Analiza naponske stabilnosti

Mikulić, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:724806

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Diplomski studij

ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI

Diplomski rad

Hrvoje Mikulić

Osijek, 2017.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. OSNOVE PRIJENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE 2
   2.1. Model voda 2
   2.2. Prijenosne jednadžbe električnog voda 3
   2.3. Jalova snaga u elektroenergetskom sustavu 6
   2.4. Reguliranje napona u mreži 7
   2.5. Kompenzacija jalove snage 8
3. STABILNOST SUSTAVA 10
   3.1. Podjela stabilnosti 10
      3.1.1. Kutna stabilnost 11
      3.1.2. Frekvencijska stabilnost 15
4. NAPONSKA STABILNOST 17
   4.1. Podjela naponske stabilnosti 17
   4.2. Karakteristike EES-a 18
      4.2.1. P-V krivulje 18
      4.2.2. Utjecaj faktora snage na P-V karakteristike 19
      4.2.3. Q-V krivulje 21
   4.3. Kriteriji naponske stabilnosti 23
      4.3.1. $d\Delta Q/dV$ kriterij stabilnosti 23
      4.3.2. $d\mathrm{E}/dV$ kriterij stabilnosti 25
5. ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI 27
   5.1. Stabilnost sustava bez kompenzacije jalove snage 31
   5.2. Stabilnost sustava uz kompenzaciju jalove snage 36
6. Zaključak 41

LITERATURA 42

SAŽETAK 43

ABSTRACT 44

ŽIVOTOPIS 45

Prilozi 46

1. Uvod

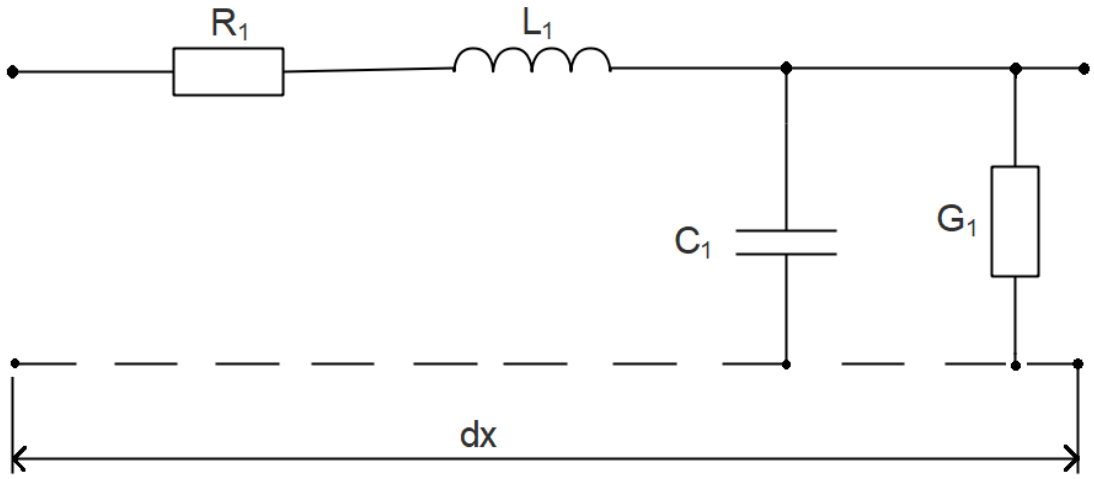
Potrošnja električne energije u svijetu konstantno se povećava zbog čega njeno dostavljanje i zadovoljavanje potreba potrošača postaje sve zahtjevnije. Pri prijenosu električne energije dolazi do preopterećenosti i podopterećenosti prijenosnih vodova zbog nejednolike potrošnje. Osim toga problem predstavljaju i mnogobrojni prekidi u mreži. Sve ovo treba uzeti u obzir kako bi se potrošačima bila osigurana neprekidna dostava električne energije. Kada se govori o dostavljanju električne energije potrošačima izuzetno je bitno održati konstantan napon u mreži. Zbog toga se rade analize stabilnosti sustava. Tema ovog rada bit će upravo analiza naponske stabilnosti sustava. Glavni dio rada sastoji se od četiri poglavlja. Prvo poglavlje prikazuje dobivanje prijenosnih jednadžbi koje su temelj prijenosa električne energije. Osim toga objašnjena je regulacija napona, s posebnim naglaskom na kompenzaciju jalove snage. U drugom je poglavlju definirana stabilnost sustava, te je prikazana podjela stabilnosti. Ukratko su prikazani načini određivanja kutne i frekvencijske stabilnosti, dok je naponska stabilnost temeljito definirana u sljedećem poglavlju. Treće poglavlje sadrži teoretski opis određivanja naponske stabilnosti sustava. Prikazani su primjeri P-V i Q-V krivulja kojima su određene granice naponske stabilnosti. Također je analizirana primjena $d\Delta Q/dV$ i dE/dV kriterija. U posljednjem poglavlju glavnog dijela rada, programskom simulacijom određivane su P-V i Q-V krivulje sustava. Na temelju njih su prikazane granice stabilnosti sustava. Te su granice mijenjane kompenzacijom jalove snage kondenzatorskom baterijom.

2. OSNOVE PRIJENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Prijenos električne energije postupak je koji podrazumijeva dostavljanje električne energije proizvedene u elektranama krajnjim potrošačima kojima je potrebna. Taj se prijenos obavlja putem prijenosne mreže koja je sastavljena od zračnih i kabelskih vodova, te rasklopnih postrojenja. Prijenosna mreža mora u svakom trenutku svakom pojedinom potrošaču osigurati pristup dovoljnoj količini električne energije.

2.1.Model voda

Kako bi se definirale električne prilike na vodu moraju se poznavati njegove četiri karakteristične veličine : jedinični djelatni otpor $R_1[\Omega/km]$, jedinični induktivitet $L_1[\mathrm{H}/km]$, jedinični kapacitet $C_1[\mathrm{F}/km]$ i jedinični odvod $G_1[\mathrm{S}/km]$. Svaki realan vod ima ova četiri parametra distribuirana kroz cijelu njegovu dužinu.



Slika 2.1. Jedinični parametri voda [1]

Na slici 2.1 vidljivo je da se u uzdužnoj grani nalaze jedinični djelatni otpor i jedinični induktivitet, dok su u poprečnoj grani jedinični kapacitet i jedinični odvod. Uzme li se u obzir frekvencija, moguće je izraziti jediničnu induktivnu reaktanciju X_1 i jediničnu kapacitivnu susceptanciju B_1.

$$X_1 = \omega\, L_1\ [\Omega/km] \tag{2-1}$$

$$B_1 = \omega\, C_1\ [\mathrm{S}/km] \tag{2-2}$$

Kompleksne simboličke vrijednosti parametara voda su jedinična poprečna impedancija Z_1 i jedinična uzdužna admitancija Y_1.

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1 \ [\Omega/km] \tag{2-3}$$

$$\bar{Y}_1 = G_1 + jB_1 \ [\mathrm{S}/km] \tag{2-4}$$

Korištenjem ovih parametara izvode se konstanta prodiranja $\bar{\gamma}$ i karakteristična impedancija Z_c.

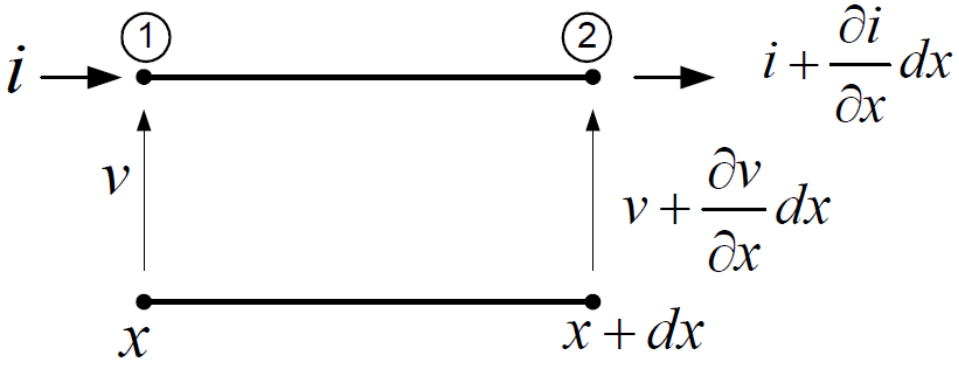
$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}_1 \, \bar{Y}_1} \ [1/km] \tag{2-5}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} \ [\Omega] \tag{2-6}$$

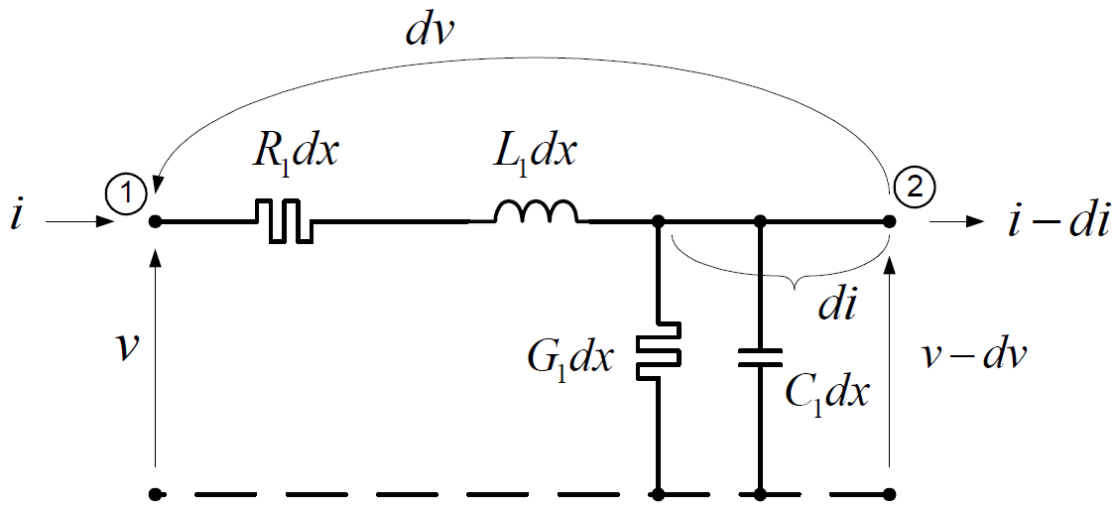
Ovime su izvedene sve karakteristične vrijednosti voda potrebne za određivanje električnih prilika na njemu. Sljedeći korak u analiziranju prijenosa električne energije je određivanje prijenosnih jednadžbi voda.

2.2. Prijenosne jednadžbe električnog voda

Nakon pravilnog modeliranja električnog voda sa svim karakterističnim veličinama, razmatra se prostorna i vremenska promjena napona i struje na njemu. Na slikama 2.2. i 2.3. analitički i grafički su prikazane te promjene.



Slika 2.2. Analitički prikaz promjene napona i struje na dužini voda dx [1]



Slika 2.3. Fizikalni prikaz promjene napona i struje na dužini voda dx [1]

Usporedbom analognih veličina sa slika 2.2. i 2.3. te sređivanjem tih jednadžbi dobivaju se telegrafske jednadžbe koje su date izrazima 2-7 i 2-8.

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = R_1 \cdot i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \tag{2-7}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_1 \cdot v + C_1 \frac{\partial v}{\partial t} \tag{2-8}$$

Njihov sažeti oblik koristi se radi daljnjeg proučavanja i određivanja prijenosnih jednadžbi.

$$\frac{d\bar{V}}{dx} = -\bar{Z}_1 \cdot \bar{I} \tag{2-9}$$

$$\frac{d\bar{I}}{dx} = -\bar{Y}_1 \cdot \bar{V} \tag{2-10}$$

Diferenciranjem i rješavanjem ovih jednadžbi dolazi se do općeg oblika prijenosnih jednadžbi.

$$\bar{V} = \bar{A}_1 \cdot e^{-\gamma x} + \bar{A}_2 \cdot e^{\gamma x} = \bar{A}_1 \cdot e^{-(\alpha + j\beta)x} + \bar{A}_2 \cdot e^{(\alpha + j\beta)x} \tag{2-11}$$

$$\bar{I} = \bar{B}_1 \cdot e^{-\gamma x} + \bar{B}_2 \cdot e^{\gamma x} = \bar{B}_1 \cdot e^{-(\alpha + j\beta)x} + \bar{B}_2 \cdot e^{(\alpha + j\beta)x} \tag{2-12}$$

Ovakav opći oblik prijenosnih jednadžbi dokazuje da su struja i napon proizvod superpozicije dvaju valova suprotnih smjerova gibanja. Ovisno o daljnjim potrebama prijenosne se jednadžbe mogu iskazati u tri oblika. Svaki od tih oblika ima dva analogna prikaza. Prvi prikaz ako su nam poznati uvjeti (struja i napon) na početku i drugi ako su nam poznati uvjeti na kraju voda. Oblici Ia i Ib koriste se za prikazivanje valne prirode napona i struje. [1]

$$\bar{V}(\mathrm{x}) = \frac{1}{2}(\bar{V}_1 + \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_1) \cdot e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\bar{V}_1 - \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_1) \cdot e^{\gamma x}$$

$$\bar{I}(\mathrm{x}) = \frac{1}{2}(\bar{I}_1 + \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_c}) \cdot e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\bar{I}_1 - \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_c}) \cdot e^{-\gamma x} \qquad (2\text{-}13)$$

$$\bar{V}(\mathrm{x}) = \frac{1}{2}(\bar{V}_2 + \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_2) \cdot e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\bar{V}_2 - \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_2) \cdot e^{-\gamma x}$$

$$\bar{I}(\mathrm{x}) = \frac{1}{2}(\bar{I}_2 + \frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}_c}) \cdot e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\bar{I}_2 - \frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}_c}) \cdot e^{-\gamma x} \qquad (2\text{-}14)$$

Iz oblika IIa i IIb određuju se efektivne vrijednosti napona i struja bilo gdje na vodu. Njima se može odrediti i veličina i faza.

$$\bar{V}(\mathrm{x}) = \bar{V}_1 \cdot ch\bar{\gamma}x \; - \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_1 \cdot sh\bar{\gamma}x$$

$$\bar{I}(\mathrm{x}) = \bar{I}_1 \cdot ch\bar{\gamma}x - \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_c} \cdot sh\bar{\gamma}x \qquad (2\text{-}15)$$

$$\bar{V}(\mathrm{x}) = \bar{V}_2 \cdot ch\bar{\gamma}x + \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_2 \cdot sh\bar{\gamma}x$$

$$\bar{I}(\mathrm{x}) = \bar{I}_2 \cdot ch\bar{\gamma}x + \frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}_c} \cdot sh\bar{\gamma}x \qquad (2\text{-}16)$$

Ukoliko su poznati struja i napon na jednom kraju voda jednadžbama IIIa i IIIb možemo odrediti struju i napon na drugom kraju.

$$\bar{V}_2(\mathrm{x}) = \bar{V}_1 \cdot ch\bar{\Theta} \; - \bar{Z} \cdot \bar{I}_1 \cdot \frac{sh\bar{\Theta}}{\bar{\Theta}}$$

$$\bar{I}_2(\mathrm{x}) = \bar{I}_1 \cdot ch\bar{\Theta} - \bar{V}_1 \cdot \bar{Y} \cdot \frac{sh\bar{\Theta}}{\bar{\Theta}} \qquad (2\text{-}17)$$

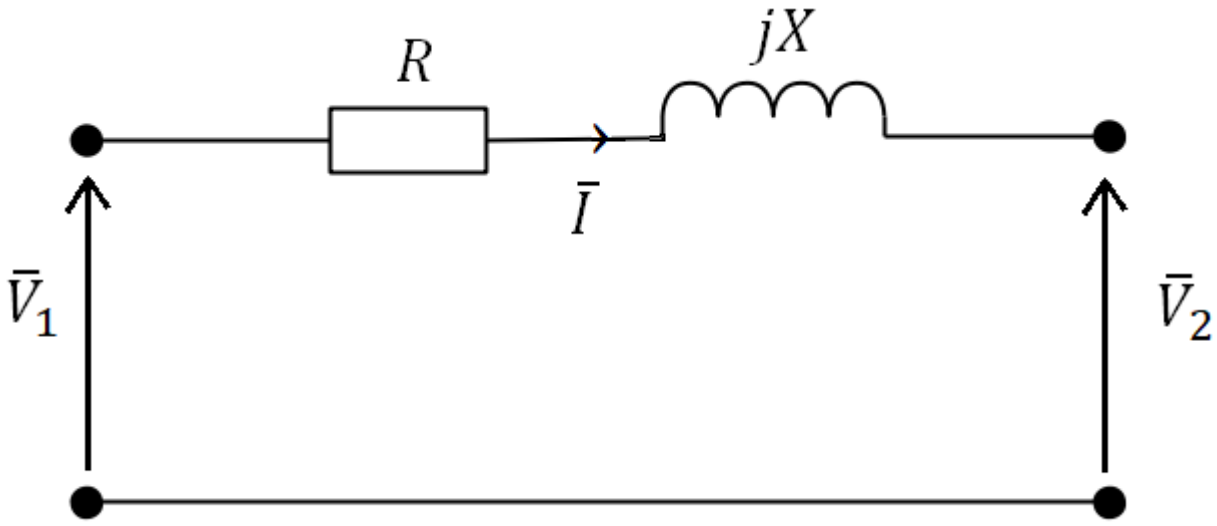
$$\bar{V}_1(\mathrm{x}) = \bar{V}_2 \cdot ch\bar{\Theta} + \bar{Z} \cdot \bar{I}_2 \cdot \frac{sh\bar{\Theta}}{\bar{\Theta}}$$

$$\bar{I}(\mathrm{x}) = \bar{I}_2 \cdot ch\bar{\Theta} + \bar{V}_2 \cdot \bar{Y} \cdot \frac{sh\bar{\Theta}}{\bar{\Theta}} \qquad (2\text{-}18)$$

2.3. Jalova snaga u elektroenergetskom sustavu

Snaga koja se koristi u izmjeničnim strujnim krugovima sastoji se od induktivne i djelatne komponente. Jalova snaga zaslužna je za fazni pomak između struje i napona u mreži a ovisi o frekvenciji mreže. U prijenosu energije jalova snaga ima negativan utjecaj na vodove i druge elemente prijenosne mreže u kojima izaziva gubitke. Iz tog je razloga vrlo bitno što više iznos jalove snage približiti nuli. Problem kod toga je to što je jalova snaga potrebna je za prijenos djelatne snage.

Za promatranje utjecaja snage na elektroenergetski sustav može se krenuti od shematskog prikaza uzdužne grane voda kako je prikazalo na slici 2.4.



Slika 2.4. Shematski prikaz uzdužne grane voda

Snagu na kraju voda za slučaj sa slike 2.4. dobiva se prema izrazu (2-19)

$$\bar{S}_2 = \bar{I}^* \cdot \bar{V}_2 \tag{2-19}$$

Uzimajući u obzir kako je prividna snaga sastavljena od djelatne i jalove komponente iz izraza (2-19) daje se izraz za struju :

$$\bar{\mathrm{I}} = \frac{P - jQ}{\bar{V}} \tag{2-20}$$

Iz ohmovog zakona znamo da je pad napona na trošilu jednak umnošku njegovog otpora i struje koja njime prolazi. Osim toga uzimajući u obzir da su naponi i snage na početku i na kraju voda približno jednaki dolazi se do izraza (2-21)

$$\Delta\bar{V} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{\bar{V}} + j\frac{X \cdot P - R \cdot Q}{\bar{V}} \tag{2-21}$$

Uzme li se u obzir činjenica da je kut između izvora i potrošača zanemariv, približno je jednak iznosu sinusa tog kuta.

$$\delta = sin\delta = \frac{\Delta V_{im}}{\bar{V}} = \frac{X \cdot P}{\bar{V}^2} \tag{2-22}$$

Kod prijenosnih se sustava djelatni otpor može zanemariti, jer je višestruko manji od reaktancije stoga uzdužni pad napona računamo kao omjer umnoška reaktancije i jalove snage mreže te napona mreže.[2]

$$\Delta V_{re} = \frac{X \cdot Q}{\bar{V}} \tag{2-23}$$

Iz izraza (2-22) i (2-23) jasno je vidljiv utjecaj snage na mrežu. Promjenom djelatne snage u mreži mijenja se kut napona, dok promjena jalove snage direktno utječe na razinu napona.Iznos napona proporcionalan je jalovoj snazi u mreži. Drugim riječima povećanjem jalove snage porast će napon u mreži, dok će njenim smanjivanjem i napon pasti. Kako je cilj prijenosa energije osigurati konstantan napon u mreži važno je ove tokove snaga ograničiti i minimalizirati, jer svaka promjena snage smanjuje kvalitetu napona. Ipak ovakav odnos napona i jalove snage koristi se pri regulaciji napona.

2.4.Reguliranje napona u mreži

Regulacija napona podrazumijeva kontroliranje i promjenu iznosa vrijednosti napona u elektroenergetskom sustavu. Pri tome se uvijek radi o nazivnom naponu. Nazivni je napon onaj napon pri kojem svi elementi mreže rade optimalno. To znači da su pri njemu javljaju najmanji gubitci, odnosno najveća je korisnost sustava. Svako odstupanje od nazivnog napona predstavlja povećanje gubitaka koje se manifestira kroz promjenu iznosa struje što uzrokuje zagrijavanje, naprezanje izolacije, gubitke djelatne snage i mnoge druge. Pošto je u praksi gotovo nemoguće održati napon konstantnim, potrebno je regulirati ga kako bi njegov iznos bio što bliži vrijednosti

nazivnog napona. Dozvoljeno odstupanje od nazivnog napona visokonaponske mreže u normalnim pogonskim uvjetima prikazano je u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Dozvoljeno odstupanje nazivnog napona VN mreže [3]

Nazivni napon	Odstupanje	Dozvoljena vrijednost napona
400 kV	+5% -10%	360 - 420 kV
220 kV	±10%	198 - 242 kV
110 kV	±10%	99 - 121 kV

2.5.Kompenzacija jalove snage

Kao što se vidi iz izraza (2-23) tok jalove snage izaziva promjenu napona mreže. Kako bi ograničili jalovu snagu potrebno ju je kompenzirati. Jalova snaga može biti induktivnog ili kapacitivnog karaktera. Ta dva karaktera suprotno djeluju na napon mreže, te se njihovi učinci međusobno poništavaju. Kompenzacija jalove snage podrazumijeva izjednačavanje kapacitivne i induktivne jalove snage. Ovo je temeljni princip na kojem je zasnovana regulacija napona u mreži. Najjednostavniji primjeri kompenzacije u praksi su prigušnica i kondenzatorska baterija. U slučaju dugog podopterećenog voda javljaju se kapacitivne struje poprečne grane koje uzrokuju porast napona, te je napon na kraju voda veći nego na početku. Ta se pojava naziva Ferrantijev efekt. Kako bi se spustila razina napona potrebno je kompenzirati višak kapacitivne jalove snage. To se rješava paralelnim spajanjem prigušnice na podopterećeni vod. Prigušnica se ponaša kao izvor induktivne energije, odnosno potrošač kapacitivne energije. Na ovaj se način smanjuje razina kapacitivne jalove snage, a samim tim i napon voda. Analogno ovome ako se u krugu javlja višak induktivne jalove snage, potrebno je priključiti kondenzatorsku bateriju koja je izvor kapacitivne jalove snage. Ovakva vrsta kompenzacije koristi se jer je izuzetno ekonomična za ugradnju i održavanje, te su gubitci djelatne snage minimalni. Problem je količina jalove snage koju daje sustavu konstantna, te se stoga ovakvi elementi koriste za stacionarnu kompenzaciju i nisu prigodni za sustave gdje jalova snaga često varira.

Na mjestima gdje kondenzatorske baterije i prigušnica nisu prikladne koriste se dinamički kompenzatori jalove snage. Među dinamičkim kompenzatorima prevladavaju sinkroni strojevi. Sinkroni kompenzator jedan je takav uređaj. To je u suštini sinkroni motor koji radi bez opterećenja. Iz tog se razloga ne koriste za mehaničku pretvorbu energije, nego isključivo za regulaciju jalove snage u mreži.

