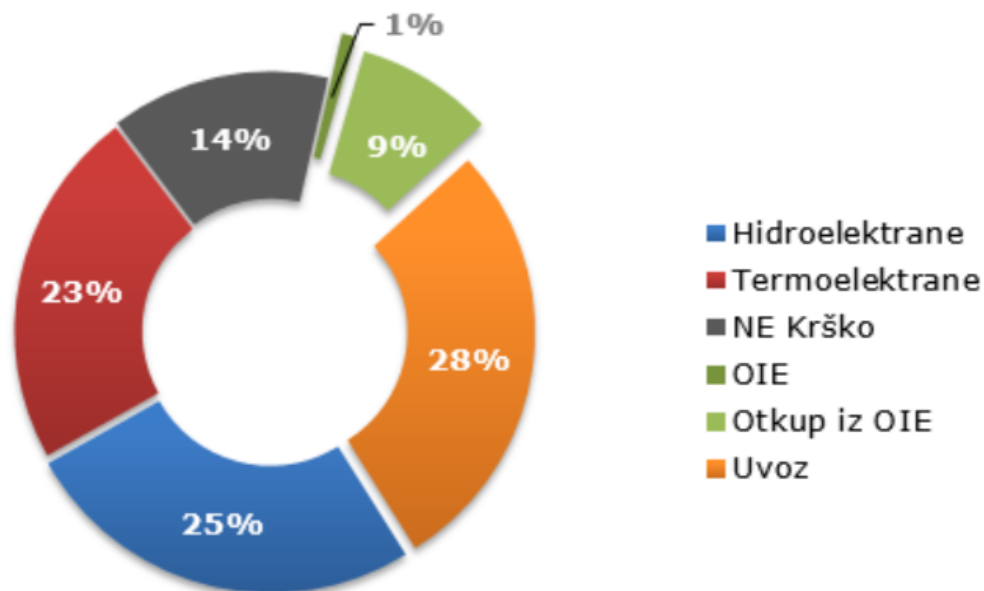


Na pogonskoj karti generatora sa slike 4.2. se nalazi horizontalna crta koja predstavlja maksimalnu snagu turbine. Ta snaga je ograničenje pogonskog stroja, a ne generatora.

Sinkroni strojevi s obzirom na pogonski stroj se dijele na:

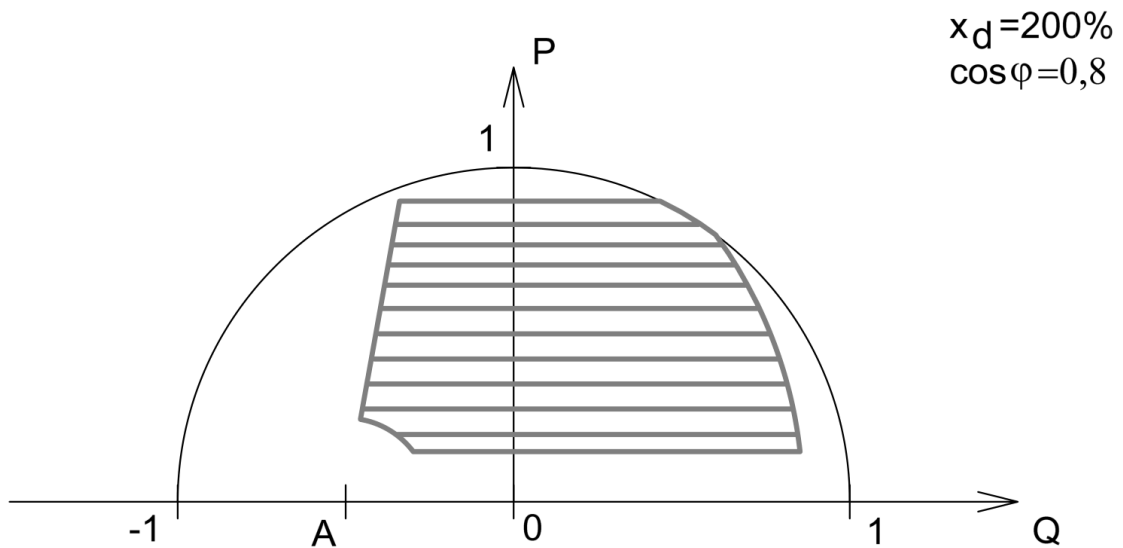
- turbogeneratore,
- hidrogeneratore
- dizelske generatore,
- kompenzatore i
- motore.

Sukladno slici 4.4. može se vidjeti da većinski proizvođači električne energije u hrvatskoj elektroenergetskoj mreži su turbogeneratori i hidrogeneratori.

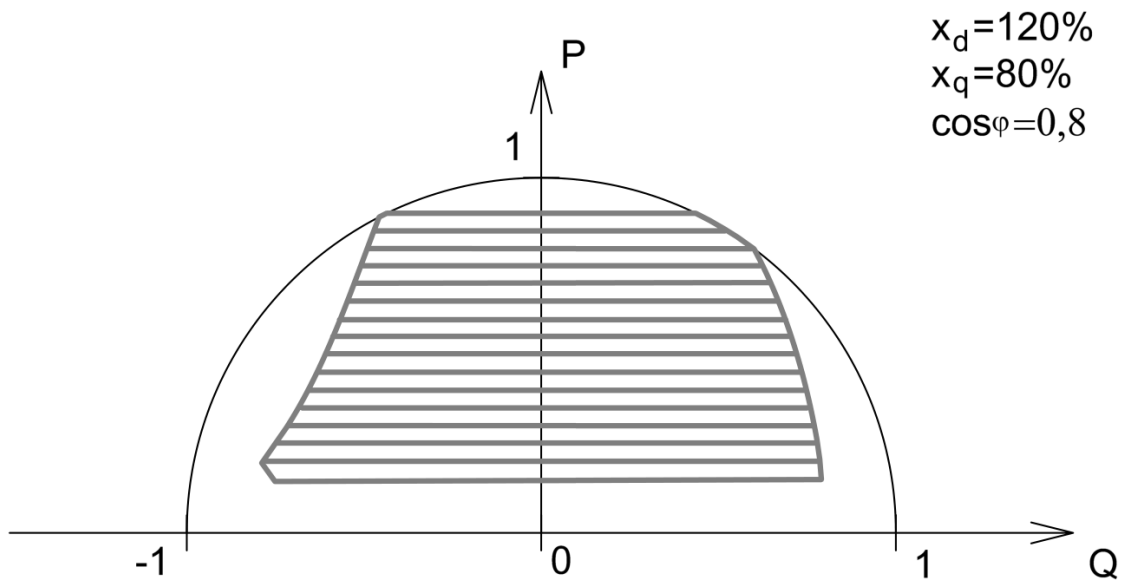


Slika 4.4. Postotak udjela pojedinih izvora električne energije u Hrvatskoj [12]

Razlika radnih područja hidrogeneratora i turbogeneratora proizlazi iz mehaničkih i pogonskih konfiguracija prilagođenih mediju koji ih pokreće. Turbogeneratori najčešće imaju veću tromost uzrokovanu velikom masom komponenti koje se rotiraju u sustavu. Hidrogeneratori uobičajeno imaju brži odziv od turbogeneratora, a karakteristike im ovise o protoku vode i dizajnu turbine. Na idućima slikama su primjeri pogonske karte turbogeneratora i hidrogeneratora.



Slika 4.5. Pogonska karta turbogeneratorskog motora [10]



Slika 4.6. Pogonska karta hidrogeneratorskog motora [10]

Može se primjetiti da pogonske karte daju bitan uvid u mogućnosti upravljanja aktivnom i reaktivnom snagom. Neophodno je da sustav ima brzu i iznosom adekvatnu sposobnost isporučivanja snage kako bi se održala njegova stabilnost. Značajan fokus se može staviti na iznose jalove snage koje su u stanju isporučiti generatori.

## 5. PRIGUŠNICE

Prigušnice u elektroenergetskom sustavu imaju nekoliko funkcija od kojih se najviše na važnosti ističu: upotreba zavojnica za dobivanje reaktivnog otpora kako bi se ograničili protoci struja i upotreba zavojnica za poništavanje kapacitivnog otpora. Pri korištenju za ograničavanje struja, zavojnice se stavljaju u seriju sa izvorom napajanja i stoga moraju imati nisku imepdanciju s obzirom na sustav. Pri korištenju za poništavanje kapacitivnog otpora se stavljaju u jednakom iznosu kao kapacitivni otpor kako bi se postigao potpuni efekt, a spajaju se u trokut ili zvijezda spoj između faza (i neutralne točke u slučaju zvijezda spoja). Time se stvara podjela na serijske zavojnice i paralelne zavojnice. Zavojnice mogu biti suhog tipa i izolirane uljem. [13, 14, 15]

### 5.1. Paralelne prigušnice

Kako bi paralelne prigušnice poništavale reaktanciju potrebno je imati određeni iznos reluktancije što se postiže smanjivanjem gustoće magnetskog toka. To se ostvaruje zračnim rasporom u jezgri ili čak potpunim uklanjanjem jezgre. Time nastaje podjela na: prigušnice izolirane uljem s zračnim rasporom u jezgri i prigušnice izolirane uljem, magnetski štícene i bez jezgre. [13]

Prva vrsta prigušnice je svojim dizajnom izvana jako slična transformatoru. Kod trofazne izvedbe se na jezgri nalaze po jedan namot umjesto dva kao kod transformatora, a jezgra ima raspore koji su popunjeni nemagnetizirajućim materijalima. Ti materijali moraju podnijeti mehanička i temperaturna opterećenja, a neki od tih materijala mogu biti prešana ploča ili smola ojačana staklom. Debljina takvih materijala u rasporima ne čini više od jedan ili dva posto ukupne duljine željezne jezgre. S obzirom da raspori izazivaju rasipanje silnica dolazi do pojave vrtložnih struja koje uzrokuju gubitke i vibracija koje uzrokuju buku. Kako bi se smanjilo rasipanje silnica potrebno je smanjiti debljine raspora, ali povećati njihov broj. Međutim, povećavanjem iznosa raspora u jezgri se narušava mehanička krutost jezgre. Pri dizajnu prigušnice je važno odabrati optimalan kompromis između navedenih mana. [13, 15]

Magnetski štícene prigušnice bez jezgre imaju magnetski štít posložen oko svojih namota. Magnetski štít predstavlja povratni put za magnetski tok. Da bi se izbjeglo zasićenje poprečni presjek štita mora biti što veći, ali što je magnetski štít veći to su potrebne veće količine materijala i samim time su veći troškovi izgradnje. Kao i kod prijašnje verzije potrebno je odabrati optimalan kompromis. [13]

### 5.1.1. Regulacijske paralelne prigušnice za visokonaponske mreže

Svrha regulacijskih prigušnica je kompenzacija jalove snage s opcijom prilagodbe zahtjevima mreže zbog naponske stabilnosti. Regulacija se postiže zasebnom regulacijskom prigušnicom koja je odvojena od glavne prigušnice i korištenjem regulacijske sklopke. Takve prigušnice se koriste na područjima s vremenski promjenjivim potrebama za jalovom snagom. Promjene mogu ovisiti o godišnjem dobu ili o dobu dana. Vjetroelektrane znaju izazivati značajne fluktuacije reaktivne snage pri čemu pomaže prilagodljivost regulacijskih prigušnica, dok prigušnice stalne vrijednosti nisu namijenjene za učestalo uklapanje i isklapanje koje je potrebno pri takvim fluktuacijama. Dodatna prednost korištenja regulacijskih prigušnica naspram prigušnica fiksne vrijednosti je što pri uključivanju i isključivanju se manje remeti kvaliteta napona. Također, regulacijske prigušnice se povremeno ugrađuju u područja koja se aktivno razvijaju i proširuju, te samim time imaju postepeno povećanu energetska potražnju kroz određeni vremenski period. [16, 17]

Jedan od problema koji se javljaju u elektroenergetskoj mreži kod kompenziranih kablova je problem nedostajuće nule. Nedostajuća nula je situacija kod koje izmjenična struja ne poprimi vrijednost nula tokom nekoliko ciklusa izmjenjivanja. Takav događaj može kompletno uništiti prekidač voda, ali problem se može spriječiti smanjivanjem kompenzacije dok je kabel pod naponom. To se postiže uporabom dvije kompenzacijske prigušnice umjesto jedne od kojih svaka vrši 50 posto kompenzacije ili uporabom regulacijske prigušnice. [16, 17]

## 5.2. Serijske prigušnice

Kao što je već spomenuto serijske prigušnice su namijenjene da ograničavaju struje, a to su uobičajeno struje kvara ili struje kratkog spoja. Svrha ograničavanja struja kratkog spoja je kako bi se osiguralo da isklopna oprema sustava bude unutar svojih radnih mogućnosti isklapanja. Serijske prigušnice se također mogu podijeliti na dvije vrste: prigušnice uronjene u ulje, elektromagnetski zaštićene i bez jezgre, te prigušnice ulivene u beton sa zračnom jezgrom. S obzirom da je svrha ovih prigušnica ograničavanje struja one često ne sadrže željeznu jezgru, a ako sadrže onda ima zračne raspore. Željezne jezgre imaju nelinearnu karakteristiku zasićenja i u slučajevima s velikim strujama, koje ovakve prigušnice trebaju spriječiti, može doći do smanjenja reaktancije. [13, 15]

Prigušnice ljevane u betonu su vrsta koja uopće ne sadrži elemente željeza, a sastoji se od betona bez armature koji drži cijelu strukturu. Ovakva vrsta prigušnice nije tako učestala, a zahtjeva

specifične metode proizvodnje. Jedan od glavnih problema je kontinuirana proizvodnja kvalitetnog betona koji neće sadržavati pukotine kako bi struktura bila prihvatljiva za serijsku prigušnicu. Drugi veći problem predstavlja ugrađivanje takve prigušnice u građevinu čija armatura neće biti pod utjecajem snažnog magnetskog polja. Magnetska polja također mogu utjecati i na razne uređaje koje radno osoblje posjeduje. [13]

Serijske prigušnice sa zračnim rasporedom imaju sličnosti paralelnim zavojnicama takve vrste, s time da je glavna razlika u ukupnoj duljini zračnih raspore. Serijske prigušnice imaju veće zračne raspore, a razlog tome je smanjivanje gustoće toka i reaktancije. Za razliku od paralelnih zavojnica mogu podnijeti značajno veće struje od normirane radne struje. [13]

Magnetski zaštićene prigušnice bez jezgre su također slične paralelnim prigušnicama iste vrste. Oko prigušnice se nalazi magnetski štit koji predstavlja povratni put za magnetski tok, te ga tako zadržava unutar definiranih granica i sprječava dodatne gubitke i zagrijavanja. Kao što je ranije spomenuto veći presjek magnetskog štita zahtjeva dodatne troškove, a manji presjek kod serijskih prigušnica dovodi do većeg zasićenja pri velikim strujama od kojih trebaju štititi i samim time do većeg umanjjenja impedancije. Okvirna vodilja pri nabavi takvih prigušnica je uvjet da impedancija pri kratkom spoju ne bude manja od određenog postotka impedancije pri normalnim radnim uvjetima. [13]

Najskuplja i najefektivnija varijanta u pogledu održavanja konstantne reaktancije je elektromagnetski zaštićena prigušnica. Šitovi se proizvode od aluminijske ili bakrene, a sam štit predstavlja put za vrtložne struje, te time zaustavlja njihovo stvaranje izvan štita. Vrtložne struje svojim proticanjem zagrijavaju štit. Unatoč svemu dolazi do pojavljivanja smanjenja reaktancije, ali to proizlazi samo iz induktivnosti prigušnice i međuinuktiviteta štita i prigušnice, te ne ovisi o struji kroz prigušnicu. Problem kod ove vrste prigušnica je financijski trošak koji predstavlja veličina štita koji treba biti određene veličine, ali istovremeno ne smije biti preblizu prigušnici zbog neželjenog efekta smanjivanja reaktancije. [13]

#### 5.2.1. Problem testiranja serijskih prigušnica

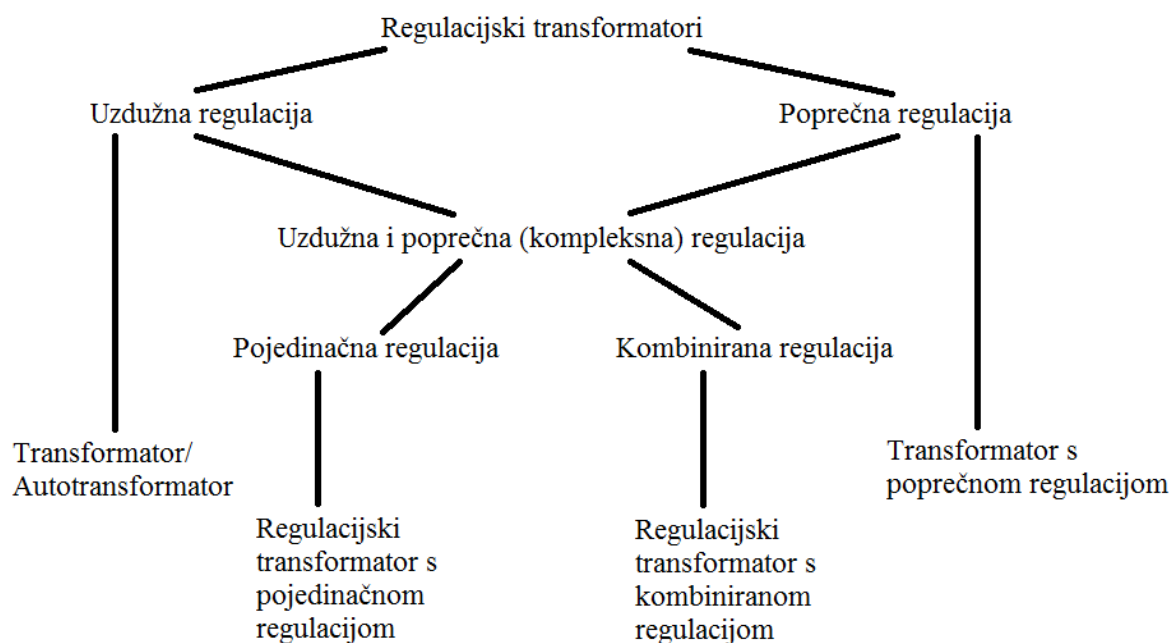
Prilikom testiranja serijskih prigušnica pojavljuju se dva problema. Prvi problem predstavlja testiranje pri kratkom spoju, a drugi problem predstavlja dokaz o prikladnosti međuzavojne izolacije. [13]

Testiranje pri kratkom spoju podrazumijeva demonstraciju da će prigušnica izdržati struje za koje je konstruirana. Kod magnetski šticećenih prigušnica i prigušnica sa zračnim rasporom je dodatni problem utvrđivanje smanjenja reaktancije koje nastaje zbog struja kvara. Mjerenje reaktancije pri kratkom spoju je teško izvedivo i rijetko se radi, ali, ovisno o iznosu propisane struje, se može testirati u testnim stanicama specijaliziranim za kratke spojeve. Uobičajeni pristup je mjerenje reaktancije pri protoku određenog postotka normirane struje. [13]

Metoda testiranja međuzavojne izolacije na transformatorima se vrši induciranjem dvostruko većeg napona. Takav test je suvišan za ispitivanje serijskih prigušnica iz razlog što je upravo njihova namjena da izdrže takav napon bez poteškoća. Test koji se vrši se zove impulsni test, a podrazumijeva primjenjivanje najčešće dva impulsa značajno višeg napona na prigušnicu. Paralelne prigušnice se također često testiraju impulsnim testom. Razlog tome je što su rijetki transformatori koji mogu inducirati potrebni prenapon i istovremeno opskrbiti dovoljno Mvar za testiranje paralelnih zavojnica. Uz navedene, na prigušnicama se odrađuju dodatni testovi koji su slični onima koji se vrše na transformatorima. [13]

## 6. REGULACIJSKI TRANSFORMATORI

Regulacijski transformatori su transformatori koji u određenom dijelu elektroenergetske mreže mijenjaju amplitudu napona ili fazni kut. U prijenosnim mrežama se koriste za upravljanje naponom i za mijenjanje faznog kuta sa svrhom određivanja smjera protoka snage. Ugradnjom i korištenjem regulacijskih transformatora se sprječava dugotrajno prekoračenje normiranih vrijednosti uzrokovano neočekivanim tokovima snage. Regulacijski transformatori se dijele na transformatore za upravljanje naponom, tj. uzdužnu regulaciju i transformatore za upravljanje faznim kutom, tj. poprečnu regulaciju. Na idućoj slici se može vidjeti detaljnija podjela transformatorske regulacije.



Slika 6.1. Vrste regulacije pomoću transformatora [1]

Neplanirani protoci snage u mreži se zovu protoci petlje. Za upravljanje toka snage u prijenosnim mrežama koristi se iduća jednadžba :

$$P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \sin(\delta_{ij}), \quad 6.1$$

gdje je:

$P_{ij}$  - aktivna snaga na kraju voda  $ij$ ,

$U_i, U_j$  - moduli faznih napona na početku „i“ i na kraju „j“ voda,

$\delta_{ij}$  - kut tereta,

$X_{ij}$  - reaktancija voda  $ij$ .

