Utjecaj elektrana na obnovljive izvore na stabilnost u prijenosnoj mreži i prolazak kroz kvar

Damjanović, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:200:265194

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

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 OSIJEK

Sveučilišni studij

UTJECAJ ELEKTRANA NA OBNOVLJIVE IZVORE NA STABILNOST U PRIJENOSNOJ MREŽI I PROLAZAK KROZ KVAR

Diplomski rad

Josip Damjanović

Osijek, 2016.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 26.09.2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Josip Damjanović
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-827, 07.10.2014.
OIB studenta:	09952625121
Mentor:	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
Sumentor:	Doc.dr.sc. Predrag Marić
Predsjednik Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Predrag Marić
Naslov diplomskog rada:	Utjecaj elektrana na obnovljive izvore na stabilnost u prijenosnoj mreži i prolazak kroz kvar
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	Dati teorijski pregled utjecaja elektrana iz obnovljivih izvora na stabilnost napona, frekvencije i kuta te prolazak kroz kvar. U praktičnom dijelu izvršiti simulaciju na primjeru jedne vjetroelektrane. Tema dodijeljena studentu: Josip Damjanović
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 Jasnoća pismenog izražavanja: 3 Razina samostalnosti: 3
Datum prijedloga ocjene mentora:	26.09.2016.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 03.10.2016.

Ime i prezime studenta:	Josip Damjanović
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-827, 07.10.2014.
Ephorus podudaranje [%]:	7%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Utjecaj elektrana na obnovljive izvore na stabilnost u prijenosnoj mreži i prolazak kroz kvar**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora Doc.dr.sc. Predrag Marić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1 Zadatak diplomskog rada 1
2. STABILNOST NAPONA 2
2.1 Kratkoročna stabilnost napona 2
2.2 Dugoročna naponska stabilnost 7
3. KINETIČKA ENERGIJA I KONSTANTA INERCIJE 14
4. STABILNOST FREKVENCIJE 19
5. KUTNA STABILNOST 24
5.1 Jedno područje nasuprot krute mreže 24
5.2 Utjecaj distribuirane proizvodnje: prije kvara 29
5.3 Utjecaj distribuirane proizvodnje: tijekom kvara 30
5.4 Utjecaj distribuirane proizvodnje: kritično vrijeme otklanjanja kvara 31
5.5 Utjecaj distribuirane proizvodnje: nakon kvara 35
5.6 Utjecaj distribuirane proizvodnje: uvozno područje 35
6. PROLAZAK KROZ KVAR 38
6.1 Pozadina 38
6.2 Povijesni slučaji 40
6.3 Zahtjevi neosjetljivosti 41
6.4 Zahtjevi za prolazak kroz kvar u Hrvatskoj 47
6.5 Ostvarivanje prolaska kroz kvar 50
7. ANALIZA UTJECAJA VJETROELEKTRANE NA STABILNOST 53
7.1 Utjecaj povećanja djelatne i jalove potrošnje na napone sabirnica 54
7.2 Analiza oscilatorne stabilnosti 62
7.3 Analiza kratkih spojeva 64
7.3.1 Pojava kratkog spoja prije dodavanja vjetroelektrane u sustav 68
7.3.2 Pojava kratkog spoja nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav – tip A 72
7.3.3 Pojava kratkog spoja nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav – tip C 76
7.3.4 Pojava kratkog spoja nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav – tip D 80
8. ZAKLJUČAK 85
LITERATURA 86
SAŽETAK 87
ŽIVOTOPIS 88
PRILOZI 89

1. UVOD

Električna energija, važna kao glavni pokretač modernog industrijskog društva, se dugo vremena od početka njene uporabe proizvodila iz istih izvora, vodnih potencijala i fosilnih goriva. Zbog dugoročne neodrživosti takve proizvodnje, te zabrinutosti zbog onečišćenja okoliša i utjecaja na klimu koji neizbježno idu uz korištenje fosilnih goriva, danas se sve više električne energije dobiva iz obnovljivih izvora poput energije vjetra, sunca, valova. Tehnologije koje se pritom koriste za pretvorbu drugih vrsta energije u električnu su još relativno nove i u procesu usavršavanja, te još nismo u potpunosti upoznati sa svim njihovim aspektima i mogućim utjecajima na postojeći elektroenergetski sustav. U ovome diplomskom radu je analiziran utjecaj različitih tipova vjetroelektrana na stabilnost testnog sustava. Stabilnost elektroenergetskog sustava može se tumačiti kao njegova sposobnost da se vrati u stanje ravnoteže nakon pojave poremećaja. Budući da ravnotežno stanje sustava ne ovisi o samo jednoj veličini, nego o više varijabli, od kojih su najznačajnije napon, frekvencija i kutovi rotora generatora, nije moguće o stabilnosti sustava govoriti kao o jednoj veličini. Prema najvažnijim veličinama o kojima ovisi hoće li sustav biti u stanju ravnoteže, stabilnost sustava se može ugrubo podijeliti na stabilnost napona, stabilnost frekvencije i kutnu stabilnost.

Od drugog do petog poglavlja dan je teorijski pregled stabilnosti napona, frekvencije, te kutne stabilnosti sustava, a u šestom poglavlju je pobliže opisan prolazak kroz kvar. U sedmom poglavlju je opisana provedena analiza stabilnosti sustava. Korišten je IEEE 24 Bus Reliability Test System, modeliran u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory. Provedena je analiza stabilnosti sustava prije i poslije dodavanja vjetroelektrane kako bi se dobio uvid u njen utjecaj.

1.1 Zadatak diplomskog rada

Dati teorijski pregled utjecaja elektrana iz obnovljivih izvora na stabilnost napona, frekvencije i kuta te prolazak kroz kvar. U praktičnom dijelu izvršiti simulaciju na primjeru jedne vjetroelektrane.

2. STABILNOST NAPONA

Stabilnost napona se odnosi na sposobnost sustava da održava iznos napona pri prijenosu radne i jalove snage. U većini slučajeva je potrebno voditi računa o prijenosu jalove snage, no postoje ograničenja i na prijenos radne snage. Treba razlikovati "kratkoročnu stabilnost napona" pod koju spadaju vremenski rasponi od nekoliko sekunda i "dugoročnu naponsku stabilnost" koja se odnosi na vremenske raspone do nekoliko minuta. Uglavnom se raspravlja o dugoročnoj naponskoj stabilnosti, gdje se izraz "slom napona" odnosi na situaciju kada sustav više ne može održavati napon. Kratkotrajni slom napona je tradicionalno bio problem u industrijskim distribucijskim sustavima gdje asinkroni motori čine velik dio opterećenja, ali zbog različitih trendova postaje potencijalan problem i u javnim prijenosnim i distribucijskim sustavima. U idućim sekcijama raspravljat će se i o kratkoročnoj i dugoročnoj stabilnosti napona, uključujući i utjecaj distribuirane proizvodnje. [1]

Nazivni naponi u prijenosnoj mreži hrvatskog elektroenergetskog sustava su 110 kV, 220 kV i 400 kV. Odstupanja napona od nazivnih vrijednosti su propisana Mrežnim pravilima. U normalnim pogonskim uvjetima iznos napona održava se u sljedećim granicama:

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

U poremećenom pogonu, iznosi napona mogu biti u sljedećim granicama:

– u mreži 400 kV: 400 kV ±15% = 340-460 kV,
– u mreži 220 kV: 220 kV ±15% = 187-253 kV,
– u mreži 110 kV: 110 kV ±15% = 94-127 kV.

Operator prijenosnog sustava odgovoran je za uravnoteženo upravljanje jalovom snagom u svom sustavu radi održavanja napona u dopuštenim granicama u svim čvorovima mreže. U tu svrhu, operator prijenosnog sustava mora imati na raspolaganju uređaje za kompenzaciju jalove snage u mreži i kapacitete za proizvodnju jalove snage u priključenim elektranama. [2]

2.1 Kratkoročna stabilnost napona

Kratkoročna stabilnost napona uključuje terete koji trebaju povećanu radnu i jalovu snagu u vremenskim rasponima od nekoliko sekundi ili manje. Slom napona nastaje kada se opterećenje

sustava povećava sa smanjenjem iznosa napona. To će uzrokovati pozitivnu povratnu vezu: smanjenje iznosa napona će povećati opterećenje što će uzrokovati daljnje smanjenje napona. Postoje indikacije da sve veći broj uređaja koje koriste mali potrošači (računala, rasvjeta) uzima stalnu snagu od opskrbe, neovisno o naponu. Mjerenja na individualnim uređajima to potvrđuju, ali takvi uređaji još nisu u širokoj upotrebi i nije moguće provesti mjerenje koje bi pokazalo utjecaj toga na višem naponskom nivou. Gledano od strane prijenosnog sustava velik dio potrošnje danas je konstantne snage u vremenskim rasponima od nekoliko minuta, zbog djelovanja automatskih preklopki na transformatorima. Uvođenje u široku primjenu ranije spomenutih elektroničkih potrošača bi uzrokovalo da snaga ostane konstantna kraće vrijeme. Naponska granica stabilnosti se ne bi bitno promijenila, ali slom napona bi se dogodio puno brže, što bi otežalo operatoru prijenosnog sustava da poduzme potrebne mjere. [1]

Glavni razlog kratkoročnog sloma napona u postojećem sustavu ostaje to što su velik dio opterećenja motori. Asinkroni strojevi, glavni tip motornog opterećenja, uzimaju više struje kada padne iznos napona. Glavno povećanje je u reaktivnom dijelu struje, što je dio koji uzrokuje smanjenje napona u prijenosnom sustavu. Već i pri normalnom radu, veliko opterećenje asinkronim motorima može dovesti do sloma napona. No glavna briga je reaktivna snaga koju uzima asinkroni motor nakon kvara. Situacija se pogoršava kada kvar rezultira gubitkom jednog od transformatora ili vodova kojima se napaja motorno opterećenje. Stvarna granica stabilosti jako ovisi o parametrima motora, opterećenju motora, te svojstvima mehaničkog opterećenja. Moguće je procijeniti granicu stabilnosti koristeći neke grube aproksimacije. [1]

Kratki spoj u mreži rezultira smanjenjem iznosa napona, "propadom napona", na mjestu spajanja stroja. Za vrijeme tog propada nestaje magnetsko polje u zračnom rasporu rotacijskog stroja. Nakon kvara, to polje treba ponovno stvoriti. Bez prisutnosti tog magnetskog polja motor se ponaša kao kratko spojeni transformator i uzima struju oko šest puta veću od nazivne struje, sa pretežno jalovom komponentom. Takva struja uzrokuje smanjenje napona na spojnim točkama motora. Smanjen napon uzrokuje smanjenje momenta motora koji je proporcionalan kvadratu napona pri istoj brzini vrtnje. Kada je moment motora manji od mehaničkog momenta (momenta tereta) motor neće moći ubrzati na normalnu brzinu vrtnje, te stati. Radni moment motora je obično oko 50% maksimalnog momenta (prekretnog momenta), pa će pad napona na 70% onemogućiti motoru da se vrati u pogon. [1]

Razmotrimo motorno opterećenje nazivne snage S_M spojeno na sustav sa snagom kratkog spoja S_k. Neposredno nakon kvara, motorno opterećenje troši reaktivnu snagu $6 \times S_M$ što rezultira padom napona

$$\Delta U = \frac{6S_M}{S_k} \tag{2-1}$$

Pad napona ne smije biti veći od 0.3 p.u. kako bi sustav ostao stabilan, dakle vrijedi:

$$\frac{6S_M}{S_k} < 0.3 \tag{2-2}$$

Iz te jednadžbe proizlazi sljedeći argument za snagu kratkog spoja, koji je smjernica pri dizajniranju industrijskih distribucijskih sustava s velikim količinama motornog opterećenja:

$$S_k > 20 \times S_M \tag{2-3}$$

Kada je snaga kratkog spoja veća više od 20 puta od nazivne snage motornog opterećenja sustav je stabilan. [1]

Ponašanje asinkronih generatora je vrlo slično ponašanju asinkronih motora. I jedni i drugi trebaju velike količine reaktivne snage nakon kvara. Istim zaključivanjem kao za asinkrone motore, za asinkrone generatore također vrijedi isto pravilo za minimalnu snagu sustava. Kada god je ukupno opterećenje asinkronim strojevima (generatorima i motorima) veće od oko 5% iznosa snage kratkog spoja, kratkoročni slom napona može postati razlog za brigu. [1]

Važno je primjetiti da je potrebna snaga kratkog spoja ona nakon kvara. To je važno pri razmatranju sukladnosti sa (N - 1) kriterijem. Na primjer, kada je grupa asinkronih generatora spojena s mrežom preko dva kabela, kako bi se poboljšala pouzdanost, snaga kratkog spoja treba biti 20 puta veća od ukupne snage strojeva, sa jednim kabelom nedostupnim. Isto vrijedi i za industrijske instalacije s velikim opterećenjem od asinkronih motora. Naravno, moguća je i izvedba u kojoj je snaga kratkog spoja 20 puta veća od snage strojeva kada rade oba voda, ali tada kvar na jednom od kabela može uzrokovati kratkoročni slom napona i gubitak cijele grupe asinkronih generatora. [1]

Pri spajanju asinkronih strojeva na sustav, vodi se računa da ukupna snaga ne bude više od 5% razine kvara. To ograničenje postavlja udarna uklopna struja asinkronih generatora nakon kvara. To je osiguranje od najgoreg mogućeg slučaja, da se pri istovremenom vršnom opterećenju i maksimalnoj proizvodnji dogodi trofazni kratki spoj blizu trafostanice. Može se činiti da je vrlo malo vjerojatno da se to dogodi, ali upravo je takav pristup, koji uzima najgoru moguću situaciju u obzir, razlog pouzdanosti prijenosnog sustava na koju smo naviknuti. Posljedica takvog pristupa je što čini spajanje velikih količina distribuirane proizvodnje i velikih vjetroparkova skupljim. [1]

Rad prijenosnog sustava treba biti takav da niti jedan kvar sam ne može rezultirati

nestabilnošću. Kada se razina kvara mijenja, sustav treba biti stabilan čak i za najnižu razinu kvara. Pri radu sa niskim razinama kvara može se koristiti smanjenje proizvodnje. Pod smanjenjem se smatra da se asinkroni generatori isključuju, a ne samo smanjuje proizvodnja pojedinačnih generatora. U tom slučaju nema potrebe za automatskim odspajanjem u slučaju, na primjer ispada prijenosnog voda (kao u "interkonekcijskim" shemama ili "shemama posebne zaštite"). Prema pravilima za rad prijenosnog sustava, sustav smije biti nesiguran od 10 do 30 minuta, što je dovoljno za ručno smanjenje proizvodnje. [1]

U nekim slučajevima je moguće poboljšati stabilnost korištenjem interkonekcijskih shema, ovisno o specifičnim svojstvima sustava. Kada se kratkoročna stabilnost napona očekuje za ograničen broj lokacija kvara, vjetropark koji uzrokuje slom napona se može brzo isključiti kada se bilo koji od tih kvarova dogodi. To se može postići koristeći interkonekciju od prekidača koji otklanjaju te kvarove do prekidača koji će isključiti vjetropark. Moguće su i naprednije metode kod kojih se samo neke od turbina isključuju, a broj isključenih turbina ovisi o količini proizvodnje neposredno prije kvara. [1]

Kada bi slom napona utjecao samo na jednog korisnika koji pristaje da povremeno bude isključen, dopušteno je rad bez rezerve. Takva situacija može nastati ne samo sa spajanjem velikog vjetroparka, nego i sa spajanjem industrijske instalacije. Korisnik tada prihvaća manju pouzdanost opskrbe u zamjenu za smanjenje cijene spajanja. [1]

Za bolju procjenu razine integracije distribuirane proizvodnje do koje je njen utjecaj povoljan na sustav u cjelini, potreban je detaljni dinamički model proizvodnje i potrošnje. Takav model treba uključivati i proizvodnju i potrošnju spojene na obližnje trafostanice. Detaljni modeli vjetroparkova (glavni izvor asinkronih generatora) su obično dostupni. Glavna nesigurnost proizlazi iz modeliranja dinamičnog ponašanja potrošnje. Neki modeli se preporučuju za studije stabilnosti, ali oni su u većini slučajeva temeljeni na iskustvu stečenom prije mnogo godina, koje možda ne vrijedi za današnje vrste opterećenja. Zbog promjena tipa potrošača u domaćinstvima i kod komercijalnih potrošača rezultati dobiveni iz takvih modela mogu biti netočni. Ako kratkoročna stabilnost napona postane ozbiljna prepreka spajanju vjetroelektrana bit će potrebno napraviti nove modele. Najprikladniji način za izradu tih modela bi bio korištenje registratora prijelaznih pojava kako bi se dobili podaci o stvarnom dinamičkom ponašanju opterećenja spojenog na prijenosni sustav. [1]

Kratkoročna stabilnost napona je briga samo kod asinkronih generatora. Sinkroni generatori nemaju taj problem (kod njih je problem kutna stabilnost), kao ni generatori sa potpunim priključkom pomoću elektroničkih energetskih pretvarača. Ponašanje dvostrano napajanih asinkronih generatora (engl. *DFIG*) ovisi o detaljima njivog upravljanja i zaštite. Iako

je moguće sprječiti kratkoročni slom napona korištenjem tih generatora, većina njih koji su trenutno spojeni na mrežu će narušiti kratkoročnu stabilnost napona. Daleko najvažnija primjena asinkronih generatora je za korištenje energije vijetra. Kroz zadnjih nekoliko godina se sve više koriste dvostrano napajani asinkroni generatori i generatori sa potpunim priključkom pomoću elektroničkih energetskih pretvarača, što daje naslutiti da će kratkoročna stabilnost napona s vremenom postajati sve manji problem, osim ako dođe do uvođenja velikog broja malih vjetroturbina spojenih na distribucijski sustav. [1]

Dostupno je više metoda za ublažavanje rizika od kratkoročnog naponskog sloma. Spajanje sinkronih strojeva i potpuni priključci pomoću elektroničkih energetskih pretvarača su već spomenuti kao opcija. Za asinkrone strojeve je glavno rješenje omogućiti dostupnost velikih količina jalove snage. Uklopne kondenzatorske baterije, statički kompenzatori jalove snage (eng. *SVC – static VAR compensator*) i statički sinkroni kompenzatori (engl. *STATCOM*) se mogu koristiti kako bi se poboljšala stabilnost. Potrošnja jalove snage nakon kvara je oko 6 puta veća od nazivne snage, pa za svaki MVA snage dodan iznad granice potrebno je 6 MVAr jalove snage. [1]