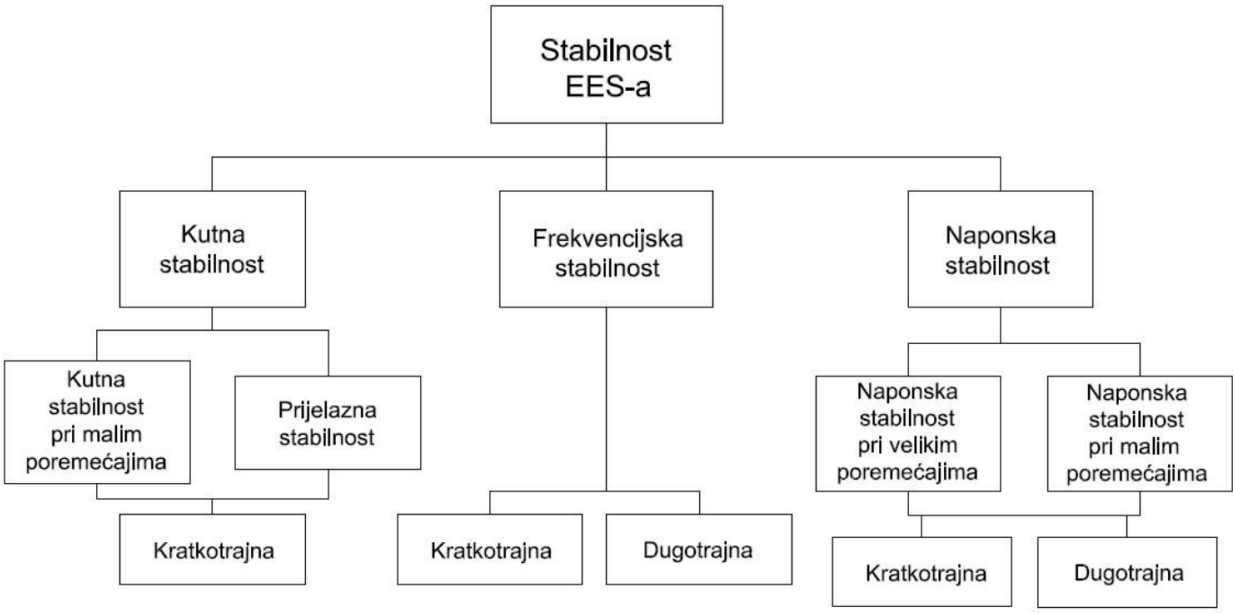
Promjenom uzbude u njegovim namotima može uzimati jalovu snagu iz mreže ili ju davati u mrežu. Kada sinkroni kompenzator radi poduzbuđen, ponaša se kao potrošač induktivne jalove snage, odnosno u mrežu daje kapacitivnu jalovu snagu. S druge strane ako je preuzbuđen iz mreže će uzimati kapacitivnu, tj. generira induktivnu jalovu snagu u mrežu. Velika prednost sinkronih kompenzatora je brza i laka prilagodba uvjetima u sustavu, no pošto im je cijena vrlo visoka ne predstavljaju idealno rješenje za kompenzaciju jalove snage. Osim sinkronih uređaja jalova se snaga može kompenzirati regulacijskim transformatorima, te u današnje vrijeme sve popularnijim FACTS (Flexible AC transmission system) uređajima.

3. STABILNOST SUSTAVA

Porast potrošnje električne energije i sve veća prisutnost obnovljivih izvora energije problem stabilnost elektroenergetskog sustava čine znatno kompleksnijim. Stabilnost elektroenergetskog sustava definira se kao sposobnost sustava da sa zadanim početnim uvjetima, zadrži stanje ravnoteže nakon utjecaja poremećaja, pri čemu će parametri sustava ostati jednaki. [4] Drugim riječima ne smiju biti vidljive promjene u sustavu nakon poremećaja u odnosu na stanje prije njega. Postizanje stabilnosti elektroenergetskog sustava otežava činjenica da je sustav sam po sebi nelinearan, i da mu se parametri konstantno mijenjaju. Uz to u sustavu se javljaju i poremećaji koji remete stabilnost. Ti poremećaji mogu biti mali i veliki. Pod male poremećaje spada promjena opterećenja sustava koja se konstantno događa i sustav joj se mora stalno prilagođavati. Primjer velikog poremećaja bio bi kratki spoj na dalekovodu ili ispad generatora. Kako bi se zadovoljio kriterij stabilnosti sustava nužno je da u oba slučaja sustav nastavi normalno funkcionirati.

3.1.Podjela stabilnosti

Pošto je stabilnost elektroenergetskog sustava vrlo složena i zahtjevna, potrebno ju je kategorizirati ovisno o vrstama poremećaja koji se mogu pojaviti u sustavu. Cilj kategorizacije je lakše razumijevanje nastalih problema, te samim tim dolazak do odgovarajućeg rješenja. Kako bi se napravila adekvatna podjela stabilnosti potrebno je razmotriti uzroke nastanka nestabilnosti sustava. Svaki od tih uzroka predstavlja specifičan problem kojem je potrebno pristupiti na jedinstven način. Stoga se stabilnost elektroenergetskog sustava dijeli na kutnu stabilnost, frekvencijsku stabilnost i naponsku stabilnost kako je prikazano na slici 3.1. Ovakva podjela pokazuje koje se veličine promatraju u analiziranju pojedine vrste nestabilnosti.



Slika 3.1. Podjela stabilnosti sustava [4]

U ovom su poglavlju opisane kutna i frekvencijska stabilnost, dok je naponska stabilnost detaljno obrađena u sljedećem poglavlju.

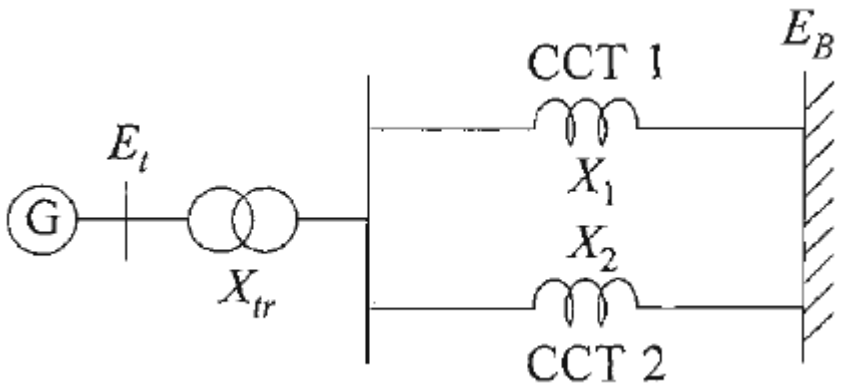
3.1.1. Kutna stabilnost

Pojam kutne stabilnosti odnosi se na svojstvo svih sinkronih generatora u sustavu da nakon poremećaja ostanu u sinkronizmu. Ovisna je o sposobnosti svakog pojedinog generatora da održi ravnotežu između okretnog magnetskog polja i okretanja rotora. Ukoliko jedan generator ispadne iz sinkronizma dovodi u pitanje stabilnost sustava. Ispad iz sinkronizma obično se može vidjeti kroz 2 do 3 sekunde nakon poremećaja koji ju je uzrokovao.

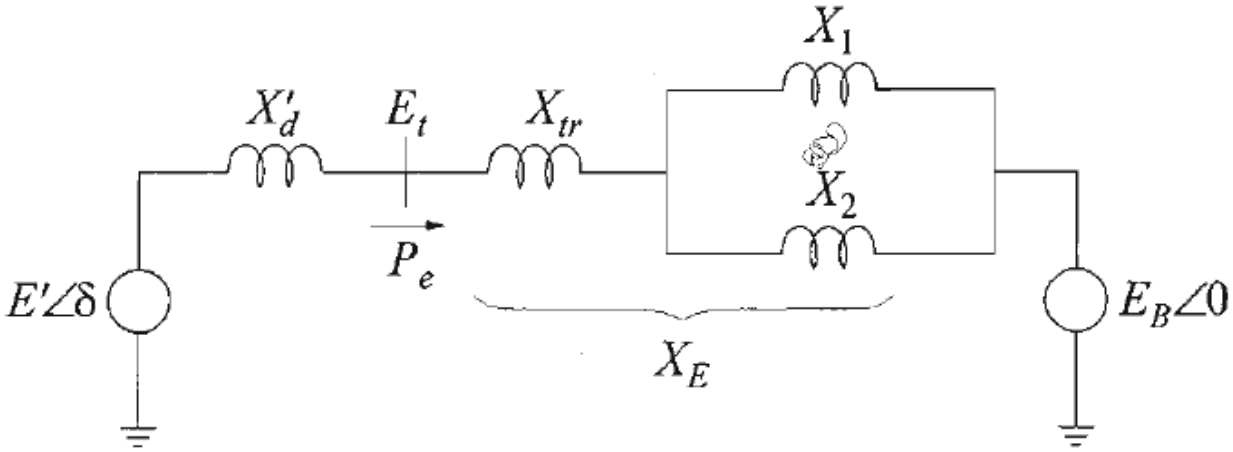
Kutna se stabilnost može podijeliti na dvije podvrste :

- Kutna stabilnost pri malim opterećenjima
- Prijelazna (tranzijentna) stabilnost

Da bi sustav imao kutnu stabilnost pri malim poremećajima mora ostati u sinkronizmu pri malim poremećajima uzrokovanim varijacijama u proizvodnji i potrošnji. Prijelazna je stabilnost sposobnost sustava da ostane u sinkronizmu nakon velikog poremećaja u mreži. Za razumijevanje tranzijentne stabilnosti može se krenuti od jednostavnog sustava prikazanog na slikama 3.2. i 3.3.



Slika 3.2. Generator napaja veliki sustav predstavljen beskonačnom sabirnicom [5]



Slika 3.3. Ekvivalentna shema sustava [5]

Reaktancija $X^{'}_{d}$ predstavlja tranzijentnu reaktanciju, X_{tr} reaktanciju transformatora, X_1 i X_2 reaktancije voda, a kut δ je kut rotora. Zbog jednostavnijeg prikaza reaktancije ovog sustava prikazuju ukupnom reaktancijom X_T.

$$X_T = X^{'}_{d} + X_{tr} + \frac{X_1 + X_2}{2} \tag{3-1}$$

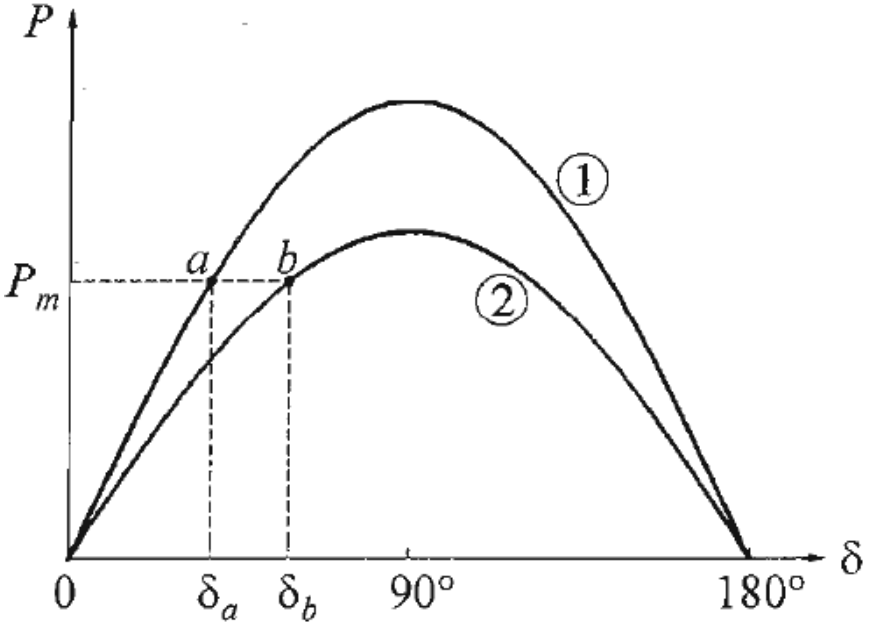
Električna snaga koju predaje generatora sada se definira kao :

$$P_e = \frac{E^{'} \cdot E_B}{X_T} \cdot sin\delta \tag{3-2}$$

Također je moguće odrediti i maksimalnu snagu koju taj sustav može prenijeti.

$$P_{max} = \frac{E^{'} \cdot E_B}{X_T} \tag{3-3}$$

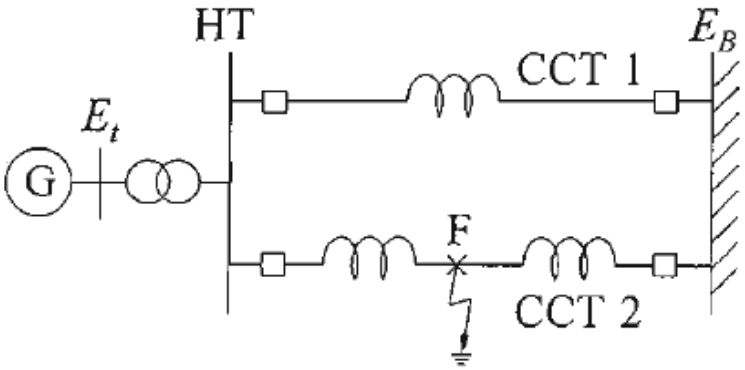
Za određivanje tranzijente stabilnosti najbitnije su krivulje $P-\delta$ koje prikazuju ovisnost djelatne snage i kuta rotora.



Slika 3.4. $P-\delta$ krivulje sustava [5]

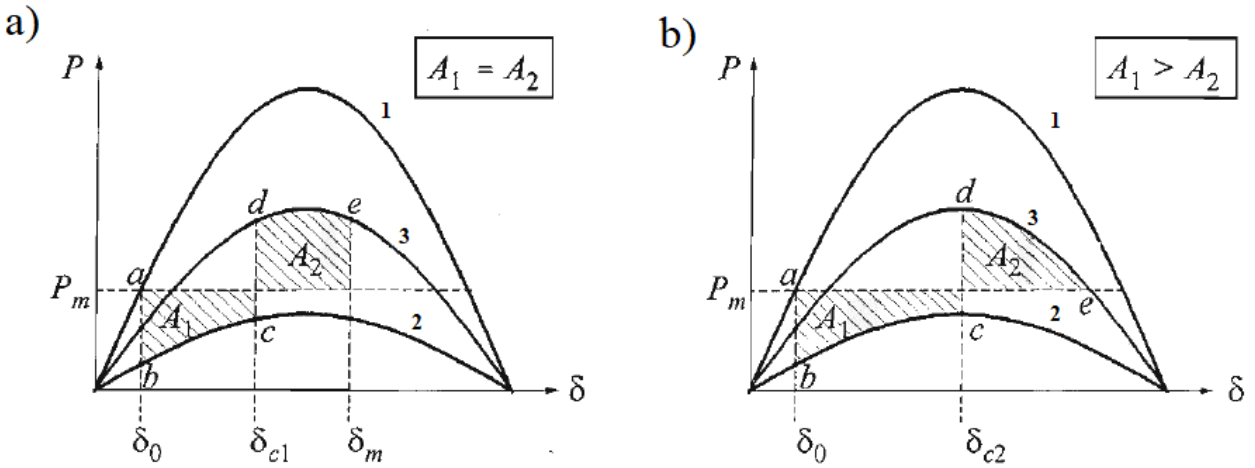
Na slici 3.4 prikazane su dvije krivulje. Prva krivulja označena brojem 1 prikazuje odnos $P-\delta$ kada u sustavu prikazanom na slici 3.2. rade oba paralelna voda. S ulaznom mehaničkom snagom P_m sustav radi u radnoj točki a kojoj odgovara kut rotora δ_a. Ako je jedan od paralelnih vodova isključen reaktancija X_T će se povećati i maksimalna snaga koju sustav može prenijeti postaje manja. To je prikazano krivuljom 2 na slici 3.4.

Stabilnost sustava može se analizirati uvođenjem trofaznog kratkog spoja na jednom od paralelnih vodova kako je prikazano na slici 3.5



Slika 3.5. Kratki spoj u sustavu [5]

U slučaju ovakvog kvara djelatna snaga koju generator predaje sustavu biti će znatno manja nego u normalnom pogonu. Na slici 3.6. prikazane su $P-\delta$ krivulje za tri slučaja. Prvi slučaj je normalan pogon prije pojave kratkog spoja, druga krivulja pokazuje sustav za vrijeme kratkog spoja, a u posljednjem slučaju je prikazan sustav nakon otklona kratkog spoja. Kratki spoj se otklanja isključivanjem prekidača, a vrijeme otklona ovisi o brzini djelovanja relejima i prekidača.



Slika 3.6. $P-\delta$ krivulje u slučaju trofaznog kratkog spoja [5]

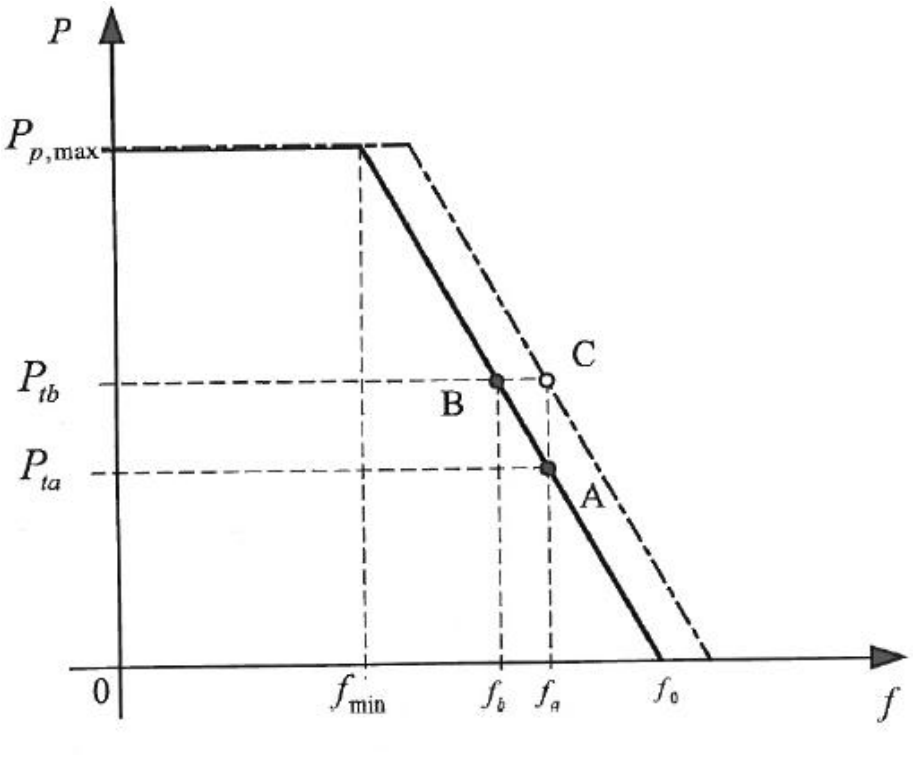
Na slici 3.6. u slučaju *a)* vrijeme otklona kvara je δ_{c1}, dok je u slučaju *b)* to vrijeme δ_{c2} , a u oba je slučaja mehanička snaga P_m konstantna. Ako se zanemare gubitci statora snage P_m i P_e su jednake prije pojave kvara. Kada dođe do kratkog spoja sustav prelazi iz radne točke a u točku b. Zbog inercije kut rotora se ne može momentalno promijeniti. Kako je sada snaga P_m veća od snage P_e rotor ubrzava do prorade zaštite, odnosno do radne točke c. Nakon što je vod na kojem se pojavio kratki spoj isključen sustav prelazi u radnu točku d. U ovoj je točki mehanička snaga manja od električne pa rotor usporava. Pošto je brzina rotora veća od sinkrone brzine kut rotora nastavlja rasti dok se ne potroši energija dobivena za vrijeme ubrzanja. Ta je energija prikazana površinom A_1 na slici 3.6. dok površina A_2 predstavlja potrošenu energiju. Uslijed potrošnje energije sustav prelazi u radnu točku e u kojoj su A_1i A_2 jednaki. Električna je snaga i dalje veća od mehaničke, rotor i dalje usporava, a brzina mu pada ispod sinkrone brzine čime opada i kut δ. Sustav se ponovno vraća u radnu točku d i dalje se nastavlja kretati po krivulji 2. Na ovom primjeru vidimo da je sustav stabilan jer se uslijed pojave trofaznog kratkog spoja samostalno vratio generator u sinkronizam.

U slučaju *b)* kada sustav dođe u radnu točku e površina A_1 veća je od površine A_2 zbog dužeg vremena otklanjanja kvara. Sada je u toj točki brzina rotora veća od sinkrone brzine i kut rotora nastavlja rasti. Porastom kuta δ sustav prelazi u područje gdje je mehanička snaga veća od električne i rotor ponovo ubrzava, te sustav ispada iz sinkronizma. Ovaj je sustav zbog toga nestabilan.

3.1.2. Frekvencijska stabilnost

Frekvencijska je stabilnost svojstvo sustava da održi konstantnu frekvenciju nakon teškog poremećaja rezultat kojeg je značajna neuravnoteženost proizvodnje i potrošnje. [4] Samim tim ovisna je o sposobnosti sustava da uravnoteži proizvodnju i potrošnju s minimalnim ispadanjem tereta. Ako ne postoji takva ravnoteža proizvodnje i potrošnje dolazi do promjene frekvencije. Veliki poremećaji uzrokuju velika odstupanja frekvencije napona i tokova snaga zbog čega se za promatranje frekvencijske stabilnosti koriste drukčije metode nego za naponsku i kutnu stabilnost. Frekvencijska stabilnost može biti kratkotrajna i dugotrajna. Kratkotrajna stabilnost podrazumijeva poremećaje kraće od jedne minute, dok vremenski periodi dugotrajne stabilnosti mogu trajati i do nekoliko sati. [4]

Uz frekvencijsku stabilnost povezani su i pojmovi primarne i sekundarne regulacije. Iz promjene opterećenja u vremenu proizlazi potreba za regulacijom mehaničke snage turbine. Ovakva regulacija turbina naziva se primarnom regulacijom. Kada nje ne bi bilo prilikom povećanja opterećenja brzina turbine bi se smanjila, te bi samim tim opala i frekvencija mreže. S druge strane smanjenjem opterećenja dolazi do povećanja broja okretaja , te analogno tome i frekvencije. Primarna regulacija turbine prikazana je na slici 3.7. punom linijom.



Slika 3.7. Karakteristika primarne regulacije turbine [8]

Najveći problem kod primarne regulacije je to što frekvenciju uslijed promjene opterećenja ne može dovoljno približiti nazivnoj vrijednosti. To može stvoriti probleme u sustavu jer ovisno o sastavu potrošača i frekventnom faktoru potrošnje smanjenje frekvencije od 1 Hz može dovesti do smanjenja isporučene djelatne snage i do 5%. Kako bi se to izbjeglo uvedena je sekundarna regulacija. Sekundarna regulacija podrazumijeva pomjeranje karakteristike primarne regulacije u stranu kako bi ju što više približili nazivnoj frekvenciji. Ukoliko je na karakteristici primarne regulacije sa slike 3.7. na nazivnoj frekvenciji početno opterećenje bilo P_{ta} sustav je radio u radnoj točki A. Prilikom povećanja opterećenja na iznos P_{tb} sustav bi prešao u radnu točku B, a frekvencija sustava bi opala na vrijednost f_b. Tada se sekundarnom regulacijom karakteristika pomjera u desno dok radna točka ne dođe iznad nazivne frekvencije. Iscrtkana karakteristika odgovara karakteristici sekundarne regulacije. Na taj je način održana konstantna frekvencija unatoč povećanju opterećenja.

4. NAPONSKA STABILNOST

Naponska stabilnost svojstvo je elektroenergetskog sustava da u svakom trenutku održi konstantan napon svih čvorišta. To podrazumijeva stabilan napon nakon pojave poremećaja u sustavu. Ovisna je o sposobnosti sustava da zadovolji potražnju električne energije potrošača. Ukoliko ne postoji ravnoteža potrošnje i proizvodnje jalove energije dolazi do nestabilnosti sustava. Ta se nestabilnost manifestira u obliku naponskih propada, a u ekstremnim slučajevima i naponskog sloma. Kriterij naponske stabilnosti je takav da u slučaju porasta napona u bilo kojoj točki sustava, mora biti injektirana jalova snaga u tu točku. Ako pak u nekoj točki napon opadne a jalova energija se injektira dolazi do nestabilnosti sustava. [5]

4.1.Podjela naponske stabilnosti

Naponska se stabilnost može se promatrati s aspekta ozbiljnosti nastalih poremećaja. Takvom podjelom dobiva se :

- Naponska stabilnost pri malim poremećajima
- Naponska stabilnost pri velikim poremećajima

Naponska stabilnost pri malim poremećajima podrazumijeva sposobnost sustava da održi konstantan napon kada je izložen manjim smetnjama kao što je povećanje opterećenja sustava. Na ovu stabilnost utječu karakteristike opterećenja, kao i uređaji za upravljanje sustavom u određenom trenutku. Linearizacijom jednadžbi sustava mogu se dobiti podatci o čimbenicima koji utječu na stabilnost sustava.

Naponska stabilnost pri velikim poremećajima predstavlja sposobnost sustava da održi stabilan napon kada je izložen velikim poremećajima kao što je ispad proizvodne jedinice. Određena je karakteristikama trošila i sustava, te međudjelovanjem sustava za upravljanje i zaštitu. Određivanje ovakve stabilnosti uključuje analizu nelinearnog odziva sustava promatranjem međudjelovanja uređaja kao što su motori i regulacijske preklopke transformatora u vremenu i do nekoliko desetaka minuta. Ovakva se pojava prikazuje u vremensko frekvencijskoj domeni.