Iz jednadžbe navedene iznad se može vidjeti da mijenjanje protoka aktivne snage se može postići promjenom napona čvorišta, reaktancije voda i kuta tereta. S obzirom da čvorovi imaju svoje normirane vrijednosti napon se ne može značajno mijenjati. Međutim s povećanjem opterećenja postoji mogućnost smanjivanja napona ispod normirane vrijednosti. U takvim slučajevima se mogu koristiti transformatori s naponskom regulacijom koji su zaduženi za održavanje napona na određenoj razini. Sljedeća mogućnost mijenjanja toka snage je promjenom reaktancije voda, što se postiže spajanjem npr. kondenzatora u prijenosni vod. Takva kompenzacija se zove serijska kompenzacija, te će se detaljnije obraditi u idućim poglavljima. Iduća metoda, koja ima značajan utjecaj, je mijenjanje kuta tereta  $\delta_{ij}$ . [1]

Regulacijski transformator se može koristiti u dijelu elektroenergetske mreže gdje se pojavljuju paralelni vodovi s različitim opterećenjima. Različita opterećenja izazivaju neuravnoteženost koja postavlja određena ograničenja. Korištenjem regulacijskih transformatora se može rasporediti opterećenje s više opterećenog voda na manje opterećeni vod.

Navedeno se može vidjeti u idućem primjeru iz literature [13]. Slika niže prikazuje mrežu u kojoj protok struje s lokacije A prema lokaciji B se odvija pomoću dvije putanje. Pretpostavka je da u mreži nema drugih vanjskih utjecaja. Protok struje će se u toj mreži podijeliti obrnuto proporcionalno s obzirom na imedanciju vodova što se vidi u idućim jednadžbama:

$$i_1 = i * \frac{z_2}{z_1 + z_2}, \quad 6.2$$

gdje je:

$i_1$  - struja u vodu 1,

$i$  - ukupna struja u vodu 1 i vodu 2,

$z_1$  - impedancija između točaka A i B po vodu 1,

$z_2$  - impedancija između točaka A i B po vodu 2;

$$i_2 = i * \frac{z_1}{z_1 + z_2}, \quad 6.3$$

gdje je:

$i_2$  - struja u vodu 2.

Povremeno je moguće da prilike u elektroenergetskoj mreži bi pogodovale od drugačije raspodjele protoka struje. To može biti zbog lošeg odnosa dozvoljenog opterećenja voda i omjera impedancije jednog voda naspram drugog koji time izazivaju nepogodnosti u mreži.



Stoga dolazimo do idućih jednažbi:

$$i'_1 = i * \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} + i_x, \quad 6.4$$

gdje je:

$i'_1$  - prikladnija struja u vodu 1,

$i_x$  - dodatna struja u vodu 1;

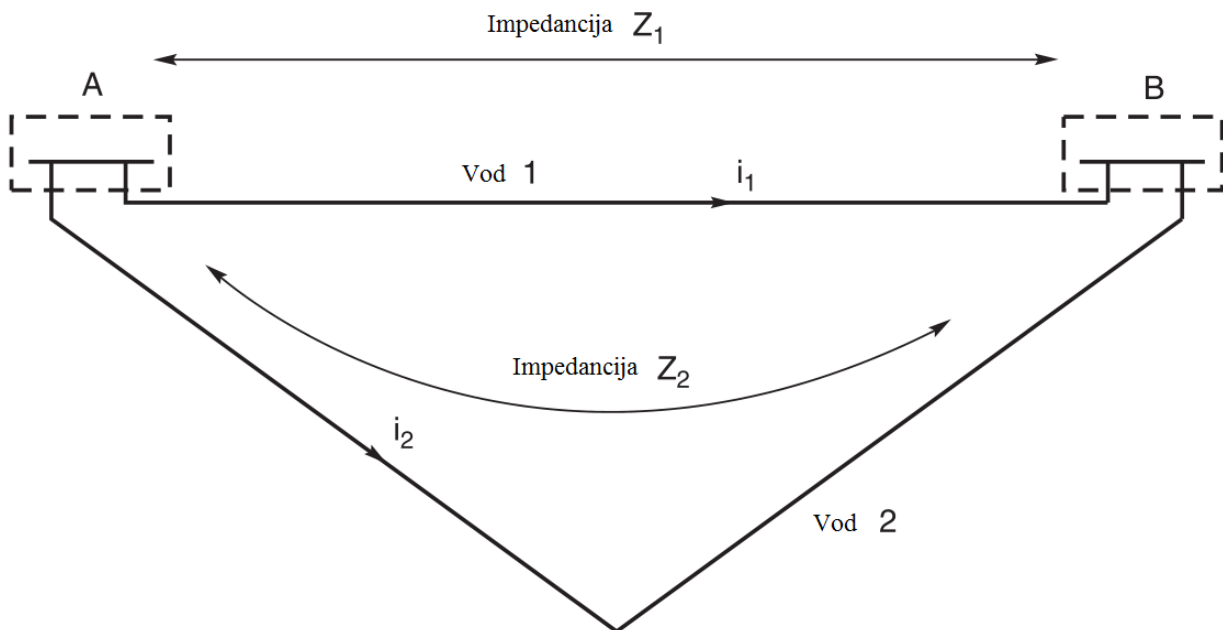
$$i'_2 = i * \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - i_x, \quad 6.5$$

gdje je:

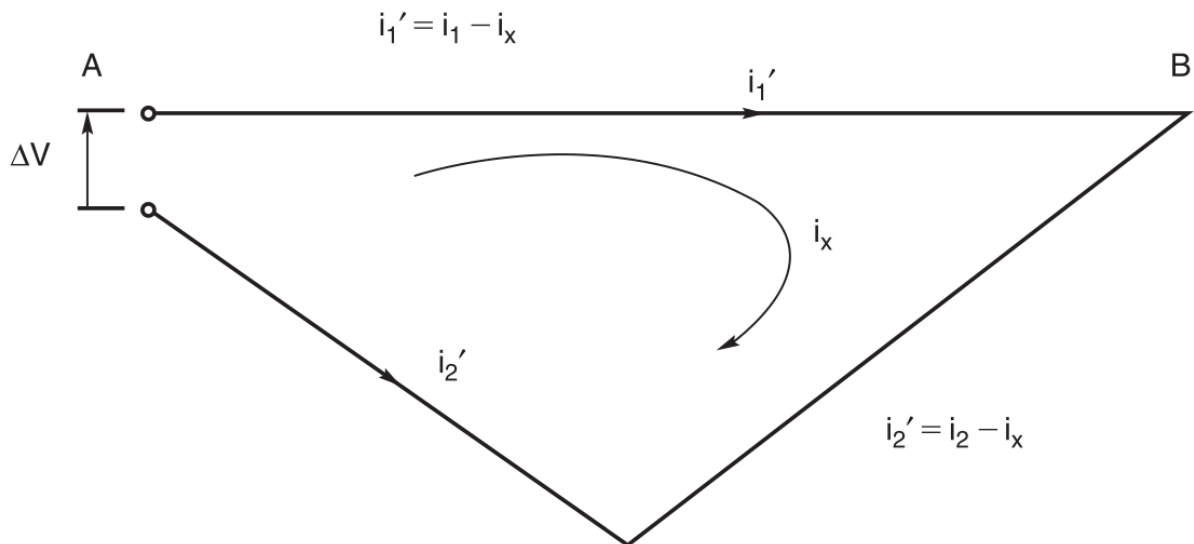
$i'_2$  - prikladnija struja u vodu 2.

U formuli navedenoj niže  $i_x$  se može smatrati nametnutom strujom koja mora imati napon  $\Delta V$  za uspostavljanje. Napon  $\Delta V$  treba imati fazni pomak od 90 stupnjeva naspram struje u vodu. Takav napon se postiže ugradnjom posebne vrste transformatora koji imaju poprečnu regulaciju.

$$i_x = \frac{\Delta V}{Z_1 + Z_2} \quad 6.6$$



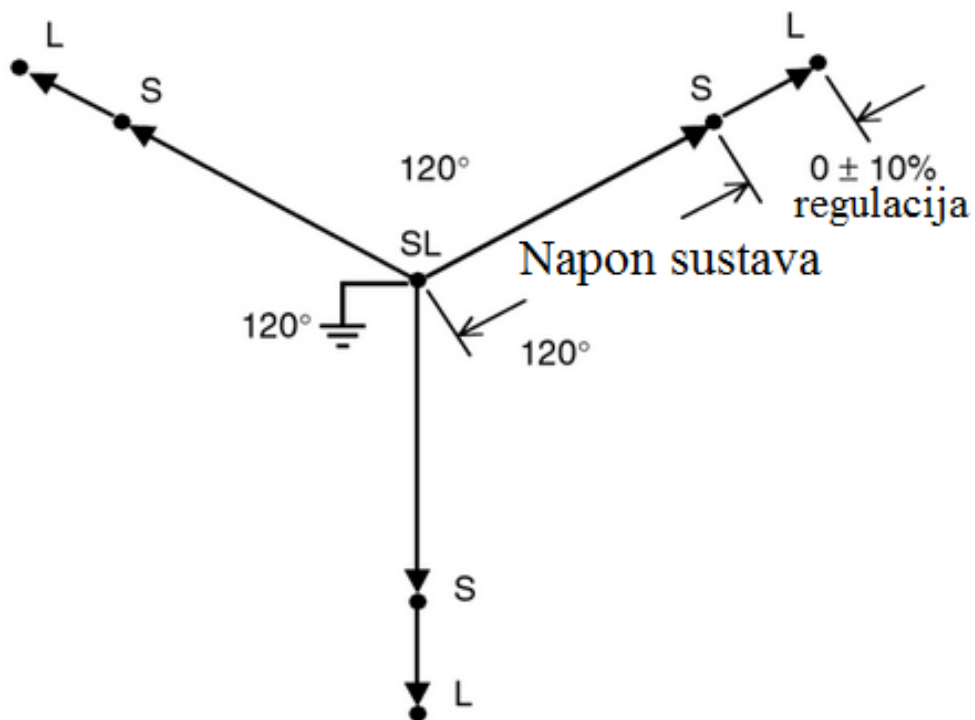
Slika 6.2. Protok struje u mreži određen impedancijama vodova [13]



Slika 6.3. Protok struje u mreži s naponom  $\Delta V$  u čvorištu A i nametnutom strujom  $I_x$  [13]

### 6.1. Transformatori s uzdužnom regulacijom

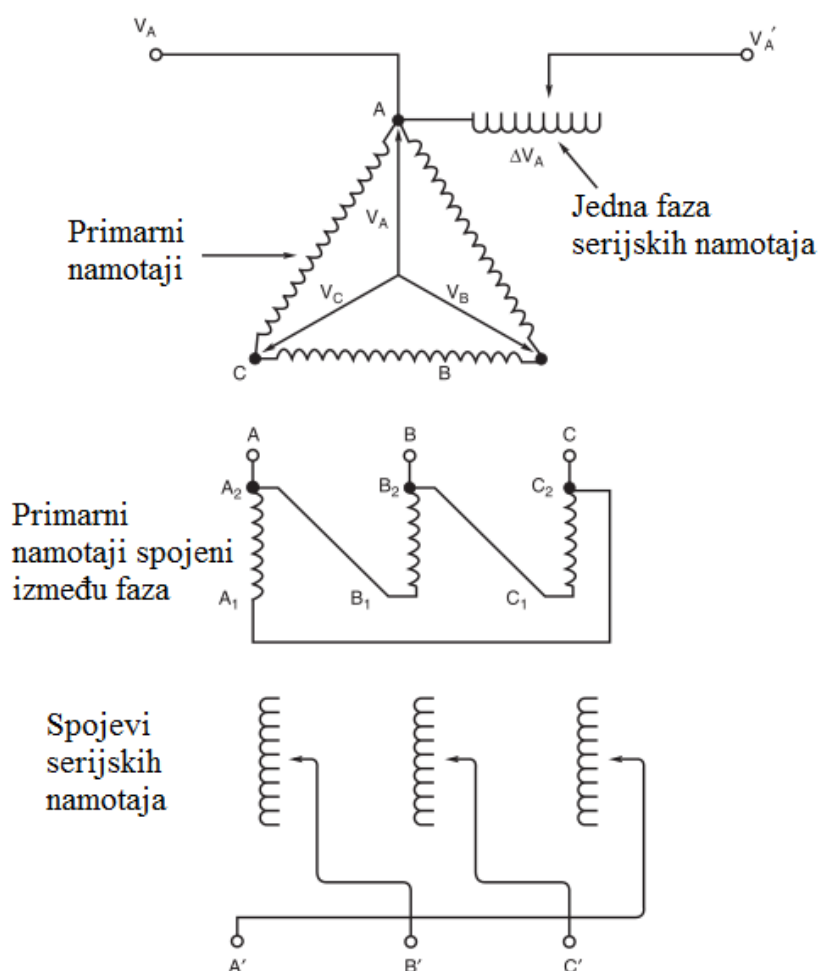
Transformatori s uzdužnom regulacijom su vrsta transformatora koji kontroliraju i održavaju iznos napona na istoj razini. Uobičajeno je da se regulira iznos napona na sekundaru. Napon se mijenja i održava automatski pod opterećenjem, a to se postiže s regulacijskom sklopkom koja mijenja broj namotaja transformatora, te tako održava napon.



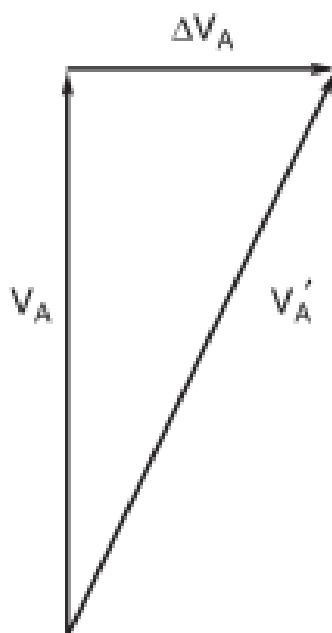
Slika 6.4. Primjer fazorskog dijagrama pri regulaciji napona trofaznog sustava [15]

## 6.2. Transformatori s poprečnom regulacijom

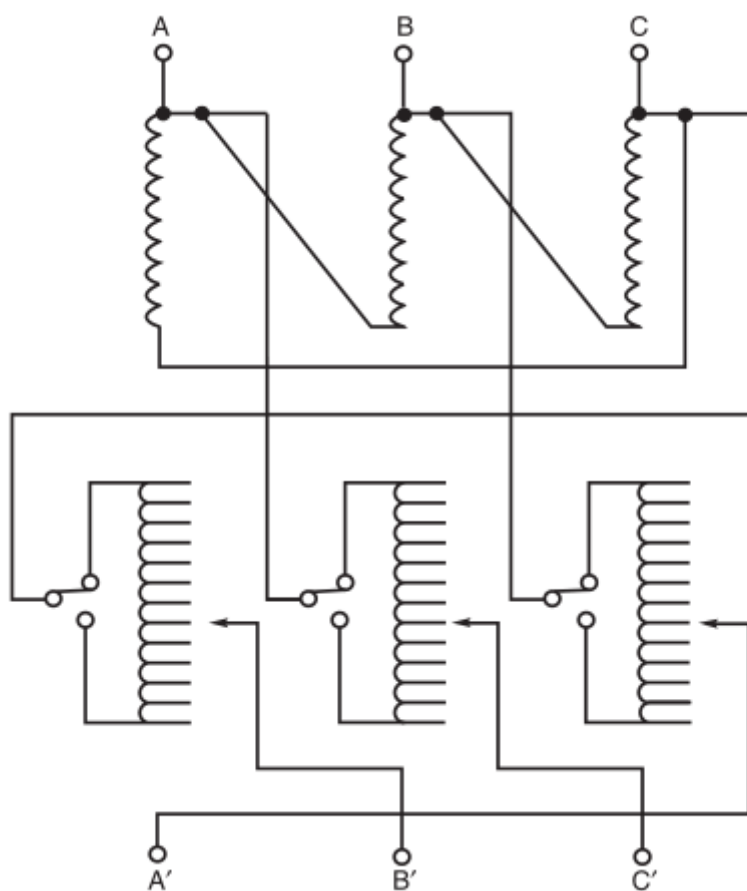
Transformatori s poprečnom regulacijom su vrsta transformatora koji kontroliraju fazni kut između ulaznog i izlaznog napona. Primarni namoti ili paralelni namoti su spojeni između faza voda. Primjer se nalazi na slici 6.5. Kako bi se dobio fazni pomak od 90 stupnjeva potrebno je spojiti sekundarne namote ili serijske namote kako je prikazano na slici. U slučaju konfiguracije sa slike 6.5. fazni pomak je moguće ostvariti samo u jednom smjeru kao što se vidi na grafu sa slike 6.6. Serijski namotaji moraju imati regulacijske sklopke kako bi se mogao regulirati iznos faznog pomaka. Kako bi se mogao dobiti i pozitivni i negativni iznos pri regulaciji potrebno je spojeve spojiti kao na slici 6.7. Dobiveni rezultat se vidi na grafu 6.8. S obzirom da izvedba sa slike 6.7. ima određene mane često se u stvarnim uvjetima koristi izvedba sa slike 6.9. Takav sustav ima dvije razdvojene komponente, a sastoje se od paralelno spojenog transformatora i serijski spojenog transformatora koji se nalaze u razdvojenim kućištima. Prednost korištenja ovakvog sustava je što se izoliraju regulacijski namotaji, te time mogu funkcionirati na nižem naponu. [13, 15]



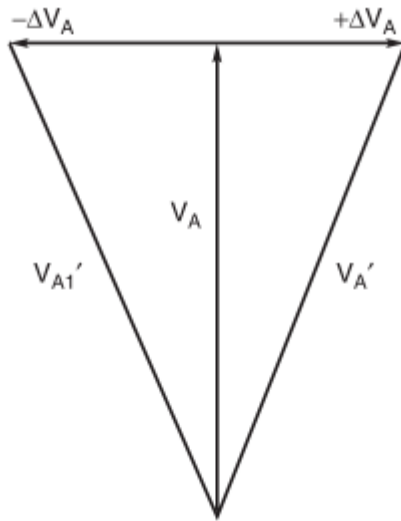
Slika 6.5. Osnovni spoj transformatora s poprečnom regulacijom [13]



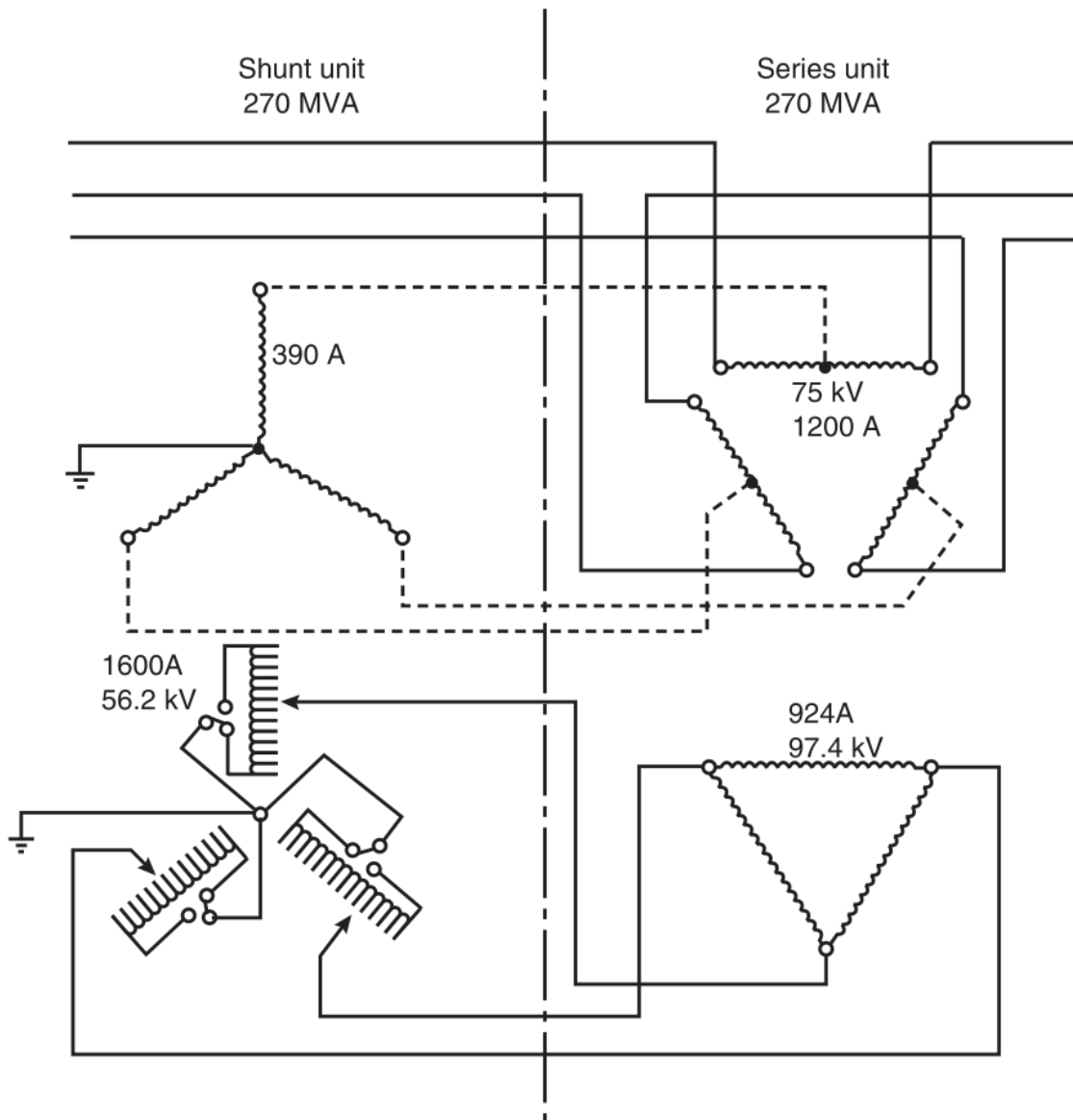
Slika 6.6. Fazorski dijagram jedne faze osnovnog spoja [13]