Međutim, količina kondenzatorskih baterija koja se može spojiti na pod-prijenosni sustav je ograničena. Između kondenzatorske baterije i izvora se javlja harmonička rezonancija. Također, javljaju se tranzijenti kada je baterija pod naponom i kvar otklonjen. Za velike baterije su često potrebni harmonički filteri, što dodatno povisuje cijenu. [1]

Isključenje asinkronih motora zbog podnapona je također način zaštite sustava od kratkoročnog sloma napona. Treba se pobrinuti da se nakon oporavka napona ne priključe ponovno sve jedinice u isto vrijeme. Kao alternativna se mogu koristiti meki upuštači (engl. *soft starter*) kako bi ograničili udarnu uklopnu struju. [1]

Isključenje asinkronih generatora je postalo problem samo po sebi jer može rezultirati iznenadnim gubitkom velikog dijela proizvodnje zbog kvara u prijenosnom sustavu. Zbog zahtjeva za prolazak kroz kvar koje postavljaju operatori prijenosnog sustava isključenje zbog podnapona kako bi se spriječio slom napona više nije prikladno rješenje. [1]

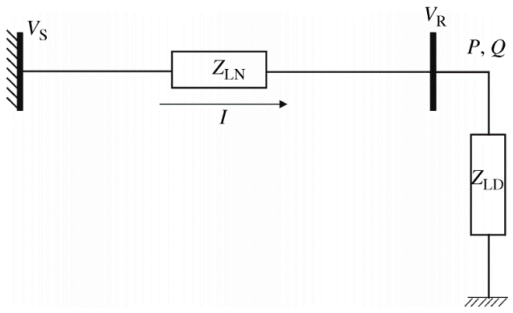
Studija kratkoročne stabilnosti je provedena u Danskom prijenosnom sustavu. Tijekom perioda sa jakim vjetrom i malom potrošnjom, proizvodnja iz vjetroelektrana pokriva velik dio, ili ponekad čak i čitavu potrošnju zapadnog dijela Danske. Rad sustava na energiju iz vjetroelektrana izlaže sustav velikom riziku od kratkoročnog sloma napona nakon kvara. Posebno ako se radi o kvaru blizu izmjenične međuveze s Njemačkom. Razlog tome je kombinacija reaktivne snage koju povlače asinkroni strojevi nakon kvara i nedostatka reaktivne snage u rezervi kada konvencionalne elektrane nisu u pogonu. Više konvencionalnih generatora,

koji mogu osigurati rezervu jalove snage, moraju biti u pogonu kako bi se to spriječilo. Budući da ti generatori imaju minimalnu proizvodnju, to rezultira viškom radne snage u sustavu zapadne Danske. Taj višak se obično izvozi putem istosmjerne veze u Švedsku i Norvešku. Minimalni broj konvencionalnih generatora koji treba biti u pogonu ovisi o broju izmjeničnih veza s Njemačkom koje su aktivne. Istosmjerne veze sa Norveškom i Švedskom ne osiguravaju nikakvu rezervu jalove snage. Provedena studija je pokazala da se sustav oporavlja, čak i nakon najgoreg mogućeg kvara, kada su aktivne sve veze s Njemačkom i barem dva konvencionalna generatora su u pogonu. Kako je vrijeme pokretanja tih generatora poprilično dugo (do nekoliko sati), treći generator mora biti u pogonu kako bi osigurao rezervu u slučaju prisilnog zastoja. Kada je jedna od veza s Njemačkom neaktivna, barem pet konvencionalnih generatora treba biti u pogonu kako bi omogućili dovoljnu stabilnost i rezervu: četiri generatora za stabilnost i jedan za rezervu. Čak i kada su obje veze s Njemačkom aktivne, bar četiri konvencionalna generatora trebaju biti u pogonu. Hoće li u pogonu biti tri ili četiri konvencionalna generatora ovisi o procijenjenoj vjerojatnosti da jedna od veza zakaže i dogodi se težak kvar prije nego se stigne pokrenuti dodatnu proizvodnju. [1]

To se također može opisati u terminima primarne i sekundarne rezerve, ali za jalovu snagu. Primarna rezerva je jalova snaga potrebna asinkronim strojevima nakon kvara. Potreba za tom jalovom snagom se smanjuje nakon nekoliko sekundi, pa nije potrebna sekundarna rezerva za obnavljanje primarne. No ipak postoji potreba za sekundarnom rezervom koja će obnoviti primarnu nakon gubitka konvencionalnog generatora ili nakon gubitka jedne od prijenosnih veza prema Njemačkoj. U prvom slučaju sustav gubi primarnu rezervu zajedno s gubitkom generatora. U drugom slučaju se povećava potreba za primarnom rezervom. Sekundarna rezerva u tim slučajevima smanjuje vjerojatnost da se dogodi ozbiljan kvar. [1]

2.2 Dugoročna naponska stabilnost

Dugoročna naponska stabilnost je vrlo kompliciranа tema za koju je potrebno puno više od nekoliko stranica kako bi se potpuno objasnila. U ovoj sekciji ćemo dati samo kratki uvod i fizikalnu podlogu dugoročne naponske stabilnosti, te opisati neke od načina kako distribuirana proizvodnja na nju utječe. [1]



Slika 2.1 Model prijenosnog voda za objašnjavanje sloma napona [1]

Dugoročna naponska stabilnost je važna tema vezana za prijenosni sustav povezana s prijenosom velikih količina energije preko velikih udaljenosti. Razmotrimo sustav na slici 2.1 Teret sa impedancijom Z_{LD} se napaja preko voda impedancije Z_{LN}. Sabirnica preko koje se teret napaja je beskonačne snage, odnosno napon V_S ostaje konstantan. Struja I je dana izrazom:

$$I = \frac{V_S}{Z_{LD} + Z_{LN}} \tag{2-4}$$

gdje je $Z_{LD} = Z_{LD}\cos\varphi + jZ_{LD}\sin\varphi$ i $Z_{LN} = Z_{LN}\cos\theta + jZ_{LN}\sin\theta$.

$$V_R = \frac{Z_{LD}}{Z_{LD} + Z_{LN}} \tag{2-5}$$

Napon na kraju voda je:

$$V_R = Z_{LD}I = \frac{1}{\sqrt{1 + (Z_{LD}/Z_{LN})^2 + 2(Z_{LD}/Z_{LN})\cos(\theta - \phi)}}\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}V_S \tag{2-6}$$

Kompleksna snaga predana teretu se dobije iz kompleksnih napona i struje:

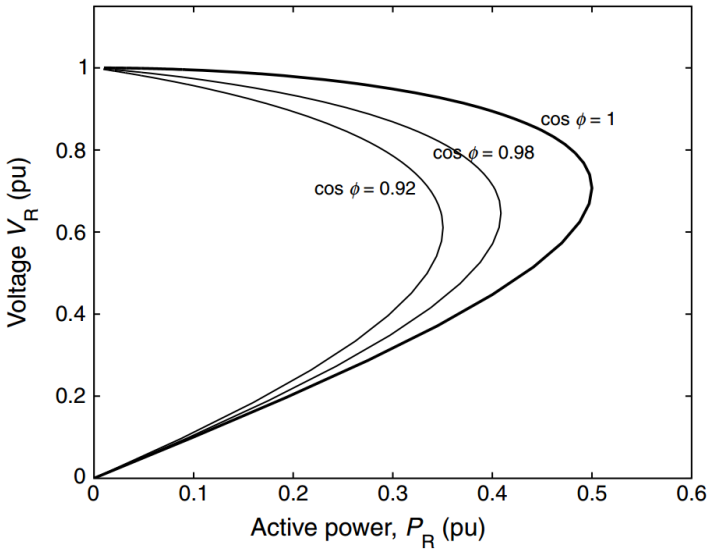
$$S_R = V_R I^* \tag{2-7}$$

$$S_R = \frac{V_S V_S^*}{(Z_{LD} + Z_{LN})(Z_{LD} + Z_{LN})^*}Z_{LD} \tag{2-8}$$

Radna snaga predana teretu je realni dio kompleksne snage:

$$P_R = \frac{V_S^*}{(Z_{LD} + Z_{LN})(Z_{LD} + Z_{LN})^*}R_{LD} \tag{2-9}$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{1 + (Z_{LD}/Z_{LN})^2 + 2(Z_{LD}/Z_{LN})\cos(\theta - \phi)}\left(\frac{V_S}{Z_{LN}}\right)^2\cos\phi \tag{2-10}$$



Slika 2.2 Veza između radne snage prenesene vodom i napona na kraju prijenosnog voda [1]

Slika 2.2 prikazuje vezu između radne snage P i napona V_R za sustav na slici 2.1 Prikazane su krivulje za različite vrijednosti faktora snage tereta ($cos\phi$). Gubici prijenosnog voda su zanemareni ($sin\theta = 1$). [1]

Valja primjetiti da za svaku vrijednost prenesene snage postoje dvije vrijednosti napona: jedna za visoki napon (mali pad napona) i slabu struju, te jedna za niski napon i jaku struju. Postoje dva područja rada na ovim krivuljama: prvo područje rada je u dijelu krivulje iznad pregiba, gdje male promjene snage uzrokuju male promjene napona, a drugo područje rada je ispod pregiba krivulje gdje male promjene opterećenja uzrokuju velike promjene napona, te će dovesti do naponske nestabilnosti. Za bilo koju od krivulja postoji maksimalna snaga koja se može prenjeti. Vrijednost te snage se naglo smanjuje sa smanjenjem faktora snage tereta, kao što se vidi iz usporedbe tri prikazane krivulje. Za jedinični faktor snage i uz zanemarenje gubitaka, maksimalna količina radne snage koja se može prenjeti vodom je:

$$P_{max} = 0.5\frac{U^2}{X} \tag{2-11}$$

gdje je U napon na početku voda, a X reaktancija voda.

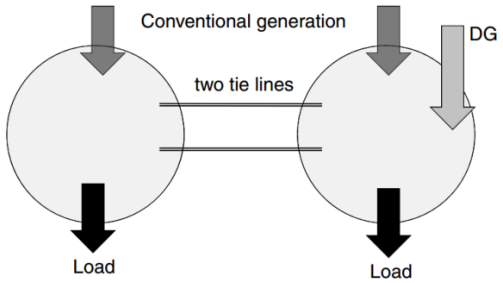
Izrazi za računanje maksimalne snage koja se može prenjeti vodom za manje faktore snage su dani u tablici 2.1. Prvi stupac tablice daje omjer jalove i radne snage opterećenja, drugi stupac daje pripadni faktor snage opterećenja, a treći stupac daje izraz za računanje maksimalne snage koja se može prenjeti vodom. [1]

Tablica 2.1 Utjecaj opterećenja jalovom snagom na prijenosni kapacitet voda [1]

Q/P	cosφ	P_{max}
0%	1.000	$0.5\ \frac{U^2}{X}$
10%	0.995	$0.45\ \frac{U^2}{X}$
20%	0.98	$0.41\ \frac{U^2}{X}$
30%	0.96	$0.37\ \frac{U^2}{X}$
40%	0.93	$0.34\ \frac{U^2}{X}$

Kada se prijenosni sustav približava granici sloma napona zanimljivo je djelovanje transformatora sa automatskim regulacijskim preklopkama. Ako se regulacijska preklopka na transformatoru koji je na kraju prijenosnog voda prebaci kako bi održala napon tereta konstantnim, povećat će se struja kroz vod, što će uzrokovati dodatno smanjenje napona. Zato neki mrežni operatori kao krajnju mjeru za sprječavanje sloma napona blokiraju djelovanje regulacijskih preklopki transformatora. [1]

Iz slike 2.2 i tablice 2.1 vidljivo je da je faktor snage kritični parametar za stabilnost napona. Za niske faktore snage je slom napona vjerojatniji. Zato je opravdano za dugačke prijenosne vodove održavati faktor snage blizu jediničnom pomoću kondenzatora, sinkronih kompenzatora ili na neki drugi način. [1]



Slika 2.3 Sustav za primjer sa dva glavna područja proizvodnje i opterećenja [1]

Na slici 2.3 je za primjer prikazan vrlo pojednostavljen sustav kako bi se pojasnio utjecaj distribuirane proizvodnje na stabilnost napona. Sustav se sastoji od dva geografski odvojena područja spojena preko dva prijenosna voda. Sustav je dovoljno jak unutar oba područja, ograničenje prijenosnog kapaciteta postavlja granica stabilnosti napona poveznice između dva sustava. [1]

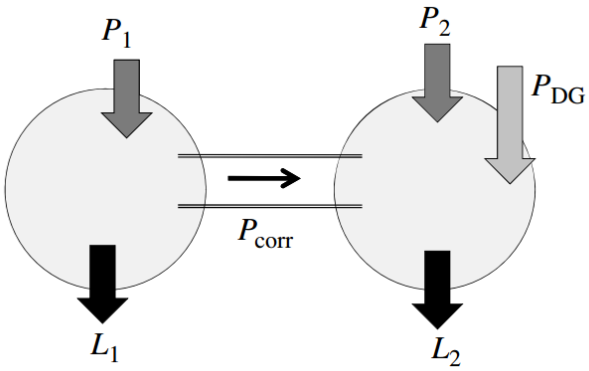
Kada rade svi vodovi stabilnost napona ne predstavlja razlog za brigu. (N - 1) kriterij implicira da nije dozvoljeno pustiti prijenosni sustav da radi duže vrijeme blizu granice stabilnosti napona. U tom slučaju prijenos treba biti smanjen. Problem nastaje ako dođe do ispada jednog od vodova. Tok snage kroz vodove koji spajaju dva područja treba biti manji od njihovog zajedničkog prijenosnog kapaciteta. Tok snage je jednak neravnoteži između dva područja. Koristeći notaciju na slici 2.4, za tok snage kroz vodove kojima su područja povezana dobijemo:

$$P_{corr} = (P_1 - L_1) = (P_2 + P_{DG} - L_2) \tag{2-12}$$

Prema (N - 1) kriteriju, sustav treba biti stabilan za sve individualne događaje ("možebitnosti") koji se u sustavu mogu dogoditi. Gubitak najvećeg generatora je obično najgora mogućnost. Količina snage koja se prenosi između dva područja stoga treba uvijek biti manja od prijenosnog kapaciteta umanjenog za iznos primarne rezerve koju treba uvesti nakon gubitka najvećeg generatora na strani koja prima energiju. Prelazak sa velikih konvencionalnih elektrana na distribuiranu proizvodnju može rezultirati time da najveće proizvodne jedinice rijeđe budu u pogonu. Ako je gubitak najveće proizvodne jedinice najgori slučaj, prelazak na manje proizvodne jedinice će povećati količinu snage koja se može prenositi. Siguran prijenosni kapacitet također treba uzeti u obzir svaki prijenos primarne rezerve nakon gubitka velike proizvodne jedinice. [1]

Ako je P_{VSL} granica naponske stabilnosti za prijenos između dva područja, a $P_{gen,large}$ snaga koju treba uvesti zbog gubitka najvećeg generatora na strani koja prima energiju, sigurni prijenosni kapacitet je:

$$P_{corr,max} = P_{VSL} - P_{gen,large} \tag{2-13}$$



Slika 2.4 Tokovi snaga u sustavu sa slike 2.3 [1]

Za važan povezni povezni prijenosni sustav, najgori slučaj ne mora biti ispad najveće elektrane,

nego gubitak jednog od poveznih vodova prijenosnog sustava. Uz pretpostavku da se povezni prijenosni sustav sastoji od N_L paralelnih vodova, siguran prijenosni kapacitet je:

$$P_{corr,max} = \left(1 - \frac{1}{N_L}\right) P_{VSL} \tag{2-14}$$

Ovdje je pretpostavljeno da je prijenosni kapacitet proporcionalan broju vodova. U stvarnosti neće svi vodovi imati jednak utjecaj na prijenosni kapacitet, te se zato uvijek računa sa najgorim mogućim slučajem. [1]

Gubitak voda postaje najgori slučaj kada je siguran prijenosni kapacitet prema (2-14) manji od onoga prema (2-13). Iz toga proizlazi sljedeća nejednakost:

$$P_{VSL} > N_L \times P_{gen,large} \tag{2-15}$$

Drugim riječima, gubitak voda je najgori mogući slučaj kada je snaga granice naponske stabilnosti podjeljena s brojem prijenosnih vodova veća od snage koju treba uvesti zbog gubitka najvećeg generatora. [1]

Gornja rasprava je namjerno nešto pojednostavljena. U stvarnosti, situacija je puno kompliciranija. Kod gubitka najvećeg generatora, ostali generatori u povezanom sustavu će preuzeti proizvodnju koristeći primarnu rezervu. Ova redistribucija proizvodnje će se dogoditi unutar jedne minute. Dugoročni slom napona je poprilično spor proces, koji traje nekoliko minuta. Operator prijenosnog sustava stoga stoga može razmatrati situaciju nakon redistribucije kao referentnu za određivanje je li sustav stabilan ili ne. Rezultat toga uvelike ovisi o tome gdje je smještena primarna rezerva. Kada je sva primarna rezerva smještena u onom dijelu povezanih sustava koji prima energiju, prijenos kroz povezne vodove će nakon redistribucije biti isti kao prije gubitka generatora. U tom slučaju gubitak generatora ne bi utjecao na dugoročni tok snage kroz povezne vodove. Suprotan efekt nastaje ako je primarna rezerva smještena u onom dijelu sustava koji šalje energiju. U tom slučaju će povezni vodovi morati moći prenjeti primarnu rezervu. U većini sustava je primarna rezerva raspodjeljena kroz sustav tako da bude potrebno prenjeti samo dio rezerve poveznim vodovima. [1]

Također treba razmotriti ravnotežu jalove snage. Velike elektrane ne proizvode samo radnu snagu, nego također podržavaju ravnotežu jalove snage. Nakon gubitka velike elektrane, u okolnom području se može pojaviti privremeni nedostatak jalove snage. Prijenos jalove snage uzrokuje ozbiljan pad granice naponske stabilnosti. Kada nema dovoljno jalove snage u rezervi na nekom području, efektivni prijenosni kapacitet do tog područja se znatno smanji jer dio kapaciteta treba držati u rezervi za prijenos jalove snage u hitnim slučajevima. [1]

Imunost ili prolazak kroz kvar distribuirane proizvodnje je još jedan faktor važan za naponsku stabilnost. Razmotrimo ponovno situaciju prikazanu na slici 2.4. Kvar negdje u području može rezultirati gubitkom velike količine distribuirane proizvodnje. Ako pretpostavimo da opterećenje L_2 nije pogođeno (u stvarnosti će potrošnja također biti smanjena zbog kvara), to smanjenje proizvodnje treba nadoknaditi uvozom energije u područje. To daje treću gornju granicu za siguran prijenosni kapacitet u područje:

$$P_{corr,max} = P_{VSL} - P_{DG} \tag{2-16}$$

gdje je u obzir uzet najgori slučaj: gubitak sve distribuirane proizvodnje bez smanjenja potrošnje. Mala je vjerojatnost da se takva kombinacija dogodi, pa je potrebna točnija procjena ako se pomoću (2-16) određuje limit. [1]