Osim ozbiljnosti nastalih poremećaja u sustavu naponska se stabilnost može podijeliti s obzirom na duljinu vremenskog perioda pojava u sustavu. Tako se naponska stabilnost dijeli na :

- Kratkoročna stabilnost
- Dugoročnu stabilnost

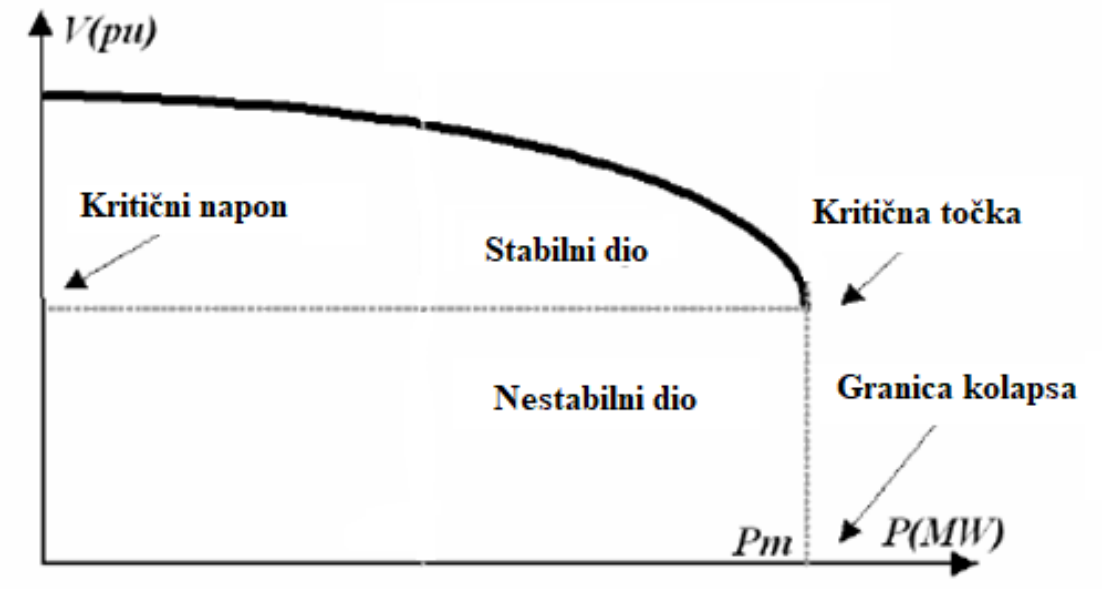
Kratkotrajna stabilnost podrazumijeva pojave u sustavu reda nekoliko sekundi do maksimalno 10, kao što su prorada zaštite u sustavu ili HVDC pretvarača. Dugoročna stabilnost obuhvaća pojave trajanja nekoliko do nekoliko minuta npr. automatski regulatori proizvodnje. Za proučavanje dugoročne stabilnosti frekvencija sustava mora biti konstantna, a oscilacije sinkronizacije sinkronih strojeva moraju biti prigušene. Tako se mogu uočiti dugi spori poremećaji i neuravnoteženost proizvodnje i potrošnje jalove energije. [5]

4.2.Karakteristike EES-a

Karakteristike elektroenergetskog sustava pokazatelji su njegove stabilnosti. Kada se radi o naponskoj stabilnosti relevantne karakteristike su P-V i Q-V krivulje. Iz njih se može vidjeti ovisnost napona sustava o djelatnoj i jalovoj snazi, te odrediti granice stabilnosti sustava.

4.2.1. P-V krivulje

Analiza naponske stabilnosti sustava obuhvaća promatranje ponašanja napona voda na strani trošila pri prijenosu djelatne snage. Takva se ovisnost napona o promjeni djelatne snage prikazuje u P-V krivuljama.

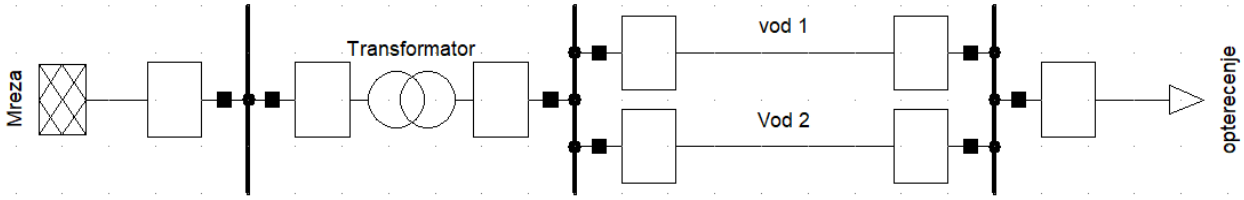


Slika 4.1. V-P krivulja [6]

Na slici 4.1. prikazana je jedna takva V-P krivulja. Na njoj se može vidjeti kako povećanjem djelatne snage koja se prenosi vodom dolazi do smanjenja napona na vodu. Djelatna snaga P_o predstavlja radnu točku sustava. Snaga P_m maksimalna je snaga koja se može prenijeti ovim sustavom. Daljnje povećavanje djelatne snage destabilizira sustav i dolazi do sloma napona. S krivulje možemo vidjeti i liniju kritičnog napona. To je napon koji će se javiti na vodu prijenosom maksimalne snage tim vodom. Sve iznad te linije na grafu smatra se stabilnim područjem, dok je područje ispod nje nestabilno. P-V krivulje korisne su jer se iz njih jasno može vidjeti s kolikom dodatnom djelatnom snagom možemo opteretiti vod, a da sustav ostane stabilan.

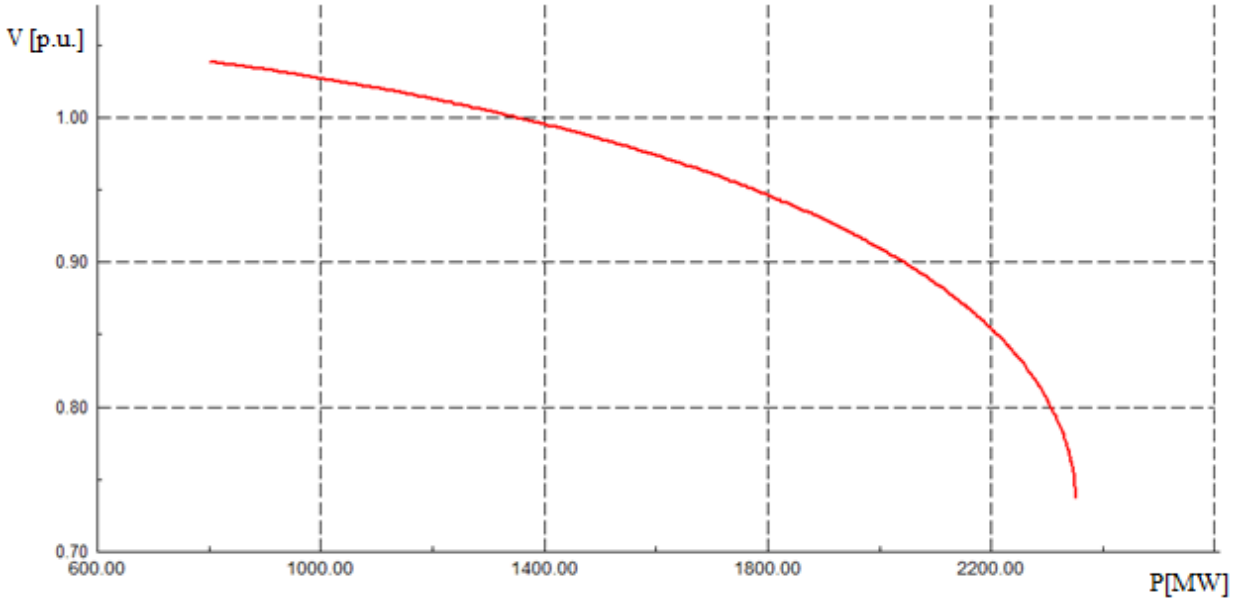
4.2.2. Utjecaj faktora snage na P-V karakteristike

Kao što je prethodno opisano u poglavlju 2.5. kompenzacija jalove snage direktno utječe na napon u mreži, te količinu djelatne snage koja se može prenijeti tim sustavom. U ovom će poglavlju to biti prikazano na praktičnom primjeru u programu DIgSILENT PowerFactory. Na slici 4.2. prikazan je jednostavan sustav u kojem je na nadomjesnu mrežu preko transformatora spojeno opterećenje od 800 MW. Pri tome je mreža postavljena kao referentni čvor.



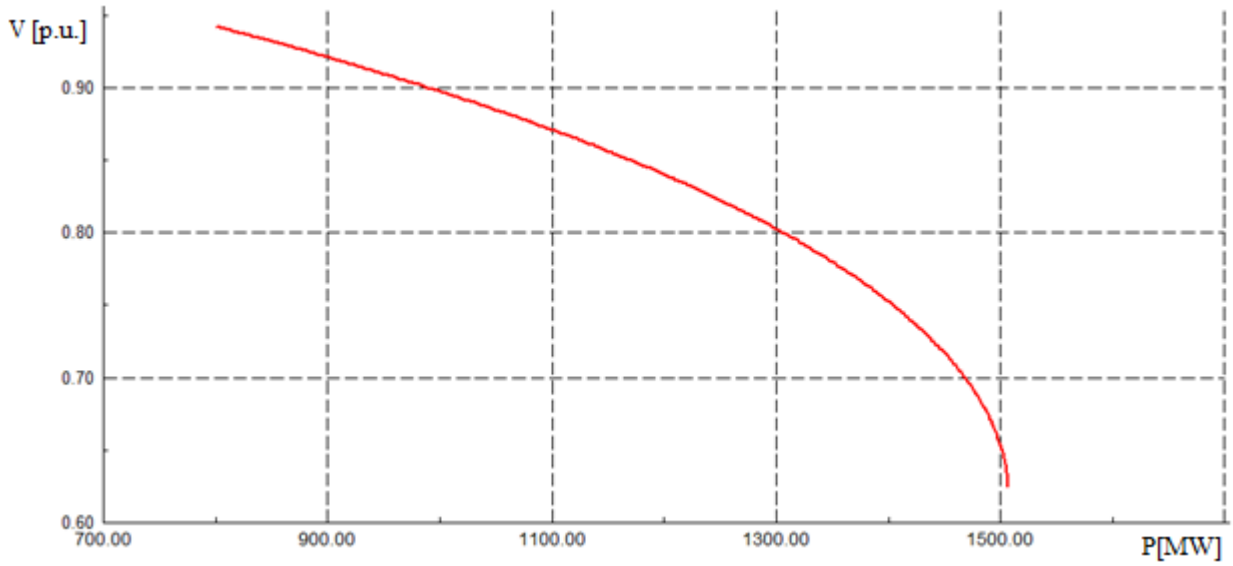
Slika 4.2. Opterećenje napajano nadomjesnom mrežom

Na slici 4.4. prikazana je V-P karakteristika kada je faktor snage opterećenja $cos\varphi = 1$. Tada se radi o čisto djelatnom trošilu koje ne utječe na jalovu snagu sustava, odnosno ona je određena parametrima prijenosne mreže. Maksimalna snaga koja se u tom slučaju može prenijeti ovim sustavom je P_{max1}=2352 MW, pri čemu je napon 0.74 p.u.

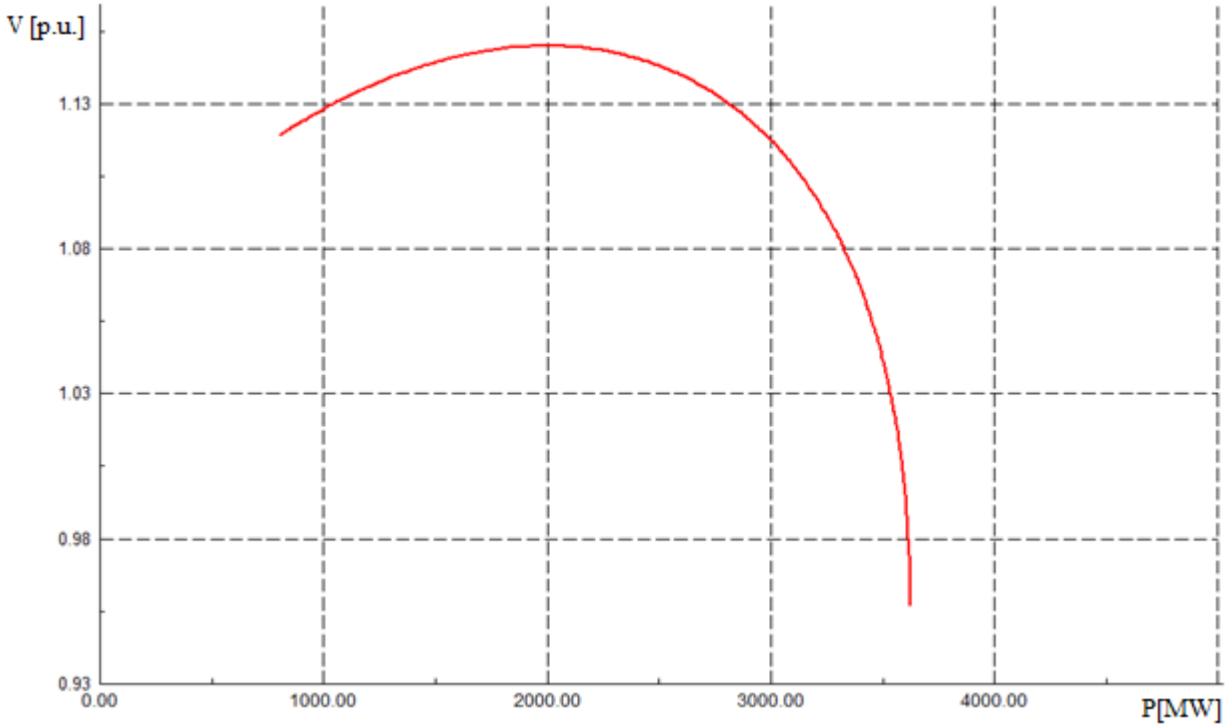


Slika 4.3. P-V krivulja faktora snage $cos\varphi = 1$

Promjenom faktora snage trošila na $cos\varphi = 0.9$ induktivno situacija u sustavu se drastično mijenja. Pošto je mreža sama po sebi induktivnog karaktera, kada se tome pridoda induktivan karakter opterećenja u sustavu će prevladavati induktivna jalova snaga. To uzrokuje smanjenjem djelatne snage koja se može prenijeti tim sustavom i smanjenjem napona sustava. Maksimalna snaga koju sustav u tom slučaju može prenijeti je P_{max2}=1507 MW, odnosno 0.64 P_{max1}, s kritičnim naponom 0.63 p.u.



Slika 4.4. P-V krivulja faktora snage $cos\varphi = 0.9$ (ind)

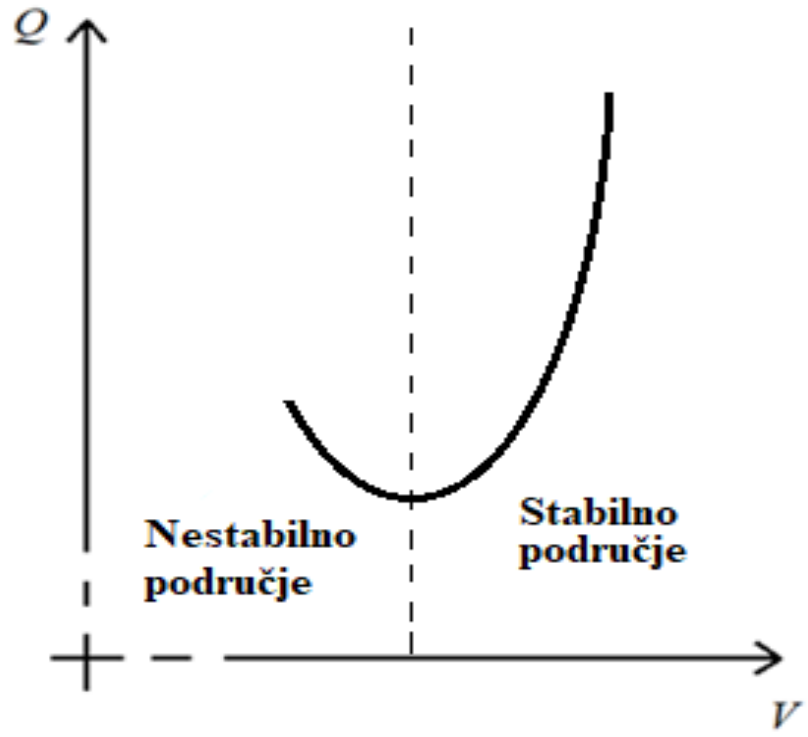


Slika 4.5. P-V krivulja faktora snage $cos\varphi = 0.9$ (cap)

U trećem je slučaju faktor snage $cos\varphi = 0.9$ kapacitivno. Ovdje dolazi do kompenzacije jalove snage sustava, te se razina napona u početku povećava i doseže svoj vrhunac od 1.15 p.u. Nakon toga napon počinje opadati sve do točke naponskog sloma. Maksimalna snaga u ovom slučaju iznosi P_{max3}=3624 MW, odnosno 1.54 P_{max1}, a kritični napon iznosi 0.96 p.u. Što se prijenosa snage tiče, najpovoljniji je treći slučaj, odnosno kapacitivan karakter opterećenja, jer se tada može prenijeti znatno veća snaga.

4.2.3. Q-V krivulje

Druga bitna karakteristika pri definiranju naponske stabilnosti sustava je Q-V krivulja. Na njoj je prikazana promjena napona na vodu prilikom injektiranja jalove energije u sustav.



Slika 4.6. Q-V krivulja [6]

Slika 4.6. prikazuje standardnu Q-V krivulju. Najniža točka na krivulji predstavlja granicu stabilnosti sustava, odnosno kritični napon.Udaljenost između Sve točke desno od granične vrijednosti na krivulji su stabilne jer se povećavanjem injektirane jalove snage postiže porast napona. Vidljivo je da se u točkama lijevo od granične vrijednosti napon smanjuje porastom dodane jalove snage. Pošto svi upravljački sustavi, kao preklopka regulacijskog transformatora, rade s pretpostavkom da će povećanjem jalove snage u sustavu rasti napon, kada to nije slučaj oni će neispravno raditi te zbog toga dolazi do nestabilnosti sustava. U tom slučaju dolazi do naponskog sloma. Iz Q-V krivulje može odrediti kolika je jalova snaga potrebna kako bi se održala određena naponska razina. Ipak glavni razlog za koji se te krivulje koriste je određivanje stabilnosti sustava, odnosno jalove energije radne točke sustava u odnosu na jalovu energiju pri kritičnom naponu sustava.

4.3.Kriteriji naponske stabilnosti

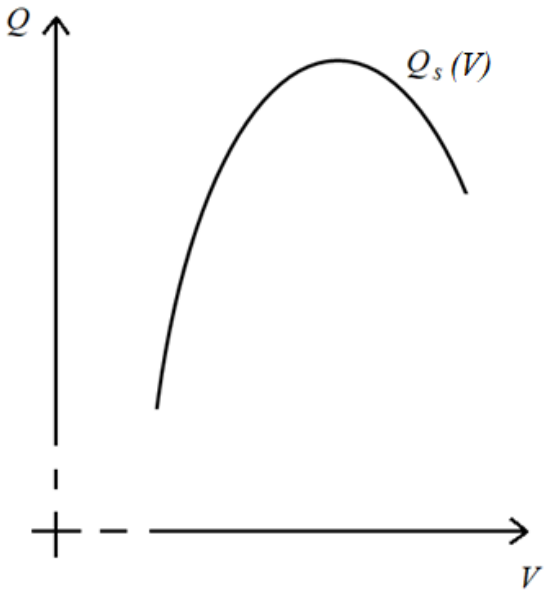
Pri ispitivanju naponske stabilnosti sustava nameću se dva glavna kriterija. To su kriterij $d\Delta Q/dV$ i kriterij dE/dV.

4.3.1. $d\Delta Q/dV$ kriterij stabilnosti

Za promatranje ovog kriterija pretpostavlja se da je potrošena sva djelatna snaga, odnosno da su proizvedena i potrošena djelatna snaga jednake. Da bi se lakše i jednostavnije razumio ovaj kriterij, jalova snaga potrošača se svojevrsno „izdvaja“ iz sustava tako da proizvodnja jalove snage ne ovisi o njoj.

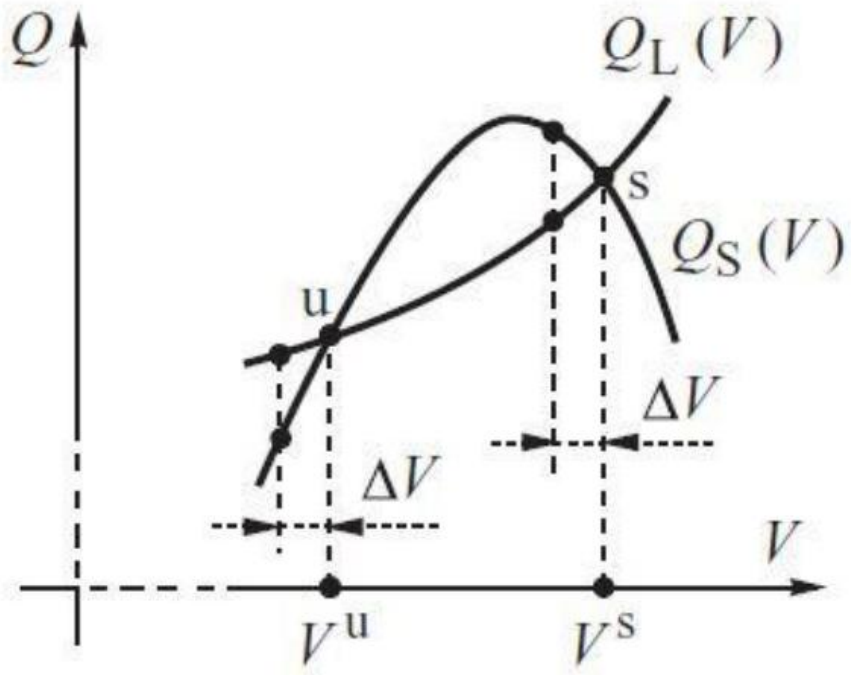
$$Q_S = \sqrt{\left[\frac{E \cdot V}{X}\right]^2 - [P_L(V)]^2} - \frac{V^2}{X} \tag{4-1}$$

Na ovaj se način može definirati Q-V krivulja na kojoj će se vidjeti proizvedena jalova snaga Q_s u sustavu čija je potrošnja čisto djelatna, dok je napon potrošača varijabla.



Slika 4.7. Proizvedena jalova snaga u sustavu bez potrošnje jalove snage

Kako bi odredili naponsku stabilnost sustava potrebno je na dijagram prikazan na slici 4.7. ucrtati i dijagram potrošnje jalove snage. Takva je karakteristika prikazana na slici 4.8.



Slika 4.8. Dijagram potrošnje i proizvodnje jalove snage [7]

Na ovakvoj se karakteristici mogu primijetiti dvije točke u kojima su potrošnja i proizvodnja jednake, tj. u ravnoteži. Za određivanje stabilnosti ovog sustava potrebno je promotriti što će se dogoditi sa sustavom koji radi u tim točkama u slučaju poremećaja. U slučaju pada napona u lijevoj točki dolazi do smanjenja jalove snage. To smanjenje nije proporcionalno, već proizvedena jalova snaga naglo opada u odnosu na jalovu snagu potrošača. Takav sustav se ne može samostalno vratiti u prethodno stanje, te napon nastavlja dalje opadati i dolazi do sloma napona. Iz toga se može zaključiti kako je lijeva točka nestabilna. Ukoliko se pak napon u desnoj točki poveća dolazi do porasta jalove snage potrošača i pada proizvedene jalove snage. Kao posljedica toga u sustavu se pojavljuje manjak jalove snage čime dolazi i do smanjenja napon, te se on opet vraća u ravnotežnu točku, Ovakva sposobnost sustava da se uslijed malih smetnji sam uravnoteži pokazuje kako je sustav stabilan.