Slika 6.7. Funkcionalni raspored transformatora s poprečnom regulacijom [13]



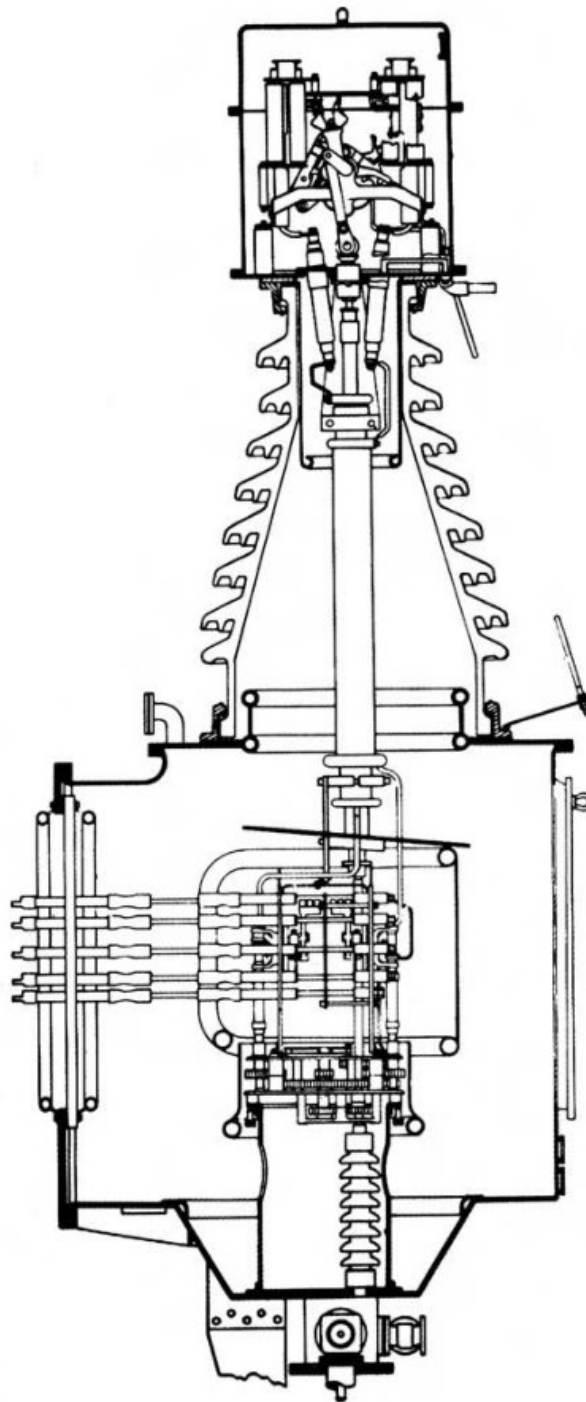
Slika 6.8. Fazorski dijagram funkcionalnog spoja [13]



Slika 6.9. Transformator s poprečnom regulacijom [13]

### 6.3. Regulacijske sklopke

Regulacijski transformatori vrše regulaciju promjenom namotaja, a promjena namotaja se izvodi promjenom položaja na regulacijskoj sklopki. Regulacijske sklopke se dijele na dvije vrste: regulacijske sklopke pod opterećenjem i regulacijske sklopke bez opterećenja. Veliki broj transformatora imaju nekakvu vrstu regulacijske sklopke, a učestalost potrebe za mijenjanjem broja namotaja predodređuje koliko je sustav napredan.



Slika 6.10. Poprečni presjek regulacijske sklopke [13]

Ako je moguće, ugrađivanje regulacijske sklopke se treba izbjeći ili svesti na što manji broj spojeva, jer transformatori bez regulacijske sklopke su jednostavnije građe, jeftiniji i pouzdaniji, ali regulacijske sklopke daje određene prednosti.

Prednosti transformatora s regulacijskom sklopkom su:

- kompenziranje promjene napona opskrbnih i ostalih vrsta transformatora,
- kompenziranje regulacije unutar samog transformatora i održavanje stalnog izlaznog napona,
- pomoć na međusabirničkim i generatorskim transformatorima u kontroli protoka VAR,
- kompenziranje nepredviđenih čimbenika tokom planiranja električnog sustava,
- mogućnost budućih izmjena u sustavu. [13, 14]

Mane regulacijske sklopke su:

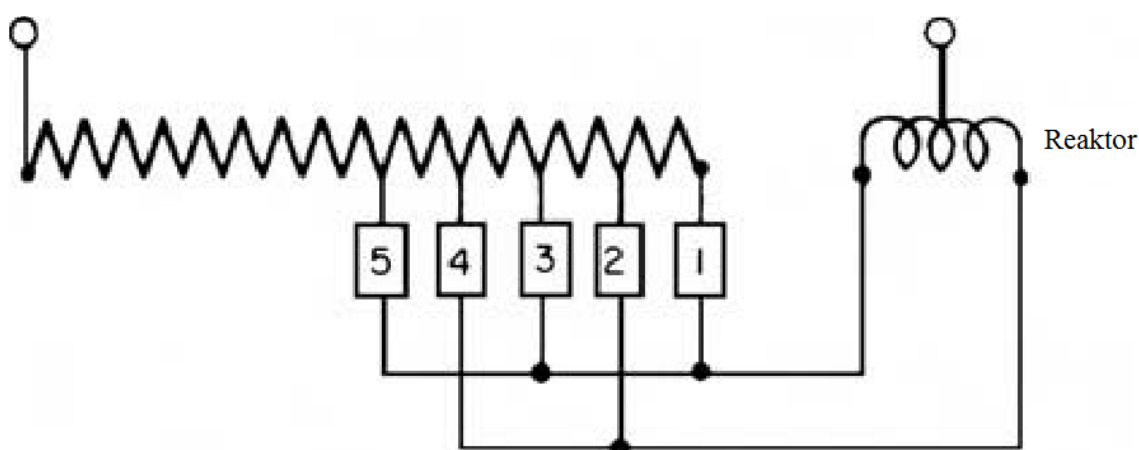
- njihovim korištenjem se dovodi do promjene gustoće toka pa se uređaj mora dizajnirati s obzirom na gustoću toka manju od optimalnog, ali računavajući da će uređaj imati i stanja optimalnog toka
- impedancija transformatora ovisi o položaju izmjenjivača, te se to mora uračunati u dizajn,
- hlađenje mora biti namijenjeno za najveće moguće gubitke koji također variraju s položajem,
- neizbježno je da će postojati stanja u kojima će elektromagnetska ravnoteža biti djelomično narušena što će dovesti do većih neuravnoteženih sila u slučaju bliskih kvarova,
- povećanjem broja stanja je kompliciranija izvedba transformatora i veće su šanse kvarova,
- regulacijska sklopka sama po sebi je značajan izvor nepouzdanosti. [13, 14]

Glavna značajka elektroenergetskog sustava je da opskrbljuje naponom u definiranim granicama bez obzira na opterećenost mreže. Kod industrijskih sustava napon mora biti dovoljno visok da bude spreman na pokretanje velikih motornih pogona, ali ne smije biti ni previše visok kako ne bi oštetio osjetljivu elektroničku opremu. Veliki postotak domaćinstava također očekuje zadovoljavajuću opskrbu u bilo koje doba dana i noći. Iz tih razloga su regulacijske sklopke od iznimne važnosti. Regulacijske sklopke pod opterećenjem moraju imati mehanizam koji zadovoljava dva uvjeta: tokom izmjenjivanja spoja se ne smije prekinuti struja tereta i niti jedan dio zavoja transformatora ne smije biti kratko spojen tokom izmjene spoja. [13, 14]

U idućem dijelu su navedeni i pojašnjeni jednostavniji primjeri regulacijske sklopke koji su korišteni u prošlosti, te principi njihovog rada na kojim se zasnivaju i moderne regulacijske sklopke.

### 6.3.1. Regulacijska sklopka pod opterećenjem s prijelazom reaktora

Na slici niže se može vidjeti primjer regulacijske sklopke pod opterećenjem s prijelazom reaktora koji se smatra najjednostavnijom vrstom regulacijske sklopke. Na transformatoru se nalazi jedan namotaj i na svakom spoju sklopke se nalazi prekidač. Prekidači su naizmjenično spojeni zajedno čineći tako dvije grupe. Krajevi tih grupa su spojeni na odvojenu zavojnicu zvanu reaktorom. U tablici niže se može vidjeti slijed izmjene spoja i rada prekidača, a „x“ predstavlja da je taj prekidač zatvoren. Na prvom spoju je zatvoren prekidač broj 1, a strujni krug je zatvoren preko polovice reaktora. Prekidač broj 2 se uključuje kako bi se izvršila izmjena spoja. Kada se to dogodi, dio zavoja transformatora su premošteni preko reaktora koji daje središnju vrijednost. Za sljedeću izmjenu je potrebno otvoriti prekidač broj 1 dok prekidač broj 2 ostaje zatvoren. Kao što se može primjetiti ovaj tip regulacijske sklopke ima veliki broj prekidača koji značajno povećavaju cijeli uređaj. [13]



Slika 6.11. Regulacijska sklopka pod opterećenjem s prijelazom reaktora [13]

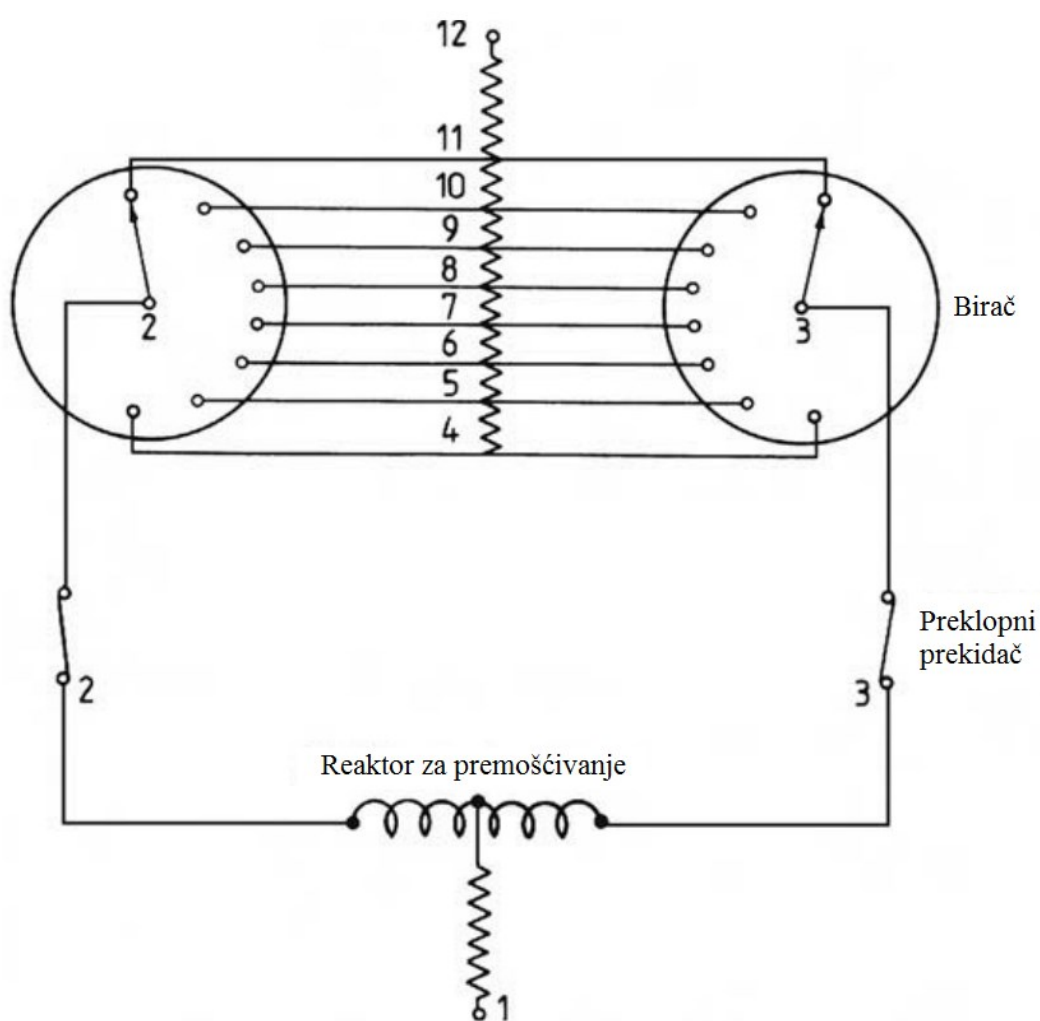
Tablica 6.1. Slijed rada prekidača [13]

Položaj	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Prekidač 1	x	x							
Prekidač 2		x	x	x					
Prekidač 3				x	x	x			
Prekidač 4						x	x	x	
Prekidač 5								x	x



### 6.3.2. Regulacijska sklopka pod opterećenjem s preklopnim prekidačima

Preinakom prijašnje navedenog tipa regulacijske sklopke se dobije regulacijska sklopka prikazana na idućoj slici. Upotrebom dvaju birača koji su mehanički povezani s preklopnim prekidačima se vrši sljedeći redoslijed rada. Kako bi se izvršila izmjena spoja iz položaja 1 u položaj 2 potrebno je otvoriti preklopni prekidač broj 2, biračem broj 2 prebaciti se sa spoja 11 na spoj 10, te potom zatvoriti preklopni prekidač broj 2. Za promjenu iz položaja 2 u položaj 3 se koristi preklopni prekidač broj 3 i pomiče birač broj 3. Cjelokupna sekvenca rada regulacijske sklopke se može vidjeti u tablici niže. [13]



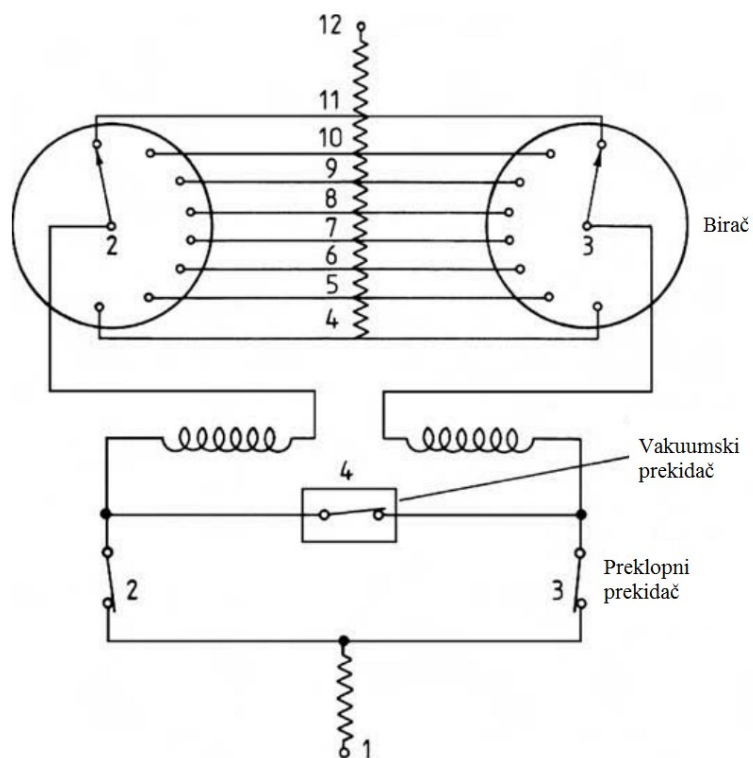
Slika 6.12. Regulacijska sklopka pod opterećenjem s preklopnim prekidačima [13]

Tablica 6.2. Slijed rada prekidača [13]

Položaj	Priključak	
	Prekidač lijeve strane	Prekidač desne strane
1	2 - 11	3 - 11
2	2 - 10	3 - 11
3	2 - 10	3 - 10
4	2 - 9	3 - 10
5	2 - 9	3 - 9
6	2 - 8	3 - 9
7	2 - 8	3 - 8
8	2 - 7	3 - 8
9	2 - 7	3 - 7
10	2 - 6	3 - 7
11	2 - 6	3 - 6
12	2 - 5	3 - 6
13	2 - 5	3 - 5
14	2 - 4	3 - 5
15	2 - 4	3 - 4

### 6.3.3. Reaktorski tip regulacijske sklopke s vakuumskim prekidačem

Dodatnom preinakom regulacijske sklopke pod opterećenjem s prijelazom reaktora, te dodavanjem vakuumskog prekidača s dobije regulacijska sklopka sa iduće slike. Kako bi se izvršila izmjena spoja iz položaja 1 u položaj 2 potrebno je otvoriti prekidač broj 2. Struja zatim teče paralelno preko birača broj 2, vakuumskog prekidača broj 4 i birača broj 3 kroz preklopni prekidač broj 3. Potom se otvori vakuumski prekidač broj 4 i izmjenjuje se spoj iz spoja 11 u spoj 10 pomoću birača broj 2. Vakuumski prekidač broj 4 i preklopni prekidač broj 2 se zatvaraju. Za iduću promjenu položaja se ponavlja sličan proces korištenjem preklopnog prekidača broj 3, birača broj 3 i vakuumskog prekidača broj 4. [13]



Slika 6.13. Reaktorski tip regulacijske sklopke s vakuumskim prekidačem [13]

Tablica 6.3. Slijed rada prekidača [13]

Položaj	Priključak	
	Prekidač lijeve strane	Prekidač desne strane
1	2 - 11	3 - 11
2	2 - 10	3 - 11
3	2 - 10	3 - 10
4	2 - 9	3 - 10
5	2 - 9	3 - 9
6	2 - 8	3 - 9
7	2 - 8	3 - 8
8	2 - 7	3 - 8
9	2 - 7	3 - 7
10	2 - 6	3 - 7
11	2 - 6	3 - 6
12	2 - 5	3 - 6
13	2 - 5	3 - 5
14	2 - 4	3 - 5
15	2 - 4	3 - 4

#### 6.3.4. Regulacijske sklopke s otpornicima

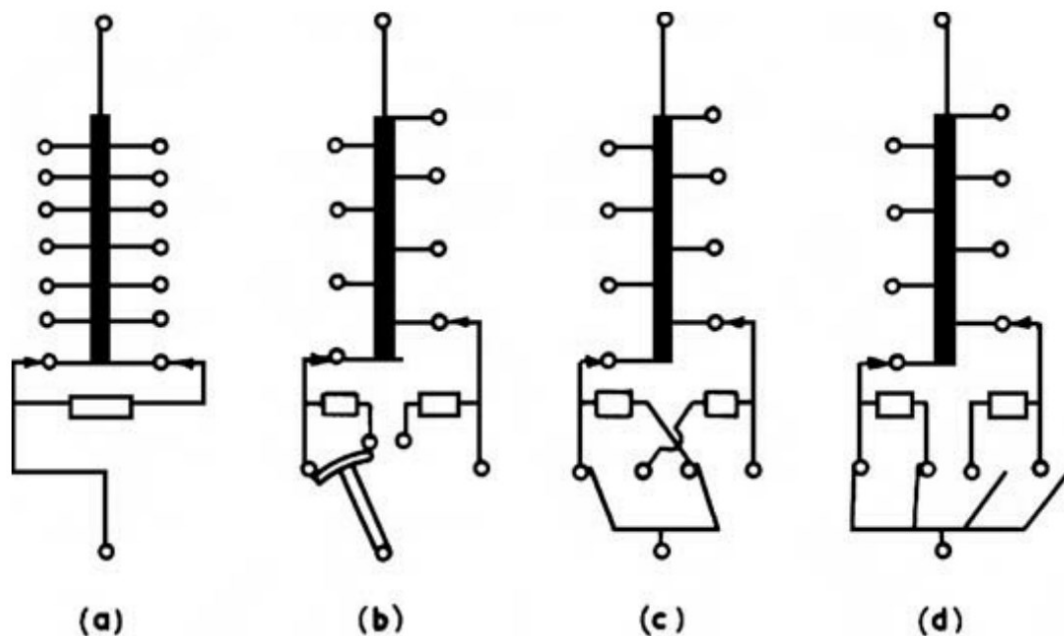
Regulacijske sklopke velikih brzina s otpornicima prevladavaju nad regulacijskim sklopkama s reaktorom zbog ekonomičnosti i jednostavnije ugradnje. Većina ih koristi ulje kao izolator i mogu se podijeliti na dva tipa: sklopke s jednim pretincem i sklopke s dva pretinca. Ulje u pretincima se nastoji držati razdvojeno od ulja u transformatoru kako se ne bi prljalo, ali to nije pravilo. U jednom pretincu se nalaze birači koji ne prekidaju struju opterećenja, a u drugom se nalaze otpornici i preklopni prekidači. Verzije s jednim pretincem se najčešće koriste za distribucijske transformatore srednjih veličina. Verzije s dva pretinca se najčešće koriste na većim transformatorima. Regulacijske sklopke s dva pretinca se također dijele na dva tipa: tip za vanjsku montažu i tip unutar spremnika. Tipovi za vanjsku montažu su potencijalno skuplji jer su izloženi vanjskim elementima pa moraju biti adekvatno izrađeni kako bi izdržali određene uvjete. Tipovi koji se nalaze unutar spremnika imaju ograničen pristup i održavanje je otežano, a kontakti regulacijske sklopke stvaraju male kapacitivne struje koje izazivaju nastajanje plina u ulju. [13, 14, 18]

Prednosti korištenja vakuumskih prekidača su:

- hermetički su zatvoreni što sprječava kontakt strujnog luka sa okružujućim medijom,
- smanjeno je trošenje kontakta,
- izolacijski medij ne utječe na karakteristike prebacivanja,
- ulje uzrokuje puno veći pad napona nego vakuum, stoga vakuumski prekidač troši manje energije,
- ne koristi se ulje pa samim time nema potrebe za filtracijom ulja niti odlaganjem otpadnog ulja i
- velika brzina prebacivanja zbog brzog oporavka dielektrika. [13, 14]

Zbog navedenih razloga vakuumski prekidači se koriste u mnogim modernim dizajnima za regulacijske sklopke. U suštini su sigurniji i zahtjevaju manje održavanja. Također se uvode elektronički sklopovi u moderne dizajne kako bi se postigla bolja kontrola.