Ovakvim zaključivanjem, distribuirana proizvodnja postavlja limit na prijenosni kapacitet onda kada maksimalna količina distribuirane proizvodnje koja bi ispala zbog kvara postane veća od potrebnog uvoza nakon ispada najvećeg generatora i veća od prijenosnog kapaciteta po liniji. Ispadanje distribuirane proizvodnje također smanjuje siguran prijenosni kapacitet kada se dogodi zbog kvara koji također rezultira gubitkom jedne od poveznih linija ili gubitkom najvećeg generatora. U tom slučaju je siguran prijenosni kapacitet umanjen za maksimalnu količinu distribuirane proizvodnje koja se može izgubiti zbog takvog kvara. [1]

Prisutnost distribuirane proizvodnje u distribucijskom sustavu će smanjiti tokove radne snage, što poboljšava naponsku stabilnost. Smanjena struja također smanjuje gubitke zbog jalove snage u prijenosnim i distribucijskim transformatorima. Detaljna teoretska studija koja je razmatrala različite kombinacije je pokazala da prisutnost proizvodnje u distribucijskom sustavu tijekom perioda velike potrošnje smanjuje potrebu za radnom i jalovom snagom iz prijenosnog sustava. To vrijedi za sve tipove proizvodnje, uključujući i asinkrone generatore. Stoga je zaključak da će bilo koji tip distribuirane proizvodnje inicijalno poboljšati naponsku stabilnost. [1]

3. KINETIČKA ENERGIJA I KONSTANTA INERCIJE

Količina kinetičke energije u sustavu jako utječe na tranzijentnu stabilnost i stabilnost frekvencije. I tranzijentna stabilnost i stabilnost frekvencije jako ovise o količini kinetičke energije u sustavu koja je direktno povezana sa inercijskim konstantama pojedinih proizvodnih jedinica. Smanjenje kinetičke energije će učiniti sustav nestabilnijim. Tranzijentna stabilnost će biti detaljnije opisana u poglavlju 5, a frekvencijska stabilnost u poglavlju 4, dok će ovo poglavlje obrazložiti utjecaj distribuirane proizvodnje na količinu kinetičke energije prisutne u sustavu. [1]

Kinetička energija mase sa momentom inercije J koje rotira kutnom brzinom ω je jednaka

$$\varepsilon_{kin} = \frac{1}{2} J \omega^2 \tag{3-1}$$

U studijama elektroenergetskih sustava se kinetička energija proizvodne jedinice često predstavlja preko inercijske konstante. Inercijska konstanta H je omjer kinetičke energije pri nazivnoj brzini (koja odgovara frekvenciji sustava koja iznosi 50 ili 60 Hz) i nazivne snage jedinice S_{nom}:

$$H = \frac{(1/2) J {\omega_0}^2}{S_{nom}} \tag{3-2}$$

gdje je $\omega_0 = 2\,\pi\, f_0$, a f_0 je nazivna frekvencija. Inercijska konstanta za električni motor se može definirati na isti način. Ukupni iznos kinetičke energije prisutne u sinkroniziranom sustavu je suma svih kinetičkih energija svih pojedinih strojeva:

$$\varepsilon_{tot} = \sum_i \varepsilon_i = \sum_i S_i H_i \tag{3-3}$$

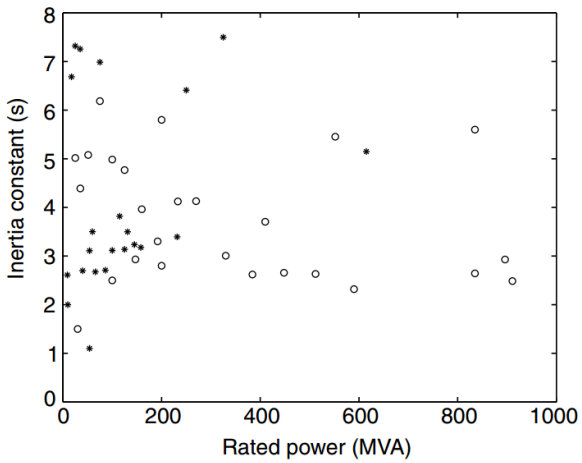
Strogo gledano, desna strana izraza vrijedi samo kada je frekvencija sustava jednaka nazivnoj frekvenciji. Bilo kakvo odstupanje od nazivne frekvencije uzrokuje promjenu ukupne količine kinetičke energije u sustavu. To je jedan od stabilizirajućih faktora velikih sinkroniziranih sustava. No budući da frekvencija nikada ne odstupa od nazivne vrijednosti za više od nekoliko postotaka, (3-3) je dobra aproksimacija. [1]

Ponekad se koristi i inercijska konstanta sustava kao cjeline. Ona se definira na isti način kao i za jedan stroj:

$$H_{tot} = \frac{\varepsilon_{tot}}{H_{tot}} = \frac{\sum_i H_i S_i}{S_{tot}} \tag{3-4}$$

Izbor bazne snage S_{tot} ovdje igra važnu ulogu. Ako se za baznu snagu uzme suma nazivnih snaga svih strojeva dobije se puno manja vrijednost nego ako se za baznu snagu uzme ukupna potrošnja. To je važno uzeti u obzir kada se raspravlja o utjecaju distribuirane proizvodnje na inercijsku konstantu. [1]

Zamjena velikih generatora spojenih na prijenosni sustav distribuiranom proizvodnjom će promjeniti količinu kinetičke energije prisutne u sustavu, što može imati velik utjecaj na stabilnost. Na slici 3.1 su prikazani podaci o inercijskim konstantama različitih generatora.



Slika 3.1 Inercijske konstante hidro jedinica (zvijezde) i parnih jedinica (krugovi) preko raspona nazivnih snaga prema različitim izvorima [1]

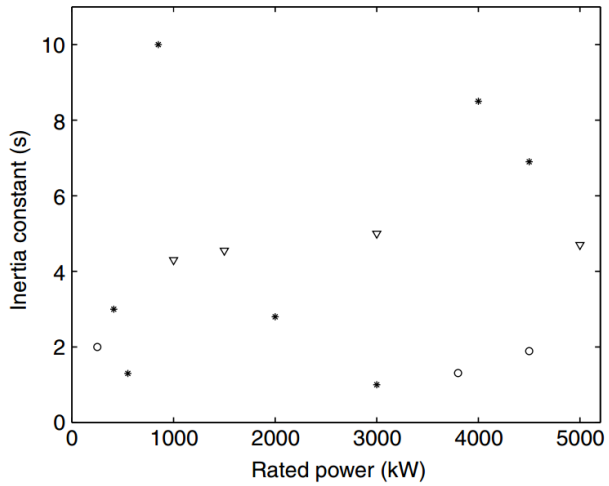
Podaci iz literature o inercijskoj konstanti konvencionalnih parnih i hidrogeneratora su korišteni kako bi se odredila veza između veličine generatorske jedinice i njene inercijske konstante.

Jasna veza nije pronađena: konstanta inercije se mijenja između 2.5 i 7.5 s za većinu generatora. Čini se da se hidro jedinice okupljaju oko 3 s i 7 s. Neke manje jedinice (manje od 100 MW) imaju vrlo malu inercijsku konstantu, do 1 s, no u globalu izgleda kao da nema direktne veze između veličine generatora i njegove inercijske konstante. [1]

Nešto više informacija od inercijskoj konstanti za velike generatorske jedinice, preuzetih iz [1] je prikazano u tablici P.3.1 danoj u prilogu. Tablica potvrđuje velik raspon vrijednosti inercijske konstante kojeg se također moglo primjetiti na slici 3.1. Nekoliko izvora spominje velike vrijednosti inercijske konstante za velike termo jedinice sa četveropolnim sinkronim strojevima (nazivne brzine 1500 ili 1800 okr/min, ovisno o frekvenciji sustava). Inercijske konstante do 10 s se mogu pojaviti, ali to nikako nisu tipične vrijednosti. Vrijednosti do 15 s

treba gledati kao vrlo rijetke. Za Japanski 60 Hz sustav je dana iznimno velika vrijednost, puno veća od vrijednosti inercijske konstante generatora. To je zbog toga što se kod računanja inercijske konstante za generatore kao bazna snaga uzima nazivna prividna snaga, a za veliki sustav je prikladnije za baznu snagu uzeti stvarno radno opterećenje. Suma snaga svih generatora spojenih na mrežu će naravno biti veća od stvarnog radnog opterećenja. Također, inercijska konstanta sustav će biti dodatno povećana zbog kinetičke energije svih motora spojenih na sustav. [1]

Neki podaci o hidro jedinicama u Aljasci su prikazani na slici 3.2, zajedno s podacima o vjetroturbinama i malim sinkronim generatorima. Slika prikazuje velik raspon inercijskih konstanti za hidro jedinice, bez ikakve jasne poveznice sa veličinom generatora. [1]



Slika 3.2 Inercijska konstanta malih hidro jedinica (zvijezde), sinkronih generatora (krugovi) i vjetroturbina (trokuti) [1]

Inercijske konstante malih generatora su, barem koliko je vidljivo iz ograničenih dostupnih podataka, nešto manje od inercijskih konstanti velikih konvencionalnih generatora (prema tablici P.3.2 danoj u prilogu, preuzetoj iz [1]). Inercijske konstante vjetroturbina su u istom rasponu kao inercijske konstante velikih konvencionalnih generatora. Inercijske konstante malih generatora u termoelektranama, poput onih korištenih u kogeneracijskim instalacijama, iznosi samo oko pola vrijednosti za velike jedinice. Tijekom perioda sa slabim vjetrom, količina spojenih jedinica po MW potrošnje će biti veća za vjetroelektrane nego za konvencionalnu proizvodnju. To rezultira većom količinom dostupne kinetičke energije po MW potrošnje. Pri jakom vjetru je količina kinetičke energije u sustavu nešto manja, ali smanjenje nije značajno. Inercija na potrošačkoj strani također doprinosi inerciji sustava i na to uvođenje distribuirane proizvodnje nema utjecaj. [1]

Distribuirana proizvodnja spojena preko elektroničkih energetskih pretvarača uopće ne

doprinose inercijskoj konstanti sustava. Kada se konvencionalni generatori zamjene takvom distribuiranom proizvodnjom, količina kinetičke energije u sustavu se smanjuje. Upravo to smanjenje najviše zabrinjava operatore sustava, jer može rezultirati frekvencijskom i kutnom nestabilnošću. [1]

Za problem inercije u modernim vjetroturbinama nije važna količina kinetičke energije dostupna u rotirajućoj masi, nego brzina kojom se ta energija može učiniti dostupnom elektroenergetskom sustavu. Za vjetroturbine sa asinkronim generatorima, energija je dostupna kada brzina generatora prati frekvenciju sustava. Tijekom naglog pada frekvencije, klizanje generatora će se povećati (u usporedbi sa stvarnom frekvencijom) i brzo će proizvesti više električne energije na račun svoje kinetičke energije, te zbog toga usporiti. Efektivna inercijska konstanta je između 3 i 5 s prema teoretskim studijama i mjerenjima. [1]

Takav prirodni prijenos energije se ne može dogoditi iz rotirajuće mase u mrežu ako je generator spojen preko elektroničkih energetskih pretvarača, kao što je slučaj kod dvostrano napajanih asinkronih generatora, asinkronih generatroa sa potpunim priključkom pomoću elektroničkih energetskih pretvarača i HVDC veza s vjetroparkovima. Takvi tipovi proizvodnje ne bi doprinjeli kinetičkoj energiji dostupnoj sustavu. No moguće je stvoriti "elektroničku inerciju", na primjer, korištenjem brzine promjene frekvencije (eng. *ROCOF – rate of change of frequency*) kao ulaznog signala kontroli momenta turbine. Sa svim implementacijama elektroničke inercije, važno je da postoji još neka vrsta dodatnog prijenosa energije od strane konvertera na kojoj je proizvodnja na stranu mreže kada se smanji frekvencija sustava. Jednostavna implementacija, na primjer kod mikroturbina, bi bilo podešavanje brzine turbine tako da je proporcionalno frekvenciji sustava. Smanjenje frekvencije sustava bi uzrokovalo smanjenje brzine turbine i razlika u kinetičkoj energiji bi postala dostupna sustavu. [1]

Sa nerotirajućom distribuiranom proizvodnjom (poput solarnih panela), takva implementacija bi zahtjevala nekakvo skladištenje energije ili nekakvu rezervu. Rezerva bi uzrokovala smanjenje proizvodnje iz obnovljivih izvora. Gubitak energije iz obnovljivih izvora se može ograničiti tako da se elektronička inercija aktivira samo kada nema dovoljno kinetičke energije u sustavu. Takvo razmišljanje može dovesti do stvaranja "tržišta kinetičkom energijom". [1]

Korištenjem elektroničke inercije, alternativna rješenja su moguća, od kojih su neka možda i bolja od klasičnog rješenja. Količina energije koja postane dostupna (odnosno smanjenje brzine rotacije) bi moglo, na primjer, ovisiti o stopi promjene frekvencije. Tada bi više energije bilo dostupno onda kada je stabilnost sustava ugroženija. Također je moguće razviti kontrolne sheme kod kojih bi smanjenje frekvencije uzrokovalo višu efektivnu inercijsku konstantu nego

povećanje frekvencije. Isti generator bi mogao pomoći u sprječavanju smanjenja frekvencije bez usporavanja oporavka frekvencije. Kod mikroturbina se može ugraditi kombinacija podfrekvencijske zaštite i elektroničke inercije kako bi se brzina vrtnje turbine naglo smanjila kada frekvencija padne ispod određenog praga. Neki autori kinetičku energiju smatraju vrstom primarne rezerve. [1]

4. STABILNOST FREKVENCIJE

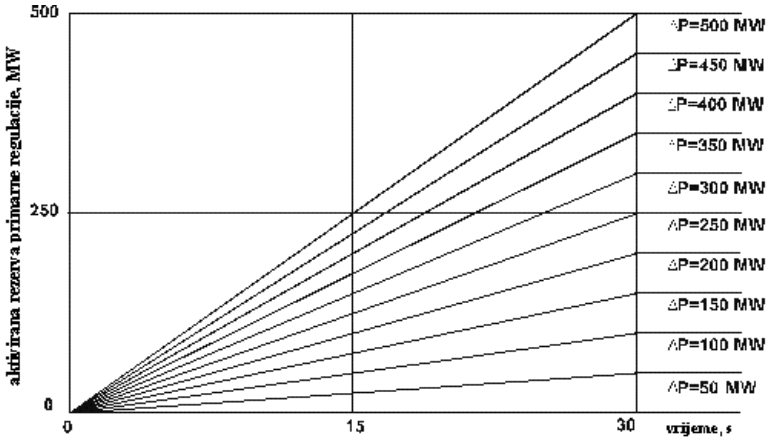
Potrošnja u sustavu značajno se mijenja tijekom dana, a potrebno ju je kontinuirano izjednačavati s proizvodnjom u svrhu održavanja frekvencije unutar granica dozvoljenog pogona i ograničavanja nedogovorenih tokova snaga uzduž interkonekcija sa susjednim sustavima. Stoga je od iznimne važnosti za normalan pogon sustava pravilno funkcioniranje sustava regulacije frekvencije. [3]

Nazivna frekvencija u hrvatskom elektroenergetskom sustavu iznosi 50,00 Hz. Odstupanja od nazivne frekvencije dopuštena prema Mrežnim pravilima su:

- od 49,95 Hz do 50,05 Hz u normalnim pogonskim uvjetima i pri radu hrvatskog sustava u interkonekciji,
- od 49,50 Hz do 50,50 Hz u normalnim pogonskim uvjetima u izoliranom radu hrvatskog sustava.
- od 47,50 Hz do 51,50 Hz u poremećenim uvjetima pogona.

Odstupanja frekvencije od zadane vrijednosti za više od ±20 mHz ispravljaju se djelovanjem primarne regulacije. Primarna regulacija frekvencije obuhvaća djelovanje turbinskih regulatora brzine vrtnje nakon odstupanja frekvencije od nazivne ili zadane vrijednosti, zbog neravnoteže između proizvodnje i potrošnje u sinkrono povezanoj mreži. [2]
Primarna regulacija frekvencije u izoliranom pogonu sustava mora:

- korigirati maksimalnu trenutnu razliku između proizvodnje i potrošnje u vrijednosti snage najveće aktivne proizvodne jedinice u sustavu,
- osigurati da trenutna vrijednost frekvencije pri poremećaju ne padne ispod 49,20 Hz,
- sadržavati mogućnost aktiviranja snage primarne regulacije prema slici 4.1. koju operator prijenosnog sustava mora održavati i u slučaju kada se zadana vrijednost frekvencije razlikuje od 50,00 Hz.



Slika 4.1 Minimalni zahtjevi UCTE-a za aktiviranje rezerve primarne regulacije u ovisnosti o vremenu, za različite iznose neravnoteže proizvodnje i potrošnje [2]

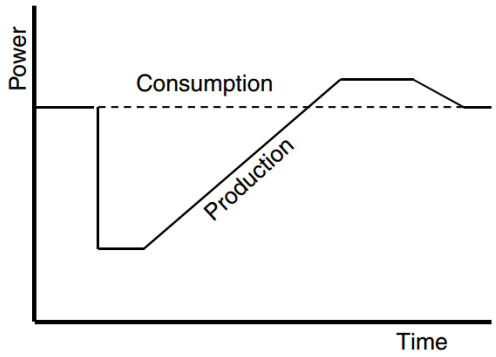
Primarna regulacija treba početi djelovati unutar nekoliko sekundi od trenutka nastanka poremećaja. Rezerva primarne regulacije iznosa od 0% do 50% treba se aktivirati unutar 15 sekundi, a iznos od 50% do 100% treba se aktivirati unutar maksimalnog vremena aktiviranja koje se mijenja linearno do maksimalno 30 sekundi.

Sekundarna regulacija mora preuzeti djelovanje od primarne regulacije najkasnije 30 sekunda nakon pojave odstupanja između proizvodnje i potrošnje, odnosno kada se završi aktiviranje primarne regulacije. Povratak frekvencije i snage razmjene na zadanu vrijednost djelovanjem sekundarne regulacije mora se dovršiti najkasnije za 15 minuta. [2]

Stabilnost frekvencije u elektroenergetskom sustavu je određena ravnotežom između sveukupne poizvodnje i potrošnje unutar cijelog sinkroniziranog sustava. Bilo kakva neravnoteža će rezultirati promjenom frekvencije, prema:

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{2} f_0 \frac{P_{gen} - P_{load}}{SH} \tag{4-1}$$

gdje je f_0 nazivna frekvencija sustava, P_{gen} je ukupna proizvodnja, P_{load} je ukupna potrošnja, a SH je ukupna kinetička energija rotirajućih masa spojenih na sustav.