S karakteristike na slici 4.8. može se dakle zaključiti kako za zadovoljavanje $d\Delta Q/dV$ kriterija stabilnosti proizvedena jalova snaga mora biti manja od potrošene jalove snage sustava, odnosno

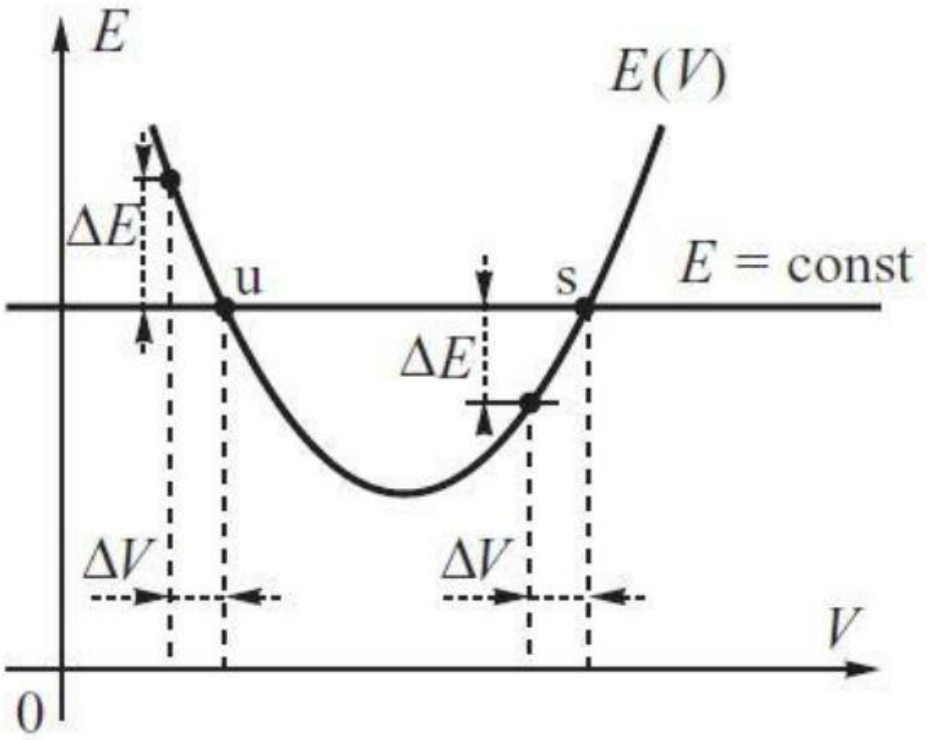
$$d\Delta Q/dV < 0 \qquad (4\text{-}2)$$

4.3.2. $d\mathrm{E}/dV$ kriterij stabilnosti

Ovim se kriterijem promatra odnos napona trošila V, elektromotorne sile izvora E i ekvivalentne elektromotorne sile sustava $E(V)$. Ekvivalentna elektromotorna sila promatra se kao funkcija napona potrošača i data je u izrazu (4-3).

$$E(V) = \sqrt{\left(V + \frac{Q_L(V) \cdot X}{V}\right)^2 + \left(\frac{P_L(V) \cdot X}{V}\right)^2} \tag{4-3}$$

Za dobivanje $d\mathrm{E}/dV$ kriterija stabilnosti potrebno je još pretpostaviti konstantnu elektromotornu silu izvora.



Slika 4.9. Grafički prikaz kriterija $d\mathrm{E}/dV$ [7]

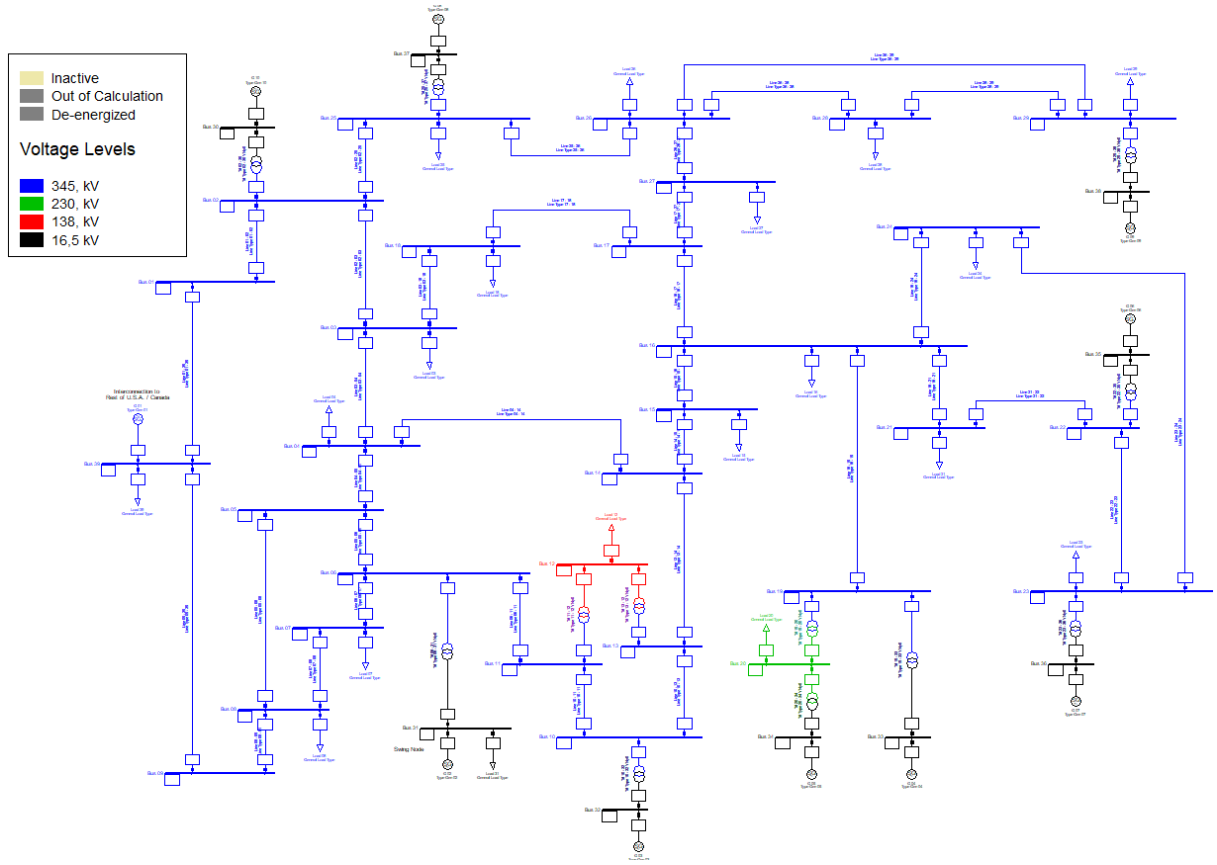
Na ovom se grafu opet mogu uočiti dvije ravnotežne točke. U tim su točkama elektromotorna sila izvora i ekvivalentna elektromotorna sila sustava jednake. Određivanje stabilnosti sustava podrazumijeva unošenje manjeg poremećaja u sustav. Ako dođe do poremećaja kada sustav radi u lijevoj ravnotežnoj točki i dođe do pada napona potrošača ekvivalentna EMS sustava će rasti i postat će veća od EMS izvora što znači da se sustav neće moći samostalno vratiti u ravnotežno stanje. Iz toga se zaključuje kako je lijeva točka nestabilna. Padom napona uslijed poremećaja u desnoj točki opada i ekvivalentna elektromotorna sila. Tada je ekvivalentna EMS manja od konstantne EMS izvora i napon u sustavu raste dok sustav ne dođe u stanje ravnoteže. Kada se pak djelovanjem poremećaja napon u desnoj točki poveća raste i ekvivalentna EMS. Tada je ona veća od EMS izvora te napon potrošača opada do točke ravnoteže. Zaključak je da je desna točka stabilna pošto se sustav samostalno vraća u stanje ravnoteže nakon djelovanja manjih poremećaja.

Kriterij naponske stabilnosti $d\mathrm{E}/dV$ bit će zadovoljen ako padom, odnosno rastom napona potrošača analogno opada/raste ekvivalentna EMS.

$$\frac{dE}{dV} > 0 \tag{4-4}$$

5. ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI

U ovom će poglavlju biti opisan eksperimentalni dio rada. Analizirat će se naponska stabilnost 39 sabirničkog testnog sustava preuzetog iz DIgSILENT PowerFactory. Sustav je prikazan na slici 5.1. Za simuliranje naponskih prilika u sustavu biti će korišten program DIgSILENT PowerFactory. U njemu će se prikazati V-P i V-Q krivulje po kojima će se određivati naponska stabilnost. Simulacijski dio biti će podijeljen u više dijelova. U prvom dijelu će se analizirati sustav bez ikakvih kompenzacijskih uređaja. U drugom će se dijelu simulirati naponske prilike na vodu uslijed kompenzacije jalove snage kondenzatorskom baterijom stalnog kapaciteta.



Slika 5.1. Sabirnički sustav

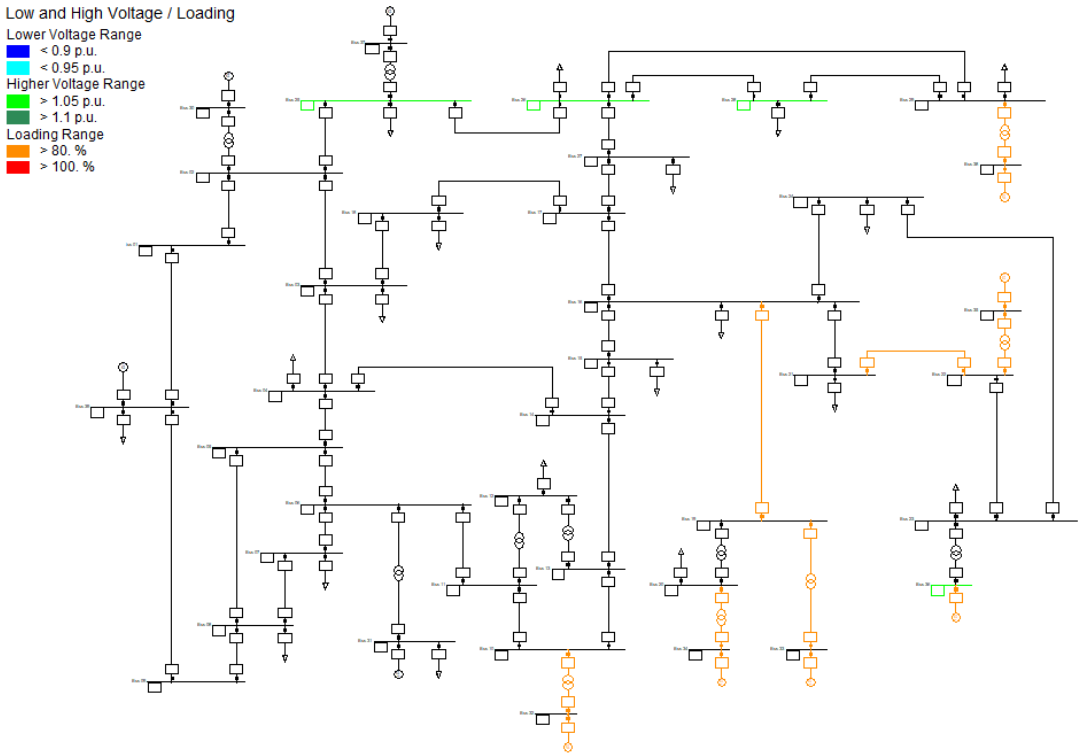
Kao što se sa slike 5.1. vidi sustav od 39 sabirnica napajan je sa 10 generatora i ima četiri naponske razine. Svaka naponska razina prikazana je drugom bojom. Nazivni su parametri generatora prikazani u tablici 5.1. Osim njih prikazana je i vrsta čvora koju svaki od tih generatora predstavlja.

Tablica 5.1. Nazivne vrijednosti generatora

Generator	Nazivna snaga (MVA)	Faktor snage	Nazivni napon (kV)	Vrsta čvora
Gen 01	10000	0,85	345	PV
Gen 02	700	0,85	16,5	SL
Gen 03	800	0,85	16,5	PV
Gen 04	800	0,85	16,5	PV
Gen 05	300	0,85	16,5	PV
Gen 06	800	0,85	16,5	PV
Gen 07	700	0,85	16,5	PV
Gen 08	700	0,85	16,5	PV
Gen 09	1000	0,85	16,5	PV
Gen 10	1000	0,85	16,5	PV

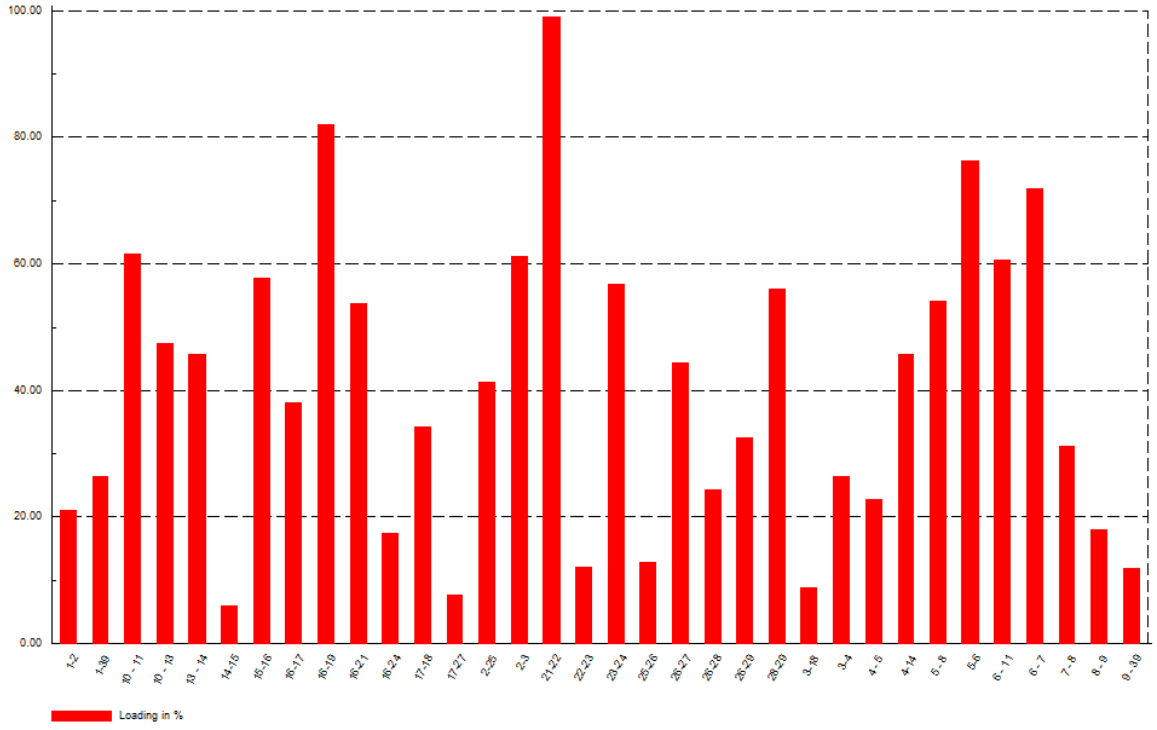
Generator 2 označen je sa SL što znači da se radi o referentnom čvoru. U svakoj se mreži nalazi točno jedan referentni čvor. Tim se čvorom prikazuje proizvodna jedinica koja je znatno veća od ostalih proizvodnih jedinica u mreži, odnosno kruta mreža. Zadatak tog čvora je sustavu isporučiti onoliko djelatne i jalove snage koliko u sustavu nedostaje. Napon referentnog čvora obično se uzima 1 p.u. pod kutem od nula stupnjeva, te se naponi na svim ostalim sabirnicama prikazuju u odnosu na referentni. Preostali generatori predstavljaju PV čvorove. Za njih je karakteristično da su im djelatna snaga i napon konstantni neovisno o opterećenju.

Slika 5.2 prikazuje stanje u sustavu nakon pokretanja proračuna tokova snaga. Na njoj su različitim bojama prikazana opterećenja pojedinih elemenata sustava, te naponska odstupanja. Plava boja prikazuje mjesta preniskog napona, dok zelena boja prikazuje napone koji su previsoki. Vidljivo je da takvih sabirnica nema puno, te da je odstupanje napona manje od 10% što je u granicama tolerancije. Osim naponskih prilika na slici se vide i elementi čija se opterećenost približava njihovoj maksimalnoj opterećenosti. Tako su svi elementi opterećeni sa više od 80% njihovog nazivnog opterećenja označeni narančastom bojom. Pretežno se radi o generatorima na najnižoj naponskoj razini.



Slika 5.2. Naponske prilike i opterećenja u sustavu

Osim generatora dva su voda opterećena sa više od 80% svog nazivnog opterećenja, od čega je jedan gotovo 100% opterećen.



Slika 5.3. Opterećenje vodova

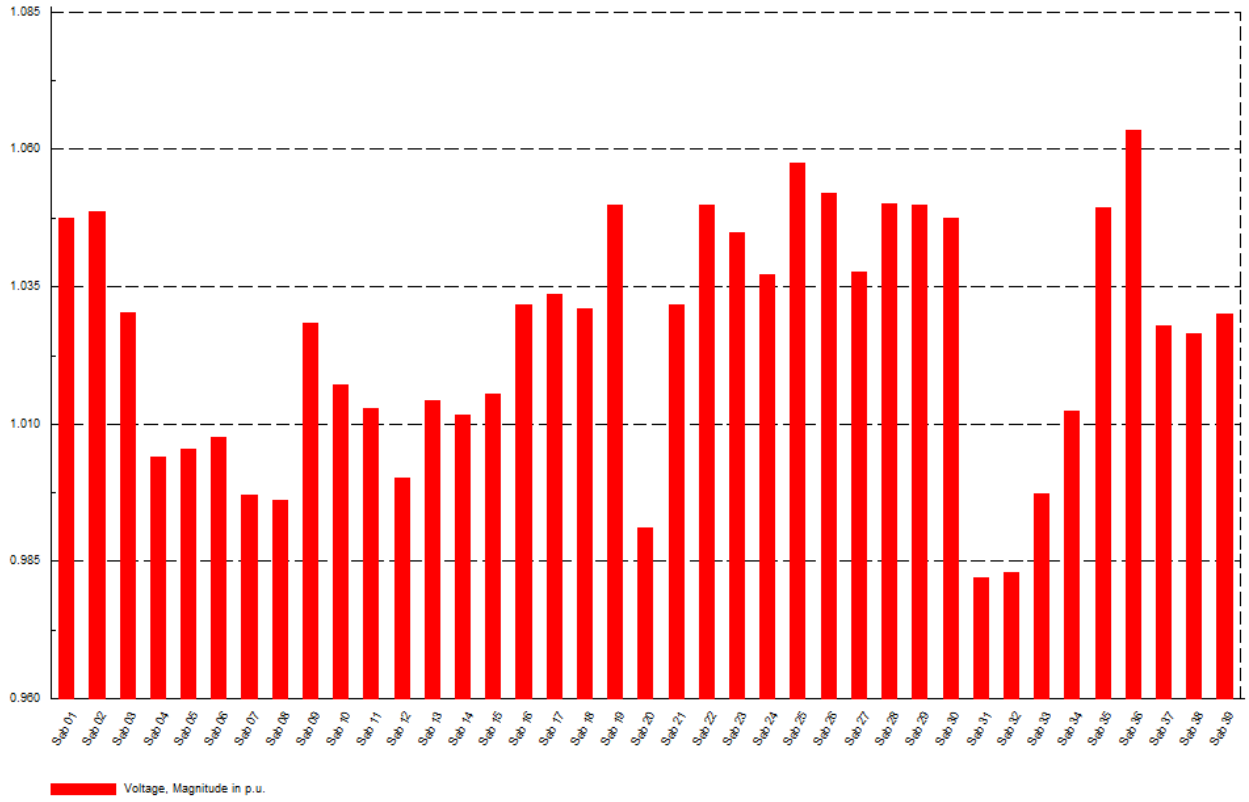
Tablica 5.2. Opterećenja u sustavu

Opterećenje	Djelatna snaga P (MW)	Jalova snaga Q(Mvar)
3	322	2,4
4	500	184
7	233,8	84
8	522	176
12	7,5	88
15	320	153
16	329	32,3
18	158	30
20	628	103
21	274	115
23	247,5	84,6
24	308,6	-92,2
25	224	47,2
26	139	17
27	281	75,5
29	206	27,6
29	283,5	26,9
31	9,2	4,6
39	1104	250

Tablica 5.3. Proizvodnja u sustavu

Generator	Djelatna snaga P (MW)	Jalova snaga Q (Mvar)
1	1000	88,28
2	520	198,25
3	650	205,14
4	632	109,91
5	508	165,76
6	650	212,41
7	560	101,17
8	540	0,44
9	830	22,84
10	250	146,15

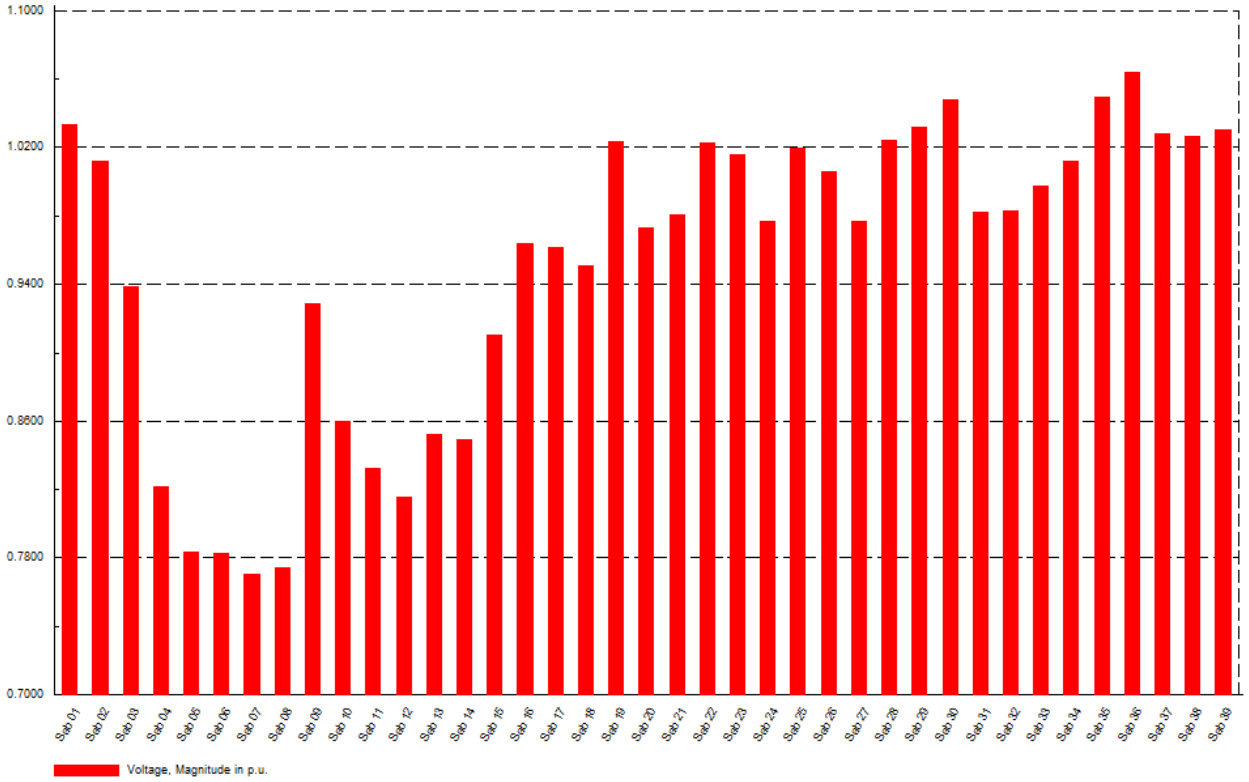
Tablice 5.2. i 5.3. prikazuju vrijednosti proizvodnih jedinica i potrošača u sustavu. Pri ovakvom opterećenju napon je stabilan i na svim je sabirnicama unutar dozvoljenih granica odstupanja.