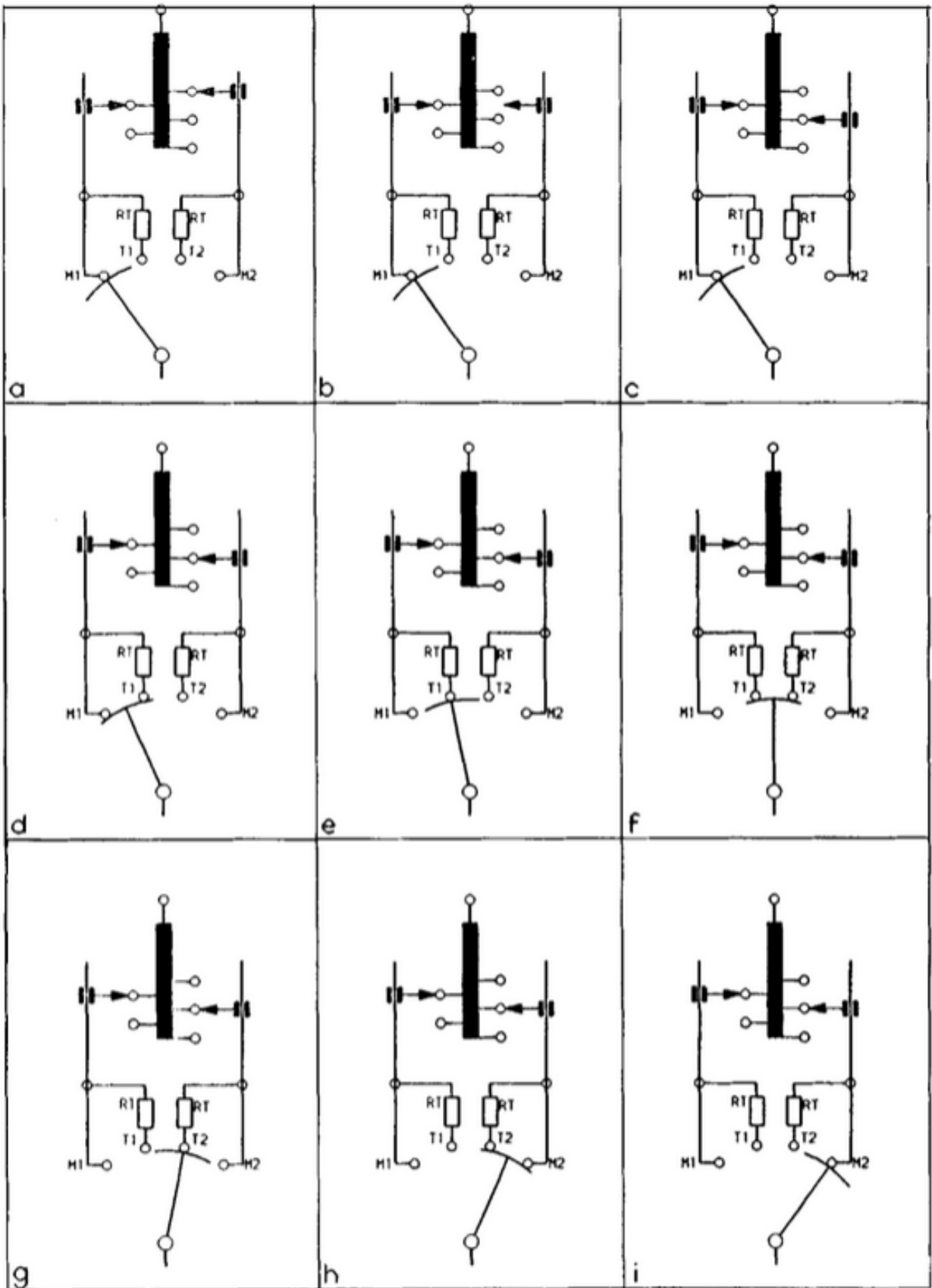
Dodatno se regulacijske sklopke s otpornicima mogu podijeliti u dvije skupine ovisno o broju otpornika: skupinu s jednim otpornikom i skupinu s dva otpornika. Na slici niže se vidi verzija a) sa jednim otpornikom čiji se ciklus zove ciklus trokutaste zastavice. Takva verzija se najčešće koristi u izvedbama s jednim pretincem. Verzije b), c) i d) imaju ciklus koji se zove ciklus zastave. Nazivi proizlaze iz oblika fazorskih dijagrama koji prikazuju promjene izlaznog napona. [13]



Slika 6.14. Vrste regulacijske sklopke s otpornicima: a) ciklus trokutaste zastavice; b), c) i d) ciklus zastave [13]

Primjer rada regulacijske sklopke s otpornicima je prikazan niže, a proces promjene spoja se odvija na idući način:

- a) uobičajeno radno stanje,
- b) pomicanje birača s jednog spoja na drugi spoj,
- c) birač pomaknut na drugi spoj,
- d) pomicanje preklopnog birača u paralelni spoj na vodič s otpornikom,
- e) daljnje pomicanje preklopnog prekidača zadržavajući samo spoj s vodičem s otpornikom,
- f) daljnje pomicanje preklopnog prekidača zadržavajući spoj s vodičem s otpornikom, te ostvarivanje spoja s vodičem s otpornikom drugog spojnog mjesta,
- g) daljnje pomicanje preklopnog prekidača zadržavajući samo spoj s vodičem s otpornikom drugog spojnog mjesta,
- h) daljnje pomicanje preklopnog prekidača zadržavajući spoj s vodičem s otpornikom, te ostvarivanje spoja s vodičem bez otpornika drugog spojnog mjesta,
- i) preklopni prekidač pomaknut do kraja u poziciju uobičajenog radnog stanja. [14, 18]



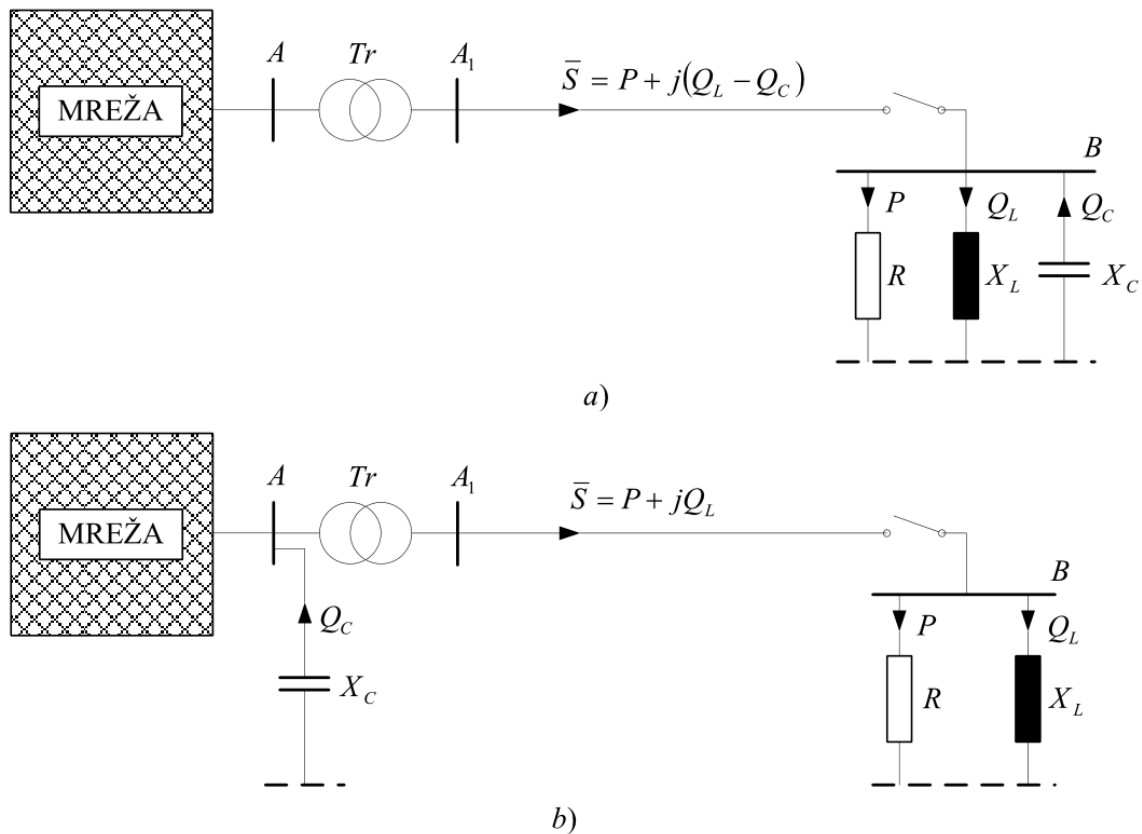
Slika 6.15. Pojednostavljeni primjer sekvence rada regulacijske sklopke s otpornicima [18]

## 7. KONDENZATORSKE BATERIJE

Kondenzatorske baterije su najučestaliji uređaj koji se koristi za kompenzaciju jalove snage, a to proizlazi iz razloga što su jednostavne za ugradnju, pouzdane i ne predstavljaju veliki trošak.

Određenim uređajima je neophodna jalova struja za njihovo funkcioniranje, međutim jalova struja svojim protokom opterećuje mrežu. Potrošači poput motora i transformatora zbog induktivnog otpora uzrokuju da struja vremenski kasni za naponom pri proticanju kroz mrežu. Stoga se koriste uređaji za kompenzaciju jalove snage kao što su kondenzatorske baterije kako bi se spriječio protok jalove snage kroz mrežu. Kada se koriste kondenzatorske baterije struja prethodi naponu, te se taj efekt koristi za izjednačavanje kapaciteta s induktivitetom i poništavanje jalove snage u mreži. [19]

Kako bi se postigao najbolji efekt kompenzaciju je idealno izvršiti što bliže mjestu nastajanja jalove snage jer se tako najviše smanjuju gubici prijenosa. Navedeno se može vidjeti na slici niže.



Slika 7.1. Primjer dva načina kompenzacije u mreži [19]

U prvom primjeru se kondenzatorska baterija nalazi uz uređaj koji je potrebno kompenzirati. Kao što se može vidjeti vod je manje opterećen za iznos jalove snage  $Q_L$ . Također, induktivni potrošač i kondenzatorska baterija se isključuju pomoću istog prekidača, te se time sprječava prekomjerno kompenziranje. Međutim ako se iz čvorišta napaja više trošila moguće je kompenzirati više njih izvođenjem kompenzacije gdje isti kondenzator pokriva više trošila. Time dolazimo do podjele vrsta kompenzacija: pojedinačna kompenzacija, grupna kompenzacija i centralna kompenzacija. Prikaze navedenih vrsta možemo vidjeti na slikama niže. [19, 20]

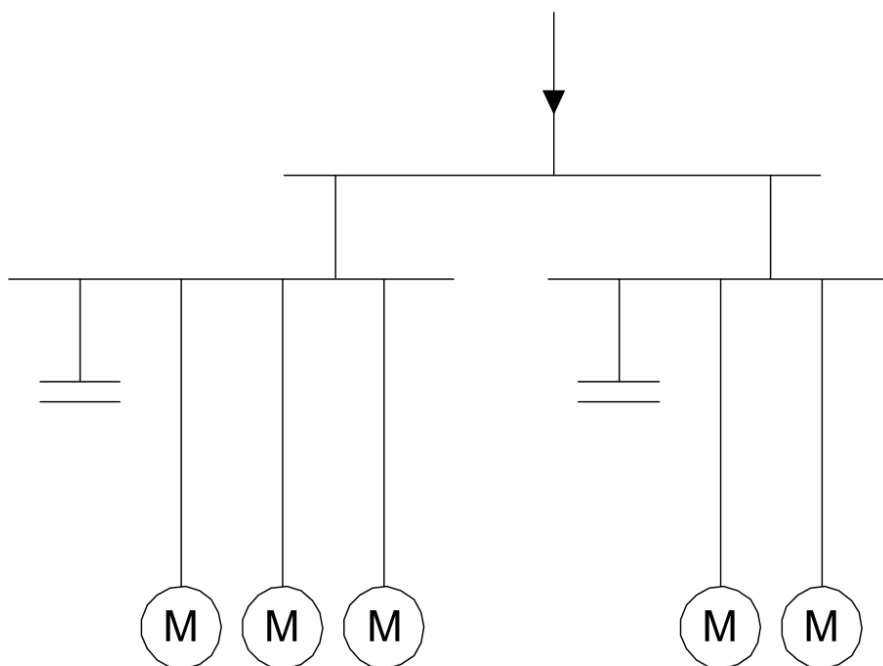
Pojedinačna kompenzacija je kompenzacija kod koje se kondenzator priključuje u neposrednoj blizini trošila. Ovakva izvedba rasterećuje vodove i ne zahtjeva dodatnu sklopnu opremu, ali je skuplja jer zahtjeva ugrađivanje više manjih kondenzatora uz pojedinačna trošila. Najčešće se koristi za uređaje koji većinu vremena rade konstantnom snagom. Iznimku za dodatnu sklopnu opremu predstavljaju motori za dizalice, liftove i slično. [19, 20]



*Slika 7.2. Pojedinačna kompenzacija [20]*

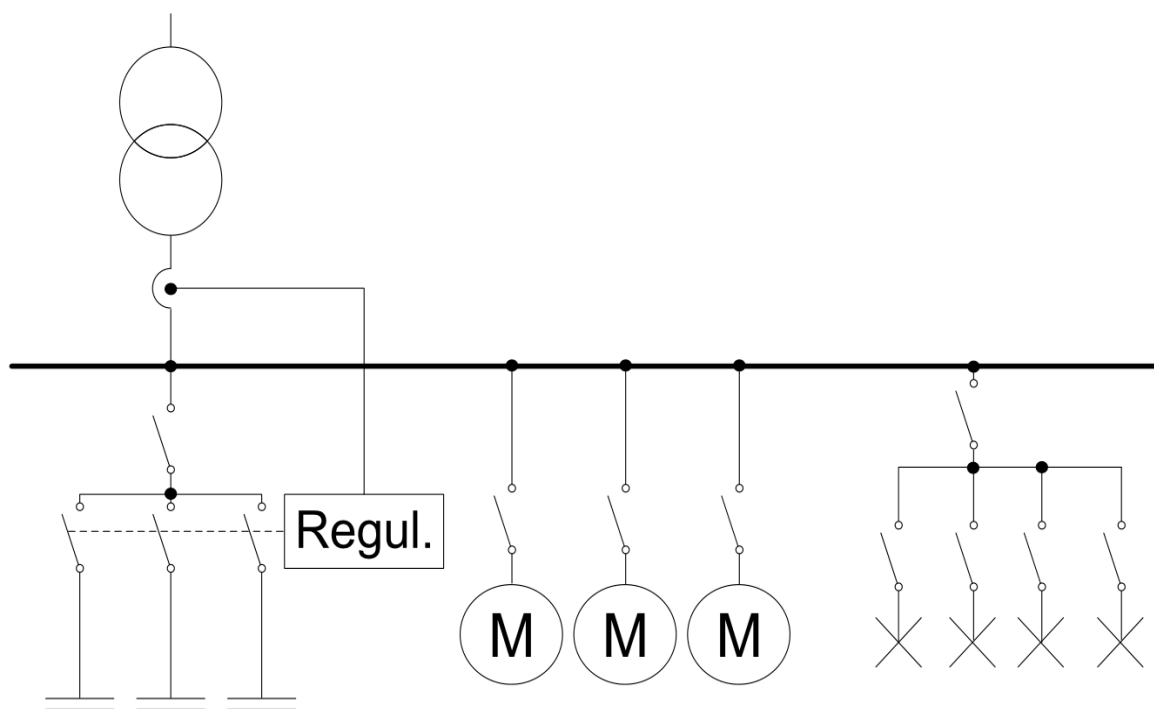
Grupna kompenzacija podrazumijeva da isti kondenzator kompenzira više trošila istovremeno ili naizmjenično. S obzirom na navedeno potrebno je pozicionirati kondenzator na takav način gdje će pokrivati više trošila. Na slici 7.3. je prikazan upravo takav raspored. Takav položaj znači veću udaljenost od pojedinih trošila i stoga vodovi nisu rasterećeni između trošila i mjesta kompenzacije, ali prednost je što su manji troškovi ulaganja. Kod ovakve vrste kompenzacije je poželjno da je faktor istovremenosti što manji od jedan. Najčešće se koristi za rasvjetu velikih objekata poput tvornica i trgovačkih centara ili za veći broj električnih motora manje snage. [19, 20]





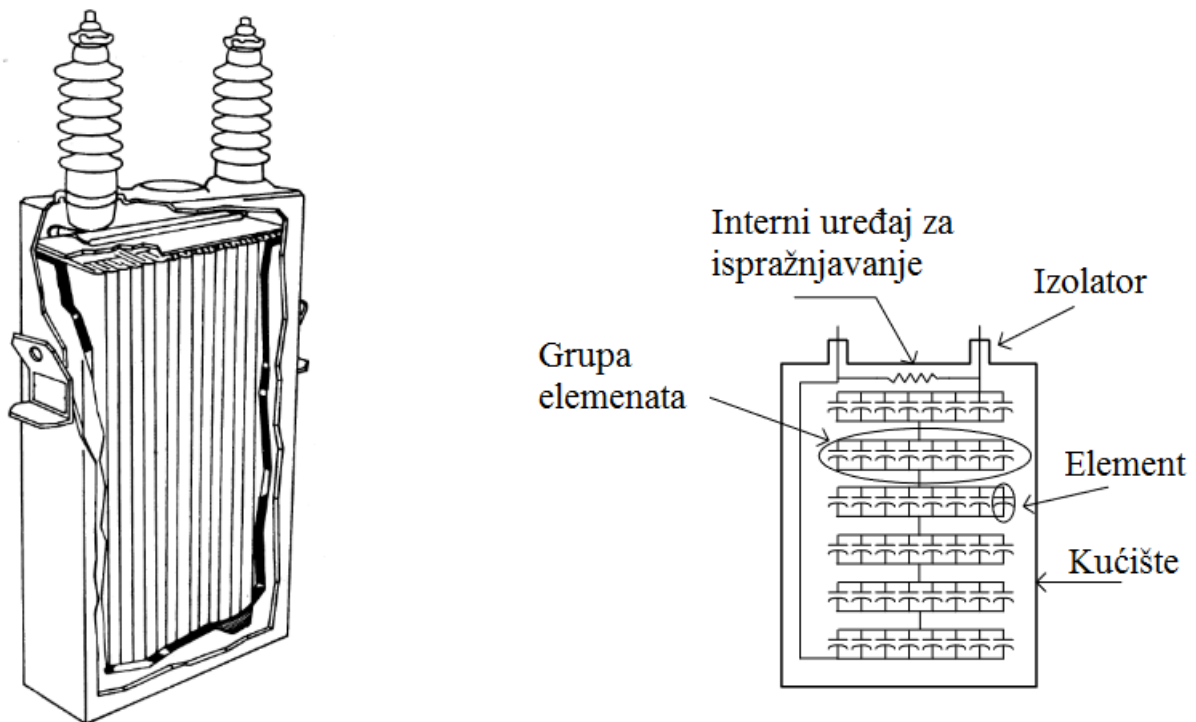
Slika 7.3. Grupna kompenzacija [20]

Centralna kompenzacija podrazumijeva kompenziranje promjenjive snage više trošila na jednom mjestu. Zbog promjenjive snage u sustavu se nalazi regulator stupnja kompenzacije koji po potrebi uključuje ili isključuje kondenzatorske baterije kako ne bi došlo do potkompenzacije ili prekompenzacije. Sustav je jednostavan za ugraditi kao i dodatno proširiti. [19, 20]



Slika 7.4. Centralna kompenzacija [21]