Slika 4.2 Oporavak ukupne proizvodnje u sinkroniziranom području nakon iznenadnog manjka proizvodnje [1]

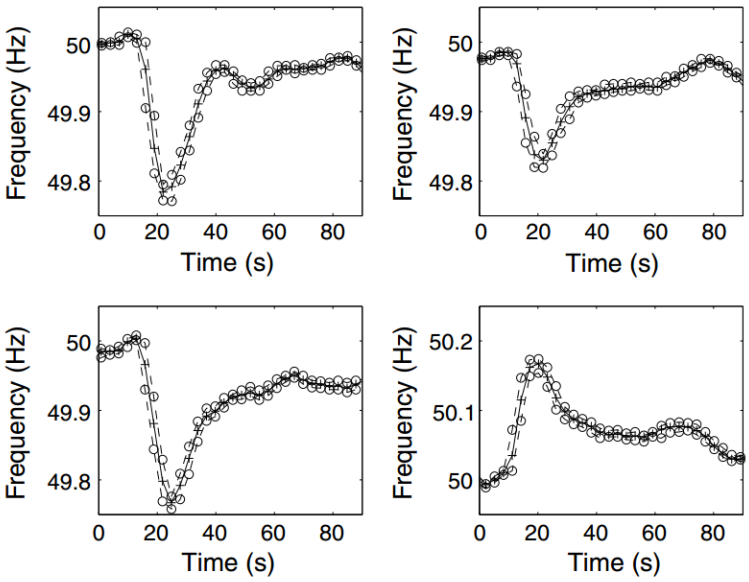
Reakcija proizvodnih jedinica na iznenadni gubitak proizvodnje je prikazana na slici 4.2. Promjena frekvencije je određena, prema (4-1), razlikom između proizvodnje i potrošnje. Slika 4.2 nije u mjerilu. Kako bi se frekvencija vratila na svoju nazivnu vrijednost, površina ispod crtkane linije treba biti jednaka površini iznad nje. Poremećaj frekvencije započinje iznenadnim gubitkom velike proizvodne jedinice ili HVDC veze kojom se uvozi energija iz drugog sinkroniziranog sustava. U početku, prije nego upravljački sustav preostale proizvodnje stigne reagirati, frekvencija se smanjuje linearno s vremenom:

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{2} f_0 \frac{\Delta P}{SH} \tag{4-2}$$

Nakon nekoliko sekundi primarna rezerva postaje dostupna, obično u vidu "rotirajuće rezerve", gdje velike proizvodne jedinice mogu vrlo brzo povećati svoju proizvodnju za mali iznos. HVDC veze također mogu osigurati tu rezervu i neke od veza između Nordijskog i Europskog kontinentalnog sinkroniziranog sustava su opremljene kontrolnim sustavima za hitne slučajeve koji mogu brzo promjeniti količinu radne snage koja se prenosi ako dođe do velikog pada frekvencije u jednom od sustava. Ukupan iznos primarne rezerve prisutne u sinkroniziranom sustavu treba biti dovoljan da pokrije gubitak najveće jedinice. Uobičajeno je i da postoje određeni zahtjevi na raspodjelu rotirajuće rezerve kroz sustav. To je zato da bi se sprječio nedostatak rotirajuće rezerve u dijelu sustava nakon podjele sustava, te kako bi se sprječilo pojavu preopterećenja u prijenosnom sustavu koja se mogu javiti kada je rotirajuća rezerva previše koncentrirana. [1]

Kako bi se frekvencija vratila na početnu vrijednost proizvodnja bi neko vrijeme trebala biti veća od potrošnje. U pogledu energije, kinetička energija koja je na početku korištena kako bi se ograničilo smanjenje frekvencije treba biti vraćen. Neki primjeri poremećaja frekvencije su

prikazani na slici 4.3, svi mjereni u Nordijskom sinkroniziranom sustavu.



Slika 4.3 Četiri primjera poremećaja frekvencije. Tri krivulje na svakoj od slika daju najveću, najmanju i prosječnu frekvenciju u intervalima od 3 s [1]

Prisutnost velikih količina distribuirane proizvodnje će utjecati na stabilnost frekvencije na dva načina. Zamjena velikih konvencionalnih generatora distribuiranom proizvodnjom može smanjiti količinu kinetičke energije dostupne sustavu. Ako je to slučaj, početni pad frekvencije će biti veći. Veći pad frekvencije nije razlog za brigu sam po sebi, budući da je oprema krajnjih korisnika poprilično neosjetljiva na frekvenciju u rasponima koji se javljaju u velikim sinkroniziranim sustavima. No prevelik pad frekvencije može rezultirati neželjenim radom podfrekvencijske zaštite. Podfrekvencijska zaštita može biti dio sustava za detekciju otočnog rada kod distribuirane proizvodnje ili dio sheme podfrekvencijskog rasterećenja. [1]

Manja inercija sustava rezultira većim variranjem frekvencije tijekom normalnog rada, kao i većim propadima frekvencije zbog ispada velike proizvodne jedinice. Oboje povećava vjerojatnost neželjenog rada podfrekvencijske zaštite. Variranje frekvencije u postojećim sinkroniziranim sustavima je vrlo malo, tijekom normalnog rada i nakon gubitka velike proizvodne jedinice. Inercija sustava se može puno smanjiti prije nego mogućnost neželjenog rada zaštite postane ozbiljan problem. Zato smanjenje inercijske konstante cijelog sustava zbog distribuirane proizvodnje zasad nije razlog za brigu. Nedostatak inercije bi mogao potencijalno postati problem samo u slučaju vrlo velikog proboja distribuirane proizvodnje. [1]

Utjecaj vjetroelektrana na stabilnost frekvencije je proučavan u sustavu Sjeverne Irske. Taj je sustav relativno malen s vršnim opterećenjem od 7 000 MW i minimalnim opterećenjem od oko 2300 MW. Proučavan je utjecaj na stopu promjene frekvencije i na minimalnu

frekvenciju. Tijekom minimalnog opterećenja, brzina promjene frekvencije zbog gubitka najveće jedinice je oko 0.5 Hz/s bez vjetroelektrana. Do 1500 MW iz vjetroelektrana nema nikakvog utjecaja na stopu promjene frekvencije, ali za 2400 MW iz vjetroelektrana brzina promjene frekvencije se povisi na 1.2 Hz/s. Tijekom vršnog opterećenja utjecaj je malen: brzina promjene frekvencije se poveća sa 0.11 Hz/s za slučaj bez vjetroelektrana na 0.12 Hz/s za 2400 MW iz vjetroelektrana. Minimalna frekvencija kod minimalnog opterećenja se smanjuje sa 49.60 Hz za slučaj bez vjetra, na 49.34 Hz u slučaju 2400 MW iz vjetroelektrana. U svim slučajevima je pretpostavljeno da vjetroelektrane ne pridonose inerciji sustava. Studija pokazuje da vjetroelektrane imaju mjerljiv utjecaj, ali čak i za velik proboj vjetroelektrana u tako malom sustavu, njihov utjecaj ostaje ograničen. [1]

Kao mjera zaštite sustava od pada frekvencije koristi se podfrekvencijsko rasterećenje. Kod pogona u interkonekciji pri padu frekvencije na 49,00 Hz nastupa stanje izvanrednog pogona mreže. Pri daljnjem padu frekvencije, interkonekcija se može podijeliti na više odvojenih mreža koje daljnji raspad sprječavaju podfrekvencijskim rasterećivanjem. U tim prilikama, bez prethodne obavijesti dolazi do automatskog isključenja opterećenja prema planu podfrekvencijskog rasterećenja. Potpuni ili djelomični raspad hrvatskog elektroenergetskog sustava u izoliranom pogonu sprječava se planom podfrekvencijskog rasterećenja danim u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Plan podfrekvencijskog rasterećenja za hrvatski sustav [2]

Stupanj	Proradna frekvencija [Hz]	Rasterećenje %	Ukupno rasterećenje %
I.	49,20	10	10
II.	48,80	15	25
III.	48,40	15	40
IV.	48,00	15	55
V.	47,50		Odvajanje elektrana od mreže i prijelaz u otočni pogon, prijelaz na vlastitu potrošnju ili u prazni hod

.

5. KUTNA STABILNOST

Osim termičkim ograničenjem i naponskom stabilnošću, prijenosni kapacitet je ograničen i kutnom (tranzijentnom) stabilnošću. Prijenos radne snage u sustavu sa malim gubicima (kao što je prijenosni sustav) je moguć samo kada postoje dovoljne razlike u faznom kutu između dijelova sustava. Ali kada razlike u kutu postanu prevelike, sustav postane nestabilan. Postoje dobro definirane granice za trajno pogonsko stanje kao i za slučaj kvara. Granice u slučaju kvara ograničavaju prijenosni kapacitet u prijenosnom sustavu. Ograničenja za vrijeme stacionarnog rada rijetko predstavljaju problem jer (N - 1) kriterij zahtjeva da sustav ostane stabilan nakon gubitka bilo koje (pojedine) jedinice sustava, što znači da će tijekom normalnog pogona sigurno biti stabilan. [1]

Prijelazna stabilnost više ne postoji ako, nakon otklanjanja kratkog spoja u prijenosnoj mreži, jedna ili više proizvodnih jedinica radi asinkrono s elektroenergetskim sustavom. Velike promjene napona i frekvencije, kao i velike struje izjednačenja koje se pojavljuju između prijenosne mreže i generatora u asinkronom pogonu, mogu značajno ugroziti pogon elektroenergetskog sustava. Kao pretpostavka za prijelaznu stabilnost moraju se na strani prijenosne mreže ispuniti slijedeći minimalni zahtjevi, prema [2]:

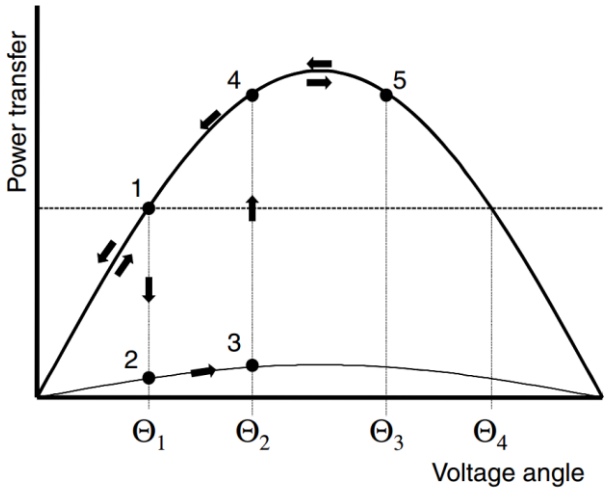
- u okviru planiranja mreže, operator prijenosnog sustava mora osigurati da minimalne vrijednosti snaga kratkog spoja na strani prijenosne mreže ne budu narušene u slučaju kratkog spoja u blizini elektrane na sučelju prijenosna mreža – proizvodna jedinica, nakon otklanjanja kvara djelovanjem zaštite
- ako nakon kratkog spoja u prijenosnoj mreži nije moguće izbjeći proklizavanje proizvodne jedinice, ona se mora odvojiti od prijenosne mreže da ne bi ugrozila mrežu i pogon ostalih elektrana. Prorada zaštite generatora također može uzrokovati odvajanje proizvodne jedinice od prijenosne mreže. Prijenosna mreža mora izdržati te dinamičke pojave.

5.1 Jedno područje nasuprot krute mreže

Razmotrimo dio elektroenergetskog sustava spojen s ostatkom sustava preko prijenosnog voda. Postoji direktna relacija između količine radne snage P koja se prenosi vodom i kuta između napona na krajevima tog voda θ. Uz zanemarenje Jouleovih gubitaka, ta relacija glasi:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin\theta \qquad (5\text{-}1)$$

gdje su naponi U_1 i U_2 naponi na krajevima voda, a X je reaktancija voda. Ta relacija je prikazana grafički na slici 5.1. Tijekom normalnog pogona generatori rade konstantnom brzinom i mehanička energija dovedena turbini je jednaka sumi električne energije koju turbina daje i gubitaka. Radna točka u normalnom pogonu je na slici označena "1".



Slika 5.1 Odnos između prenesene snage i kuta napona: promjene snage i napona tijekom i nakon kvara [1]

Pri pojavi kvara na vodu ili u blizini voda, napon pada na obje strane voda i količina električne energije koja se može prenjeti vodom se smanjuje u skladu sa (5-1). To odgovara točki "2" na slici. Kao rezultat smanjenja električne snage javlja se ravnoteža između mehaničke i električne snage. Mehanička snaga ostaje konstantna u vremenskim rasponima o kojima se ovdje raspravlja. Rotacijski stroj povećava brzinu vrtnje jer dobiva više energije od mehaničke strane nego što ju može isporučiti na električnu stranu. Fazni pomak između napona na početku i na kraju voda se stoga poveća u skladu sa jednadžbom njihanja:

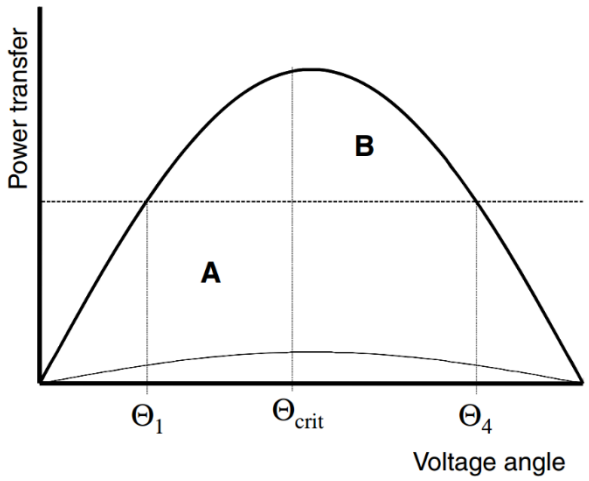
$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{2}\omega_0 \frac{\Delta P}{SH} \tag{5-2}$$

gdje je $\Delta P = P_{mech} - P$ razlika između mehaničke snage P_{mech} dovedene rotacijskom stroju i električne snage P isporučene elektroenergetskom sustavu. Mehaničku snagu obično pretpostavljamo konstantnom i jednakom prijenosu električne snage prije kvara, ω_0 je nazivna kutna brzina, a SH je kinetička energija rotacijskog stroja pri nazivnoj brzini vrtnje. Dvostrukim integriranjem jednadžbe (5-2), uz pretpostavku da su ΔP i SH konstante, dobije se sljedeći izraz za razliku kutova kao funkciju vremena:

$$\theta(t) = \theta_1 + \frac{1}{4}\omega_0 \frac{\Delta P}{SH} t^2 \tag{5-3}$$

Nakon nekog vremena kvar se otkloni i napon se vrati na početnu vrijednost. Na slici to odgovara skoku iz točke "3" neposredno prije otklanjanja kvara u točku "4" neposredno nakon otklanjanja kvara. Od tog trenutka je električna snaga koja se prenosi veća od mehaničke snage koja se dovodi strojevima. To rezultira smanjenjem brzine. No strojevi se i dalje vrte brže nego u normalnom pogonu, pa se razlika kutova nastavlja povećavati. U točki "5" na slici 5.1 frekvencija se vratila na nazivnu vrijednost (50 ili 60 Hz) i razlika kutova je dosegla maksimalnu vrijednost. Zatim će se razlika kutova vratiti na originalnu vrijednost pri normalnom pogonu u točki "1" na slici. [1]

U točki sa najvećom razlikom kutova na slici (točka "5"), električna snaga koja se prenosi je veća od mehaničke snage, pa stroj i dalje usporava. No kada bi se razlika kutova nastavila povećavati, došlo bi se do točke u kojoj je električna snaga manja od mehaničke. Kada se dođe do te točke generatori nastavljaju ubrzavati i sustav postaje nestabilan. Granični slučaj je prikazan na slici 5.2. Matematički se može pokazati da su dva područja (A i B na slici) jednake veličine. To se pravilo naziva "kriterij jednakih površina" i vrlo je korisno pri procjeni stabilnosti jednostavnih mreža. Za kompleksnije sustave se pod određenim pretpostavkama mogu izvesti slični izrazi. No u većini slučajeva se jednadžbe rješavaju numerički korištenjem programskih paketa za analizu elektroenergetskih sustava. [1]



Slika 5.2 Kriterij jednakih površina [1]

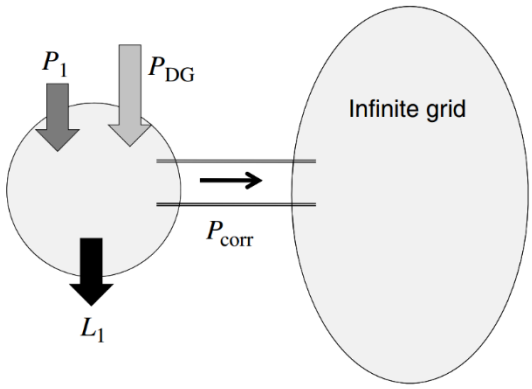
Čak i u relativno jednostavnom slučaju jednog stroja nasuprot krute mreže ne postoji jednostavno analitičko rješenje za granicu stabilnosti. No moguće je odrediti koji parametri utječu na kritično vrijeme otklanjanja kvara. Krtični kut, prikazan na slici 5.2 ovisi o toku snage prije kvara, toku snage tijekom kvara i snazi sustava nakon kvara.

- Što je veći tok snage kroz prijenosni vod, veća je razlika kutova prije kvara, i kraće je

kritično vrijeme otklanjanja kvara. Povećavanje prijenosa vodom prije kvara će učiniti sustav manje stabilnim.

- Što je veća radna snaga koju vuče opterećenje i koja se prenosi vodom tijekom kvara, strojevi će manje ubrzavati i kritično vrijeme otklanjanja kvara će biti duže. Povećanje potrošnje tijekom kvara će učiniti sustav stabilnijim.
- Što je sustav jači nakon kvara, više snage će se prenositi kada se napon oporavi, i kritično vrijeme otklanjanja kvara će biti duže. Povećavanje razine kvara nakon kvara će učiniti sustav stabilnijim.
- Što je veća inercija, to će strojevi sporije ubrzavati, i kritično vrijeme otklanjanja kvara će biti duže. Povećavanje inercije sustava će učiniti sustav stabilnijim.