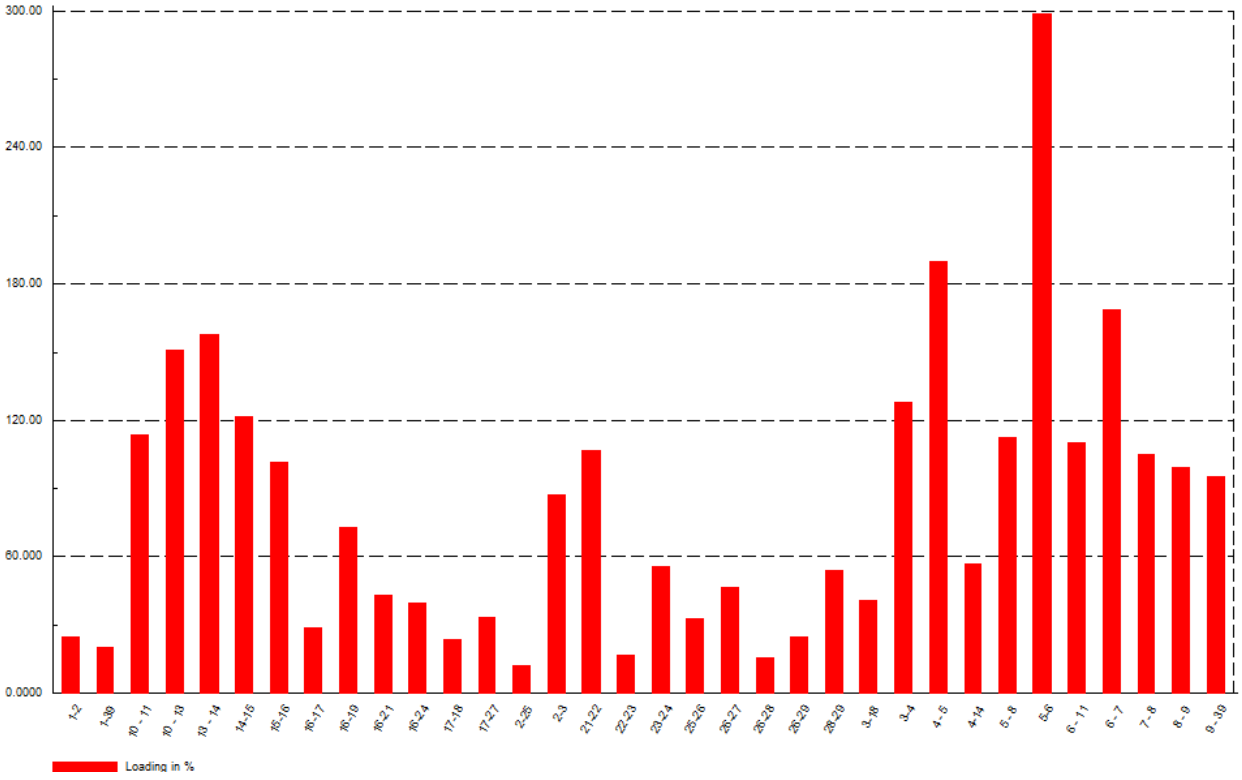
Slika 5.4. Naponske prilike na sabirnicama

5.1. Stabilnost sustava bez kompenzacije jalove snage

DIgSILENT V-P krivulju konstruira tako što povećava opterećenje u sustavu i prati razinu napona na pojedinim sabirnicama. Na taj način određuje maksimalnu snagu koja se može isporučiti potrošačima prije nego što dođe do naponskog sloma. U ovom je slučaju maksimalna snaga $P_{max} = 7865.29$ MW, pri čemu se na sabirnici 7 javlja minimalni napon 0.77 p.u. Na slici 5.5. prikazane su razine napona na sabirnicama pri prijenosu maksimalne snage. U tom je slučaju opterećenost vodova neravnomjerna. Spojni vod između sabirnica 5 i 6 preopterećen je sa gotovo tri puta većim opterećenjem od njegovog nazivnog opterećenja. S druge su pak strane neki vodovi praktički neopterećeni



Slika 5.5. Naponi na sabirnicama uslijed prijenosa maksimalne snage



Slika 5.6. Opterećenost vodova za vrijeme prijenosa maksimalne snage

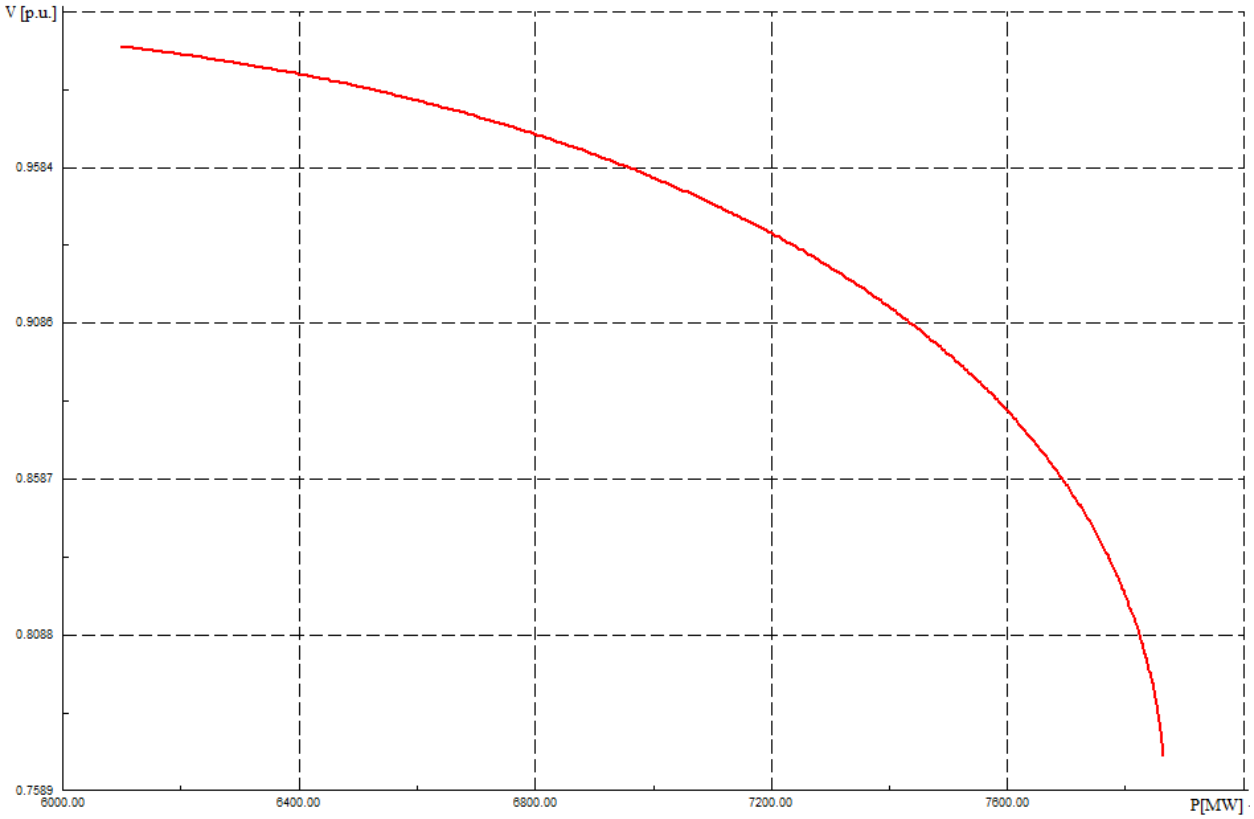
Tablica 5.4. Proizvodnja u sustavu

Generator	Djelatna snaga P (MW)	Jalova snaga Q (Mvar)
1	1000	676,15
2	2359,03	2251,22
3	650	959,02
4	632	290,44
5	508	269,92
6	650	416,89
7	560	219,03
8	540	181,42
9	830	144,63
10	250	325,26

Tablica 5.5. Opterećenja u sustavu

Opterećenje	Djelatna snaga P (MW)	Jalova snaga Q (Mvar)
3	415,38	3,1
4	645	237,36
7	301,6	108,36
8	673,38	227,04
12	9,68	113,52
15	412,8	197,37
16	424,41	41,67
18	203,82	38,7
20	810,12	132,87
21	353,46	148,35
23	319,28	109,13
24	398,09	-118,94
25	288,96	60,89
26	179,31	21,93
27	362,49	97,4
28	265,76	35,6
29	365,72	34,7
31	11,87	5,94
39	1424,16	322,5

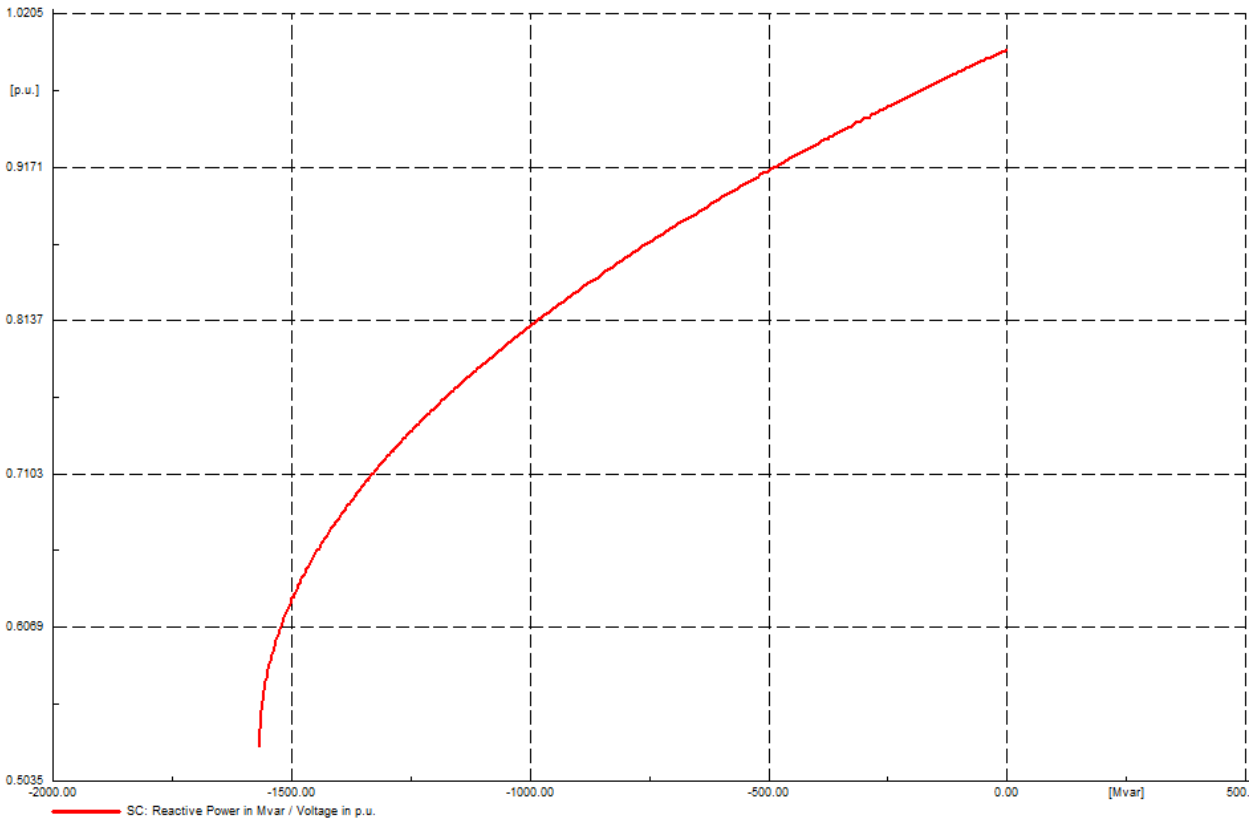
Tablice 5.4. i 5.5. prikazuju proizvodnju pojedinih generatora, te potrošnju opterećenja u sustavu. Vidljivo je kako su sve djelatne snage jednake kao i prije određivanja V-P krivulja osim djelatne snage drugog generatora. Razlog tome je njihova vrsta čvora. Pošto se radi o PV čvorovima njihova djelatna snaga ostaje konstantna, a potrebnu djelatnu snagu sustavu predaje referentni čvor.



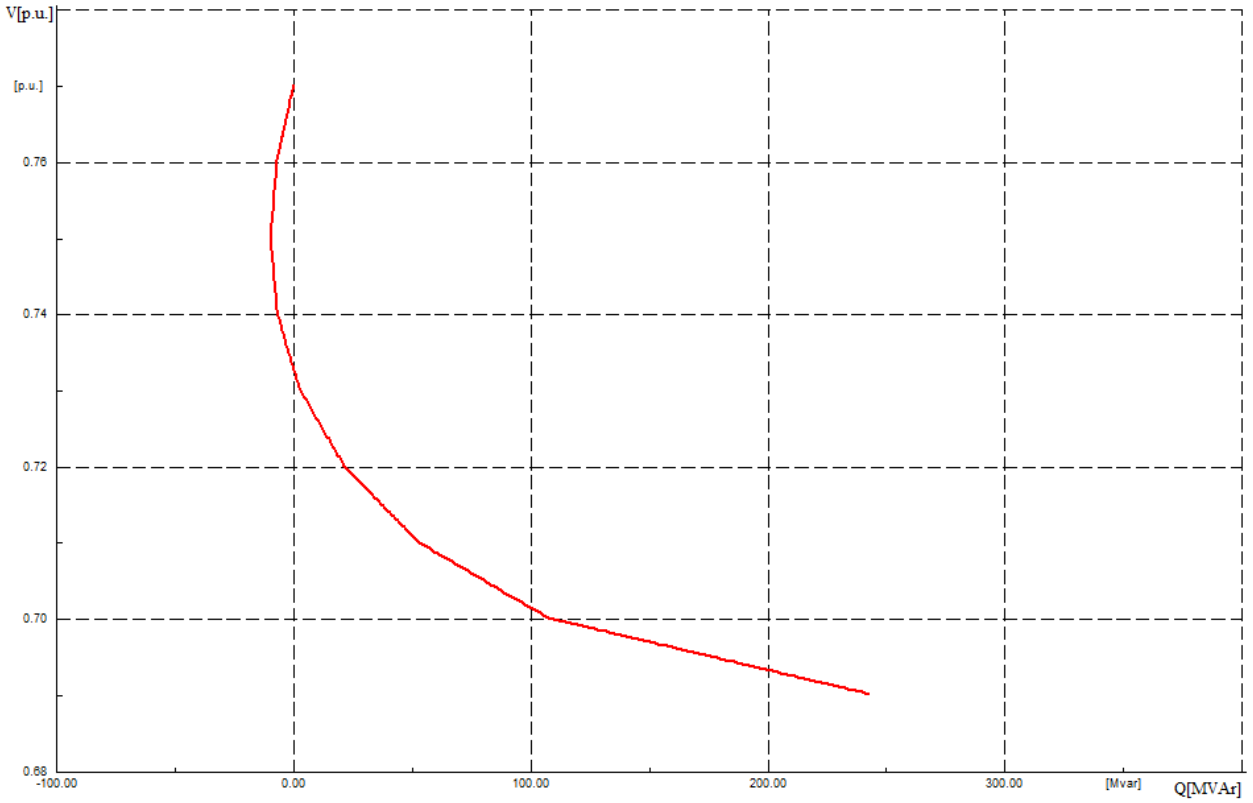
Slika 5.7. V-P krivulja sabirnice 7

P-V krivulja prikazuje ponašanje napona povećanjem opterećenja sustava. Jasno je vidljivo kako napon opada povećanjem opterećenja do točke kritičnog napona koja u ovom slučaju iznosi 0.77 p.u.

Na slici 5.8. prikazana je V-Q krivulja sabirnice 7 prije nego što je opterećenje povećano. Točka krivulje u kojoj je jalova snaga jednaka nuli je radna točka sustava. Točka kritičnog napona je skroz lijeva točka. Razlika jalove snage između te dvije točke pokazuje maksimalnu jalovu snagu kojom se može opteretiti taj čvor a da ne dođe do naponskog sloma. U ovom se slučaju radi o 1566 Mvar-a.

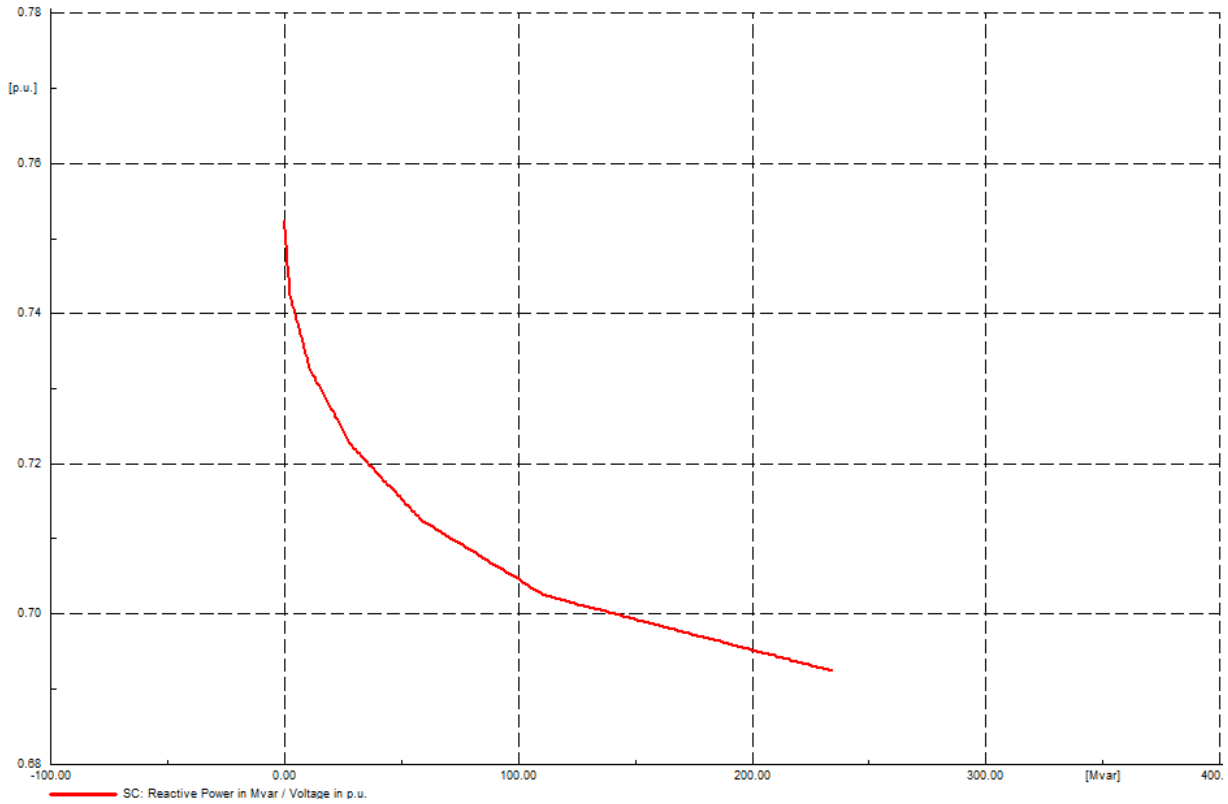


Slika 5.8. V-Q karakteristika sabirnice 7 prije povećanja opterećenja



Slika 5.9. V-Q karakteristika sabirnice 7 pri maksimalnom opterećenju

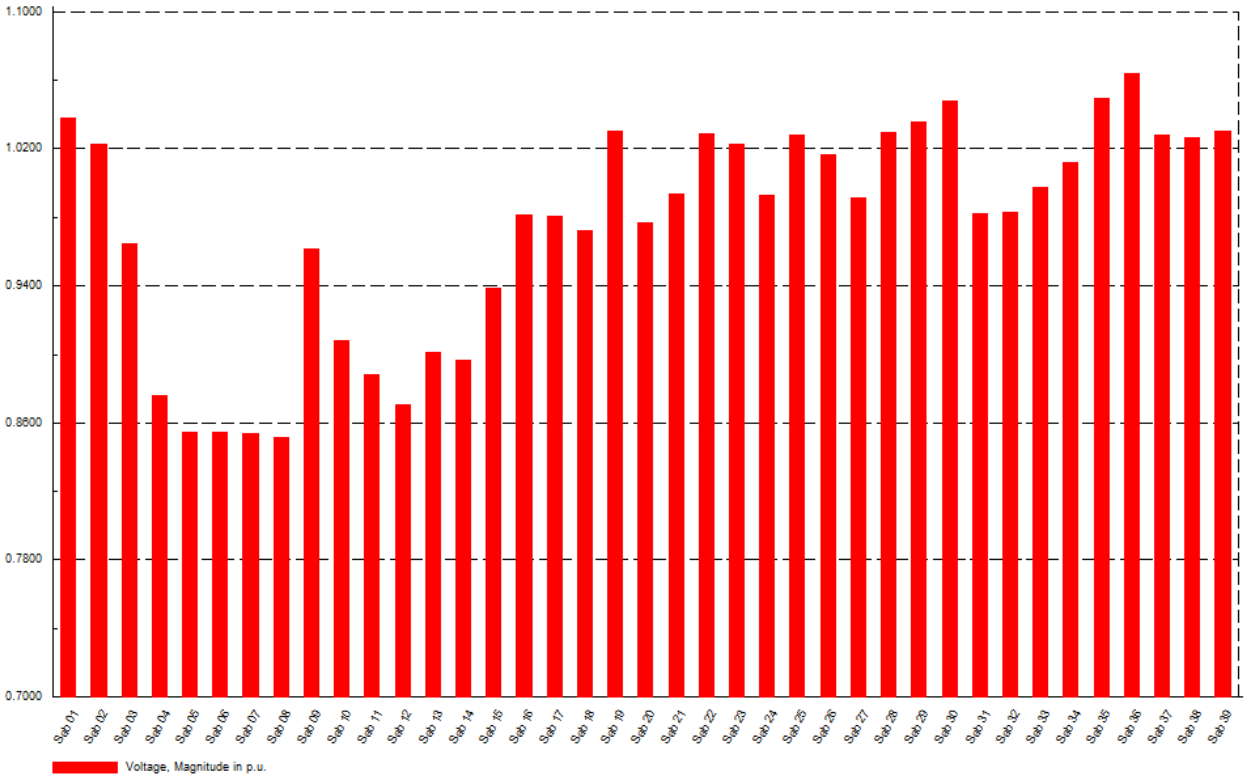
Slika 5.9. prikazuje V-Q krivulju na sabirnici 7 kada se sustavom prenosi maksimalna snaga, odnosno kada se na toj sabirnici javlja kritičan napon. Prethodno je sa V-P krivulje određena razina kritičnog napona od 0.77 p.u. ali se V-Q krivulje vidljivo je kako je kritičan napon nešto niži. Razlog tome je način na koji DIgSILENT određuje V-P karakteristiku. Pri povećanju opterećenja, sva opterećenja sustava proporcionalno rastu, dok program ne odredi točku naponskog sloma. Kada do toga dođe DIgSILENT uzima zadnju vrijednost opterećenja prije sloma kao točku kritičnog napona. U stvarnosti bi se pojedina opterećenja mogla još malo povećati te bi se dobila karakteristika prikazana na slici 5.10.



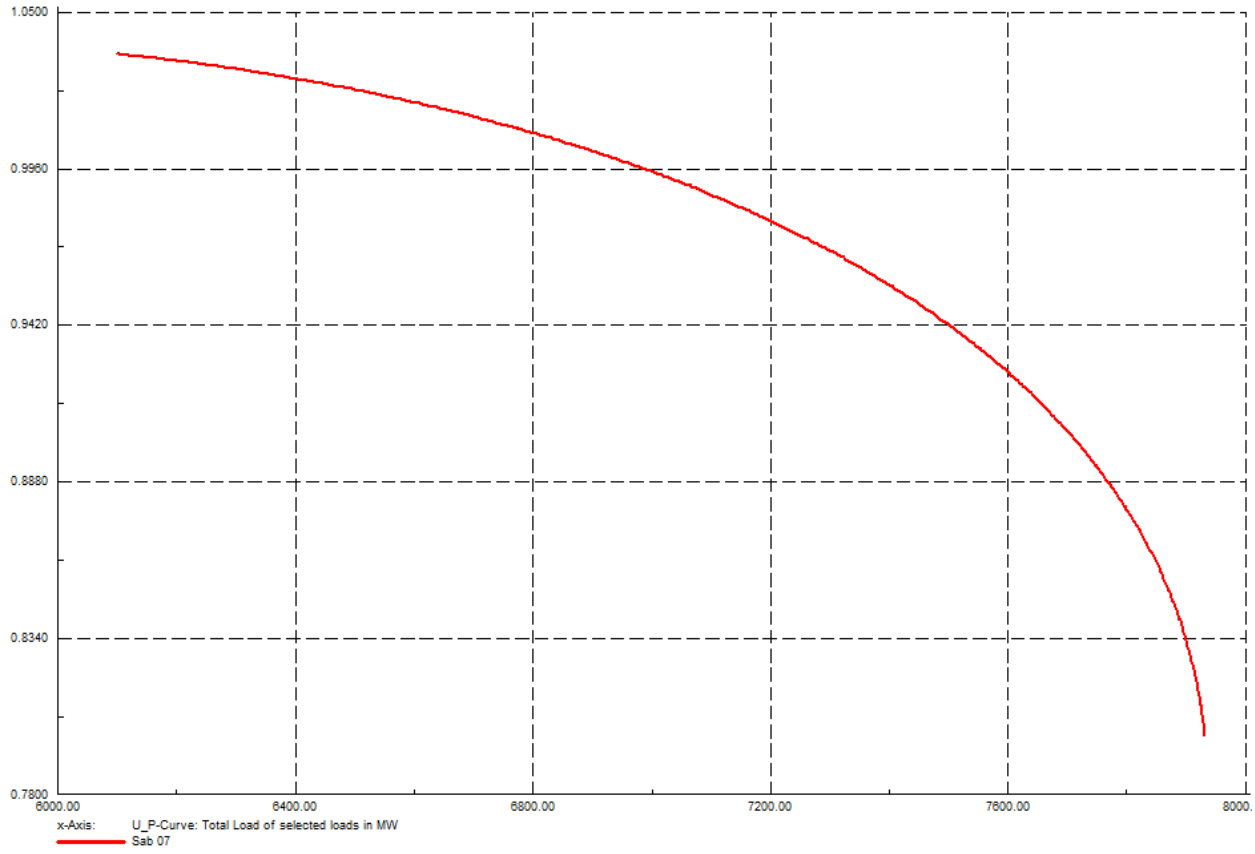
Slika 5.10. Stvarni prikaz V-Q karakteristike sabirnice 7 pri maksimalnom opterećenju

5.2. Stabilnost sustava uz kompenzaciju jalove snage

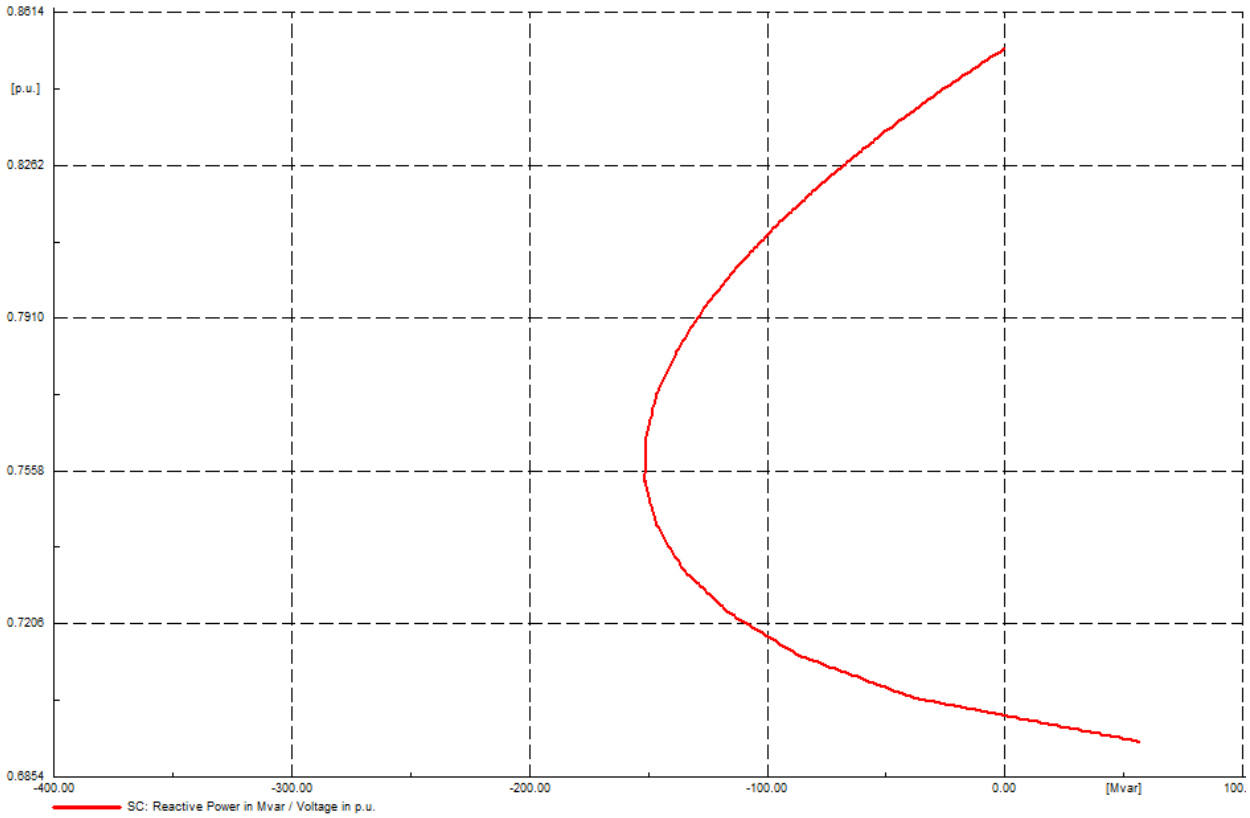
Kako je pokazano u prethodnom primjeru razina napona prilikom prijenosa maksimalne snage na većini je sabirnica daleko niža od propisanih granica odstupanja. U cilju podizanja naponske razine i određivanja utjecaja kompenzacije jalove snage na P-V i Q-V krivulje na sabirnicu 7 na kojoj se pojavio kritičan napon dodavat će se kondenzatorska baterija. U slučaju I. kondenzatorska će baterija imati snagu 250 Mvar-a, u slučaju II. povećat će se njena jalova snaga na 500 Mvar-a.