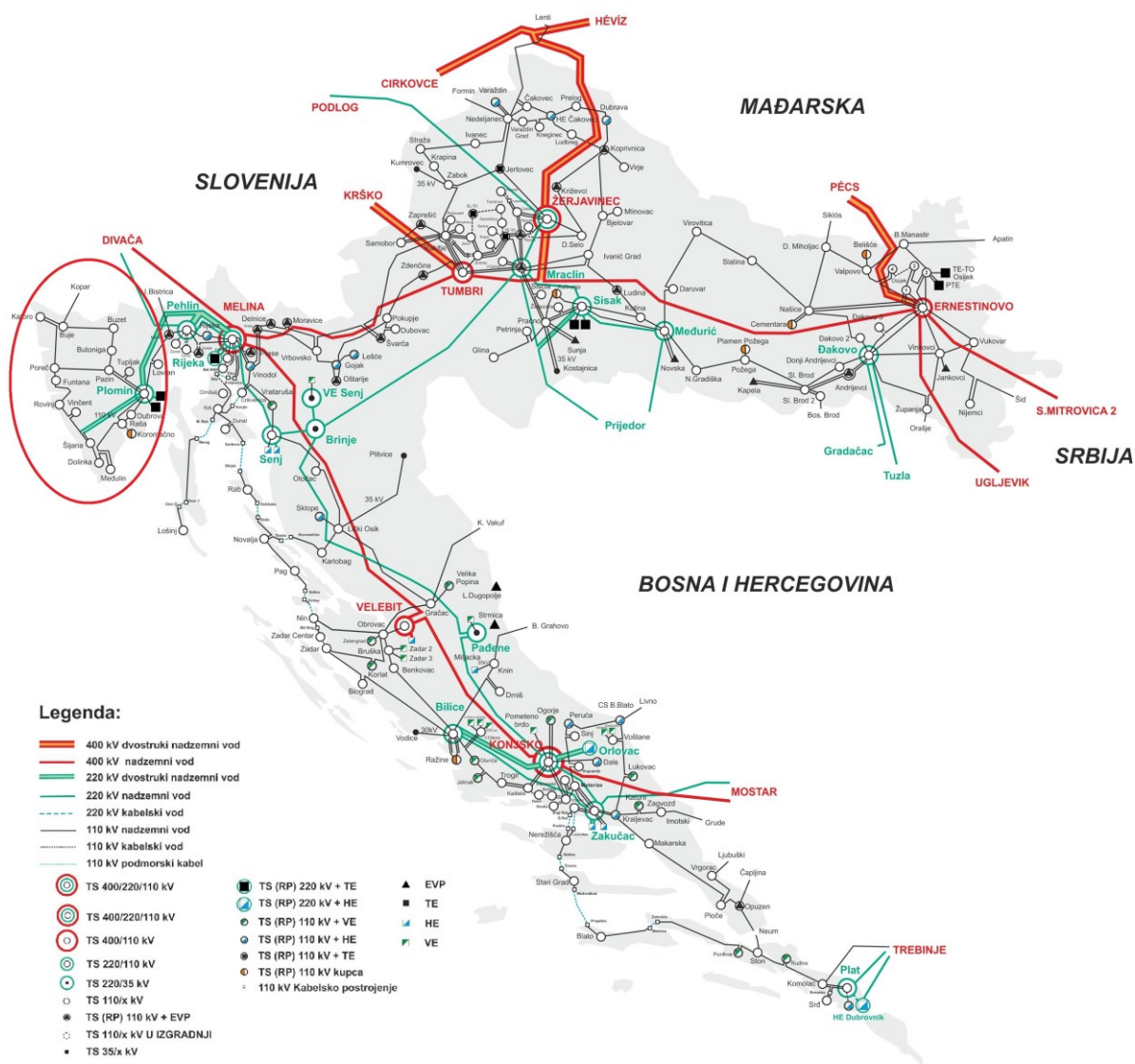
Kondenzatorska baterija je uređaj koji se sastoji od više manjih kondenzatora zvanih elementi, a nalaze se u metalnom kućištu. Manji kondenzatori ili elementi su sastavljeni od višestrukih slojeva aluminijske folije i polipropilenskog filma. Međusobnim spajanjem manjih kondenzatora se dobije kondenzatorska baterija, ali ovisno o načinu spajanja se definiraju karakteristike baterije. Spajanjem manjih kondenzatora u seriju se definira napon, a spajanjem u paralelni spoj se definira iznos jalove snage. U kućištu se nalazi interni uređaj za ispražnjivanje koji je u suštini otpornik namijenjen da se suvišni preostali napon smanji na 50 V ili manje unutar vremenskog perioda od pet minuta. [22]



Slika 7.5. Konstrukcija kondenzatorske baterije [22]

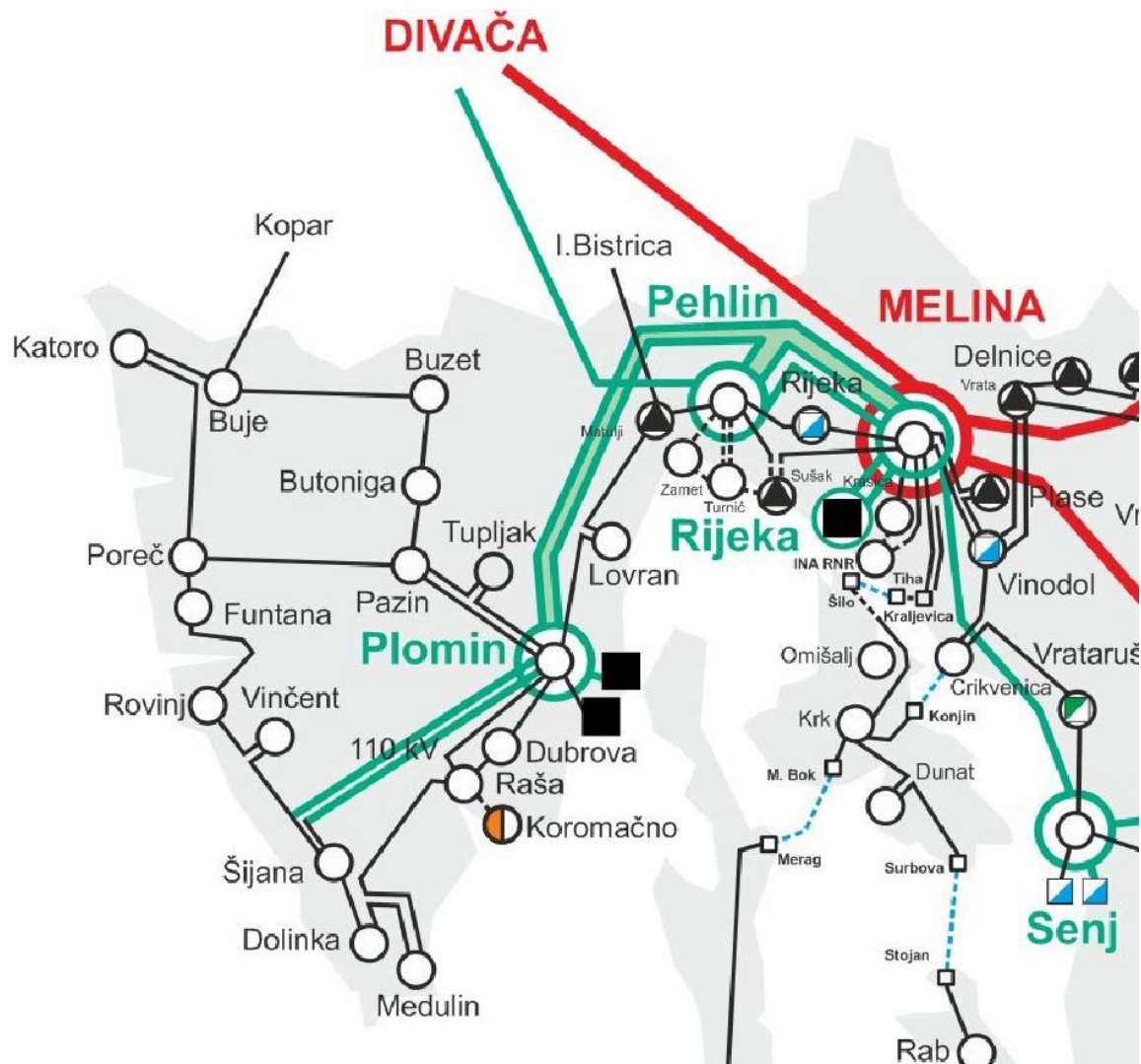
## 8. SPRJEČAVANJE NAPONSKOG SLOMA UGRADNjom KONDENZATORSKIH BATERIJA NA PRIMJERU ELEKTROENERGETSKOG PODSUSTAVA ISTRE

Prijenosni sustav Republike Hrvatske ima 4 glavna prijenosna područja: Zagreb, Split, Rijeka i Osijek. Elektroenergetski podsustav Istre, označen na slici niže crvenim krugom, je podsustav koji ima određenu dozu izoliranosti i loše povezanosti zbog svojeg geografskog položaja. Prijenosni sustav mu se sastoji od naponskih razina 110 kV i 220 kV. Visoki napon od 110 kV se spušta na srednji napon distribucijske mreže, najčešće 20 kV, na područjima potrošnje električne energije. S ostatkom elektroenergetskog sustava je povezan vodovima 220 kV Plomin-Pehlin-Melina, 110 kV Plomin- Lovran-Matulji, 110 kV Matulji-Ilirska Bistrica i 110 kV Buje-Kopar.



Slika 8.1. Prijenosni sustav Republike Hrvatske [23]

Podsustav ima varijacije u potrošnji s obzirom na dnevnu i noćnu potrošnju, kao i sezonsku potrošnju. Također, područje ima izražen turistički element koji predstavlja značajan faktor u potrošnji i u rastu potrošnje električne energije, čemu dodatno doprinose turisti koji u sve većem broju posjeduju električne automobile. Elektroenergetski podsustav Istre ima jedan proizvodni objekt TE Plomin 2. U ljetnim mjesecima kada potrošnja prelazi 160 MW TE Plomin 2 je od važnosti za pogonsku sigurnost.



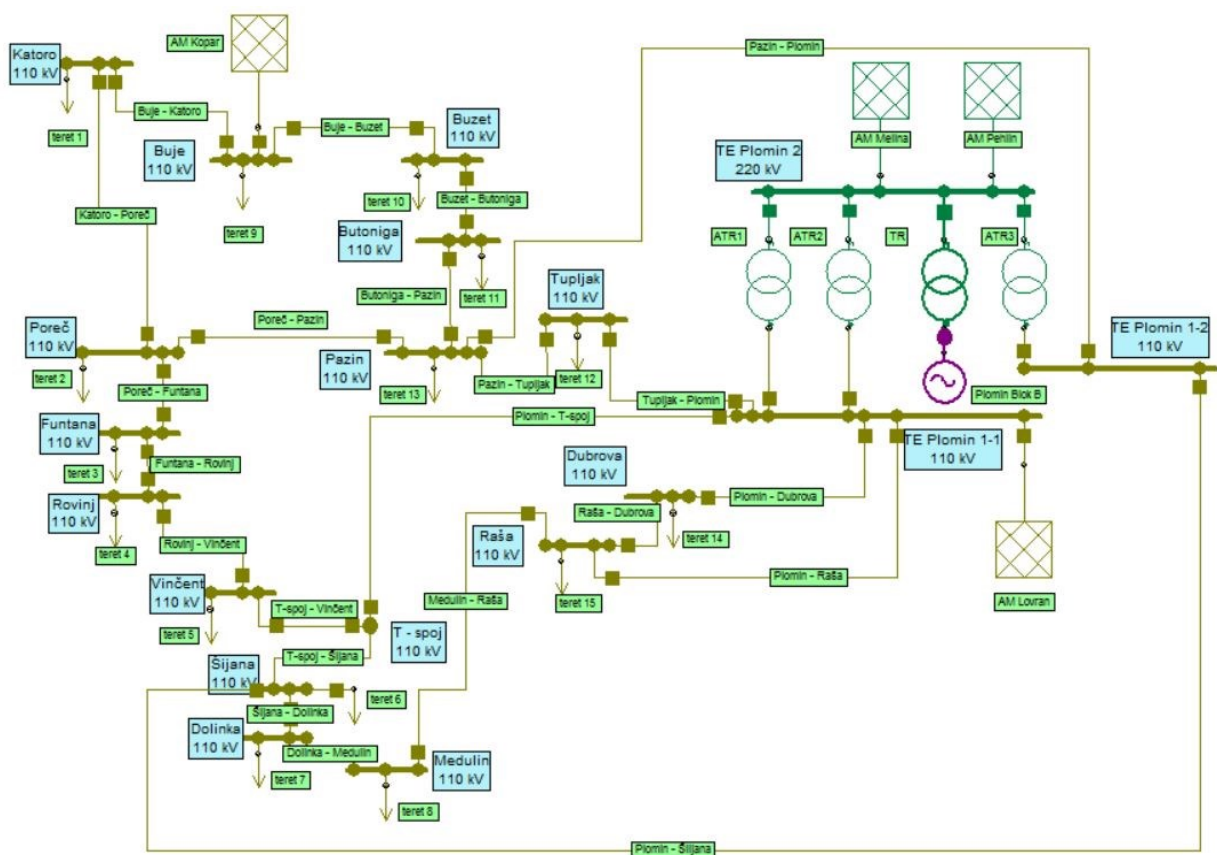
Slika 8.2. Shema elektroenergetskog podsustava Istre [23]

Kako bi se prikazao utjecaj kondenzatorskih baterija na stabilnost elektroenergetskog sustava napravljena je računalna simulacija u programu Neplan.

## 8.1. Simulacija podsustava Istre u Neplan programskom paketu

Neplan je programski paket namijenjen za planiranje, simulaciju, analiziranje i optimizaciju elektroenergetskih mreža. Program sadrži opsežan izbor alata za mrežne elemente, zaštitne uređaje i kontrolne elemente, te je baziran na internacionalnim standardima.

U simulaciji su spojevi sa sabirnica na transformatore sa visokog na srednji napon predstavljeni programskim simbolom za teret kako bi se pojednostavila shema. Spojevi s ostatkom elektroenergetskog sustava su predstavljeni pomoću programskog simbola za aktivnu mrežu.



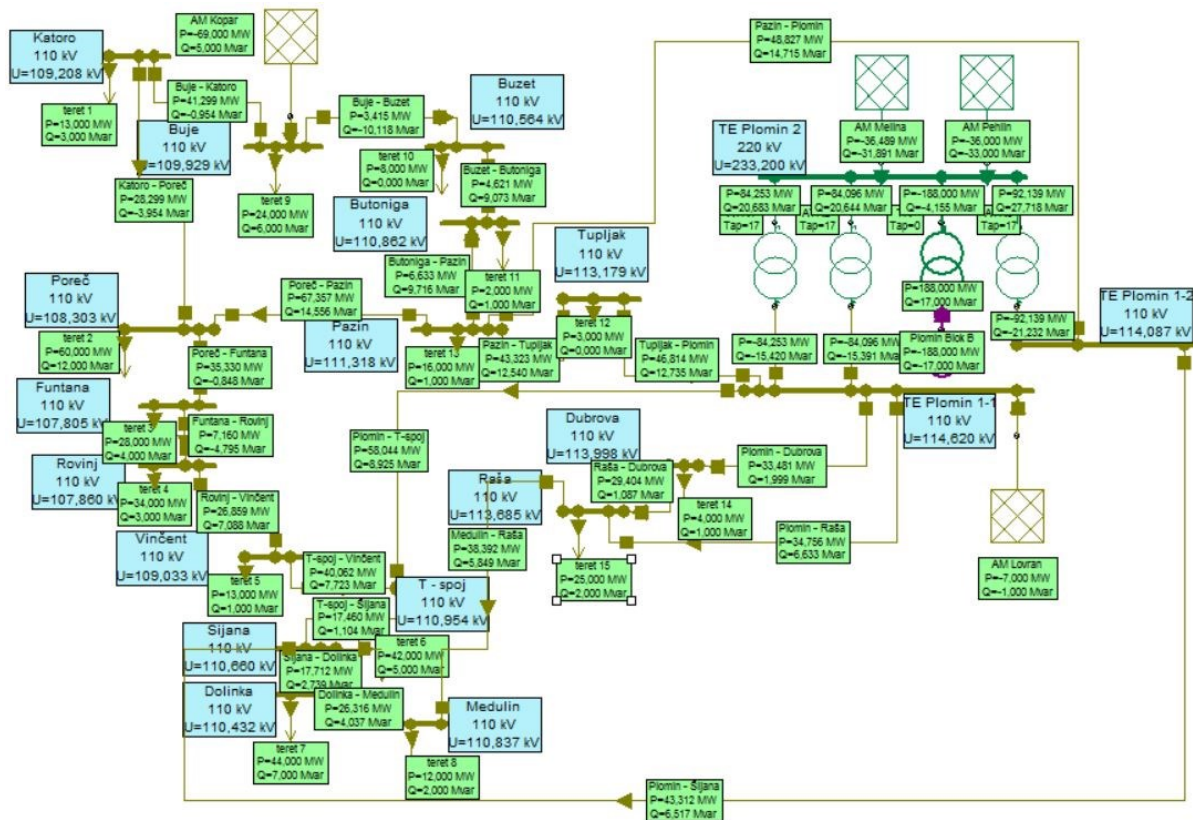
Slika 8.3. Shema u Neplan programskom paketu

Napravljen je proračun tokova snage s podacima jedne od najvećih potrošnja snage elektroenergetskog podsustava Istre koja se dogodila tokom ljeta 2024. godine. Potrošnja je iznosila 328 MW. Podaci opterećenja po lokacijama se nalaze u idućoj tablici. Korišteni su takvi podaci kako bi se dobile informacije o naponskom stanju tokom najvećeg naprežanja sustava.



Tablica 8.1. Potrošnja elektroenergetskog podsustava Istre

Lokacija	Snaga opterećenja [MW]
Buje	24
Butoniga	2
Buzet	8
Dolinka	44
Dubrova	4
Funtana	28
Katoro	13
Medulin	12
Pazin	16
Poreč	60
Raša	25
Rovinj	34
Šijana	42
Tupljak	3
Vincent	13



Slika 8.4. Proračun tokova snage u Neplan programskom paketu

U idućoj tablici su prikazane naponske vrijednosti podsustava tokom opterećenja od 328 MW, dobivene naponske vrijednosti istih lokacija sa simulacijom u Neplanu, te postotak odstupanja simulacije od stvarnih vrijednosti.

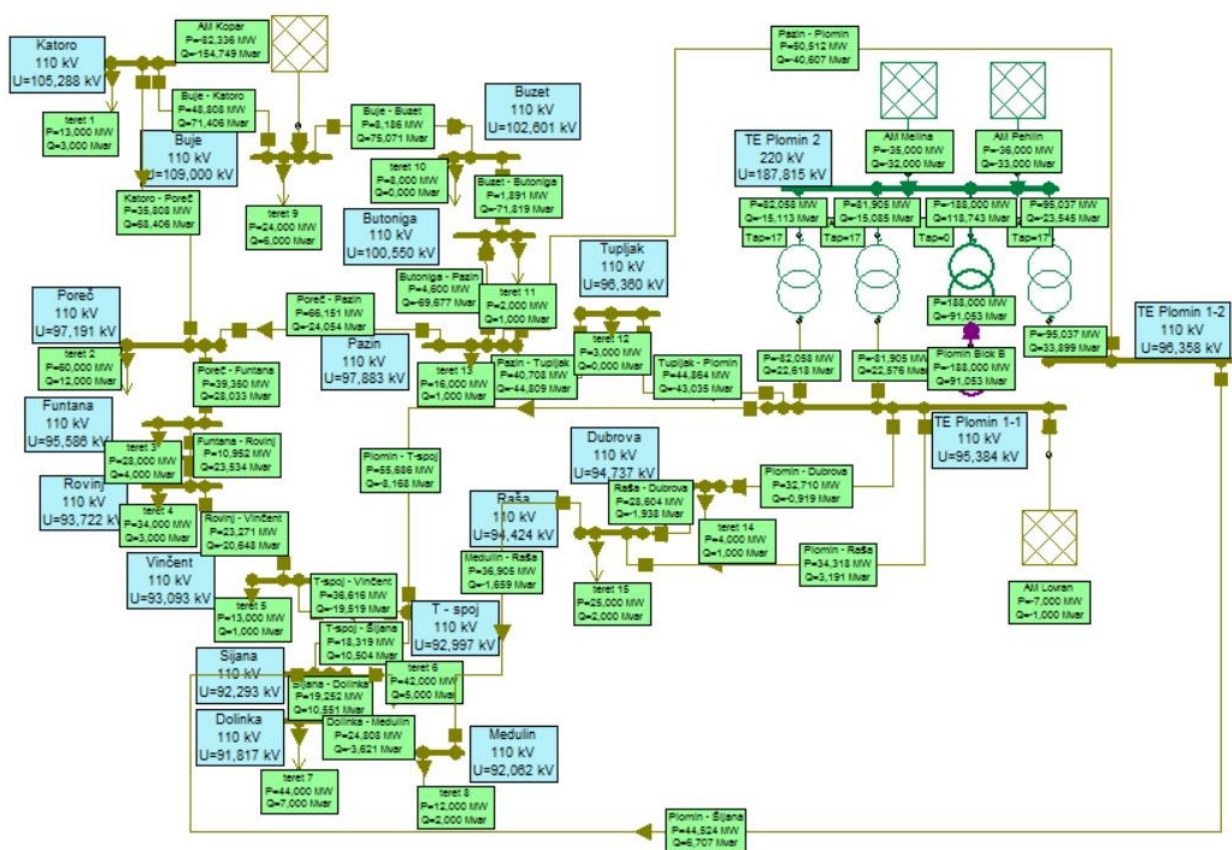
*Tablica 8.2. Naponske vrijednosti stvarnih uvjeta i simulacije*