Ono što je važno je hoće li vrijeme otklanjanja kvara biti kraće ili duže od kritičnog vremena otklanjanja kvara. Stvarno vrijeme otklanjanja kvara jako ovisi o vrsti korištene zaštite. Za važne veze se gotovo uvijek koristi diferencijalna zaštita ili distantna zaštita s prijenosom okidnog signala. Javlja se i malo povećanje kritičnog vremena otklanjanja kvara sa smanjenjem struje kvara, dakle sa smanjenjem snage sustava. [1]



Slika 5.3 Podsustav spojen preko pijenosnog koridora na ostatak sustava [1]

Ograničenja koje tranzijentna stabilnost postavlja na prijenos snage kroz prijenosni vod ili koridor su objašnjena pomoću sustava prikazanog na slici 5.3. Prilikom normalnog pogona je proizvodnja konvencionalnih generatora P_1, proizvodnja distribuiranih izvora je P_{DG}, a lokalna potrošnja ("teret") je jednaka L_1. Izvoz energije u glavnu mrežu kroz prijenosni koridor je jednak:

$$P_{corr} = P_1 + P_{DG} - L_1 \tag{5-4}$$

Prilikom normalnog stacionarnog pogona pretpostavljamo da svi generatori u području imaju jednak kut rotora u odnosu na krutu mrežu. Drugim rječima, razlike kutova unutar područja su male u usporedbi sa razlikom kuta unutar područja i kuta ostatka mreže. Primjenom izraza (5-1) i slike 5.1, te uz pretpostavku da je napon na obje strane prijenosnog koridora jednak 1 per unit, za stacionarno pogonsko stanje dobijemo sljedeći izraz za razliku kutova između područja i mreže:

$$\sin\theta_1 = X_{corr}P_{corr} \tag{5-5}$$

gdje je X_{corr} per unit impedancija između područja i mreže sa istom bazom kao P_{corr}. Tijekom kvara, zbog niza razloga, proizvodnja i potrošnja više nisu u ravnoteži:

- Naponi na obje strane prijenosnog koridora se smanjuju, što rezultira trenutačnim smanjenjem prenesene snage. Standardne procedure upravljanja prijenosnim sustavom razmatraju najgori mogući slučaj, što je najčešće da prijenos snage kroz koridor padne na nulu.
- Smanjenje napona unutar područja znači da se potrošnja smanjuje. Teško je dati opću vrijednost za to, ali što je manje područje, to će veće biti prosječno smanjenje napona i manja potrošnja tijekom kvara. Doprinos generatora struji kvara uzrokuje povećanje gubitaka unutar područja. To treba uzeti u obzir kod proračuna jer gubici tijekom kvara mogu iznositi značajan dio proizvodnje.
- Kvar utječe i na proizvodnju iz distribuiranih izvora. Uobičajeno je da se proizvodnja smanji ili čak padne na nulu tijekom kvara. Zahtjevi za prolazak kroz kvar, o kojima se raspravlja u poglavlju 6, razmatraju proizvodnju samo kratko vrijeme nakon kvara. Za sada nema zahtjeva koji se postavljaju na distribuiranu proizvodnju tijekom kvara.
- Mehanička snaga dovedena turbinama konvencionalnih generatora se može smatrati konstantnom tijekom kvara.

Prije kvara je mehanička snaga dovedena turbinama jednaka električnoj snazi koju proizvode konvencionalni generatori, P_1 u izrazu (5-4):

$$P_{mech} = P_{corr} + L_1 - P_{DG} \tag{5-6}$$

Tijekom kvara, pretpostavljamo da snaga koja se prenosi koridorom pada na nulu, dok potrošnja i distribuirana proizvodnja padaju na L_1* i P_{DG}*. Električna snaga koju daju konvencionalni generatori tijekom kvara je jednaka:

$$P_e{}^* = L_1{}^* - P_{DG}{}^* \tag{5-7}$$

Neravnoteža snage, koja uzrokuje promjenu razlike kutova između mreže i područja, se dobije oduzimanjem izraza (5-6) od izraza (5-7):

$$\Delta P = P_{corr} + (L_1 - {L_1}^*) - (P_{DG} - {P_{DG}}^*) \tag{5-8}$$

Ista ravnoteža energije koja vrijedi za jedan stroj vrijedi i za cijelo područje, pa i dalje vrijedi izraz (5-2). Jedina je razlika što je sada kinetička energija jednaka ukupnoj kinetičkoj energiji u području:

$$SH = \sum_i S_i H_i \tag{5-9}$$

Iz izraza (5-3) i (5-8) dobijemo sljedeći izraz za promjenu razlike kutova s vremenom:

$$\theta(t) = \theta_1 + \frac{1}{4}\omega_0 \frac{P_{corr} + (L_1 - {L_1}^*) - (P_{DG} - {P_{DG}}^*)}{SH} \times t^2 \tag{5-10}$$

5.2 Utjecaj distribuirane proizvodnje: prije kvara

Razlika faznih kuteva između spojenog područja i krute mreže tijekom normalnog pogona, odnosno prije kvara, je određena impedancijom prijenosnog koridora i količinom snage koja se prenosi koridorom prema izrazu:

$$\sin\theta_1 = \frac{P_{corr} X_{corr}}{U_1 U_2} \tag{5-11}$$

Što je veći kut θ_1, manja je raspon za povećanje faznog kuta tijekom kvara, odnosno kritično vrijeme otklanjanja kvara će biti manje. Na napone U_1 i U_2 na krajevima prijenosnog koridora ne utječe prisutnost distribuirane proizvodnje jer njih i dalje kontroliraju (preostali) konvencionalni generatori. Na snagu prenesenu koridorom utječe količina distribuirane proizvodnje:

$$P_{corr} = P_1 + P_{DG} - L_1 \tag{5-12}$$

Prisutnost distribuirane proizvodnje ne utječe na potrošnju L_1, ali može utjecati na proizvodnju konvencionalnih generatora P_1. To ovisi o pravilima tržišta električnom energijom i graničnim troškovima proizvodnje električne energije u lokalnoj proizvodnji u usporedbi sa proizvodnjom negdje drugdje. U sustavu sa slobodnim tržištem električne energije će uvođenje distribuirane proizvodnje uzrokovati gašenje proizvodnje iz najskupljih elektrana. Ako je najskuplja prizvodnja smještena lokalno (odnosno lijevo od koridora na slici 5.3), P_1 će se smanjiti, P_{DG} će

se povećati, a prijenos kroz koridor će ostati nepromijenjen. No ako je najskuplja proizvodnja smještena negdje drugdje u mreži, lokalna proizvodnja neće biti smanjena i koritor će biti više opterećen. [1]

5.3 Utjecaj distribuirane proizvodnje: tijekom kvara

Tijekom kvara, proizvodnja i potrošnja električne energije unutar područja više nisu u ravnoteži. Rezultat toga je da se razlika kutova između područja i mreže povećava, sa stalnim ubrzanjem (sa kvadratom proteklog vremena od pojave kvara). Povećanje s vremenom je dano izrazom (5-8); utjecaj distribuirane proizvodnje na svaki od tri člana u tom izrazu je objašnjen odvojeno dolje.

- Kao što je raspravljano u sekciji 5.2, prisutnost distribuirane proizvodnje može rezultirati većim prijenosom snage kroz koridor (P_{corr}), i to bi povećalo akceleraciju promjene razlike kutova. No za isti prijenos snage prisutnost distribuirane proizvodnje nema nikakav utjecaj na ovaj član. Također je raspravljano ranije kako povećanje prijenosa kroz koridor nije direktno uzrokovano distribuiranom proizvodnjom, nego time što tržište električne energije favorizira jeftiniju proizvodnju, bez obzira gdje je smještena.
- Na drugi član u izrazu, smanjenje potrošnje tijekom kvara, prisutnost distribuirane proizvodnje blizu potrošnje može indirektno utjecati. Ako distribuirana proizvodnja ostane spojena i pridonosi struji kvara to će podići napon na kojeg su spojeni uređaji krajnjih korisnika, pa se smanjuje pad opterećenja. Što je manji pad opterećenja $L_1 - L_1^*$ manja je neravnoteža snaga. Dovođenje jalove snage je najbolje rješenje za podizanje napona. Ono podiže kvalitetu električne energije i može poboljšati tranzijentnu stabilnost.
- Treći član izraza je smanjenje proizvodnje radne snage iz distribuiranih izvora tijekom kvara. Što više proizvodnja padne to će manja biti neravnoteže snaga, te time i stabilniji sustav. Isključivanje jedinica tijekom kvara bi poboljšalo stabilnost. Najbolje za tranzijentnu stabilnost bi bilo da tijekom kvara distribuirani izvori daju maksimalnu čisto reaktivnu struju.

Vidljivo je da prisutnost distribuirane proizvodnje može povoljno utjecati na ravnotežu snaga. Treba napomenuti da smo razmatrali područje koje izvozi električnu energiju. Kada područje uvozi energiju, distribuirana proizvodnja drukčije utječe na ravnotežu snaga. [1]

Utjecaj distribuirane proizvodnje na inerciju ovisi o tome je li distribuirana proizvodnja zamjenila postojeću proizvodnju ili joj je dodana. Kada je distribuirana proizvodnja dodana

postojećoj ukupna inercija $\Sigma S_i H_i$ će se povećati ili ostati ista, ovisno o tipu proizvodnje i tome ostaje li spojena za vrijeme kvara ili ne. Ako se distribuirana proizvodnja isključi ubrzo nakon pojave kvara, neće pridonjeti inerciji. Također, proizvodnja spojena preko elektroničkog međusklopa neće pridonjeti inerciji. Razvijaju se metode za stvaranje "elektroničke inercije". [1]

Veliko smanjenje kinetičke energije u području bi povećalo brzinu kojom se mijenja razlika kutova područja i ostatka mreže tijekom kvara, tako da bi kritični kut bio prije dosegnut. Kritično vrijeme otklanjanja kvara je proporcionalno kvadratnom korijenu iz količine kinetičke energije (*SH*). Ako se kinetička energija smanji upola, kritično vrijeme otklanjanja kvara će se smanjiti na 70% svoje početne vrijednosti. [1]

5.4 Utjecaj distribuirane proizvodnje: kritično vrijeme otklanjanja kvara

Razmotrimo koridor koji se sastoji od više prijenosnih vodova. Najgora moguća situacija je da se dogodi trofazni kratki spoj na jednoj od prijenosnih linija, blizu područja proizvodnje. Pretpostavljamo da u području nema opterećenja, pa snaga koju daju generatori pada na nulu tijekom kvara. Fazni kut prije kvara Θ_1 između područja i glavne mreže se dobije iz:

$$\frac{\sin \Theta_1}{X_{pre}} = P_{corr} \tag{5-13}$$

gdje je X_{pre} impedancija koridora prije kvara, odnosno dok su sve linije u pogonu. Maksimalni kut njihanja Θ_4 se dobije iz sljedećeg izraza:

$$\frac{\sin \Theta_4}{X_{post}} = P_{corr} \tag{5-14}$$

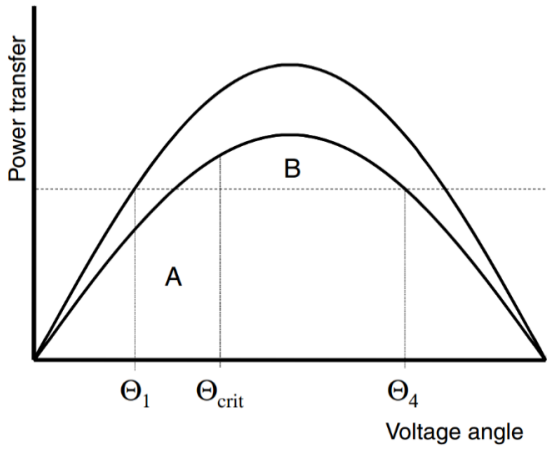
Gdje je X_{post} impedancija nakon gubitka linije. Također, $\Theta_1 < \pi/2$ i $\Theta_4 > \pi/2$.

Kriterij jednakih površina je pikazan na slici 5.4, gdje je A površina ubrzanja, a B površina kočenja. Za ovaj slučaj kriterij jednakih površina glasi:

$$(\Theta_{crit} - \Theta_1)P_{corr} = \int_{\Theta_{crit}}^{\Theta_4} \left(\frac{\sin \Theta}{X_{post}} - P_{corr}\right) d\Theta \tag{5-15}$$

sa sljedećim rješenjem za kritični kut isklopa:

$$\cos \Theta_{crit} = \cos \Theta_4 + (\Theta_4 - \Theta_1)X_{post}P_{corr} \tag{5-16}$$



Slika 5.4 Kirterij jednakih površina [1]

Kritično vrijeme otklanjanja kvara se dobije iz:

$$t_{crit} = 2\sqrt{\frac{\Theta_{crit} - \Theta_1}{\omega_0} \times \frac{SH}{P_{corr}}} \tag{5-17}$$

gdje je *SH* ukupna kinetička energija u području (suma svih kinetičkih energija generatora pomnoženih sa njihovim inercijskim konstantama).

Zatim razmotrimo potrošnju i distribuiranu proizvodnju u području (situacija prikazana na slici 5.3). Računanje početnog kuta (prije kvara) i kritičnog kuta isklopa se radi kao i ranije u izrazima (5-13) i (5-14). [1]

Kriterij jednakih površina daje sljedeći izraz, s obzirom na sliku 5.3:

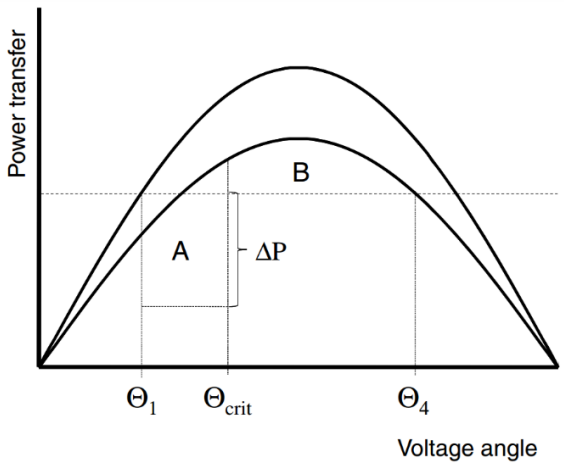
$$(\Theta_{crit} - \Theta_1)\Delta P = \int_{\Theta_{crit}}^{\Theta_4} \left(\frac{\sin\Theta}{X_{post}} - P_{corr}\right) d\Theta \tag{5-18}$$

gdje je ΔP dan izrazom (5-8). Izraz se može pojednostaviti na sljedeći oblik:

$$\cos\Theta_{crit} + X_{post}(P_{corr} - \Delta P)\Theta_{crit} = \cos\Theta_4 + \Theta_4 X_{post} P_{corr} - \Theta_1 X_{post}\Delta P \tag{5-19}$$

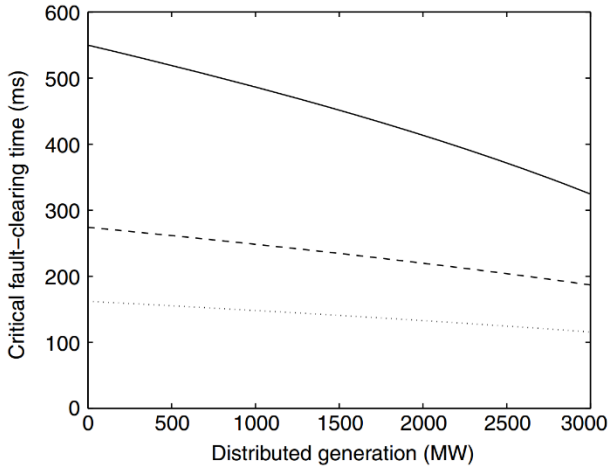
koji se ne može riješiti analitički. Potrebno je koristiti numeričke metode kako bi se izračunao kritični kut isklopa. Kada dobijemo njegovu vrijednost možemo analitički izračunati kritično vrijeme otklanjanja kvara koristeći izraz (5-10). [1]

Kriterij jednakih površina sa uvažavanjem razliitih impedancija prije i poslije kvara pikazan je na slici 5.5.



Slika 5.5 Kriterij jednakih površina, uzimajući u obzir potrošnju unutar područja, različite impedancije prije i poslije kvara [1]

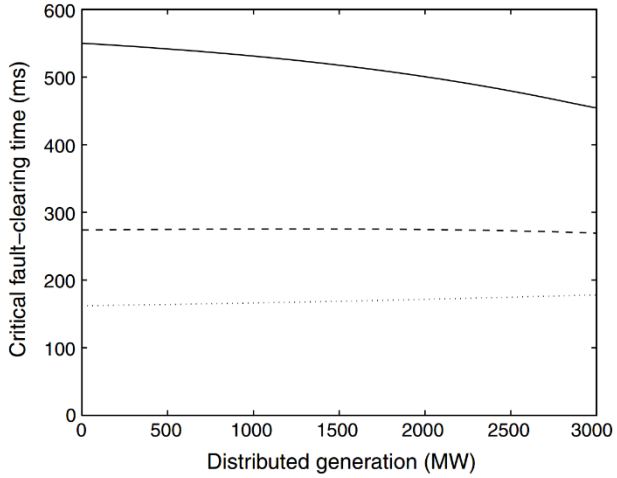
Utjecaj distribuirane proizvodnje na kritično vrijeme otklanjanja kvara možemo prikazati na primjeru podsustava koji prijenosnim koridorom izvozi energiju. U podsustavu korištenom za primjer postoji 4 000 MW proizvodnje i 3 000 MW potrošnje. Prvo pretpostavimo najgori mogući slučaj, gdje distribuirana proizvodnja zamjenjuje postojeću proizvodnju u regiji, distribuirana proizvodnja ne pridonosi inerciji sustava, distribuirana proizvodnja tijekom kvara daje jednaku snagu kao prije kvara, i distribuirana proizvodnja ne pridonosi porastu napona blizu potrošnje tijekom kvara. U tom je slučaju utjecaj distribuirane potrošnje samo na smanjenje ukupne kinetičke energije u sustavu. Veća količina distribuirane proizvodnje tada smanjuje kinetičku energiju u podsustavu. Ovisnost kritičnog vremena otklanjanja kvara o količini distribuirane proizvodnje je prikaza na slici 5.6 za tri vrijednosti prijenosa snage.