Slika 5.11. Naponi na sabirnicama u slučaj I.

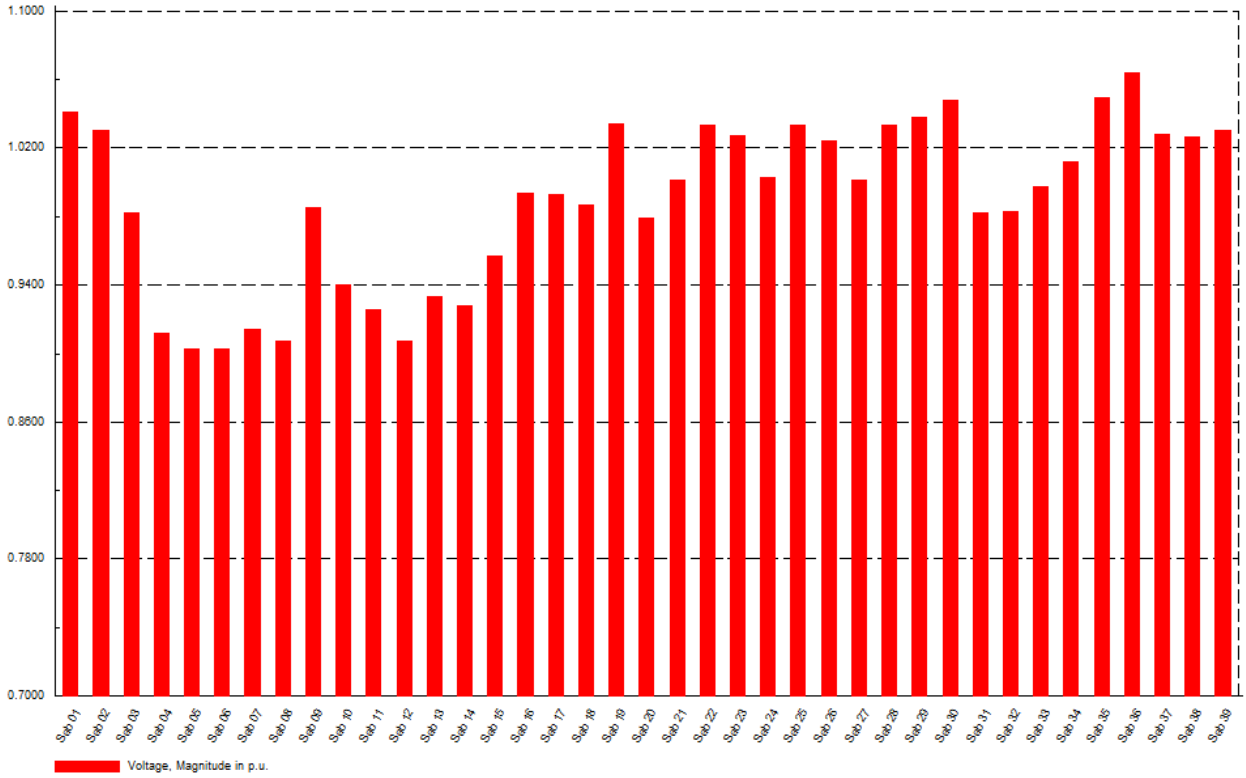


Slika 5.12. V-P krivulja sabirnice 7 za slučaj I.

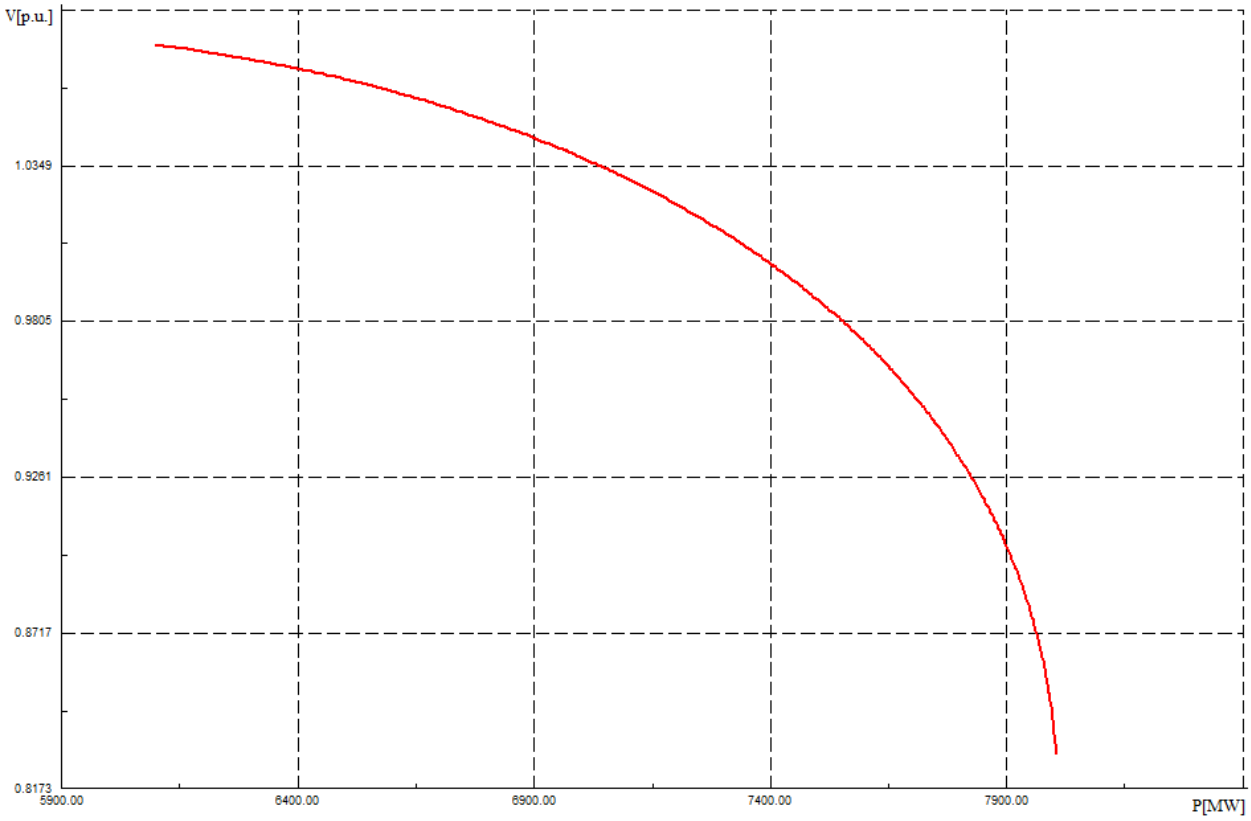


Slika 5.13. V-Q krivulja sabirnice 7 za slučaj I.

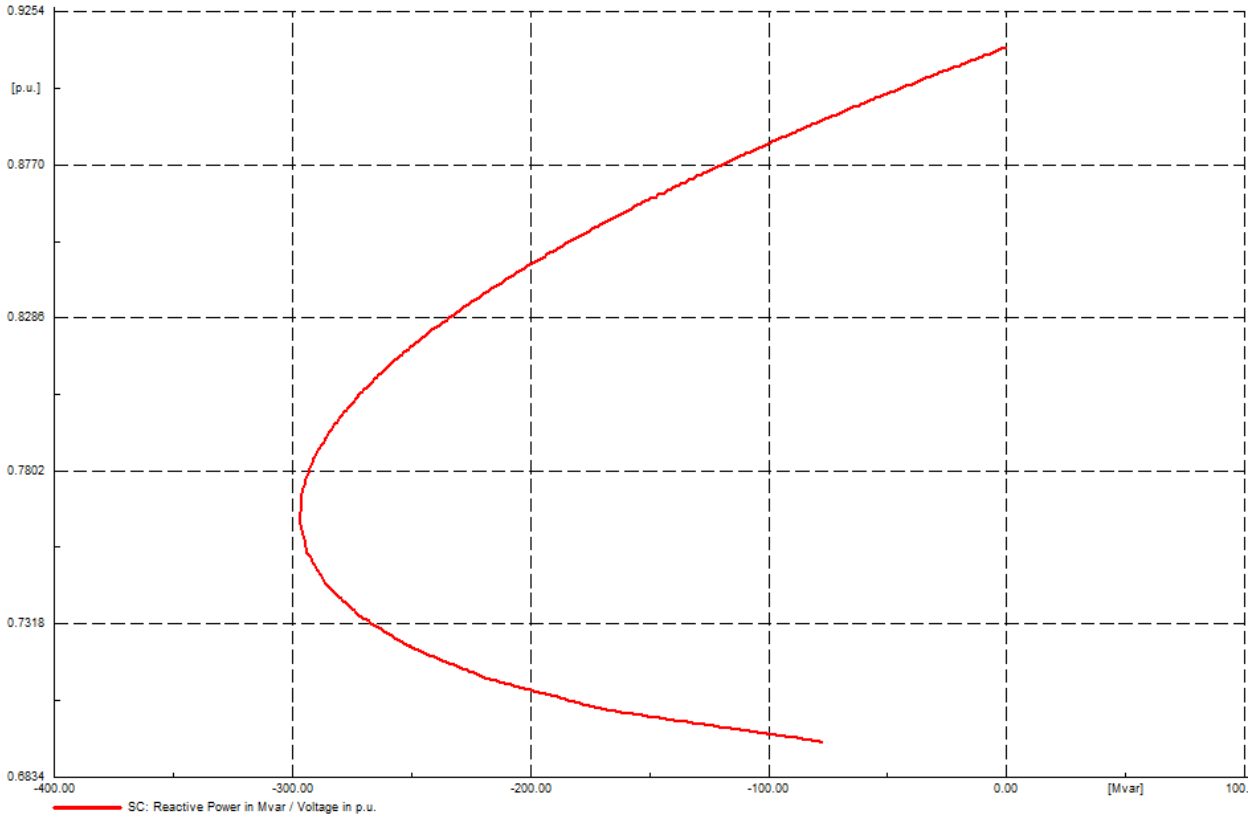
U I. slučaju dodavanjem kondenzatorske baterije došlo je do značajnog porasta napona u sustavu. Uslijed toga lagano je porasla i maksimalna snaga koja se može prenijeti sustavom te ona sada iznosi $P_{max} = 7932{,}32\ MW$. Sa V-Q krivulje vidljivo je kako se taj čvor sada može opteretiti s dodatnih 150 Mvar-a prije nego dođe do naponskog sloma. Unatoč porastu napona, na nekim se sabirnicama još uvijek javljaju naponi koji su van granica dozvoljenog odstupanja. Zbog toga je potrebna daljnja kompenzacija jalove snage, odnosno veća kondenzatorska baterija. Tako će se za II. slučaj koristiti baterija od 500 Mvar-a.



Slika 5.14. Naponske prilike u slučaju II.



Slika 5.15. V-P krivulja sabirnice 7 u slučaju II.



Slika 5.16. V-Q karakteristika sabirnice 7 u II. slučaju

Povećavanjem jalove snage kondenzatorske baterije došlo je do ponovnog rasta napona u sustavu, te su sada svi naponi unutar dozvoljenih granica odstupanja. Sa V-P krivulje može se vidjeti kako je sada maksimalna snaga porasla na $P_{max} = 5005.5$ MW. Ovaj se čvor sada može opteretiti sa gotovo 300 Mvar-a, a da ne dođe do naponskog kolapsa.

6. Zaključak

Cilj ovog rada bio je kroz analizu P-V i Q-V krivulja na sabirnicama sustava odrediti granice naponske stabilnosti tog sustava. Kako bi to što bolje bilo objašnjeno u radu su opisani osnovni principi prijenosa električne energije, te regulacije napona u mreži. Kod regulacije naglasak je bio na kompenziranju jalove snage. Osim toga u radu je data definicija same stabilnosti sustava, te njena podjela. Objašnjene su osnove promatranja kutne i frekvencijske stabilnosti, dok je naponska stabilnost kao tema rada detaljno obrađena. Definirana je i objašnjeni su svi aspekti određivanja naponske stabilnosti. Određivanje granica stabilnosti prikazano je kroz P-V i Q-V krivulje, te kroz $d\Delta Q/dV$ i dE/dV kriterij. Nakon teoretskog razmatranja naponske stabilnosti prikazano je njeno određivanje na praktičnom primjeru. Za to je korišten program DIgSILENT PowerFactory, te 39 sabirnički testnog sustav koji je preuzet iz programa. Korištenjem V-P i V-Q određene su granice stabilnosti sustava, odnosno kritičan napon u sustavu. Kako bi se razina napona podigla korištena je kondenzatorska baterija spojena na sabirnicu na kojoj se kritičan napon pojavljivao. To je odrađeno u dva koraka povećavanjem kapacitivne jalove snage kondenzatorske baterije. Porastom jalove snage kondenzatorske baterije dolazi do povećanja maksimalne snage koja se tim sustavom može prenijeti što se vidi sa V-P karakteristika. Sa V-Q karakteristika može se zaključiti kako se kompenzacijom jalove snage sustav može opteretiti većom jalovom snagom, odnosno da dolazi do povećanja stabilnosti sustava.

LITERATURA

[1] M. Ožegović,K. Ožegović Električne energetske mreže, 1996

[2] Z. Ružičić, Regulacija napona i jalove snage u elektroenergetskom sustavu sa priključenim vjetroelektranama, diplomski rad 2016.

[3] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, Narodne novine, izdanje 36/2006,

(http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/126651.html), pristupljeno 19.04.2017.

[4] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of Power System Stability

[5] P. Kundur, Power System Stability and Control, Electric Power Research Institute, McGraw-Hill, Inc. USA, 1994

[6] Marwa A. Abd El-Hamid, Noha H.El.Amary, Voltage Instability Prediction Using Artificial Immunity System, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 11, November-2013 559

[7] J. Machowski, J. Bialek, J. Bumby, ‘’Power System Dynamics: Stability and Control’’, 2nd Edition, Wiley, 2008

[8] L. Jozsa, Vođenje pogona elektroenergetskog sustava, 2008

SAŽETAK

Ključne riječi: regulacija napona, naponska stabilnost, P-V krivulja, Q-V krivulja

Zadatak ovog rada bio je prikazom P-V krivulja i Q-V krivulja odrediti stabilnost sustava, odnosno granice stabilnosti sustava. Kroz analiziranje regulacije napona, pobliže je opisan princip kompenzacije jalove snage u mreži. Definirana je stabilnost sustava, te je prikazana podjela stabilnosti ovisno o promatranoj veličini. Naponska je stabilnost kao tema ovog rada bila temeljito obrađena. Kroz teoretske primjere je prikazano definiranje naponske stabilnosti, odnosno nestabilnosti sustava. Nakon toga su na praktičnom primjeru 39 sabirničke mreže određivane granice stabilnosti sustava. Za analizu je korišten program DIgSILENT PowerFactory. Prvobitno je određena granica naponske stabilnosti u sustavu bez ikakve kompenzacije jalove snage. Nakon toga se kondenzatorskom baterijom na sabirnici s kritičnim naponom jalova snaga kompenzirala. Pri tome je promatran utjecaj kompenzacije na P-V i Q-V krivulje. Može se zaključiti da kompenzacijom jalove snage sustav postaje stabilniji.

ABSTRACT

Key words: voltage control, voltage stability, P-V curve, Q-V curve

The goal of this thesis was to determine system stability i.e. the limit of voltage stability by showing its P-V and Q-V curves. Trough the analysis of voltage control, compensation of reactive power is closely described. System stability is defined, and its classification is given depending on the variable that is being monitored. Voltage stability was thoroughly analyzed because its the main topic of this thesis. Trough some theoretical examples voltage stability definition was given i.e. voltage instability. DIgSILENT PowerFactory program was used for the analysis. Originally voltage stability limit was determined without any kind of reactive power compensation in the system. After that a capacitor bank was connected to the bus that showed the critical voltage. The influence of capacitor banks on the P-V and Q-V curves was monitored. It can be concluded that the system becomes more stable by compensating the reactive power.

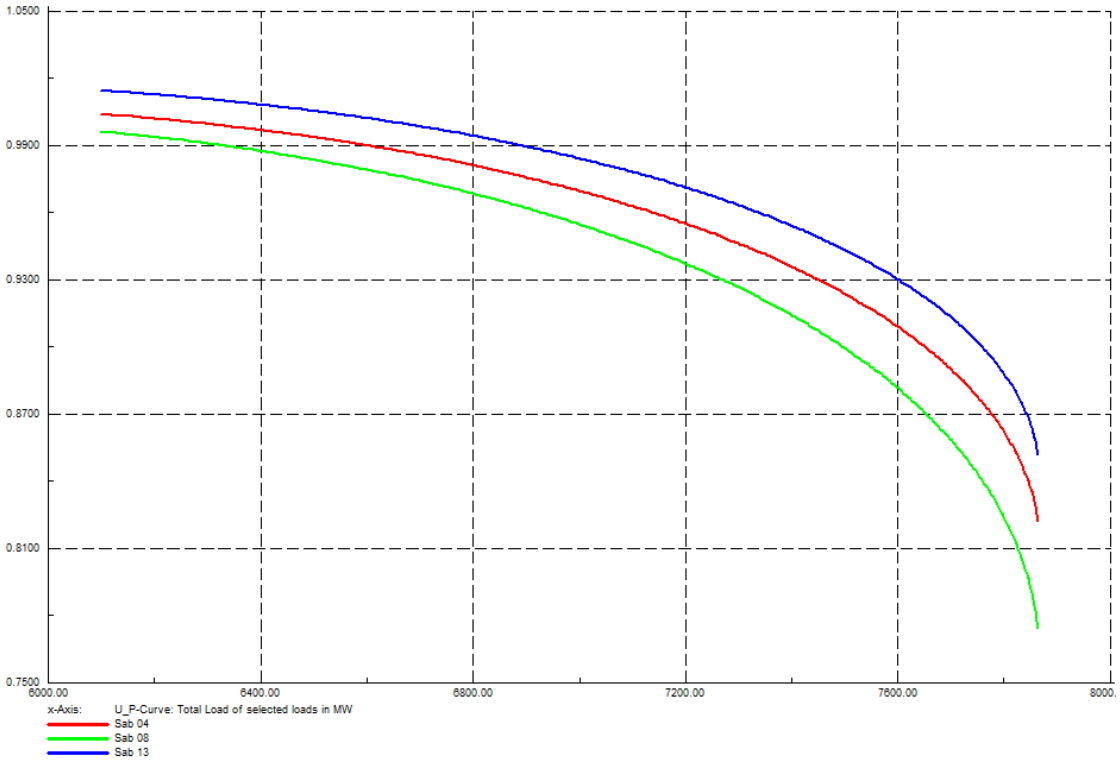
ŽIVOTOPIS

Hrvoje Mikulić rođen je 01. srpnja 1991. godine u Osijeku. Osnovnu školu pohađa i završava u Osijeku. Nakon toga upisuje Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku, te završava i stječe zanimanje elektrotehničar. Po završetku srednje škole upisuje preddiplomski studij Elektrotehničkog fakulteta, smjer elektrotehnika, kao redovan student. 2014. Godine, završava predidiplomski studij i upisuje diplomski studij elektroenergetike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.