Sabirnica	Nazivni napon [kV]	Napon u stvarnim uvjetima [kV]	Napon u simulaciji [kV]	Postotak greške simulacije naponskih stanja [%]
Buje	110	109	110	0,92
Butoniga	110	110	111	0,91
Buzet	110	110	111	0,91
Dolinka	110	110	110	0,00
Dubrova	110	113	114	0,88
Funtana	110	108	108	0,00
Katoro	110	108	109	0,93
Medulin	110	111	111	0,00
Pazin	110	111	111	0,00
Poreč	110	108	108	0,00
Raša	110	113	114	0,88
Rovinj	110	108	108	0,00
Šijana	110	111	111	0,00
Tupljak	110	112	113	0,89
Vincent	110	109	109	0,00
Plomin 1-1	110	114	115	0,88
Plomin 1-2	110	113	114	0,88
Plomin 2	220	233	233	0,00

## 8.2. Simulacija podsustava pri različitim faktorima snage TE Plomin

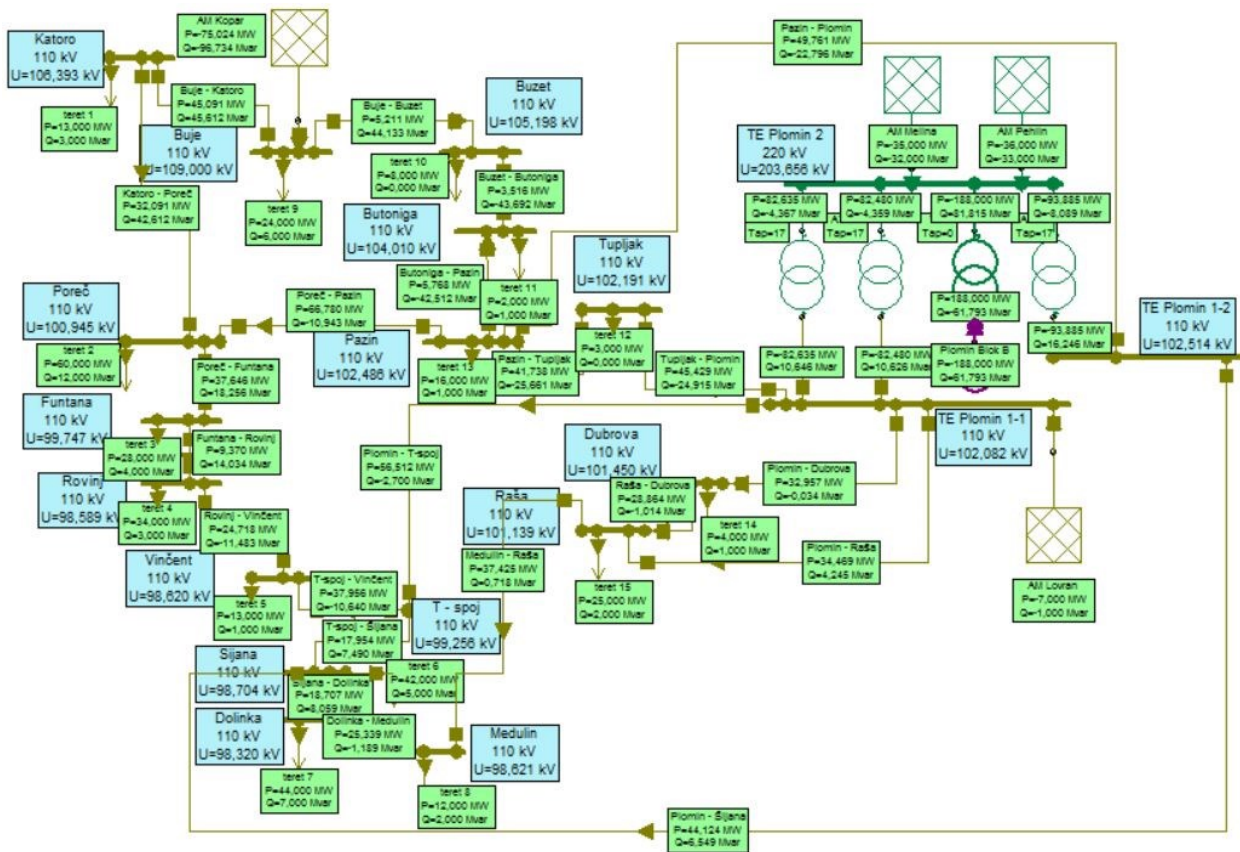
Kako bi se dobio detaljniji uvid u naponsko stanje elektroenergetskog podsustava Istre, a postoje razni uvjeti koji utječu na faktor snage proizvodne jedinice TE Plomin, napravljene su dodatne simulacije čime se dobio cijeli spektar mogućih naponskih stanja. Napravljeno je pet simulacija s faktorima snage od 0,9 induktivno do 0,9 kapacitivno sa istim iznosom proizvedene aktivne snage na dan od kada su uzeta opterećenja za simulaciju.

Na slici simulacije tokova snage se može primjetiti da naponske prilike u zapadnom dijelu elektroenergetskog podsustava Istre predstavljaju problem. Kako bi se dodatno izrazile problematične lokacije, u simulaciji su ograničeni tokovi snaga vodova Lovran-Plomin, Melina-Plomin i Pehlin-Plomin u istom iznosu toka snaga koji su imali na dan od kada su uzeta opterećenja za simulaciju. Vod Kopar-Buje je jedini vod na koji nisu stavljena ograničenja snage u simulaciji s ciljem da se jalova snaga koju proizvede TE Plomin rasporedi po podsustavu, te je pretpostavljeno da je u stanju održavati napon na sabirnici Buje na 109 kV. Napon od 109 kV je postavljen jer je toliko iznosio napon na sabirnici Buje na dan od kada su uzeti podatci opterećenja.

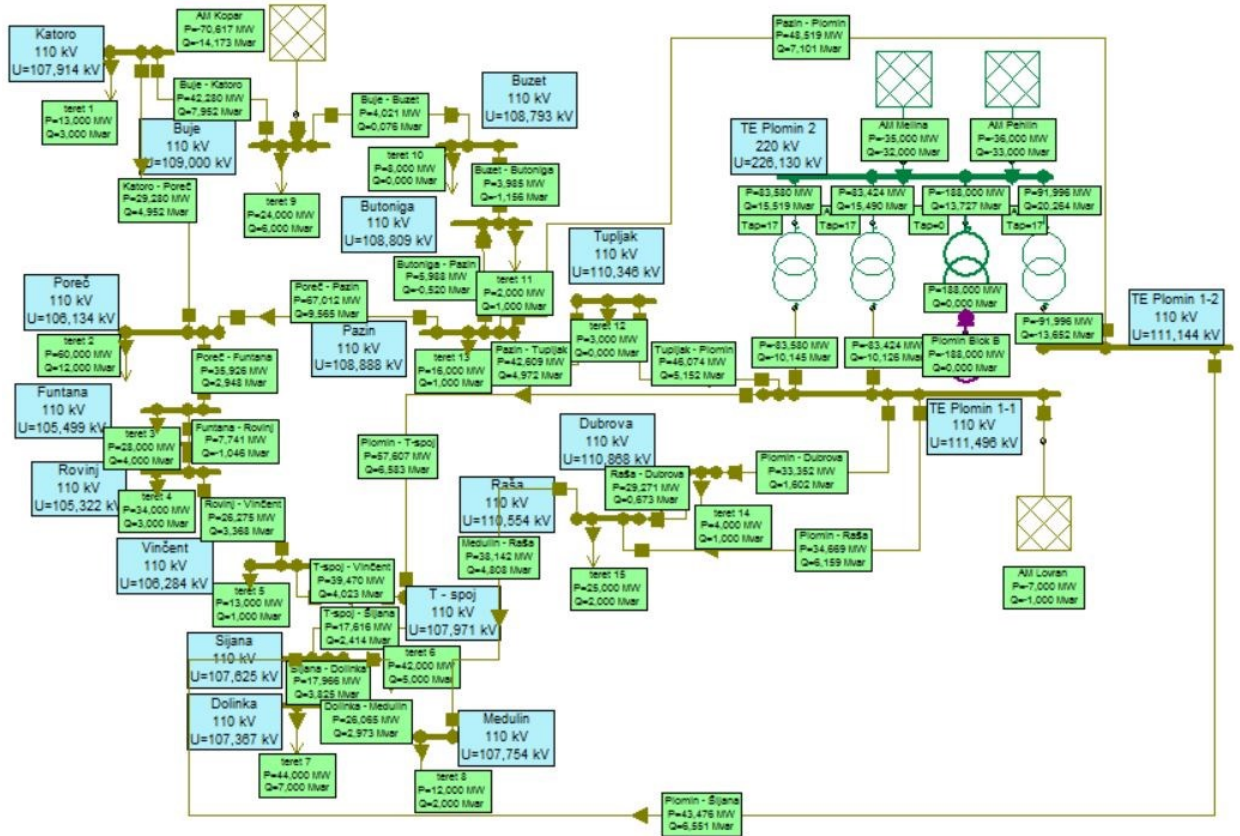


Slika 8.5. Tok snaga s faktorom snage 0,9 induktivno

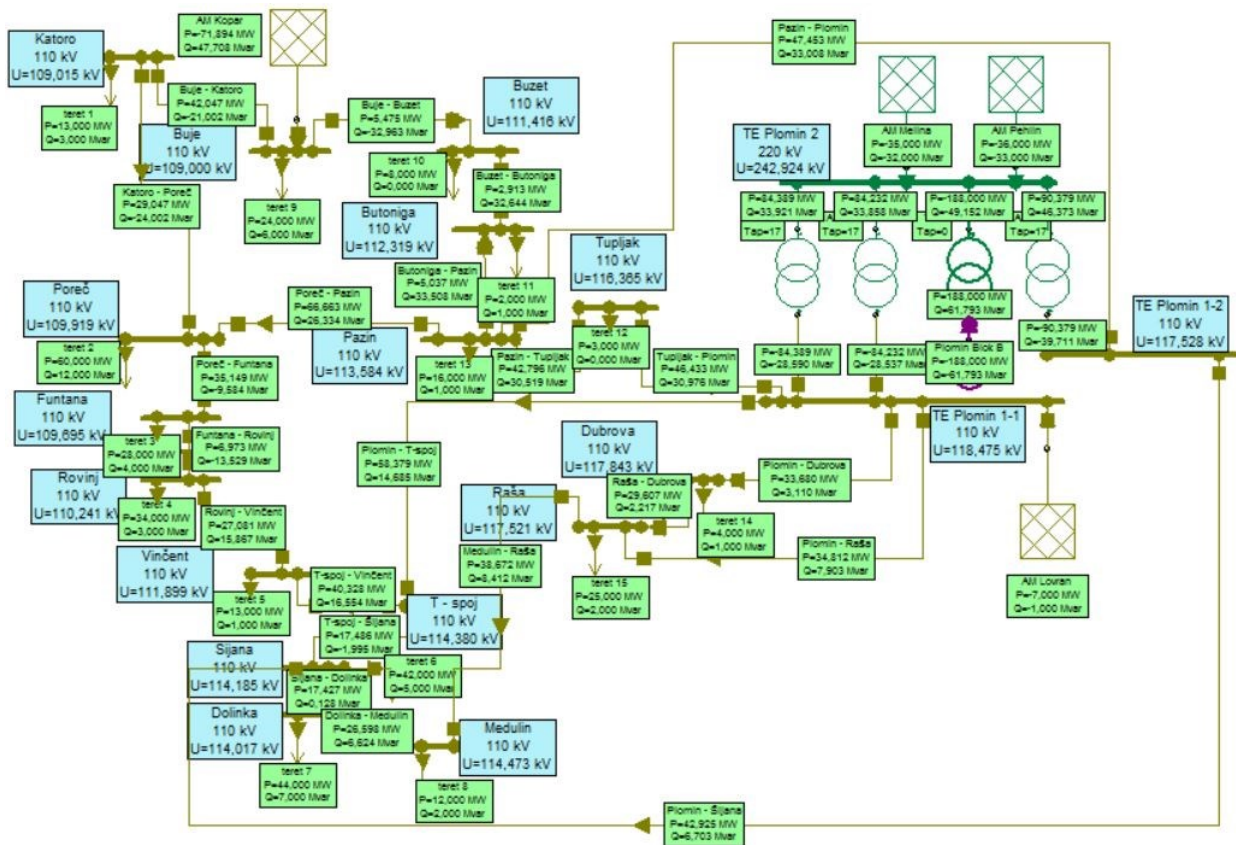




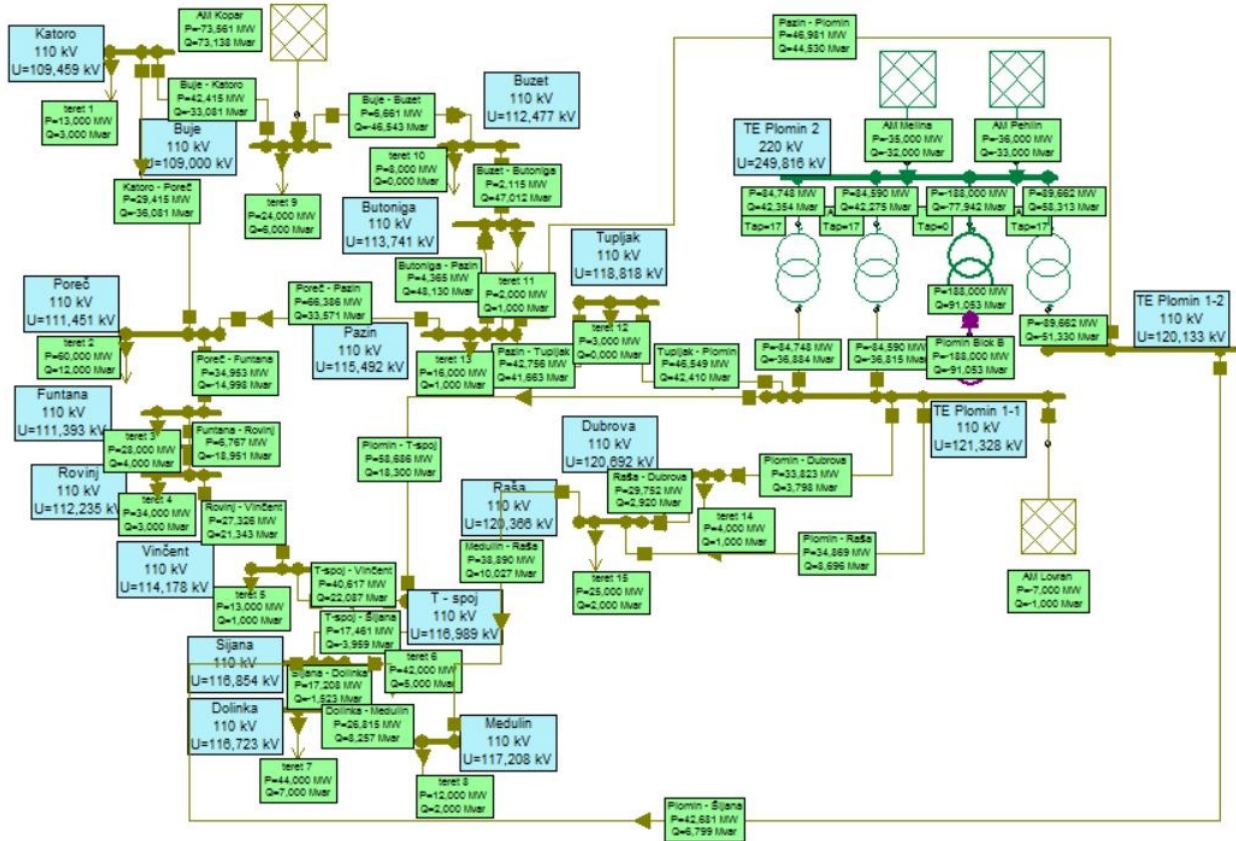
Slika 8.6. Tok snaga s faktorom snage 0,95 induktivno



Slika 8.7. Tok snaga s faktorom snage 1



Slika 8.8. Tok snaga s faktorom snage 0,95 kapacitivno



Slika 8.9. Tok snaga s faktorom snage 0,9 kapacitivno

### 8.3. Analiza i rezultati simulacija

Tablica 8.3. Naponske vrijednosti sabirnica pri različitim faktorima snage

Sabirnica	Faktor snage TE Plomin				
	Cosφ = 0,9 (induktivno)	Cosφ = 0,95 (induktivno)	Cosφ = 1	Cosφ = 0,95 (kapacitivno)	Cosφ = 0,9 (kapacitivno)
Buje [kV]	109	109	109	109	109
Butoniga [kV]	100,55	104,01	108,81	112,32	113,74
Buzet [kV]	102,6	105,19	108,79	111,42	112,48
Dolinka [kV]	91,82	98,32	107,37	114,02	116,72
Dubrova [kV]	94,74	101,45	110,87	117,84	120,69
Funtana [kV]	95,59	99,75	105,49	109,69	111,39
Katoro [kV]	105,29	106,39	107,91	109,06	109,46
Medulin [kV]	92,06	98,62	107,75	114,47	117,21
Pazin [kV]	97,88	102,49	108,89	113,58	115,49
Poreč [kV]	97,19	100,95	106,13	109,92	111,45
Raša [kV]	94,42	101,14	110,55	117,52	120,37
Rovinj [kV]	93,72	98,59	105,32	110,24	112,24
Šijana [kV]	92,29	98,71	107,63	114,19	116,85
Tupljak [kV]	96,36	102,19	110,35	116,37	118,82
Vincent [kV]	93,09	98,62	106,28	111,89	114,18
Plomin 1-1 [kV]	95,38	102,08	111,49	118,48	121,33
Plomin 1-2 [kV]	96,36	102,51	111,144	117,53	120,13
Plomin 2 [kV]	187,82	203,66	226,13	242,92	249,82

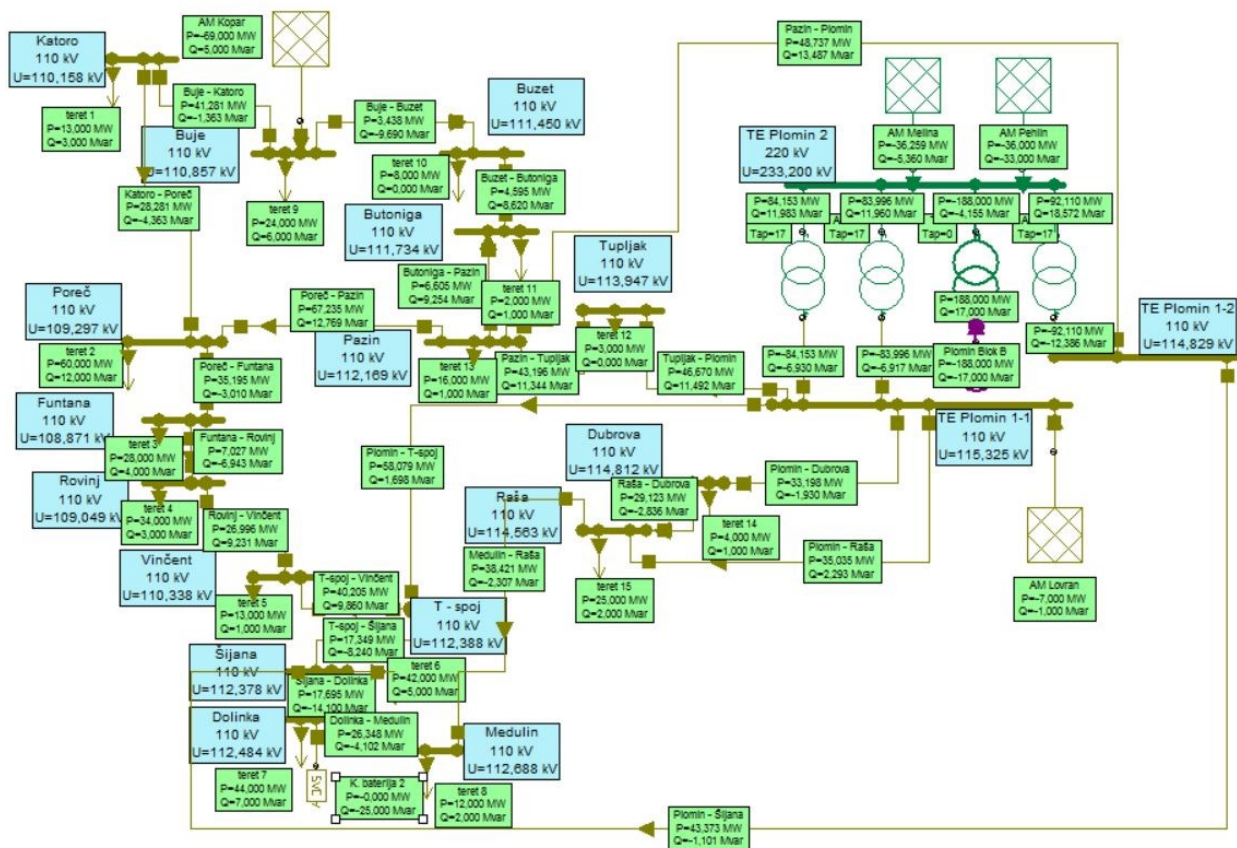
Iz tablice se može primjetiti da je najniži napon na sabirnici Dolinka, te je napravljena simulacija s kondenzatorskom baterijom u iznosu 25 Mvar na toj lokaciji. Dobiveni rezultati se mogu vidjeti na slici niže. Iduće lokacije u tablici koje imaju najniže napone su Medulin i Šijana što je očekivano s obzirom da su to susjedne sabirnice od sabirnice Dolinka. Na simulaciji se može vidjeti značajno poboljšanje u naponskim prilikama zapadnog dijela podsustava. Unatoč poboljšanju ističu se tri lokacije koje imaju napone niže od nazivnih veličina, a to su Funtana, Poreč i Rovinj.