Slika 5.6 Ovisnost kritičnog vremena otklanjanja kvara o količini distribuirane proizvodnje, najgori slučaj: pri prijenosu snage od 1000 MW (puna linija), 2000 MW (crtkana linija), i 2500 MW (točkasta linija) [1]

Povećanje iznosa distribuirane proizvodnje uzrokuje smanjenje kritičnog vremena otklanjanja kvara i time smanjuje stabilnost sustava. No smanjenje stabilnosti nije drastično. [1]

Razmotrimo sada slučaj u kojem se distribuirani izvori proizvode manje radne snage tijekom kvara nego prije kvara. To pomaže konvencionalnoj proizvodnji da održi brzinu i sustavu da ostane stabilan. Krivulje na slici 5.7 se računaju s pretpostavkom da se proizvodnja iz distribuiranih izvora smanji na 25% od vrijednosti prije kvara. U usporedbi sa slikom 5.6 vidljivo je da je utjecaj distribuirane proizvodnje na kutnu stabilnost u ovom slučaju puno manji. Za velik prijenos snage se utjecaj distribuirane proizvodnje može čak i zanemariti (u ovom specifičnom slučaju). [1]



Slika 5.7 Ovisnost kritičnog vremena otklanjanja kvara o količini distribuirane proizvodnje, distribuirana proizvodnja se smanji na 25% vrijednosti prije kvara: pri prijenosu snage od 1000 MW (puna linija), 2000 MW (crtkana linija), i 2500 MW (točkasta linija) [1]

Tablica 5.1 Smanjenje prijenosnog kapaciteta s povećanjem količine distribuirane proizvodnje, najgori slučaj [1]

Distribuirana proizvodnja [MW]	Prijenosni kapacitet [MW]
0	2590
500	2560
1000	2530
1500	2500
2000	2460
2500	2400
3000	2340

Utjecaj distribuirane proizvodnje na prijenosni kapacitet je malen, kao što je prikazano u tablici 5.1. Ovdje je prijenosni kapacitet definiran kao količina prenesene snage koja daje kritično vrijeme otklanjanja kvara od 140 ms. Čak i kada se sva lokalna potrošnja napaja iz distribuirane

proizvodnje, prijenosni kapacitet se smanji za samo 10% uz 3000 MW iz distribuirane proizvodnje. Ovdje je pretpostavljeno da distribuirani izvori ne smanjuju proizvodnju tijekom kvara, što je najgori mogući slučaj. [1]

Važno je napomenuti da su ovo samo primjeri i nije moguće izvući nikakve opće zaključke iz njih. Utjecaj distribuirane proizvodnje može biti veći ili manji nego što je ovdje prikazan. Potreban je novi proračun, koji koristi prikladne modele, za svaki pojedini slučaj. [1]

5.5 Utjecaj distribuirane proizvodnje: nakon kvara

U svim prethodnim proračunima se pretpostavljalo da su proizvodnja i potrošnja nakon kvara jednake kao prije kvara. To obično nije točno. Moguće je da se neki uređaji isključe tijekom kvara (zbog smanjenja napona) i treba im dugo vremena da se ponovno uključe (više od vremenskih raspona od nekoliko sekundi o kojima se ovdje raspravlja). Uređaji koji su ostali spojeni tijekom kvara uzimaju više radne snage kada se napon oporavi. To posebno vrijedi za motorno opterećenje. Za motorno je opterećenje također tipično da uzima velike količine jalove snage nakon kvara, što će smanjiti napon i ograničiti prijenos snage. To je sve uglavnom neovisno o prisutnosti distribuirane proizvodnje, pa se više neće spominjati ovdje. No detaljni modeli i proračuni su potrebni koji sve to uzimaju u obzir pri procjeni stabilnosti. [1]

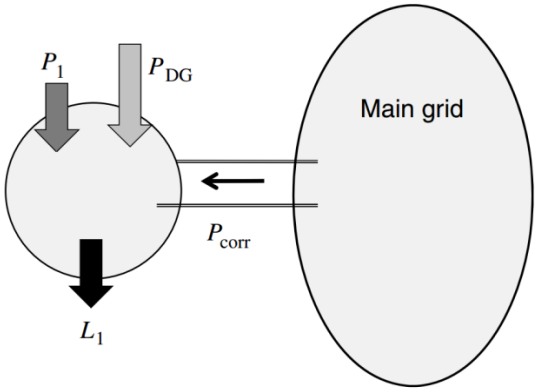
Utjecaj distribuirane proizvodnje, nakon kvara, ponovno ovisi o tome ostaje li proizvodnja spojena na mrežu tijekom kvara. Ako se distribuirana proizvodnja oporavi odmah nakon otklanjanja kvara, ponašanje sustava nakon kvara će biti jednako kao bez distribuirane proizvodnje. Ako distribuiranoj proizvodnji treba puno vremena za oporavak (više od nekoliko sekundi), u području će nastati nedostatak proizvodnje ili će višak proizvodnje biti manji. Kako je u području za vrijeme kvara nastao višak proizvodnje (zbog gubitka prijenosa kroz koridor, smanjenja lokalne potrošnje), ovaj nedostatak će poboljšati stabilnost. No isključenje distribuirane proizvodnje nije nužno dobra stvar. Većina operatora prijenosnog sustava bi htjela da se distribuirana proizvodnja oporavi odmah nakon kvara. U nekim slučajevima bi odgoda oporavljanja distribuirane proizvodnje povoljno utjecala na stabilnost, ali trenutno ne postoje metode kojima bi se odredilo tijekom samog kvara je li bolje da distribuirani izvori ostanu spojeni. [1]

5.6 Utjecaj distribuirane proizvodnje: uvozno područje

Kada je područje uvozno (u podsustav se kroz koridor uvozi energija), utjecaj distribuirane

proizvodnje je drukčiji, te u nekim slučajevima potpuno suprotan od onoga kada se radi o izvoznom području. Ponovno će se raspravljati o utjecaju prije, tijekom i nakon kvara ali ne jednako detaljno kao za slučaj izvoznog područja. [1]

Tokovi snaga prije kvara su prikazani na slici 5.8. Razlika između te slike i slike 5.3 je samo u smjeru toka snage između područja i glavne mreže. Izraz za razliku kutova između područja i glavne mreže je isti kao i prije, ali je kut drukčijeg predznaka zbog suprotnog smjera toka snage. Utjecaj distribuirane proizvodnje na stabilnost ovisi, kao i kod izvoznog područja, o tome je li distribuirana proizvodnja dodana postojećoj ili ju zamjenjuje. Kada joj je dodana, manjak snage u području i prijenos kroz povezni koridor će biti manji. To će smanjiti razliku kutova u normalnom pogonu i učiniti sustav stabilnijim. Zamjena postojeće proizvodnje distribuiranom neće promjeniti prijenos kroz koridor. [1]



Slika 5.8 Uvozno područje spojeno na glavnu mrežu kroz prijenosni koridor [1]

Utjecaj za vrijeme kvara ponovno ovisi o neravnoteži snaga, i količini kinetičke energije. Neravnoteža snaga tijekom kvara je dana sljedećim izrazom:

$$\Delta P = P_{corr} - (L_1 - L_1{}^*) + (P_{DG} - P_{DG}{}^*) \qquad (5\text{-}20)$$

U izvoznom području višak proizvodnje nije problem, no u uvoznom području nedostatak snage može biti problem u slučaju kvara koji bi prekinuo vezu s mrežom preko prijenosnog koridora. Višak energije tijekom kvara bi uzrokovao smanjenje razlike kutova, što naravno nije problem za stabilnost. Izraz (5-20) daje manjak snage u području tijekom kvara. Što je taj manjak veći, razlika kutova između podsustava i glavne mreže će se brže povećavati. [1]

Prisutnost distribuirane proizvodnje može utjecati i na drugi i treči član izraza (5-20). Ali to će imati suprotan utjecaj na stabilnost nego ranije. Smanjenje proizvodnje iz distribuiranih izvora tijekom kvara će povećati vrijednost trećeg člana, što će povećati nedostatak snage tijekom kvara. Povećanje napona blizu potrošnje tijekom kvara će rezultirati manjim padom

potrošnje tijekom kvara, što će također povećati manjak energije. Ako to usporedimo sa utjecajem na izvozno područje, vidimo da isto ponašanje distribuirane proizvodnje ima pozitivan utjecaj na izvozno područje, ali negativan na uvozno područje. Kako isti podsustav može i uvoziti i izvoziti energiju (ovisno o lokalnoj proizvodnji i potrošnji), nije moguće dati opće zahtjeve na ponašanje distribuirane proizvodnje tijekom kvara. Sa većim instalacijama, poput vjetroparkova, postavke proizvodnje se mogu mijenjati ovisno o radnom stanju sustava. To bi zahtjevalo razvoj nove infrastrukture (između ostalih za kontrolu i komunikaciju) i novih načina za promatranje rada prijenosnog sustava. [1]

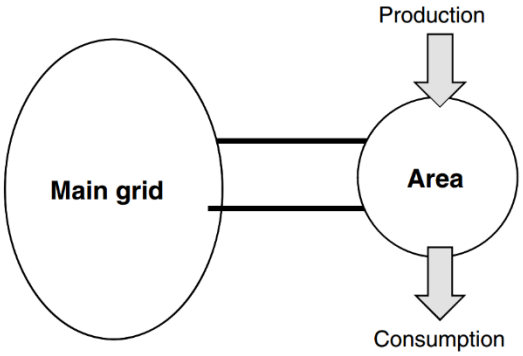
Utjecaj distribuirane proizvodnje na količinu kinetičke energije u području je isti kao za izvozni podsustav. No u uvoznom podsustavu ima manje spojene proizvodnje, pa je smanjenje kinetičke energije ranije vidljivo. [1]

Nakon kvara u uvoznom podsustavu, distribuirana proizvodnja treba biti dostupna odmah kako bi se ograničio nedostatak snage, te omogućilo razlici kutova da se što prije vrati na vrijednost prije kvara. Isključivanje distribuirane proizvodnje tijekom kvara treba izbjegavati za uvozni podsustav. Dok kod izvoznog podsustava isključenje distribuirane proizvodnje čak popravlja kutnu stabilnost. [1]

6. PROLAZAK KROZ KVAR

6.1 Pozadina

Kao što je ranije spomenuto, glavno pravilo za vođenje prijenosnog sustava je (N - 1) kriterij. Pod tim kreterijem nijedan pojedini događaj ne smije rezultirati gubitkom opterećenja. Operator prijenosnog sustava mora osigurati dovoljne rezerve kako bi se pobrinuo za održavanje (N - 1) kriterija. Za planiranje rezervi je važno znati ponašanje proizvodnje i potrošnje, tijekom i nakon kvara. Kako bi to pojasnili razmotrimo sustav prikazan na slici 6.1. Područje sa proizvodnjom i potrošnjom je spojeno na glavnu mrežu preko dvije prijenosne linije. Razlika između proizvodnje i potrošnje u području treba biti manje od dvostruke vrijednosti prijenosnog kapaciteta svake linije. [1]



Slika 6.1 Lokalno područje sa proizvodnjom spojenom na glavnu mrežu pomoću dvije prijenosne linije [1]

Siguran prijenosni kapacitet prijenosnog koridora je jednak prijenosnom kapacitetu jednog od dva voda. Gubitak jedne prijenosne linije ne smije rezultirati gubitkom opterećenja. Razlika između proizvodnje i potrošnje unutar područja stoga treba biti manja od prijenosnog kapaciteta jedne linije. Planiranje proizvodnje u regiji treba biti takvo da se ta razlika ne premaši. [1]

U praksi se ravnoteža između proizvodnje i potrošnje održava pomoću stvarne proizvodnje. Teoretski je moguće zakazati proizvodnju iz rezervi prije nego prijenosne linije postanu preopterećene. To bi zahtjevalo komunikacijsku infrastrukturu koja bi rezervu dovoljno brzo učinila dostupnom nakon gubitka jedne od linija. Rezerva se može učiniti dostupnom ne samo povećanjem proizvodnje nego i smanjenjem potrošnje. [1]

U ranijoj raspravi o maksimalnoj razlici između proizvodnje i potrošnje u području, predpostavljeno je da gubitak prijenosne linije ne utječe na proizvodnju i potrošnju. Ispad prijenosne linije se najčešće događa zbog kratkog spoja ili zemljospoja. To utječe na proizvodnju

i na potrošnju kao kratkotrajno smanjenje napona. Takva kratkotrajna smanjenja napona mogu uzrokovati isključenja velikih industrijskih instalacija. Također mogu uzrokovati isključenja distribuirane proizvodnje. To je dijelom zbog inherentne osjetljivosti električnih strojeva i posebno elektroničkih energetskih pretvarača, te dijelom zbog zahtjeva zaštite. Važan uzrok isključenja distribuirane proizvodnje zbog smanjenja napona je zbog zaštite od otočnog pogona. [1]

Kako bi se sprječilo preopterećenje druge linije nakon ispada prve, dodatna proizvodnja treba biti predviđena kako bi nadoknadila proizvodnju koja ispadne zbog isključenja distribuiranih izvora zbog kvara. U najgorem slučaju, odnosno bez oslanjanja na ikakvu sposobnost prolaska kroz kvar distribuirane proizvodnje, količina distribuirane proizvodnje ne utječe na potrebnu količinu konvencionalne proizvodnje. To bi učinilo sustav sigurnijim jer bi se smanjio prijenos kroz prijenosni koridor. No rezultiralo bi i povećanjem pogonskih troškova, osim ako tržište električnom energijom omogući dovoljnu proizvodnju unutar regije u bilo kojem slučaju. [1]

Operator prijenosnog sustava mora izbjegavati svako namjerno isključenje interkonekcijskih vodova, kako bi se djelovanjem primarne regulacije frekvencije omogućila solidarna ispomoć susjednih regulacijskih područja ugroženom regulacijskom području. Zbog toga, svi interkonekcijski vodovi među regulacijskim područjima moraju biti opremljeni uređajima za automatski ponovni uklop (APU) i uređajem za kontrolu sinkronizma. [2]

Većina operatora prijenosnog sustava daje stroge zahtjeve na sposobnost prolaska kroz kvar proizvodnih jedinica. Zasad je to ograničeno na veće jedinice, posebno velike vjetroparkove, ali javlje se i trend postavljanja sličnih zahtjeva i na manje jedinice. Zahtjevi za sposobnost prolaska kroz kvar pokrivaju neosjetljivost na podnapone, podfrekvencije i nadfrekvencije. Ponekad se postavljaju i zahtjevi za slučaj pojave prenapona.

Provedena je studija o utjecaju 3500 i 7000 MW snage iz vjetroelektrana na Norveški prijenosni sustav, te predstavljena u [1]. Temeljeno na postojećim zahtjevima za sposobnost prolaska kroz kvar računata je predviđena količina snage dobivene iz vjetroelektrana koja će biti isključena za velik broj kvarova u prijenosnom sustavu. Za 3500 MW iz vjetroelektrana, očekuje se ispad do 800 MW. Za 7000 MW, gubitak proizvodnje iz vjetroelektrana zbog kvarova može biti do 1623 MW. To premašuje veličinu primarne rezerve u Nordijskom sinkroniziranom sustavu (1200 MW), pa postoji mogućnost potpunog ispada sustava. U istoj studiji je pokazano da bi količina proizvodnje iz vjetroelektrana koja bi bila isključena zbog kvara bila smanjenja na maksimalno 1050 MW kada bi vjetroparkovi doprinosili struji kratkog spoja. Treba napomenuti da je studija razmatrala posebno radno stanje i da je količina primarne rezerve prisutne u

Nordijskom sustavu obično veća od minimalno zahtjevanih 1200 MW zbog postojanja velikog broja hidroelektrana.

6.2 Povijesni slučaji

Iako se u raspravama o masivnim isključenjima više govori o sposobnosti prolaska kroz stanje propada napona, masivna isključenja se češće događaju zbog podfrekvencije i nadfrekvencije. Industrijske instalacije u Velikoj Britaniji godinama prijavljuju isključenja postrojenja za kogeneraciju zbog ispada HVDC veze s Francuskom. Brzina promjene frekvencije zbog tog ispada je dovoljna da ROCOF relej reagira i isključi generator. To je smatrano nepoželjnim za industrijsku instalaciju, slično kao isključenje zbog propada napona. Nije predstavljalo problem za operatore prijenosnog sustava jer se radi o maloj količini proizvodnje. Takvi problemi nisu prijavljivani u Nizozemskoj niti Danskoj, dvije zemlje s velikim količinama kogeneracijskih postrojenja u poljoprivredi. Razlog tome je što su odstupanja frekvencije u Europskom kontinentalnom sinkroniziranom sustavu puno manja nego u Britanskom sustavu. [1]

Najranija izvješća o nepovoljnom utjecaju isključenja vjetroelektrana su došla iz malih otočnih sustava. Tijekom perioda od 3 godine su zabilježena 33 slučaja isključenja vjetroelektrana na Kreti zbog podnapona. Potpuni ispad sustava je uzorkovan masovnim isključenjem vjetroelektrana zbog podfrekvencije. [1]

Prvi dobro dokumentiran slučaj masovnog isključenja se pojavio sa potpunim ispadom u Italiji 28. rujna 2003. Kolaps sustava je započeo ispadom dvije prijenosne linije između Italije i Švicarske. To je uzrokovalo preopterećenja u preostalim međunarodnim vezama i dovelo do otočnog pogona cijelog sustava Italije. Kako je u sustavu nedostajala velika količina proizvodnje, frekvencija je počela naglo opadati. Kada je frekvencija dosegla 49 Hz, ukupno 1700 MW distribuirane proizvodnje je isključeno zbog podfrekvencije. To je dodatno povećalo nedostatak proizvodnje. Frekvencija je dodatno smanjena i gotovo cijela država je ostala bez električne energije. O ovome slučaju se mnogo raspravljalo kao primjeru neželjenog isključenja distribuirane proizvodnje koje otežava posao operatora prijenosnog sustava. U tom slučaju bi se kolaps sustava vjerojatno dogodio čak i da je distribuirana proizvodnja ostala uključena. Distribuirana proizvodnja je reagirala točno kako je trebala kako bi se spriječio otočni pogon. Nekoliko konvencionalih elektrana je isključeno prije nego što je trebalo. [1]

Drugi slučaj se dogodio nekoliko godina kasnije, 4. studenog 2006. Preopterećenje prijenosnog voda u sjevernoj Njemačkoj je uzrokovalo kaskadni efekt koji je rezultirao slomom Europskog kontinentalnog sinkroniziranog sustava na tri dijela. Zbog podjele sustava je sjeverni dio imao višak proizvodnje, što je uzrokovalo brzi porast frekvencije. Pojava nadfrekvencije je

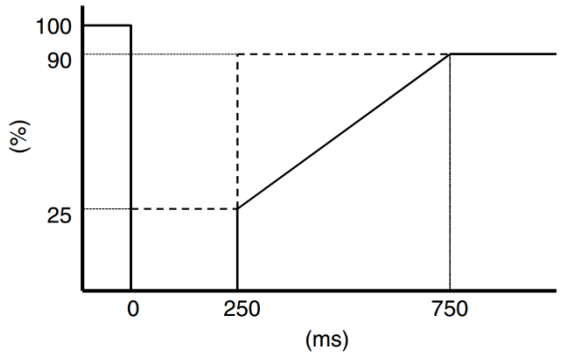
uzrokovala isključenje vjetroelektrana i drugih distribuiranih izvora u sjevernoj Njemačkoj i Danskoj. To je pridonjelo stabilizaciji frekvencije u tom dijelu sustava. No kada su te proizvodne jedinice ponovno uključene, opet se pojavio lokalni višak proizvodnje koji je gotovo uzrokovao daljnje dijeljenje sustava. [1]