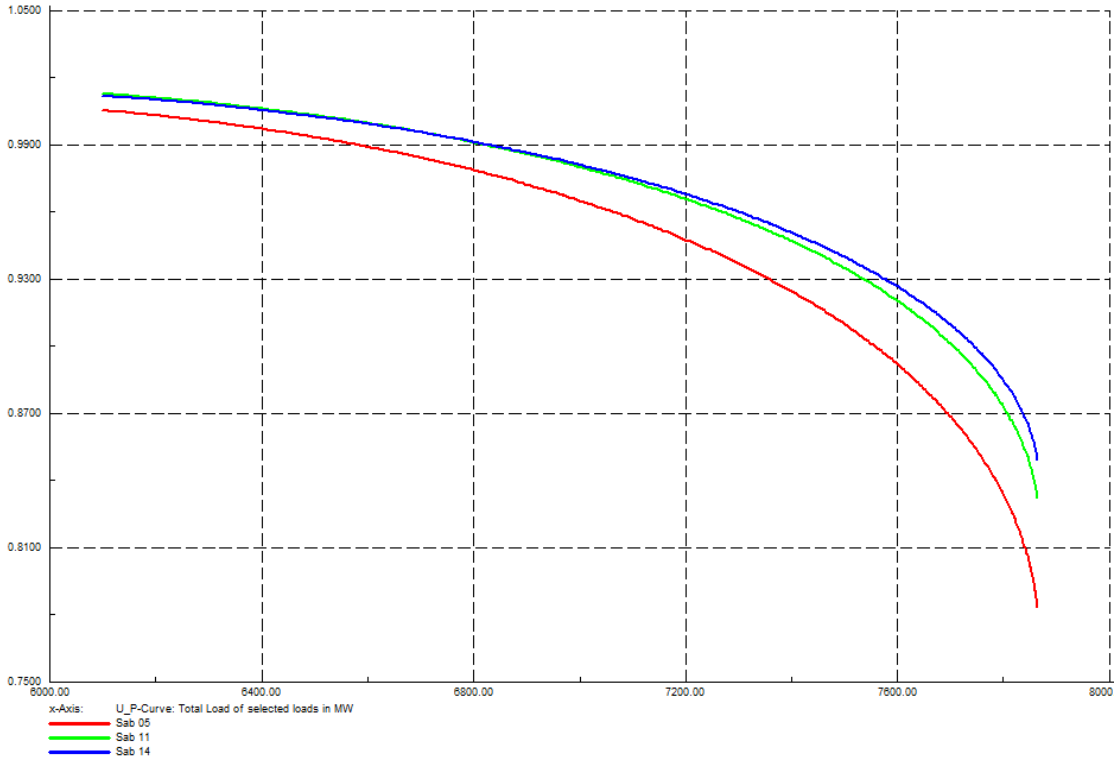
_____

(VLASTORUČNI POTPIS)

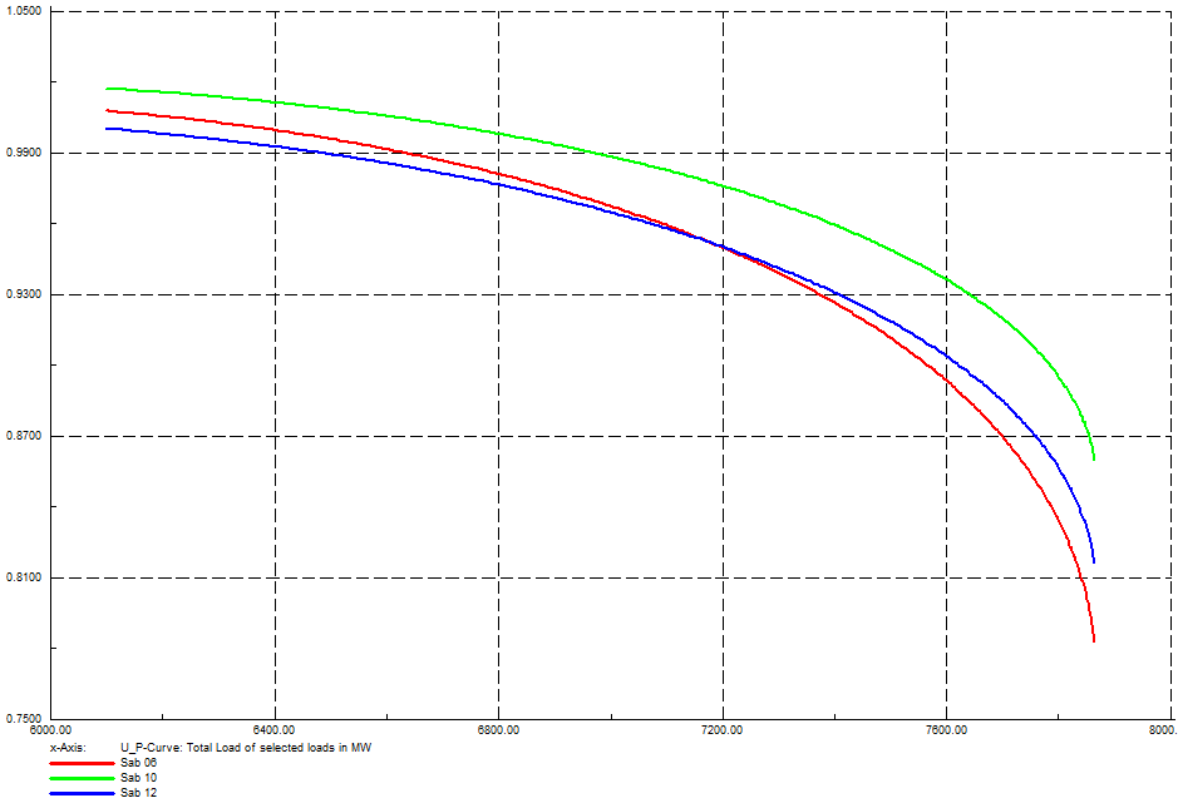
Prilozi



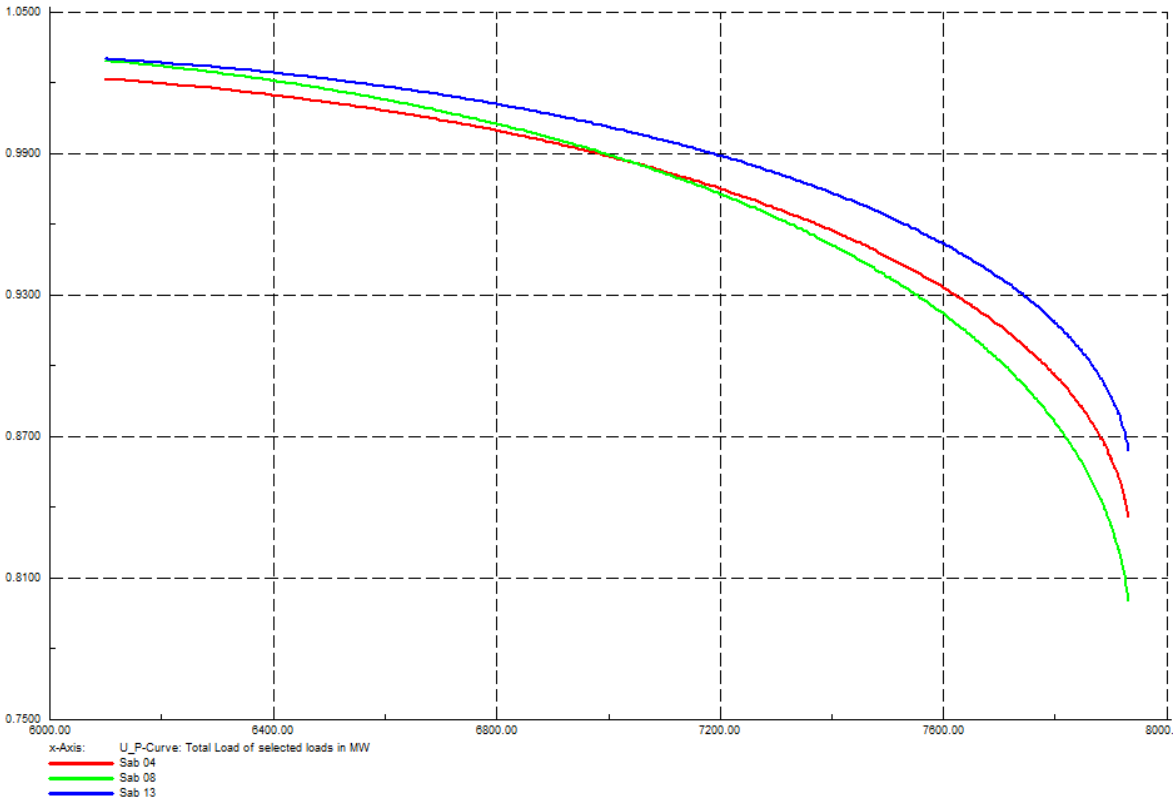
Slika P1. P-V krivulje sabirnica 4,8 i 13 bez kompenzacije jalove snage



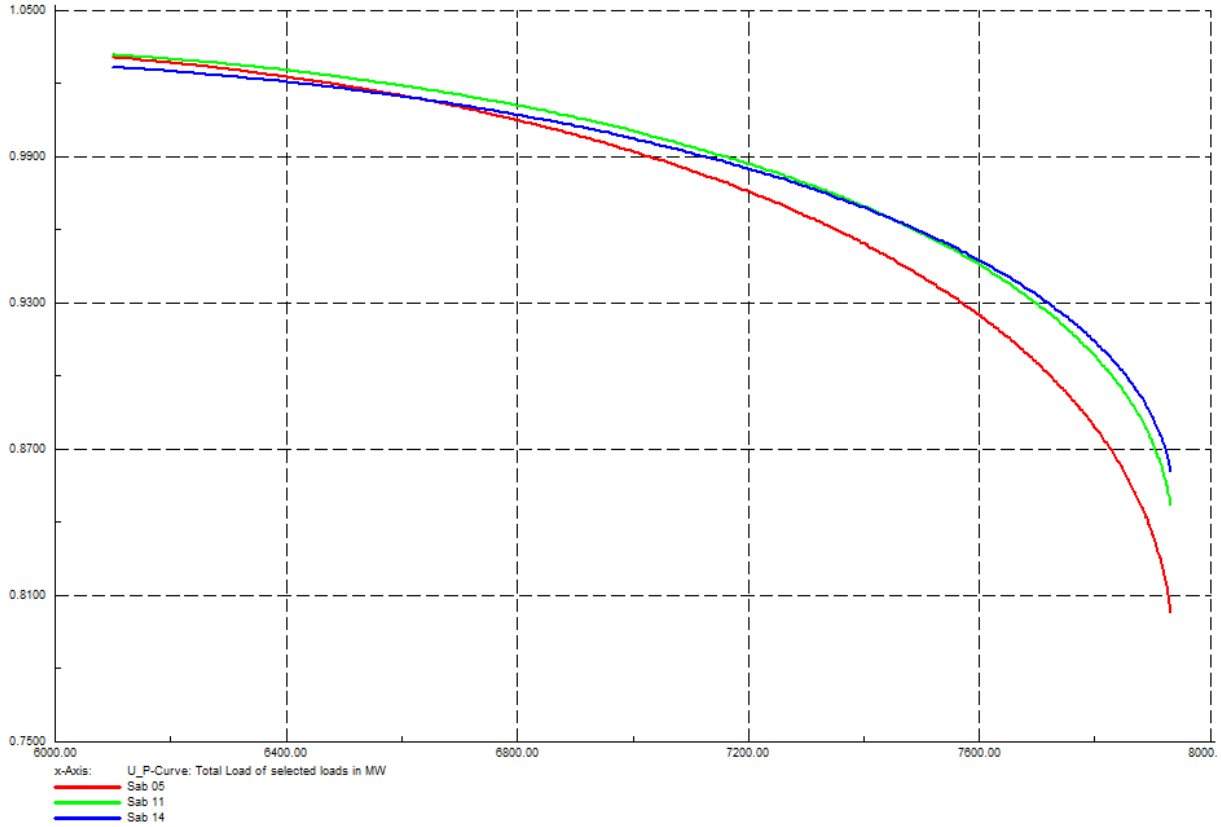
Slika P2. P-V krivulje sabirnica 5,11 i 14 bez kompenzacije jalove snage



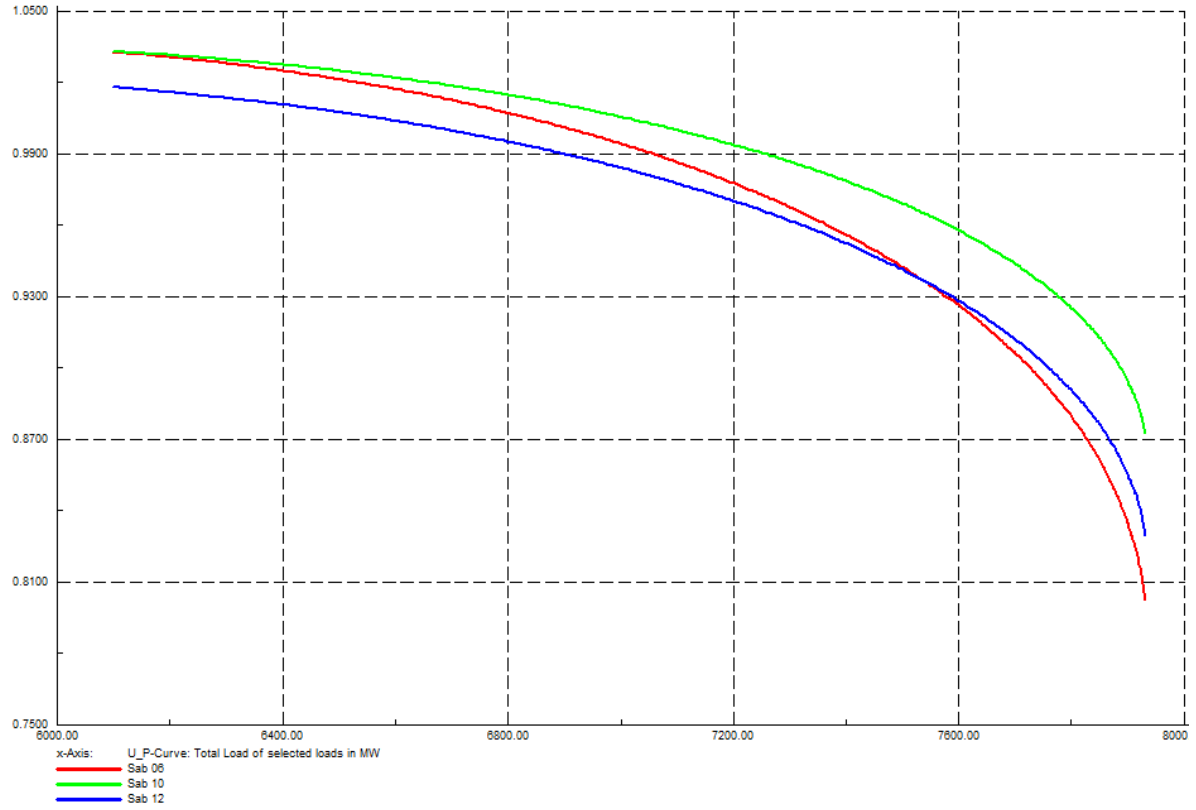
Slika P3. P-V krivulje sabirnica 6,10 i 12 bez kompenzacije jalove snage



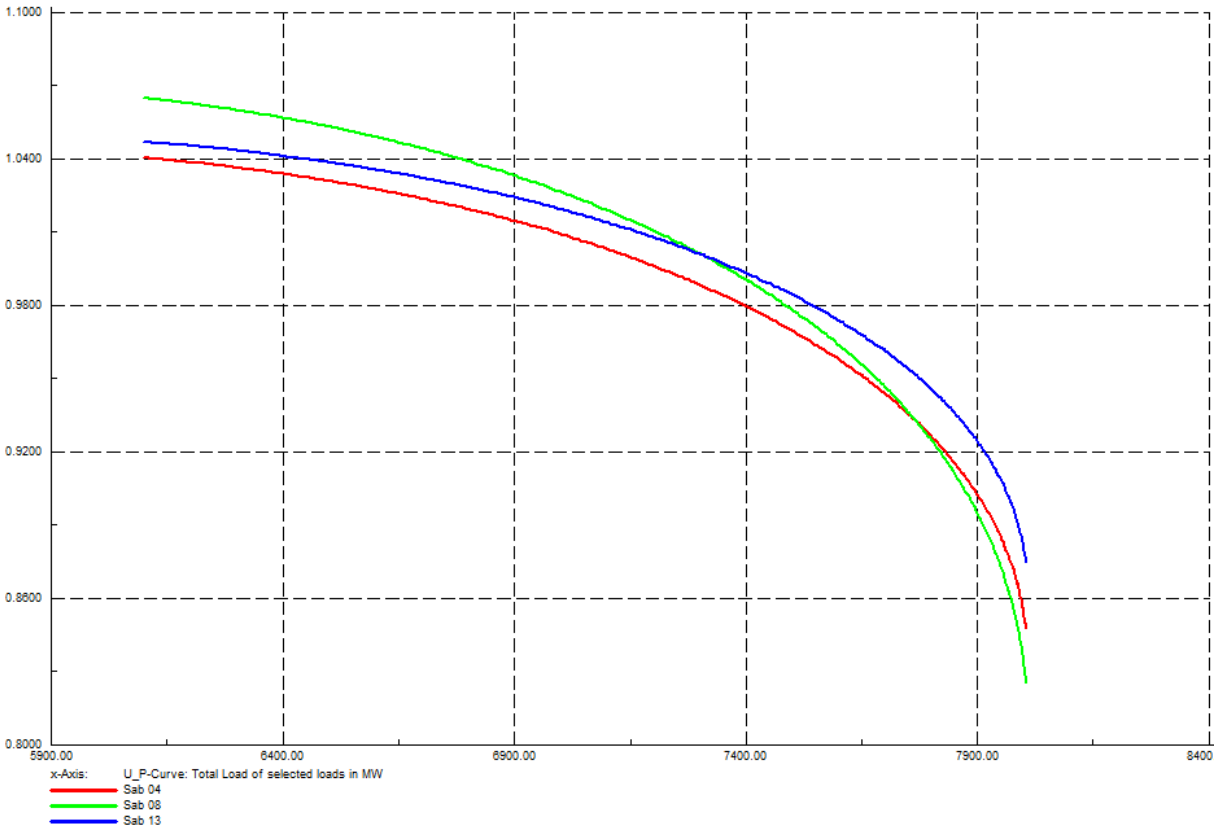
Slika P4. P-V krivulje sabirnica 4,8 i 13 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



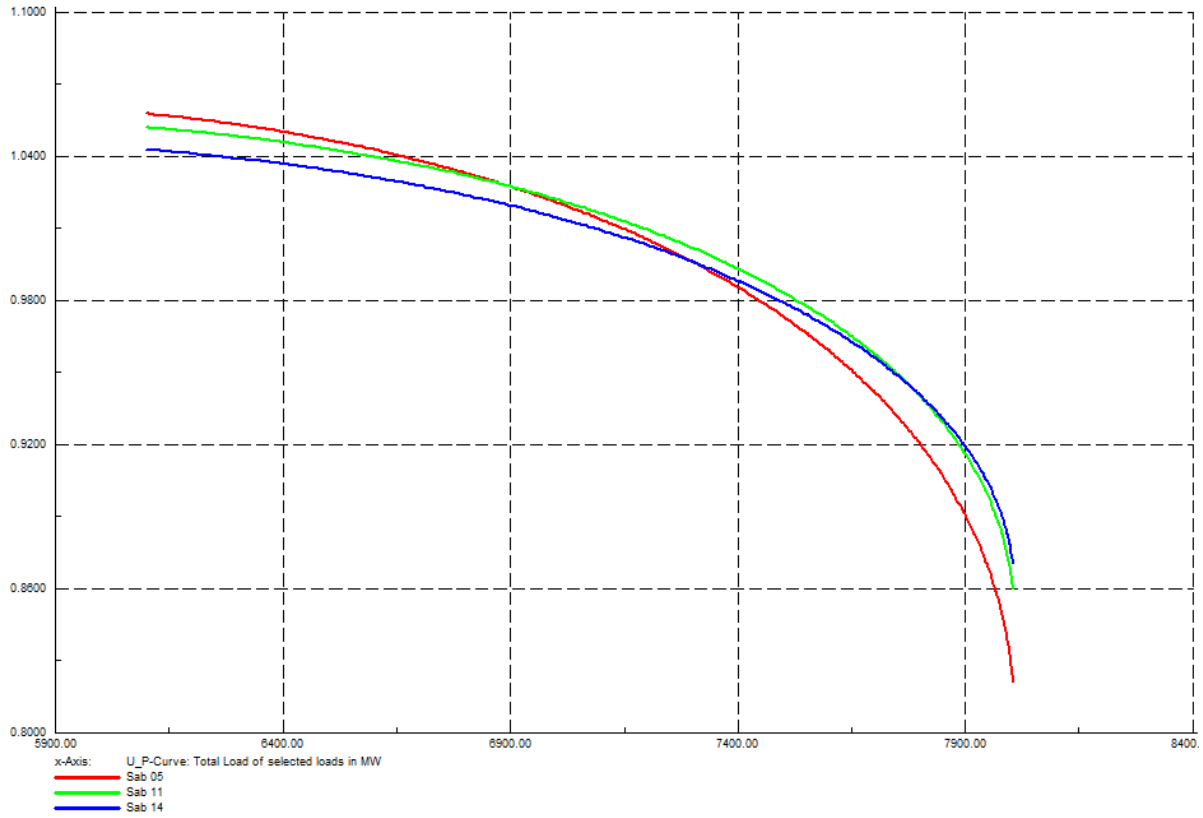
Slika P5. P-V krivulje sabirnica 5,11 i 14 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



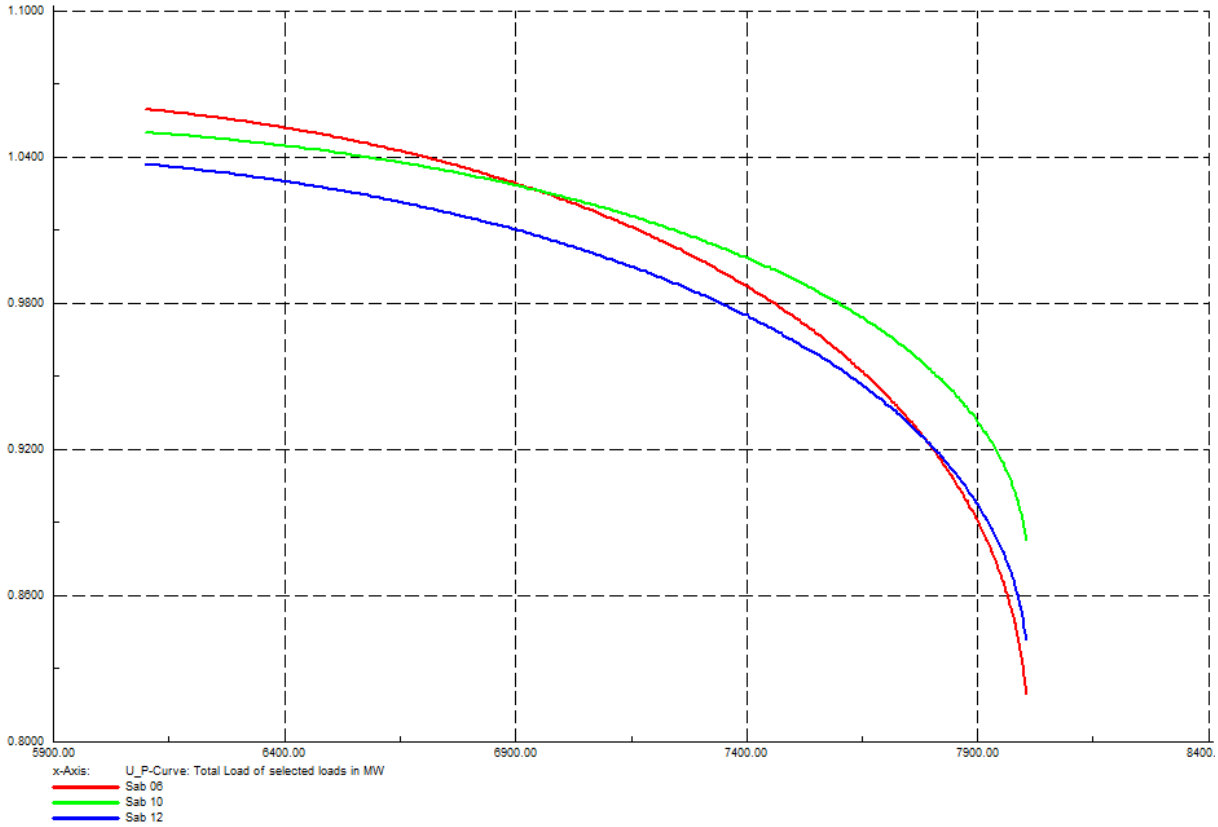
Slika P6. P-V krivulje sabirnica 6,10 i 12 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



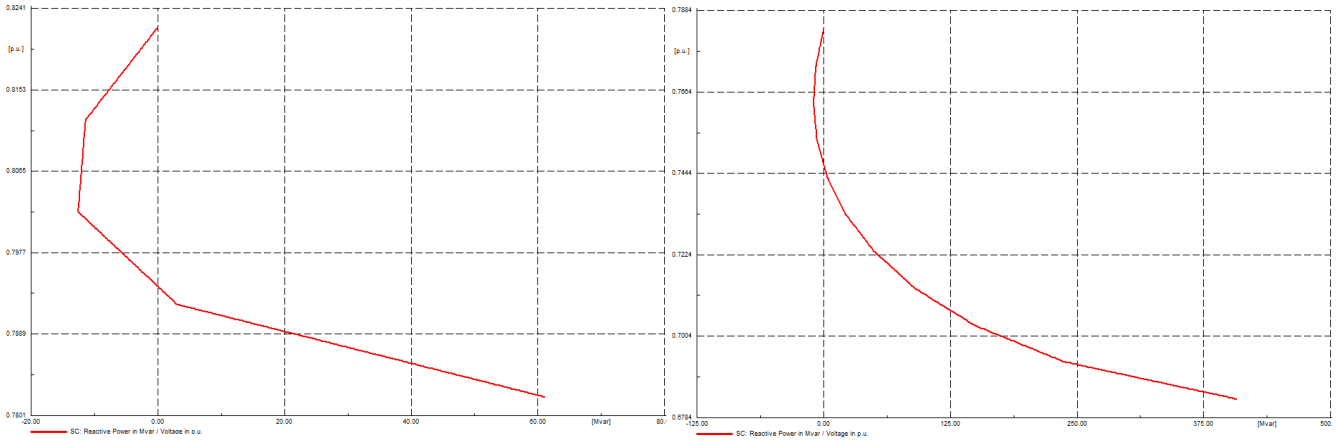
Slika P7. P-V krivulje sabirnica 4,8 i 13 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7