S obzirom da kondenzatorske baterije mogu biti ugrađene na više mjesta u mreži razmatrane su dvije lokacije za ugradnju. Lokacija u tablici iznad koja ima najveći pad napona naspram iznosa

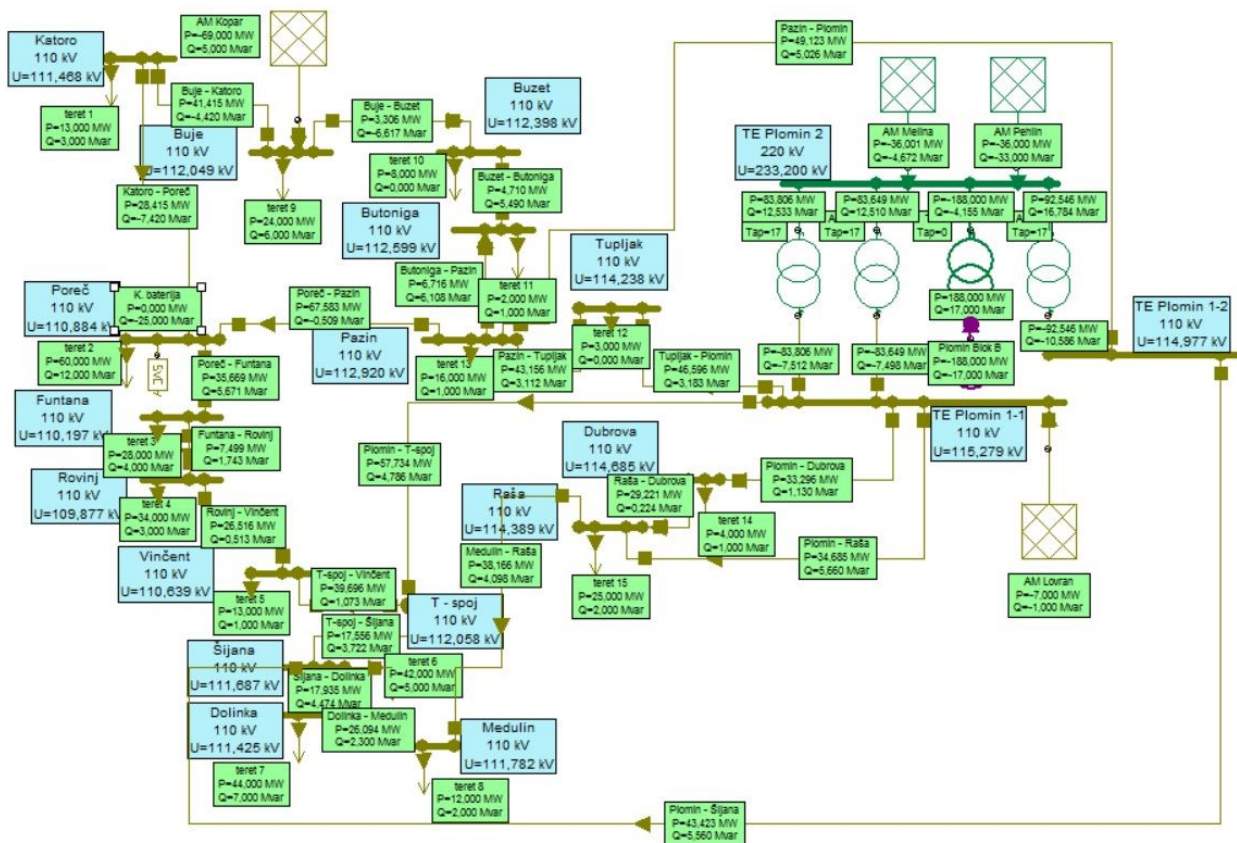


napona susjednih sabirnica je Poreč. U simulaciji s najlošijim naponskim prilikama ( $\cos\varphi=0,9$  induktivno) sabirnica Poreč ima oko 8 kV manji napon od susjedne sabirnice Katoro.

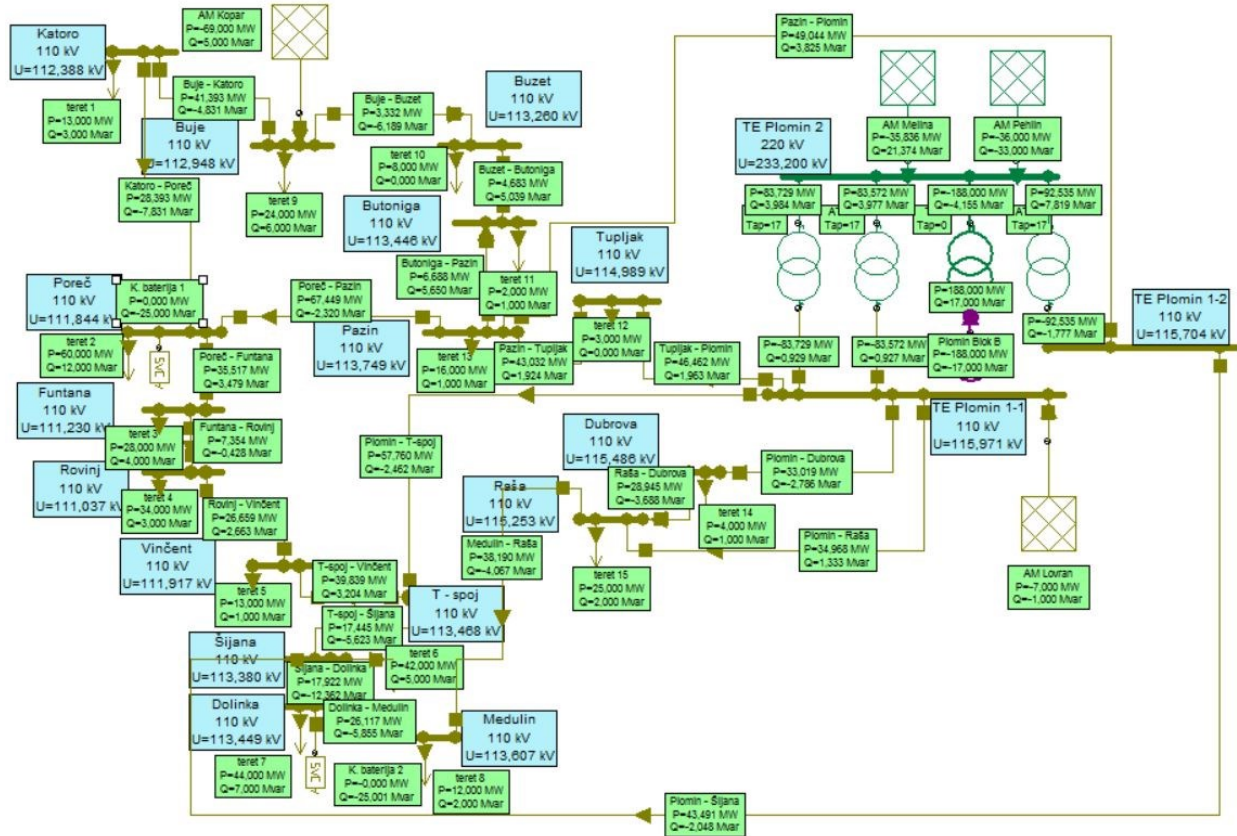
U prvobitnom proračunu tokova snaga, sabirnica sa najnižim naponom je Funtana, a nakon toga su Poreč i Rovinj. Dolazi se do zaključka da bi se optimalno naponsko stanje ostvarilo ugradnjom jedne baterije na području Medulina, Dolinke i Šijane, a druge baterije na području Poreča, Funtane i Rovinja. Kako bi se odredile točne optimalne lokacije potrebno je razmotriti još jedan faktor, a to je na kojoj sabirnici je najveća potrošnja. Time će se najmanje opterećivati vodovi s jalovom snagom. Uzimajući u obzir navedeno se odabiru lokacije za ugradnju Poreč i Dolinka. Izvršena je simulacija s kondenzatorskom baterijom u iznosu 25 Mvar na lokaciji Poreča, te se rezultat može vidjeti niže. Ugradnjom baterije samo na lokaciji Poreč se također dobiva znatno poboljšanje naponskih prilika, čak i bolje nego ugradnjom baterije na lokaciji Dolinke, međutim i dalje je lokacija Rovinj na nižem naponu od nazivnog. Potom je izvršena simulacija s baterijama u iznosu 25 Mvar na lokacijama Poreč i Dolinka, te se mogu primjetiti optimalne naponske prilike unatoč velikom opterećenju mreže.



Slika 8.10. Tokovi snaga s kondenzatorskom baterijom na sabirnici Dolinka



Slika 8.11. Tokovi snaga s kondenzatorskom baterijom na sabirnici Poreč



Slika 8.12. Tokovi snaga s kondenzatorskim baterijama na sabirnicama Poreča i Dolinke

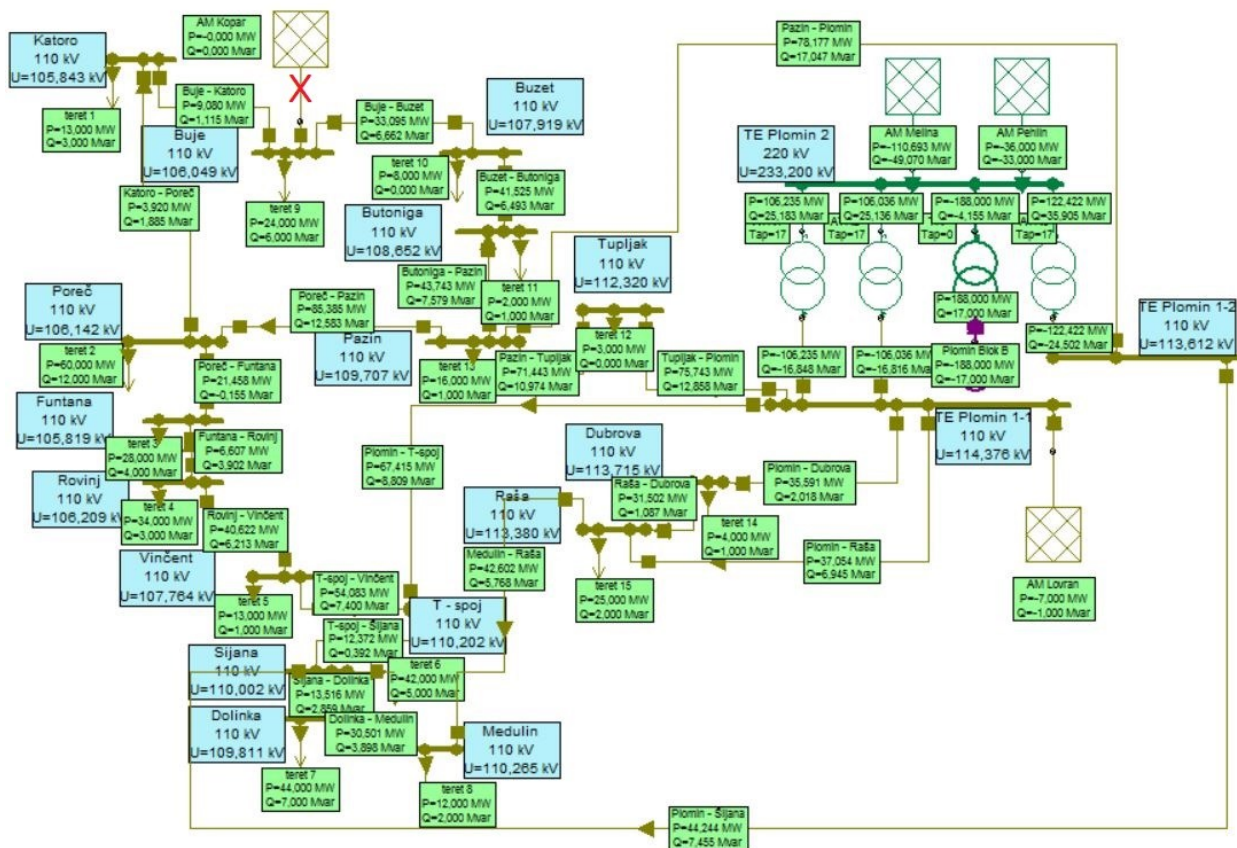
U idućoj tablici se vide naponske prilike ostvarene pomoću kompenzacije s kondenzatorskim baterijama.

*Tablica 8.4. Naponska stanja sa i bez kompenzacije*

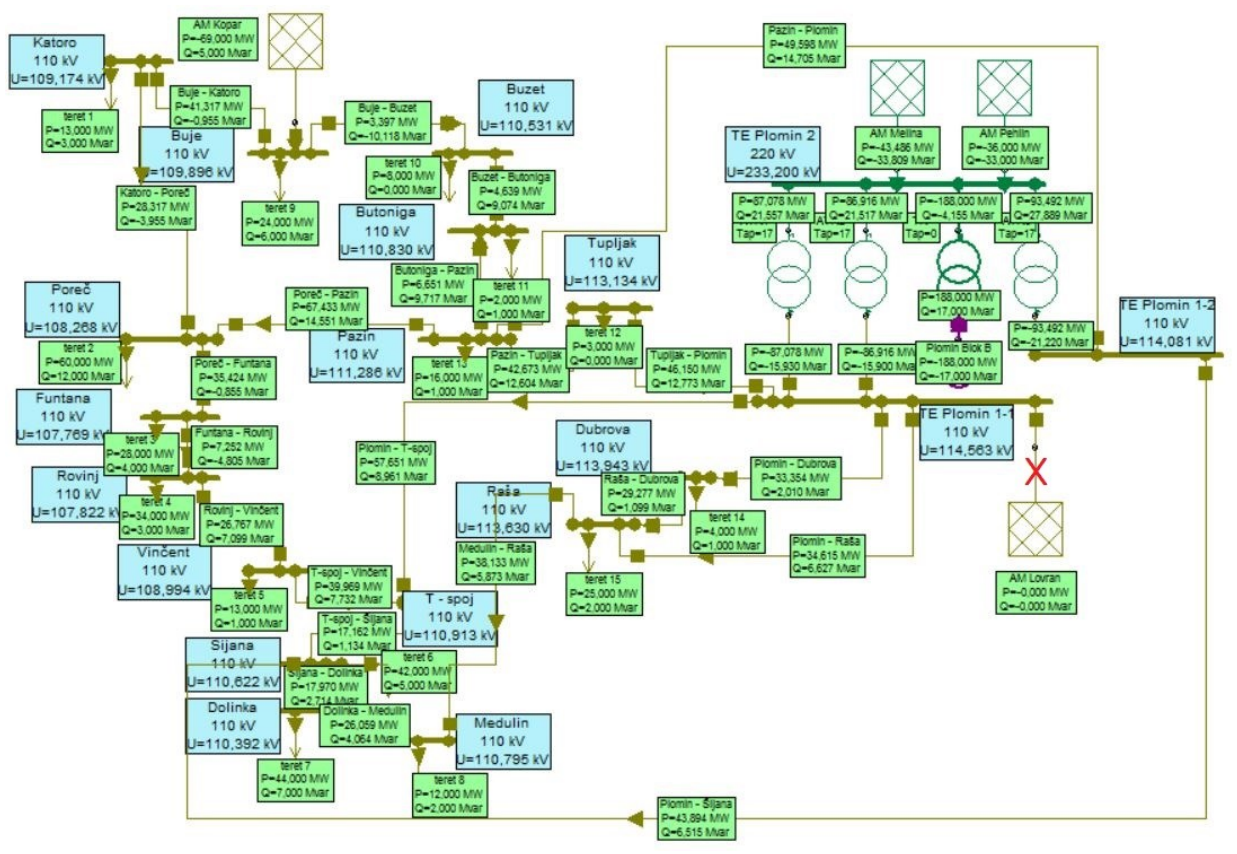
Sabirnica	Bez kompenzacije	25 Mvar kompenzacija na sabirnici Dolinka	25 Mvar kompenzacija na sabirnici Poreč	25 Mvar kompenzacija na sabirnici Dolinka i Poreč
Buje [kV]	109,93	110,86	112,05	112,95
Butoniga [kV]	110,86	111,73	112,59	113,45
Buzet [kV]	110,56	111,45	112,39	113,26
Dolinka [kV]	110,43	112,48	111,43	113,45
Dubrova [kV]	113,99	114,81	114,69	115,49
Funtana [kV]	107,81	108,87	110,19	111,23
Katoro [kV]	109,21	110,16	111,47	112,39
Medulin [kV]	110,84	112,69	111,78	113,61
Pazin [kV]	111,32	112,17	112,92	113,75
Poreč [kV]	108,3	109,29	110,88	111,84
Raša [kV]	113,69	114,56	114,39	115,25
Rovinj [kV]	107,86	109,05	109,88	111,04
Šijana [kV]	110,66	112,38	111,69	113,38
Tupljak [kV]	113,18	113,95	114,24	114,99
Vinčent [kV]	109,03	110,34	110,64	111,92
Plomin 1-1 [kV]	114,62	115,33	115,28	115,97
Plomin 1-2 [kV]	114,09	114,83	114,98	115,7
Plomin 2 [kV]	233,2	233,2	233,2	233,2

Kako bi se dobio dodatni uvid koliko kondenzatorske baterije utječu na naponska stanja i stabilnost podsustava napravljene su pojedinačne simulacije sa i bez kondenzatorskih baterija, ali sa zasebnim ispadima vodova Buje-Kopar, Lovran-Plomin i Melina/Pehlin-Plomin. Rezultati se mogu vidjeti na slikama i u tablici niže.