U isto vrijeme, u jugozapadnom dijelu sustava je nastao ozbiljan manjak proizvodnje što je uzrokovalo brzi pad frekvencije. Kao i kod sloma sustava u Italiji, sva distribuirana proizvodnja je isključena kada je frekvencija pala na 49 Hz. Isključenje industrijske kogeneracije je uzrokovalo nekoliko dugih zaustavljanja proizvodnje. Ukupan iznos isključene proizvodnje je iznosio 10,800 MW. Početni manjak proizvodnje u ovom dijelu mreže je bio oko 9000 MW; no ukupno 17,000 MW tereta je isključeno podfrekvencijskim rasterećenjem, što odgovara približno 15 milijuna kućanstava. Nije moguće sa sigurnošću pripisati rasterećenje niti podjeli sustava niti gubitku distribuirane proizvodnje. Ali pogled na brojke opravdava grubu procjenu da je oko pola od 15 milijuna isključenih kućanstava ostalo bez električne energije zbog ispada distribuirane proizvodnje. Treba naglasiti da to nije samo po sebi posljedica prisutnosti distribuirane proizvodnje. To se dogodilo zbog postavki zaštite, koje zahtjeva operator distribucijske mreže, a koje imaju negativne posljedice na prijenosnom nivou. [1]

6.3 Zahtjevi neosjetljivosti

Kako bi se sprječilo masovna isključenja jedinica tijekom kvarova u prijenosnom sustavu, većina operatora prijenosnog sustava daju stroge zahtjeve na neosjetljivost proizvodnih jedinica od utjecaja frekvencija i napona koji odstupaju od normalnih vrijednosti. [1]

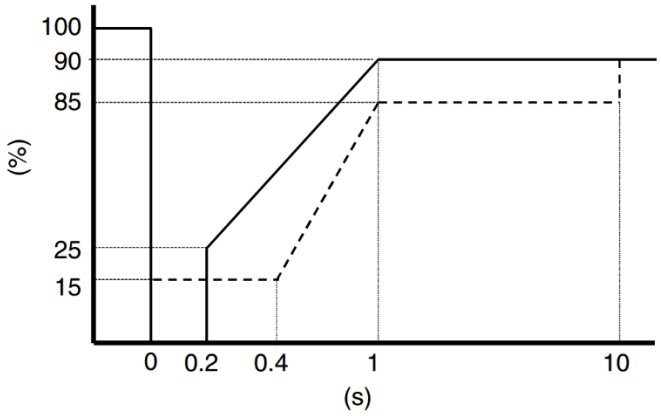
U većini slučajeva ti zahtjevi su opravdani za veće instalacije, ali često se postavljaju i na sve manje i manje proizvodne jedinice. Dolje je dano nekoliko primjera tih zahtjeva, kako su postavljeni u različitim državama.



Slika 6.2 Podnaponski zahtjevi u Švedskoj za proizvodne jedinice veće od 100 MW (puna linija) i za proizvodne jedinice između 1.5 i 100 MW (crtkana linija) [1]

Podnaponski zahtjevi u Švedskoj su prikazani na slici 6.2. Za jedinice veće od 100 MW, nulti napon se treba tolerirati barem 250 ms. Manje jedinice (1.5-100 MW) moraju tolerirati 25% nazivne vrijednosti napona kroz 250 ms. Kosina između 25%, 250 ms i 90%, 750 ms predstavlja spori oporavak napona nakon kvara zbog dinamičnih efekata. Strogo govoreći ovo nije ista krivulja kao krivulja neosjetljivosti na propade napona u studijama kvalitete električne energije. U području kvalitete električne energije, neosjetljivost je dana "krivuljom tolerancije napona" ili ""krivulje neosjetljivosti na propade napona". Ta krivulja spaja pravokutne propade različitog iznosa i trajanja. Krivulje neosjetljivosti švedskog operatora prijenosnog sustava daju najgori mogući (pravokutni ili nepravokutni) propad napona za koji generator treba ostati u pogonu. [1]

Postavljanje blažih zahtjeva na manje jedinice nego na veće je uobičajeno. No neki operatori prijenosnog sustava daju različite zahtjeve za jedinice ovisno o naponskom nivou na kojeg su spojene, na primjer u Norveškoj, kao što je prikazano na slici 6.3. Iznad 200 kV proizvodna jedinica mora tolerirati nulti napon 200 ms, dok je jedinicama na nižim naponskim nivoima dopušteno isključenje kada napon padne ispod 15%. Jedinice spojene na nižem naponskom nivou moraju tolerirati duže propade manjeg iznosa. To odražava tipično dulje vrijeme otklanjanja kvara na nižim naponskim nivoima u usporedbi sa višim naponskim nivoima. [1]



Slika 6.3 Podnaponski zahtjevi u Norveškoj za proizvodne jedinice spojene na naponske nivoe iznad 200 kV (puna linija) i za proizvodne jedinice spojene na naponske nivoe ispod 200 kV (crtkana linija) [1]

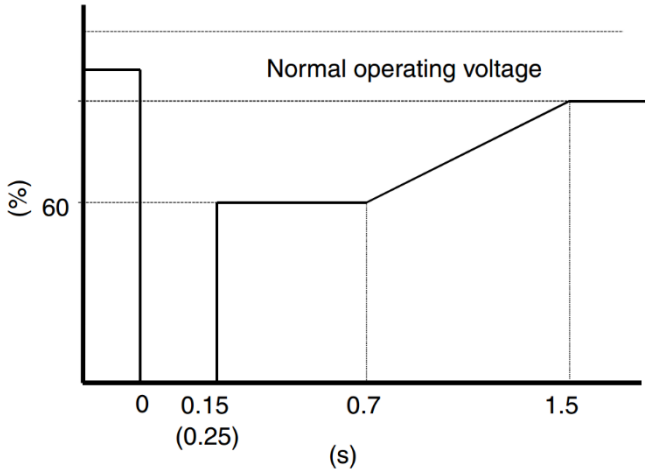
Danski operator prijenosnog sustava postavlja različite zahtjeve na jedinice različitih tipova i veličina. Razlikuju se sljedeće kategorije:

- Svi generatori manji od 11 kW
- Generatori u termoelektranama veći od 11 kW i manji od 1.5 MW
- Generatori u termelektranama veličine 1.5 MW i više

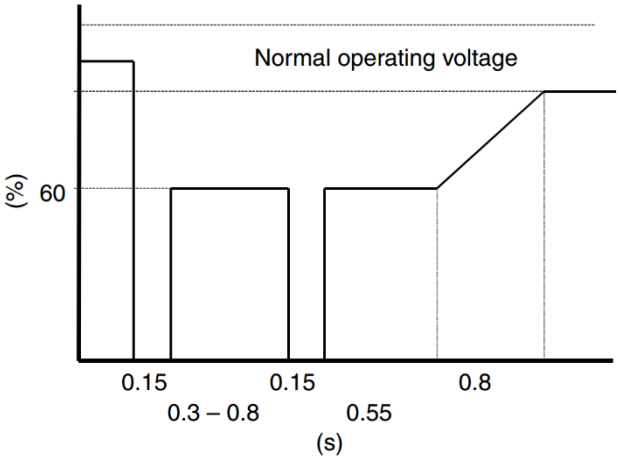
- Vjetroturbine spojene na naponski nivo manji od 100 kV, veličine između 11 kW i 1.5 MW
- Vjetroturbine spojene na naponski nivo manji od 100 kV, veličine 1.5 MW ili više
- Vjetroturbine spojene na naponski nivo od 100 kV ili više

Za termo proizvodne jedinice veće od 200 kW, generator treba ostati spojen za pad napona na 50% u tri faze tijekom 1 s, i pad napona jedne faze prema zemlji na nulu tijekom 1 s. Za odstupanja frekvencije, bilo koja termo proizvodna jedinica veća od 11 kW treba ostati spojena za frekvencije između 49.0 i 50.5 Hz, i 30 minuta kada je frekvencija između 47.5 i 51.0 Hz. Određeno smanjenje proizvodnje je dozvoljeno za frekvencije ispod 49.0 Hz. Jedinica treba ostati spojena za stope promjene frekvencije između -2.5 i +2.5 Hz/s. [1]

Za napone iznad 100 kV postavljaju se različiti zahtjevi za slučaj kvarova na jednoj fazi i trofaznih kvarova. Krivulje neosjetljivosti za trofazne i jednofazne kvarove su prikazane na slikama 6.4 i 6.5. U oba slučaja, početni napon može biti bilo gdje u normalnom radnom opsegu, a napon nakon propada može biti na nižoj granici normalnog radnog opsega. [1]



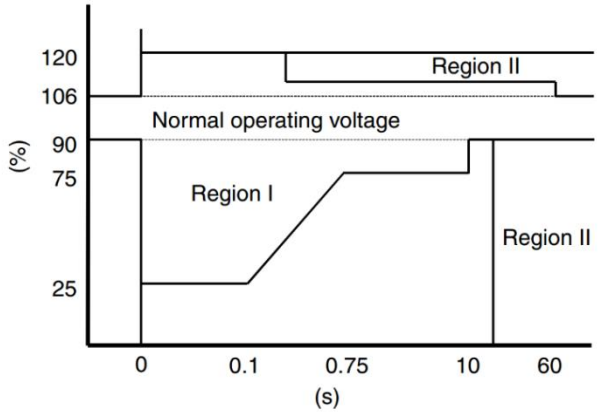
Slika 6.4 Podnaponski zahtjevi u Danskoj za termoelektrane od 1.5 MW i više spojene na napon iznad 100 kV: trofazni kvarovi [1]



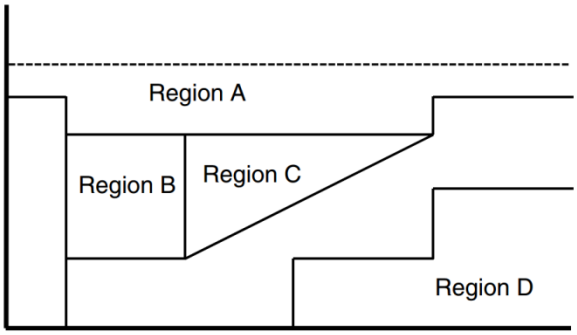
Slika 6.5 Podnaponski zahtjevi u Danskoj za termoelektrane od 1.5 MW i više spojene na napon iznad 100 kV: jednofazni kvarovi [1]

Za trofazne kvarove su postavljeni različiti zahtjevi za istok zemlje (koji pripada Nordijskom sinkroniziranom sustavu) i za zapad zemlje (koji je dio Europskog kontinentalnog sinkroniziranog sustava): na istoku zemlje generator treba ostati spojen kada je napon jednak nuli 250 ms; na zapadu zemlje, 150 ms je dovoljno. Za trofazne kvarove generator treba tolerirati samo jedan propad, dok za jednofazne kvarove treba tolerirati dva propada vremenski razmaknuta 300-800 ms. [1]

Za generatore u termoelektranama spojene na napone iznad 100 kV vrijede zahtjevi dani na slici 6.6. Slika prikazuje i zahtjeve neosjetljivosti (za koje turbina treba ostati spojena) i zahtjeve zaštite (za koje turbinu treba isključiti). Postoji područje između regije I i regije II u kojem turbina može biti isključena ili ostati spojena. Nema pravila za tu regiju. Za nadnapone, nema takvog područja između regije I i regije II: turbina ili mora ostati spojena ili mora biti isključena.



Slika 6.6 Zahtjevi neosjetljivosti i zaštite kod vjetroturbina u Danskoj. Regija I: ne treba isključiti, regija II: treba isključiti [1]

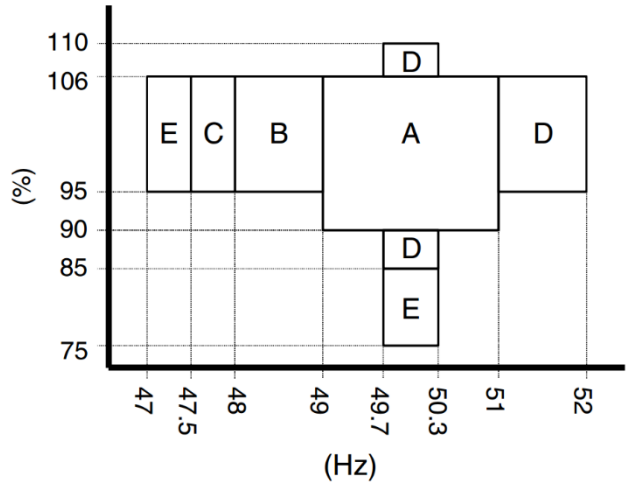


Slika 6.7 Predloženi zahtjevi neosjetljivosti i zaštite prema DERlab-u [1]

Širok raspon pravila i zahtjeva između različitih država stvara problem proizvođačima distribuiranih izvora. Različita pravila između država često uzrokuju nesporazume i teškoće u tumačenju pravila, što može ozbiljno odgoditi spajanje instalacije. Glavni problem proizvođača je sa malim proizvodnim jedinicama, gdje je masovna proizvodnja važna kako bi im cijena ostala niska. Ne samo da su pravila različita između zemalja, nego se i mijenjaju s vremenom, obično tako da postaju stroža. Ti problemi su, između ostaloga, izloženi u bijeloj knjizi koju je izdao DERlab konzorcij, grupa istraživačkih laboratorija koji nastoje uspostaviti usklađene standardne i metode testiranja distribuirane proizvodnje. Trenutno nema zahtjeva za neosjetljivost za takve male jedinice, ali postoje zahtjevi zaštite. Kako bi se osigurao sklad između zahtjeva zaštite i budućih zahtjeva za neosjetljivost, predloženo je da se definira više regija na karakteristici napona-trajanja kvara, kao što je prikazano na slici 6.7. [1]

- Područje A je normalan radni raspon, gdje ne bi trebalo biti utjecaja na rad generatora.
- Za propade u području B generator treba ostati spojen, ali nema zahtjeva za tokove radne i jalove snage.
- Za propade u području C, generator treba ostati spojen i davati definiranu struju. Moguća je potreba za zahtjevima na radnu i jalovu komponentu stuje.
- Područje D je raspon u kojem bi generator trebao biti aktivno uklonjen iz sustava kao mjera zaštite.

Kao što je ranije spomenuto, jedini dobro dokumentirani slučajevi masovnih isključenja su se dogodili zbog odstupanja frekvencije. Zahtjevi na neosjetljivost na odstupanja frekvencije su jednostavniji nego za propade napona. Neka od pravila koja je postavio operator prijenosnog sustava u Danskoj su prikazana na slici 6.8. Zahtjevi su prikazani na frekvencijsko-naponskom dijagramu; za različite kombinacije napona i frekvencije, instalacija mora ostati spojena različito vrijeme. [1]



Slika 6.8 Zahtjevi za prolazak kroz stanje promijenjene frekvencije i napona: vjetroelektrane spojene na napone ispod 100 kV u Danskoj [1]

Sljedećih pet područja je prikazano na slici 6.8:

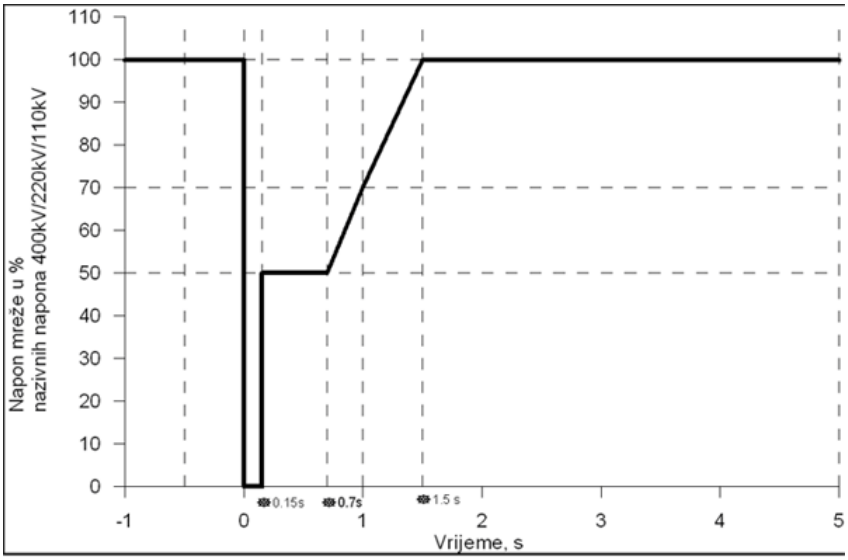
- Područje A je normalno radno područje: instalacija treba raditi kako je predviđeno dokle god je frekvencija između 49 i 51 Hz i napon između 90% i 106% nazivnog.
- U području B, podfrekvencija između 48 i 49 Hz i normalan napon, instalacija treba ostati spojena 25 minuta. Tada nastaje ozbiljan nedostatak proizvodnje i pokreće se podfrekvencijsko rasterećenje kako bi se vratila ravnoteža između proizvodnje i potrošnje; gubitak dodatne proizvodnje bi uzrokovao isključenje dodatne potrošnje.
- Područje C, podfrekvencija između 48 i 47.5 Hz, treba se tolerirati 5 minuta. Ovo je ozbiljna situacija koja bi se trebala događati rijetko i trajati kratko vrijeme.
- Područje D se sastoji od tri dijela: nadfrekvencije i normalnog napona, blagih podnapona i blagih nadnapona pri normalnoj frekvenciji. Ovdje bi instalacija trebala ostati spojena 1 minutu.
- U području E, instalacija treba biti isključena nakon 10 s. Ovdje se radi o drastičnoj podfrekvenciji pri normalnom naponu ili drastičnom podnaponu pri normalnoj frekvenciji. U oba slučaja, sustav je jako poremećen i takav ne bi trebao trajati dulje od nekoliko sekundi.