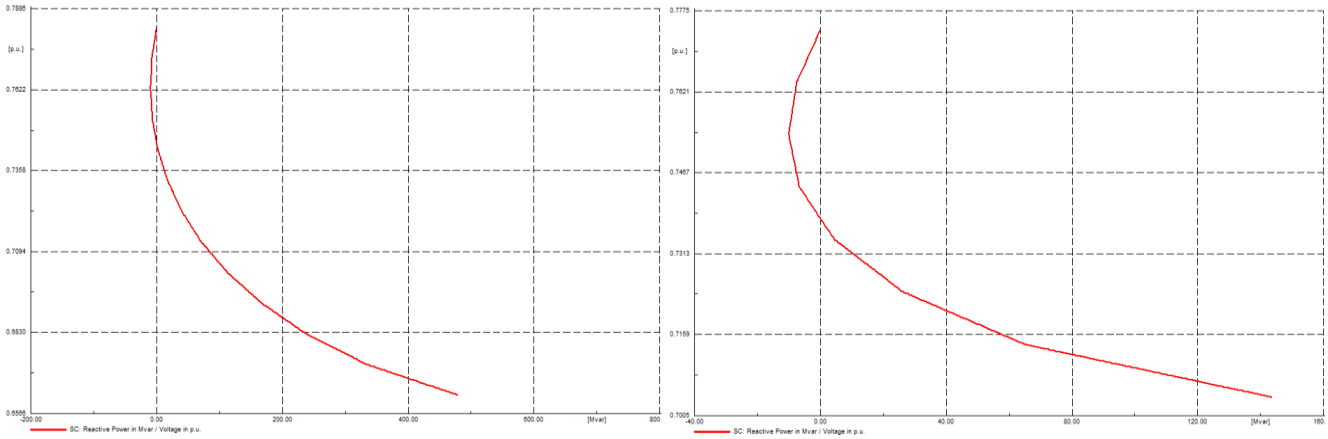
Slika P8. P-V krivulje sabirnica 5,11 i 14 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7



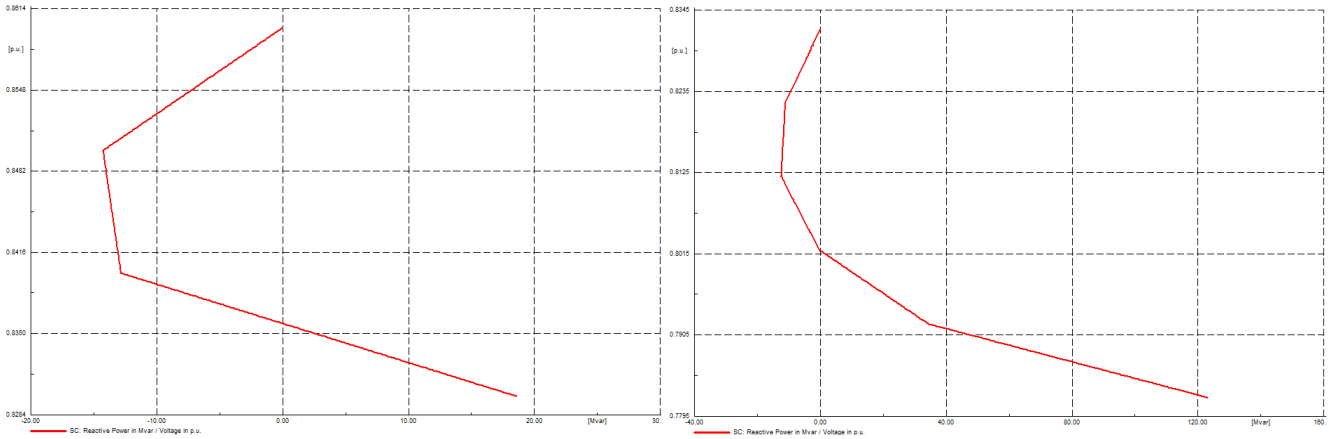
Slika P9. P-V krivulje sabirnica 6,10 i 12 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7



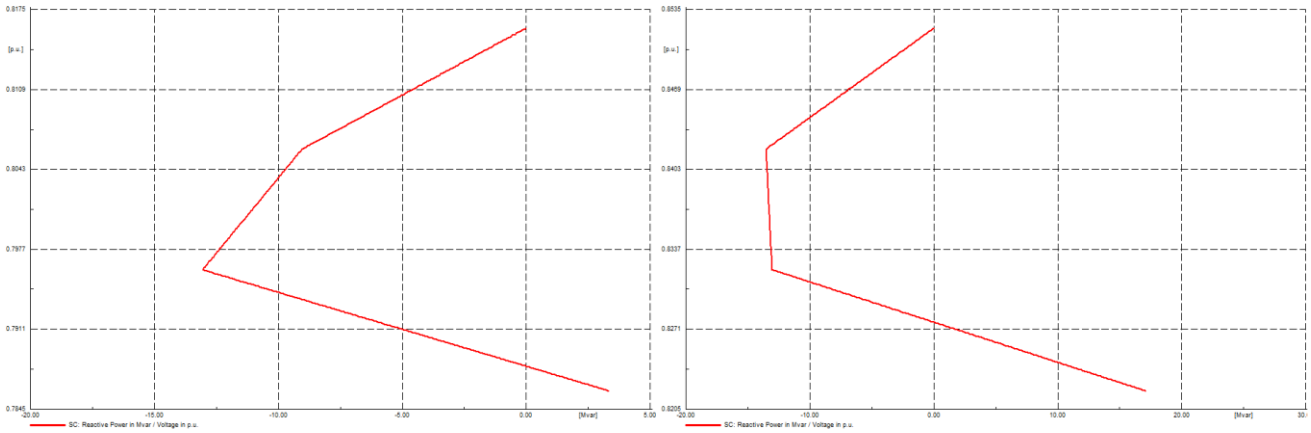
Slika P10. Q-V krivulje sabirnica 4 i 5 bez kompenzacije jalove snage



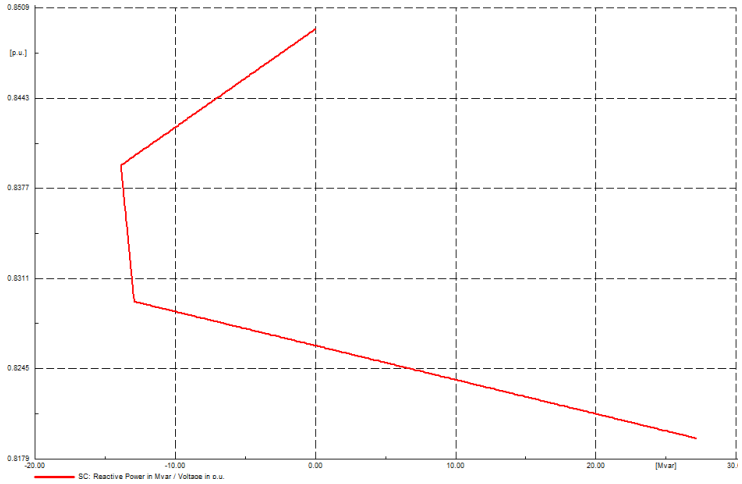
Slika P11. Q-V krivulje sabirnica 6 i 8 bez kompenzacije jalove snage



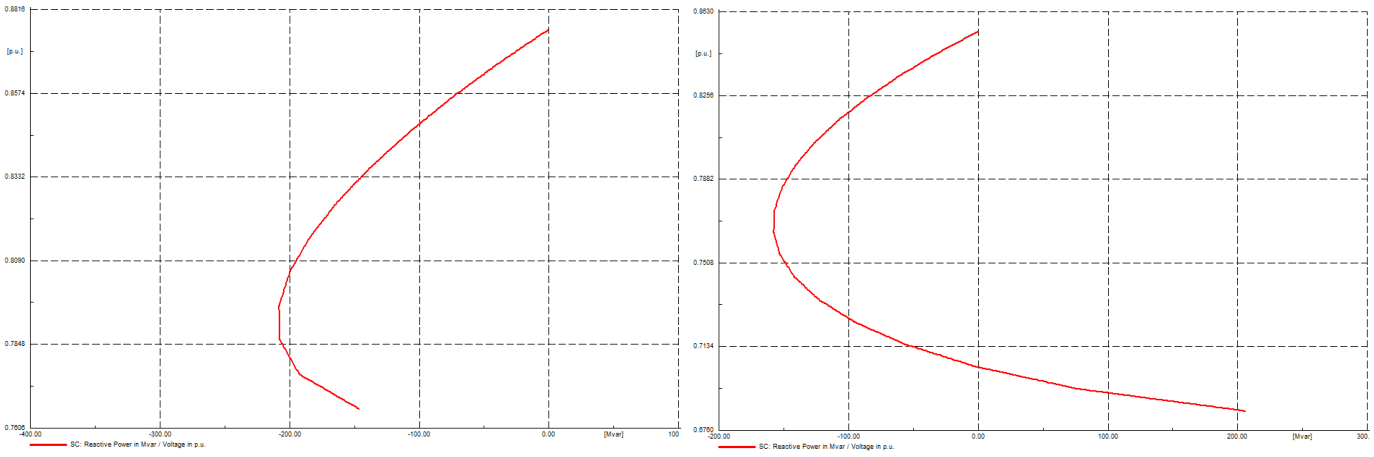
Slika P12. Q-V krivulje sabirnica 10 i 11 bez kompenzacije jalove snage



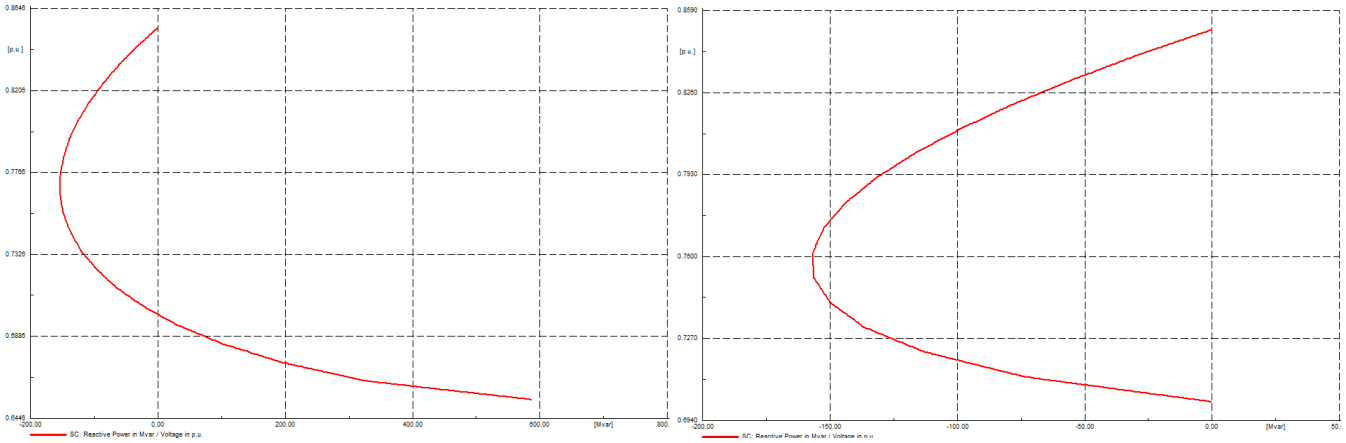
Slika P13. Q-V krivulje sabirnica 12 i 13 bez kompenzacije jalove snage



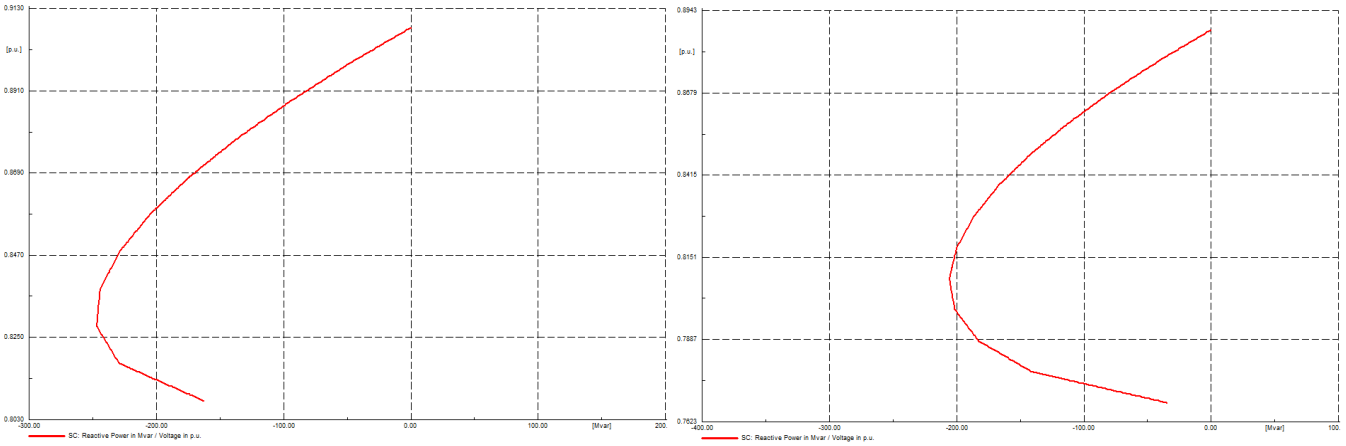
Slika P14. Q-V krivulja sabirnice 14 bez kompenzacije jalove snage



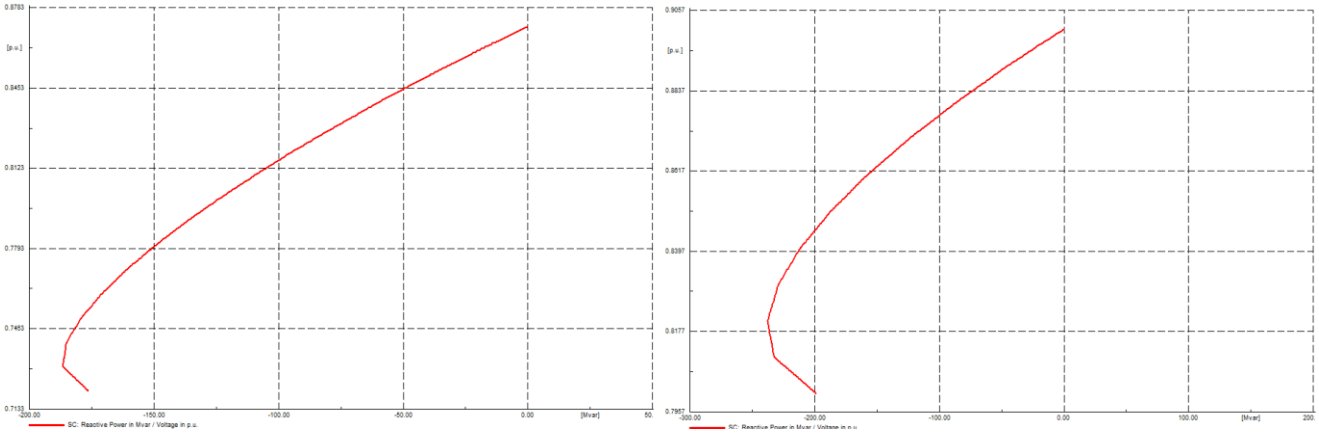
Slika P15. Q-V krivulje sabirnica 4 i 5 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



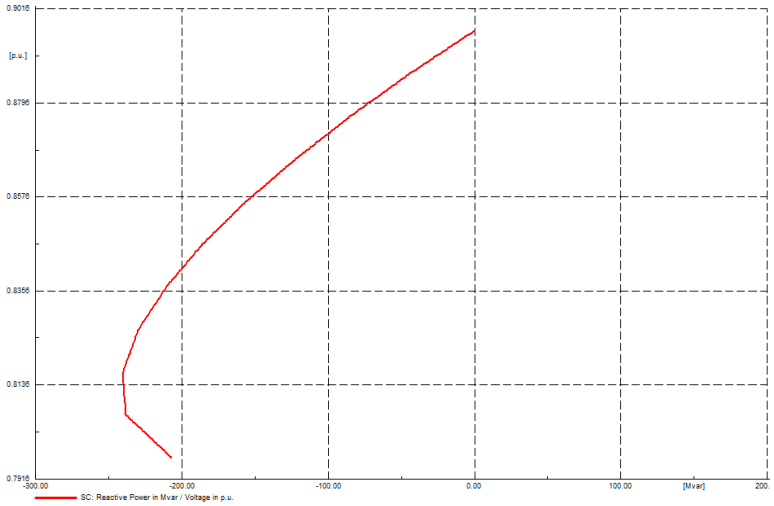
Slika P16. Q-V krivulje sabirnica 6 i 8 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



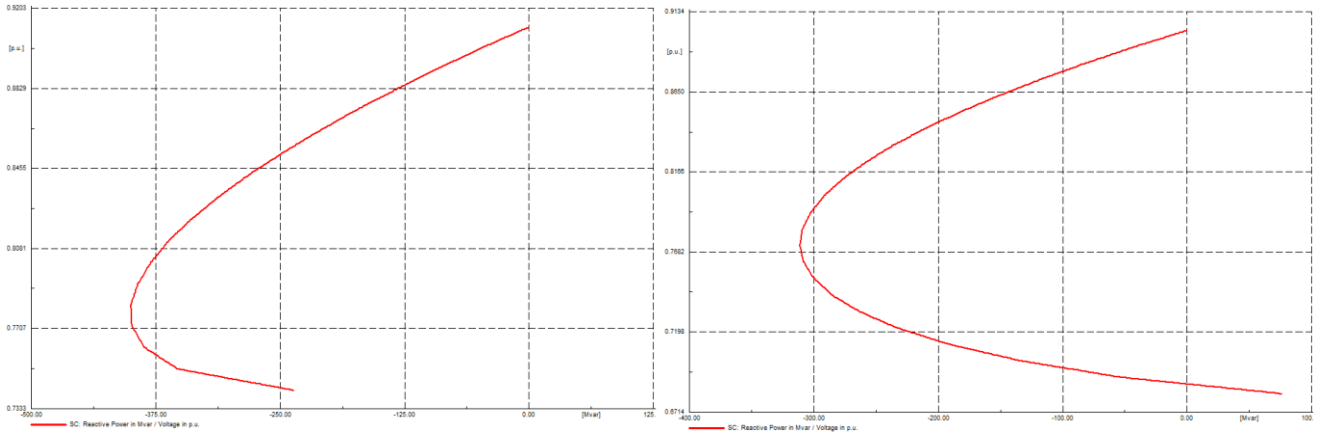
Slika P17. Q-V krivulje sabirnica 10 i 11 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



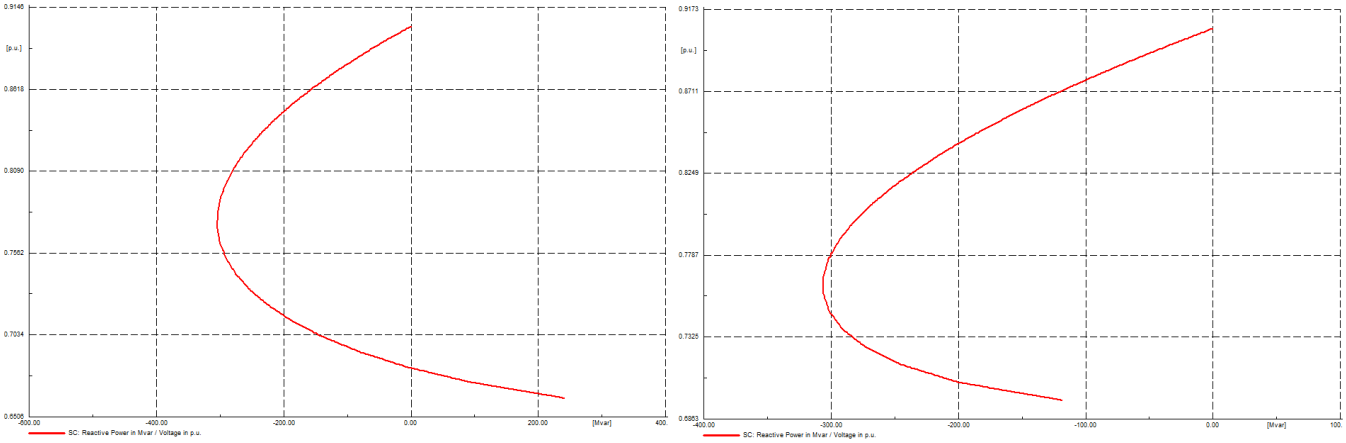
Slika P18. Q-V krivulje sabirnica 12 i 13 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



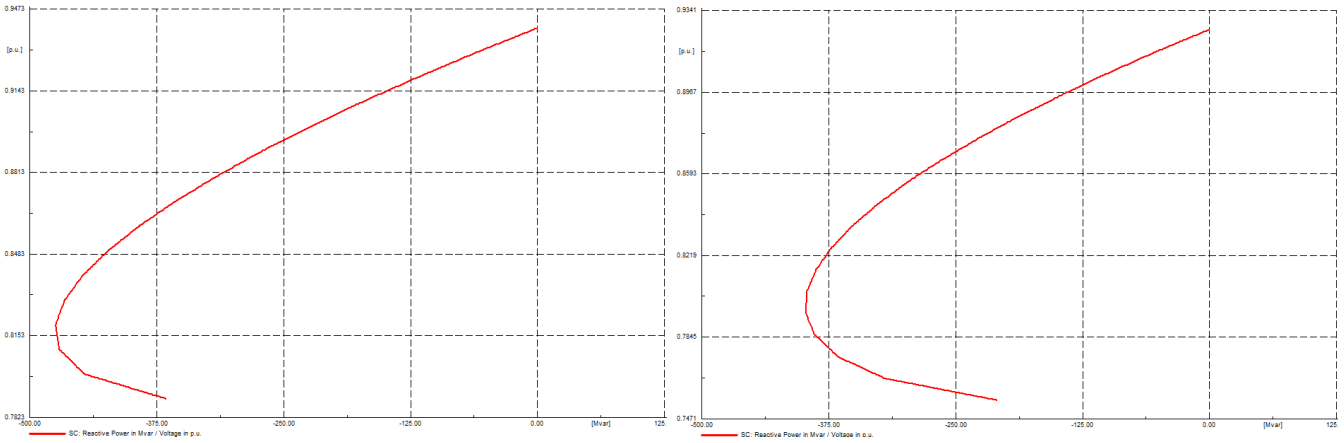
Slika P19. Q-V krivulja sabirnice 14 s kompenzacijskom baterijom 250 Mvar na sabirnici 7



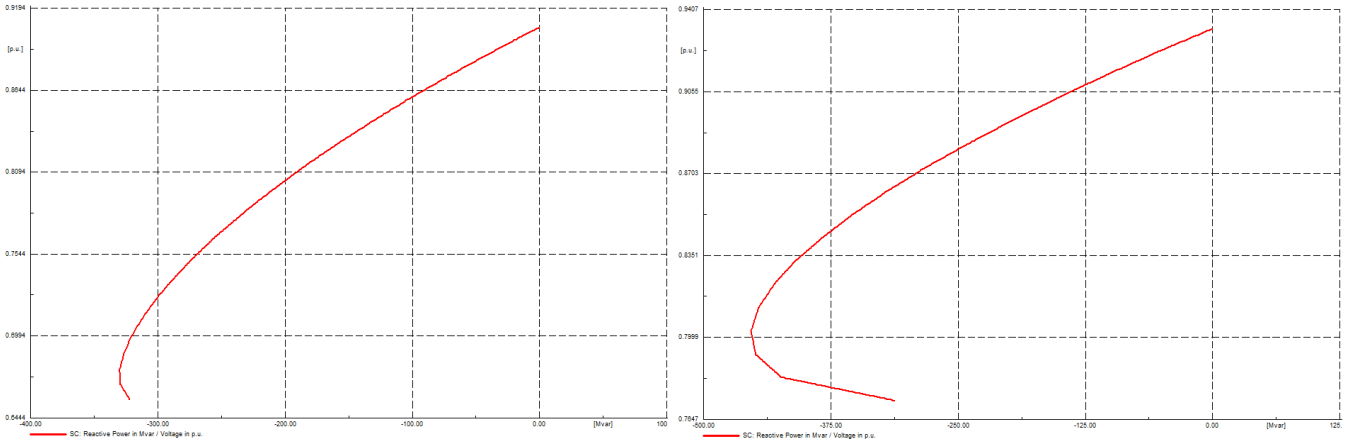
Slika P20. Q-V krivulje sabirnica 4 i 5 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7



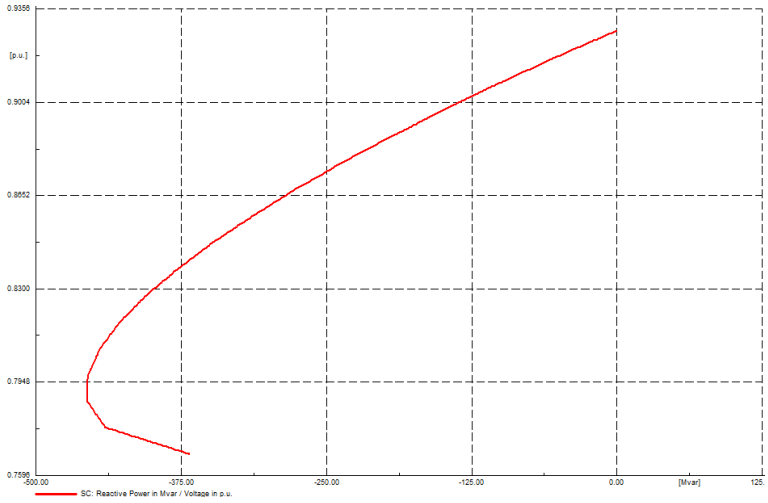
Slika P21. Q-V krivulje sabirnica 6 i 8 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7



Slika P22. Q-V krivulje sabirnica 10 i 11 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7



Slika P23. Q-V krivulje sabirnica 12 i 13 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7



Slika P24. Q-V krivulja sabirnice 14 s kompenzacijskom baterijom 500 Mvar na sabirnici 7