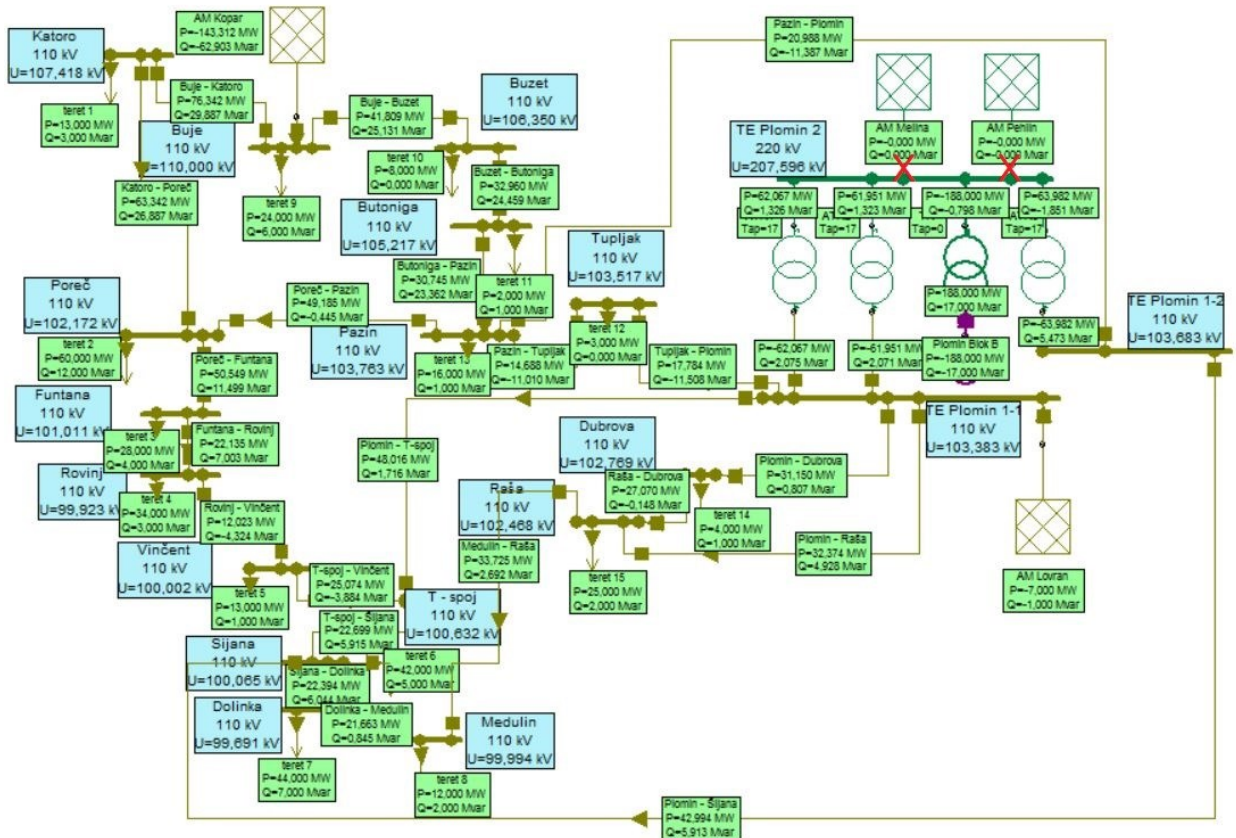




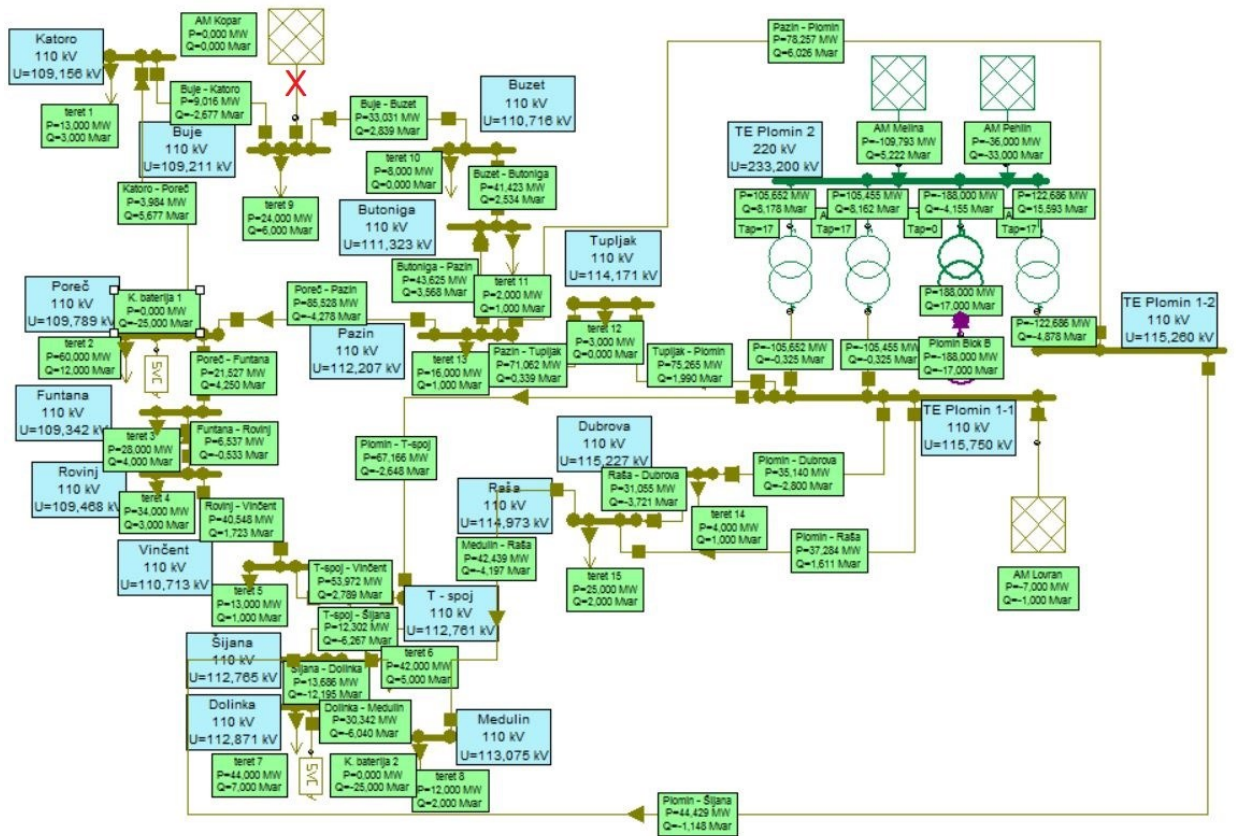
Slika 8.13. Tokovi snaga pri ispadu voda Buje-Kopar



Slika 8.14. Tokovi snaga pri ispadu voda Lovran-Plomin

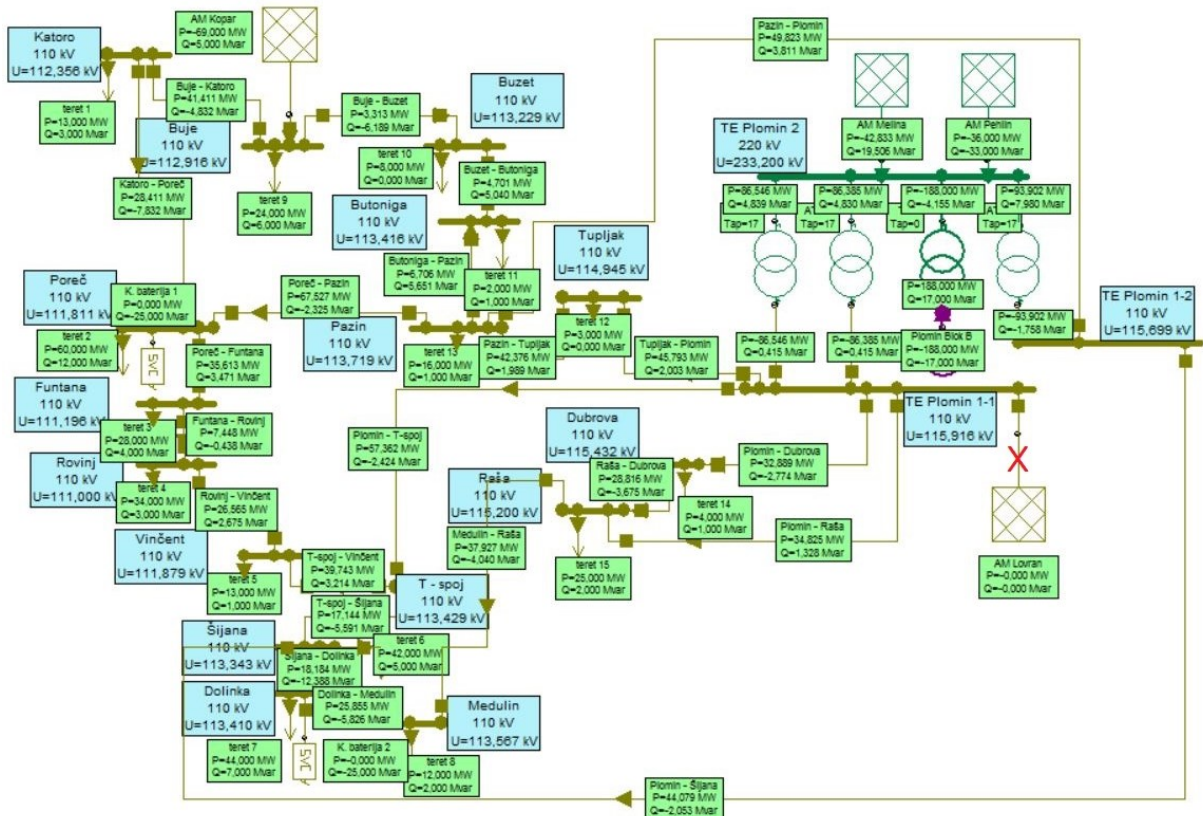


Slika 8.15. Tokovi snaga pri ispadu vodova Melina/Pehlin-Plomin

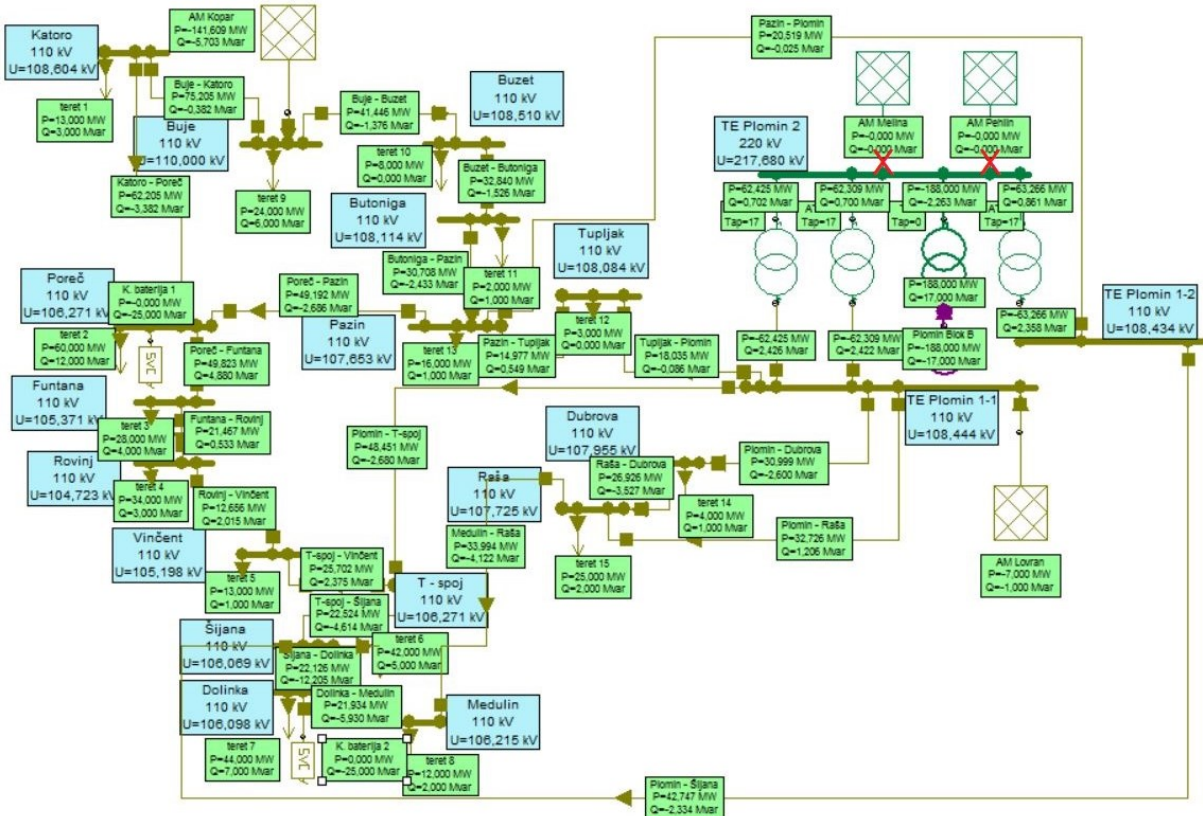


Slika 8.16. Tokovi snaga pri ispadu voda Buje-Kopar s kondenzatorskim baterijama u mreži





Slika 8.17. Tokovi snaga pri ispadu voda Lovran-Plomin s kondenzatorskim baterijama u mreži



Slika 8.18. Tokovi snaga pri ispadu vodova Melina/Pehlin-Plomin s kondenzatorskim baterijama u mreži

Tablica 8.5. Naponska stanja sa i bez kondenzatorskih baterija u mreži pri ispadu vodova

Sabirnica	Ispad voda Buje-Kopar		Ispad voda Lovran-Plomin	
	Bez k. baterija u mreži	S k. baterijama u mreži	Bez k. baterija u mreži	S k. baterijama u mreži
Buje [kV]	106,05	109,21	109,89	112,92
Butoniga [kV]	108,65	111,32	110,83	113,42
Buzet [kV]	107,92	110,72	110,53	113,23
Dolinka [kV]	109,81	112,87	110,39	113,41
Dubrova [kV]	113,72	115,23	113,94	115,43
Funtana [kV]	105,82	109,34	107,77	111,19
Katoro [kV]	105,84	109,16	109,17	112,36
Medulin [kV]	110,27	113,08	110,79	113,57
Pazin [kV]	109,71	112,21	111,29	113,72
Poreč [kV]	106,14	109,79	108,27	111,81
Raša [kV]	113,38	114,97	113,63	115,2
Rovinj [kV]	106,21	109,47	107,82	111
Šijana [kV]	110,02	112,77	110,63	113,34
Tupljak [kV]	112,32	114,17	113,13	114,95
Vinčent [kV]	107,76	110,71	108,99	111,88
Plomin 1-1 [kV]	114,38	115,75	114,56	115,92
Plomin 1-2 [kV]	113,61	115,26	114,08	115,69
Plomin 2 [kV]	233,2	233,2	233,2	233,2

Kao što je očekivano kondenzatorske baterije poboljšavaju naponske prilike kroz cijeli podsustav. Međutim, pri ispadu nekog od navedenih vodova se znatno otežava održavanje stabilnosti sustava, te se znatno povećavaju mogućnosti za naponski slom. Iako kondenzatorske baterije poboljšavaju naponsko stanje imaju malen utjecaj za sprječavanje naponskog sloma pri ispadu nekog od vodova. Problem leži u povezanosti podsustava s ostatkom mreže i manjku dodatnih pravaca za dobavu aktivne snage. Ako se opterećenja, koja podsustav Istre treba podnijeti tokom ljetnih mjeseci, nastave povećavati kondenzatorske baterije su praktično rješenje za suzbijanje tokova reaktivne snage i stabiliziranje iznosa napona, te se lako mogu proširiti, ali za slučaj ispada nekih od vodova je potrebno istražiti druga rješenja kako bi se spriječio naponski slom.

Tablica 8.6. Naponska stanja sa i bez kondenzatorskih baterija u mreži pri ispadu vodova

Sabirnica	Prekid vodova Melina/Pehlin-Plomin	
	Bez k. baterija u mreži	S k. baterijama u mreži
Buje [kV]	110	110
Butoniga [kV]	105,28	108,11
Buzet [kV]	106,35	108,51
Dolinka [kV]	99,69	106,09
Dubrova [kV]	102,77	107,96
Funtana [kV]	101,01	105,37
Katoro [kV]	107,42	108,6
Medulin [kV]	99,99	106,22
Pazin [kV]	103,76	107,65
Poreč [kV]	102,17	106,27
Raša [kV]	102,47	107,73
Rovinj [kV]	99,92	104,72
Šijana [kV]	100,07	106,07
Tupljak [kV]	103,52	108,08
Vincent [kV]	100	105,19
Plomin 1-1 [kV]	103,38	108,44
Plomin 1-2 [kV]	103,68	108,43
Plomin 2 [kV]	207,59	217,68

## 9. ZAKLJUČAK

Hrvatski prijenosni sustav se svake godine suočava s većim opterećenjem uzrokovanim ljetnom turističkom sezonom. Svake godine veliki broj turista posjećuje Hrvatsku, a temperature tokom ljeta su u prosjeku sve veće. U radu je obrađena tema stabilnosti elektroenergetskog sustava i naponskog sloma, te su obrađeni alati za održavanje stabilnosti kao što pogonske karte generatora, prigušnice, regulacijski transformatori i kondenzatorske baterije. Fokus ovog rada je bio prijenosni podsustav Istre i kako spriječiti naponski slom korištenjem kondenzatorskih baterija. Jedan od najčešćih uzroka naponskog sloma su preveliki protoci reaktivne energije koji nepotrebno opterećuju vodove i samim time smanjuju naponske razine. Kondenzatorske baterije predstavljaju praktično i jeftino rješenje za kompenzaciju jalove snage. Određeni potrošači zbog induktivnog otpora uzrokuju da struja vremenski kasni za naponom pri protjecanju kroz mrežu. Korištenjem kondenzatorskih baterija struja prethodi naponu, te se taj efekt koristi za poništavanje jalove snage u mreži. Snaga koja tereti mrežu u ljetnim mjesecima je uglavnom induktivnog tipa i kako bi se poništili nepoželjni tokovi snage potrebno je ugraditi kondenzatorske baterije na taktički odabrana mjesta. Mjesta koja se odabiru za ugradnju kondenzatorskih baterija moraju ostvariti što bolje naponske prilike. U tu svrhu je napravljena simulacija u Neplan programskom paketu s podacima kada je elektroenergetski podsustav Istre bio pod velikim opterećenjem. Također su napravljene dodatne simulacije s različitim faktorima snage TE Plomin kako bi se dobio bolji uvid u kritične lokacije. Simulacijama i analizom su uočene i istaknute lokacije koje bi najviše doprinijele naponskoj stabilnosti kada bi se u njih ugradile kondenzatorske baterije. Odabrane su lokacije Poreč i Dolinka za ugradnju kondenzatorskih baterija. Napravljene su simulacije tokova snaga s ugrađenim kondenzatorskim baterijama na odabranim lokacijama zasebno i zajedno. U simulaciji s kondenzatorskim baterijama na obje lokacije se mogu vidjeti optimalne naponske prilike pri velikom opterećenju mreže. Za kraj su napravljene pojedinačne simulacije s ispadima vodova Buje-Kopar, Lovran-Plomin i Melina/Pehlin-Plomin. Zaključuje se da kondenzatorske baterije pomažu u stabiliziranju naponskih prilika sustava pri velikim opterećenjima, ali za slučajeve ispada vodova je potrebno istražiti druga rješenja koja bi održavala stabilnost podsustava.

## 10. LITERATURA

- [1] Žurek, S.; Przygodzki, M.: „The Use of a Regulating Transformer for Shaping Power Flow in the Power System“, *Energies*, 16(9), 1548, Internet, 2023.
- [2] Sivaraman, P.; Sharmeela, C.; Thaiyal Nayagi, A.; Mahendran, R.: „Basic Electrical and Enstrumenation Engineering“, John Wiley & Sons, SAD, 2021.
- [3] P.Kundur, Power system stability and control, Electric power research institute, McGraw-HillInc.,Surrey, SAD, 1993.
- [4] Tang, Y.: „Voltage Stability Analysis of Power System“, Springer, Singapur, 2021.
- [5] Hrvatski operator prijenosnog sustava: „Mrežna pravila prijenonog sustava“, s Interneta, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2024\\_01\\_10\\_199.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2024_01_10_199.html)
- [6] Apostolov, A. i dr.: „Power system stability and control“, CRC Press, SAD, 2007.
- [7] Hosseinzadeh, N. i dr.: “Voltage Stability of Power Systems with Renewable-Energy Inverter-Based Generators: A Review”, *Electronics* 10(2), 115, 2021.
- [8] Rahman, M. i dr.: “Voltage sensitivity based site selection for PHEV charging station in commercial distribution system”, American International University-Bangladesh, Bangladeš, 2013.
- [9] Lis, R.: „Voltage Stability Assessment Using Bus P-Q Curve“, Wroclaw University of Technology, Poljska, 2013.
- [10] Vražić, M.: „Sinkroni stroj“, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [11] Mandić, I.; Tomljenović, V.; Pužar, M.: „Sinkroni i asinkroni električni strojevi“, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [12] HEP Opskrba: „Struktura udjela pojedinih izvora električne energije“, s Interneta, <https://www.hep.hr/opskrba/trziste-elektricne-energije/trziste/izvori-energije/1385>, 06.09.2024.
- [13] Heathcote, M.: „The J&P Transformer Book“, Newnes, Velika Britanija, 2007.
- [14] Sridhar, T.: „Application of Tap changers to Transformers“, Springer, Singapur, 2020.
- [15] Allan, D. i dr.: „Electric power transformer engineering“, CRC Press, SAD, 2007.
- [16] Ryen, K.; Rui, Ø.; Bengtsson, C.: „Application of Variable Shunt Reactors in High Voltage Networks“, CIGRE SC A2/C4 COLLOQUIUM, Švicarska, 2013.
- [17] Khalilnezhad, H. i dr.: „Countermeasures of Zero-missing Phenomenon in (E)HV Cable Systems“, *IEEE Transactions on Power Delivery* 33(4), 2055, Internet, 2018.
- [18] Bayliss, C.; Hardy, B.: „Transmission and Distribution Electrical Engineering“, Elsevier Science, Velika Britanija, 2007.
- [19] Markić, D.; Podgornik, A.; Pavić, I.: „Primjena i utjecaj kompenzacijskih uređaja u industrijskim mrežama“, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2017.

- [20] Sipl, D.: „Prijelazne pojave prilikom sklapanja kondenzatorskih baterija“, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2004.
- [21] Markić, D.: „Primjena kompenzacijskih uređaja u industrijskim mrežama“, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [22] Brunello, G.; Kasztenny, B.; Wester, C.: „Shunt Capacitor Bank Fundamentals and Protection“, Conference for Protective Relay Engineers, SAD, 2003.
- [23] HOPS: “Shema EES-a“, s Interneta, <https://www.hops.hr/shema-ees-a>, 08.09.2024.

## 11. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Povećanje opterećenja elektroenergetske mreže koje se povećava kroz godine zahtjeva rješenja za održavanje naponske stabilnosti u mreži. U ovom radu su obrađeni alati koji se koriste pri održavanju naponske stabilnosti. Za početak je obrađena tema stabilnosti mreže i navedena je podjela stabilnosti. Nakon toga je opisana tema naponskog sloma i stvarni slučaj naponskog sloma koji je mnoge ostavio bez napajanja. Obradene su teme idućih alata: pogonska karta generatora, prigušnice, regulacijski transformatori i kondenzatorske baterije. Za kraj su napravljene simulacije elektroenergetskog podsustava Istre u programskom paketu Neplan, te su pomoću simulacije odabrane poželjne točke za ugradnju kondenzatorskih baterija kako bi se ostvarile bolje naponske prilike u mreži.

**Ključne riječi:** naponska stabilnost, naponski slom, elektroenergetski podsustav Istre, kondenzatorske baterije, prijenosna mreža

## 12. ABSTRACT AND KEYWORDS

The increase in the load on the power grid, which has been increasing over the years, requires solutions to maintain voltage stability in the grid. In this paper, the tools used in supporting voltage stability are discussed. To begin with, the topic of network stability is addressed and the division of stability is specified. After that, the topic of voltage collapse and the actual case of a voltage collapse that left many without power was described. The topics of the following tools are covered: generator capability curve, reactors, regulation transformers and capacitor banks. Finally, simulations of the electric power subsystem of Istria were made in the Neplan software package, and with the help of the simulation, desirable locations for the installation of capacitor batteries were selected in order to achieve better voltage conditions in the network.

**Keywords:** voltage stability, voltage collapse, power subsystem of Istria, capacitor banks, transmission network