Nema zahtjeva za ozbiljna odstupanja napona i frekvencije u isto vrijeme. To odgovara (N - 1) kriteriju, gdje se ne pretpostavlja da se dogodi više od jednog ozbiljnog problema u isto vrijeme. [1]

6.4 Zahtjevi za prolazak kroz kvar u Hrvatskoj

Zadržavanjem priključka proizvodnih objekata, pa tako i vjetroelektrana pri stanju kvara doprinosi se bržem oporavku napona. Stoga sva nova pogonska ili mrežna pravila u Europi nameću vjetroelektranama obvezu sposobnosti prolaska kroz stanje kvara ili drugim riječima, sposobnost zadovoljavanja potražnje za jalovom snagom u stanju nakon kvara. U Hrvatskoj je Mrežnim pravilima propisano da kratki spojevi u blizini elektrane pri ispravnom djelovanju sustava zaštite, ako se otklone unutar 150 ms, ne smiju dovesti u cijelom pogonskom području generatora do nestabilnosti ili odvajanja jedinice od mreže. Ovo vrijedi ako je na sučelju prijenosne mreže i proizvodne jedinice snaga bliskog tropolnog kratkog spoja, nakon isključenja kvara šesterostruko veća od nazivne djelatne snage proizvodne jedinice (što pri cos 0,85 i naponskom faktoru 1 znači da ekvivalentna impedancija sustava gledano od mjesta priključka proizvodne jedinice iznosi najviše 20% nazivne impedancije generatora). Pri tomu ne smije doći do automatskog prespajanja vlastite potrošnje na rezervni izvor energije. Ukoliko neka proizvodna jedinica ne može zadovoljiti zahtjeve iz ovoga stavka, može samo uz odobrenje operatora prijenosnog sustava nastaviti s pogonom. [3]

Proizvodna jedinica se ne smije odvojiti od prijenosne mreže dok god je napon mreže na visokonaponskoj strani blok-transformatora iznad granične krivulje prikazane na slici 6.9. Ovaj zahtjev vrijedi i za proizvodne jedinice priključene na naponske razine niže od 110 kV, a koje su pod središnjim nadzorom operatora prijenosnog sustava.



Slika 6.9 Granična krivulja dopuštenog napona prijenosne mreže na visokonaponskoj strani blok-transformatora [3]

Pri kratkim spojevima udaljenim od elektrane, ako se kvar otkloni djelovanjem mrežne zaštite unutar 5 sekundi, ne smije doći do prespajanja vlastite potrošnje na rezervni izvor, a niti do preventivnog odvajanja proizvodne jedinice od mreže, zbog nepovoljnog utjecaja napona mreže na napon vlastite potrošnje. [3]

6.4.1 Tehnički zahtjevi obzirom na regulaciju napona i kompenzaciju jalove snage te sposobnost prolaska kroz stanje kvara: [3]

1) Vjetroelektrana treba zadržati trajno priključenje na prijenosni sustav pri maksimalno raspoloživoj djelatnoj snazi ili skraćenoj izlaznoj djelatnoj snazi:

- unutar pogonskih raspona propisanih u Mrežnim pravilima za sve generatore u sustavu: vjetroelektrana mora ostati trajno priključena na prijenosnu mrežu pri maksimalno raspoloživoj djelatnoj snazi ili skraćenoj izlaznoj djelatnoj snazi unutar slijedećih normalnih raspona napona prijenosne mreže:
  - 400 kV prijenosna mreža: 360 kV - 420 kV;
  - 220 kV prijenosna mreža: 198 kV - 242 kV;
  - 110 kV prijenosna mreža: 99 kV - 121 kV.

  vjetroelektrana mora ostati trajno priključena na prijenosnu mrežu pri maksimalno raspoloživoj djelatnoj snazi ili skraćenoj izlaznoj djelatnoj snazi unutar slijedećih raspona napona koji se mogu javiti tijekom poremećaja ili kvarova u prijenosnoj mreži:
  - 400 kV prijenosna mreža: 340kV - 460 kV;
  - 220 kV prijenosna mreža: 187kV - 253 kV;
  - 110 kV prijenosna mreža: 94 kV - 127 kV.
- za skokovite promjene napona u prijenosnoj mreži u iznosu do 10% od nazivne vrijednosti unutar pogonskih raspona.

2) Vjetroelektrana koja je na prijenosnu mrežu priključena preko istog transformatora zajedno s drugim potrošačkim teretima treba također imati regulaciju faktora snage.

3) Ukoliko se regulacija napona izvodi na razini cijele vjetroelektrane umjesto na razini pojedinačnih vjetroagregata, tada raspon raspoloživog faktora snage ne smije biti manji od onog koji bi bio raspoloživ kada bi se regulacija napona izvodila korištenjem pojedinačnih vjetroagregata.

4) Vjetroelektrana treba biti sposobna regulirati iznos napona u čvorištu priključenja na prijenosnu mrežu te postići njegov iznos prema postavnoj vrijednosti koju određuje operator prijenosnog sustava, unutar raspona njenog faktora snage između 0.95ind i 0.95kap.

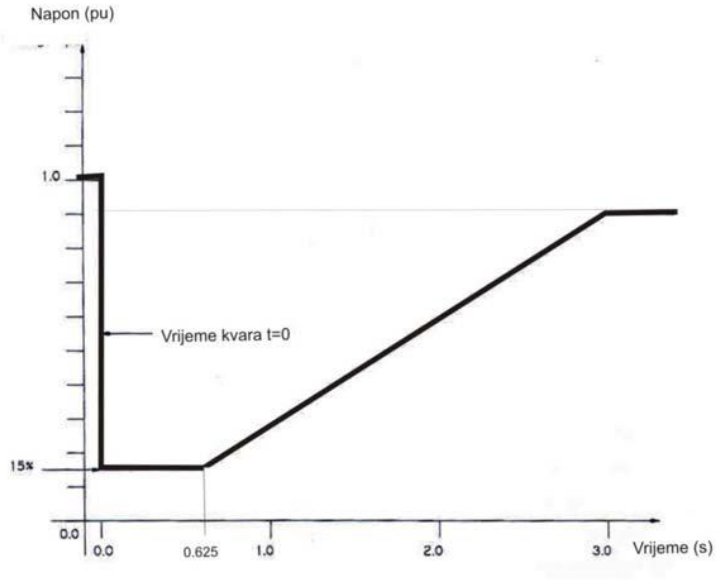
5) Postavnu vrijednost definira HEP-OPS barem 60 radnih dana prije zakazanog puštanja

vjetroelektrane u pogon. Operator vjetroelektrane odgovoran je za primjenu postavne vrijednosti u fazi puštanja u pogon. Statičnost ili nagib karakteristike može povremeno biti mijenjana u ovisnosti o potrebama sustava. HEP-OPS mora izvijestiti operatora vjetroelektrane barem dva tjedna unaprijed o traženoj izmjeni postavne vrijednosti. Operator vjetroelektrane mora formalnim putem potvrditi da su tražene izmjene primijenjene u roku od dva tjedna od primitka formalno izdanog naloga operatora sustava.

6) Ovisno o opravdanim potrebama u sustavu HEP-OPS može zatražiti brzinu odziva sustava za regulaciju napona takvu da nakon skokovite promjene iznosa napona u čvorištu priključenja vjetroelektrana postiže 90% od njezine stacionarne jalove snage unutar jedne sekunde.

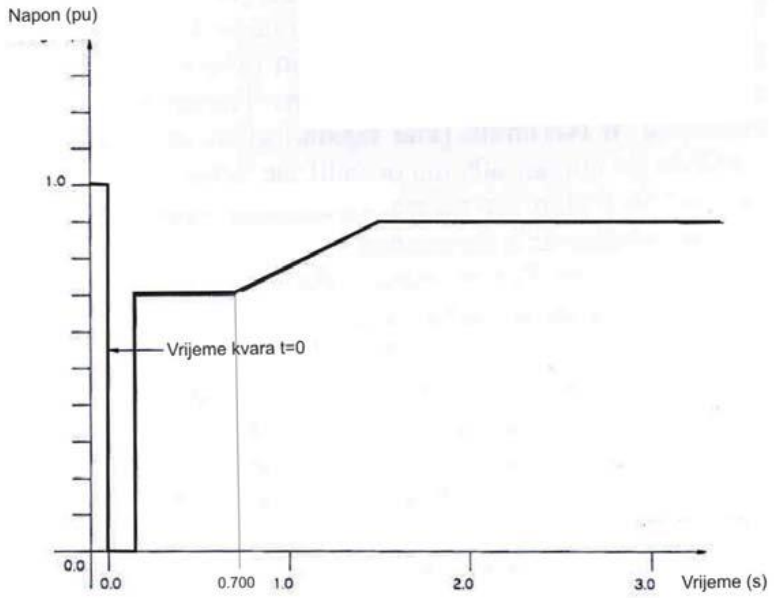
7) Nakon provedenih razmatranja navedenih opcija za vrijeme injektiranja djelatne snage u sustav, vjetroelektrana mora biti sposobna voditi pogon uz raspon faktora snage od 0.95ind do 0.95kap. Neophodno je spomenuti da se ovaj zahtjev postavlja na cijelu vjetroelektranu, što znači da je u postupak neophodno uključiti transformatore i srednjonaponski distribucijski sustav unutar vjetroelektrane.

8) Svaka vjetroelektrana mora biti sposobna podnijeti propad napona na razinu od 15% nazivne vrijednosti u periodu od 625 ms bez gubitka priključka. Ukoliko iznos napona u čvorištu priključenja opadne kvazi-stacionarno (ne mijenja se brže od 5% po minuti) na razinu ispod 90% nazivne vrijednosti, do isključenja mora doći najranije poslije 3 sekunde kako je prikazano na slici 6.10.



Slika 6.10 Sposobnost prolaza vjetroelektrane kroz stanje kvara u sustavu [3]

9) Ukoliko je simetrična komponenta doprinosa struji kratkog spoja od strane generatora dvaput ili više veća od nazivne struje, onda mora biti zadovoljena krivulja prikazana na slici 6.11.



Slika 6.11 Zahtjevi za sposobnost prolaska kroz stanje propada napona onih vjetroelektrana koje značajnije doprinose struji kratkog spoja u priključnom čvorištu [3]

6.5 Ostvarivanje prolaska kroz kvar

Ostvarivanje prolaska kroz kvar je postalo zadatak vlasnika proizvodne jedinice, s tim da operator prijenosnog sustava postavlja zahtjeve. Većina razvoja je usmjerena na postizanje potrebne neosjetljivosti za svaku individualnu generatorsku jedinicu. No to nije jedino moguće rješenje. Treba napomenuti da zahtjevi neosjetljivosti trebaju vrijediti za sučelje s prijenosnom mrežom. Iznenadan ispad velikih količina proizvodnje je problem prijenosnog sustava. Kvar na distribucijskoj razini, električno puno bliži generatorima, će utjecati na mali broj generatora. Njihovo ispadanje neće imati utjecaj na rad prijenosnog sustava. Važno je kako se ponaša distribuirana proizvodnja u slučaju propada napona na sučelju sa prijenosnim sustavom. Propad napona na sučelju također treba razmotriti za velike vjetroparkove spojene na prijenosni sustav. Nije očito koju naponsku razinu treba razmotriti kao spojnu točku za svrhu prolaska kroz kvar. Važno je kakav utjecaj će gubitak distribuirane proizvodnje imati na prijenosni sustav. Bilo koji gubitak proizvodnje manji od veličine najveće proizvodne jedinice neće ugroziti stabilnost frekvencije. [1]

Napon na spojnim točkama generatora je određen doprinosom generatora struji kvara i impedancijom između generatora i kvara. Doprinos generatora struji kvara jako ovisi o tipu generatora. Doprinos je najveći za sinkrone strojeve. [1]

Sinkroni strojevi održavaju napon u distribucijskoj mreži tijekom kvara u prijenosnom sustavu. Njihov utjecaj može biti značajan u slučaju velike integracije distribuirane proizvodnje, što im je očita prednost. Nedostatak je što sinkroni strojevi mogu postati nestabilni nakon kvara, što bi imalo nepovoljan utjecaj na kutnu stabilnost. Što dulje kvar traje i što je napon niži, veća je opasnost od nestabilnosti. Također su važni faktori inercijska konstanta sinkronog stroja i kontrola jalove snage stroja. U literaturi se mogu naći proturječne informacije i nije moguće izvući opće zaključke. No može se izvući jedan zaključak: kada stroj postane (kutno) nestabilan, ne može ostati spojen na sustav. Ili će se stroj oštetiti ili će ga zaštita isključiti. [1]

Situacija s asinkronim strojevima je potpuno drugačija. Asinkroni strojevi održavaju napon tijekom trofaznog kvara samo kroz jednu ili dvije periode nakon nastanka kvara. Za nesimetrične kvarove asinkroni stroj prigušuje inverznu komponentu napona, što ima pozitivan utjecaj na napon, ali ne značajan. Nakon kvara asinkroni stroj se može ponovno spojiti kada god je sustav dovoljno jak. Ovdje je važna kratkoročna stabilnost napona: stroj uzima veliku količinu jalove snage nakon kvara, što toliko ruši napon da stroj ne može prenjeti dovoljno energije s mehaničke na električnu stranu. Ponašanje asinkronih strojeva je važno zbog njihove široke uporabe u vjetroelektranama. Naročito mnogo manjih vjetroturbina ima asinkrone strojeve. Sva rješenje za poboljšanje sposobnosti prolaska kroz kvar za asinkrone strojeve su vezana za proizvodnju jalove snage blisu stroja tako da ne dođe do pada napona. Studije koje su radile usporedbu između mogućnosti uklopnih kondenzatorskih baterija, *SVC-a* i *STATCOM-a* da omoguće prolazak kroz kvar vjetroparkova koji se sastoje samo od asinkronih strojeva su pokazale da nije važna brzina kojom se jalova snaga može učiniti dostupnom, nego samo količina jalove snage. No statički kompenzatori i *STATCOM* imaju druge prednosti poput manje veličine i sposobnosti da omoguće kontrolu napona i jalove snage i tijekom normalnog pogona. [1]

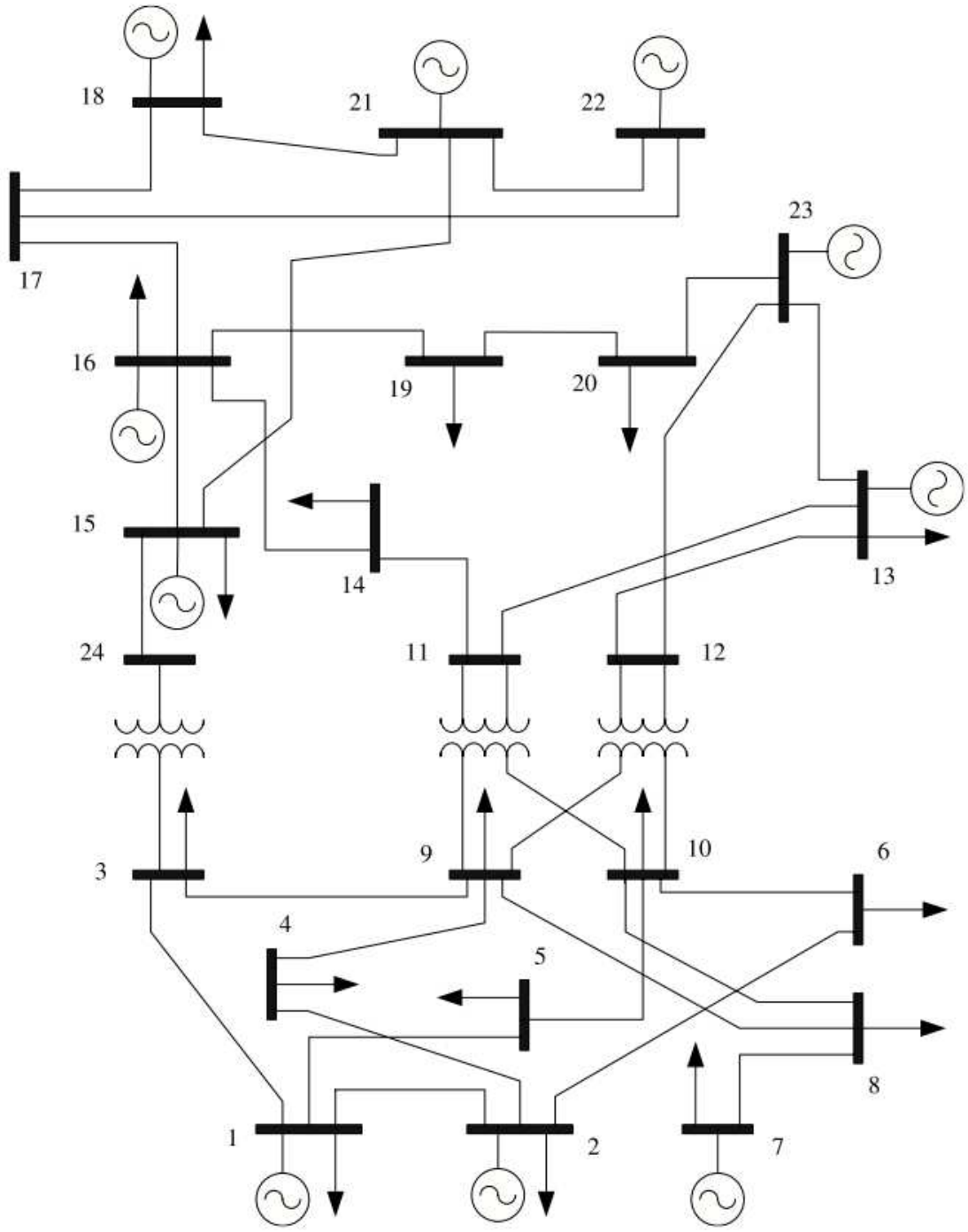
Prolazak kroz kvar dvostrano napajanih asinkronih strojeva jako ovisi o njihovoj zaštiti i kontroli. Uobičajeno korišten način zaštite rezultira time da se stroj ponaša kao običan asinkroni stroj koji radi sa velikim klizanjem. To stvara velik tok jalove snage koji uzrokuje proradu zaštite stroja koja ga odspoji. Sposobnost prolaska kroz kvar takvih strojeva je vrlo ograničena. Noviji strojevi tog tipa koriste alternativne metode zaštite i kontrole koje omogućuju bolju sposobnost prolaska kroz kvar. Kada turbina ostane spojena, konverterski dio se može koristiti za napajanje mreže jalovom snagom nakon kvara. [1]

Sve veći broj vjetroturbina koje se instaliraju je opremljeno sa potpunim priključkom pomoću elektroničkih energetskih pretvarača. Kod njih postoje problemi sa neosjetljivosti vrlo slični onima kod pretvarača koji napajaju opremu krajnjih korisnika: kada je napon prenizak, sklopovi energetske elektronike prestaju raditi ispravno; zbog niskog napona se struja mora povećati kako bi se održao tok snage. Nakon oporavka napona mogu se pojaviti nadstruje i nadnaponi koji mogu oštetiti sklopove energetske elektronike. Postoje dva načina sprječavanja oštećenja elektroničkih sklopova: isključenje uređaja na pojavu podnapona ili nadstruje, ili nad dimenzioniranje komponenti. Prvi način se tipično koristi kod opreme krajnjih korisnika gdje ne postoje strogi zahtjevi na neosjetljivost. Korištenje nadstrujne zaštite daje bolje rezultate u pogledu prolaska kroz kvar od podnaponske zaštite, ali podnaponska zaštita daje veću sigurnost da neće doći do oštećenja opreme. Kod vjetroturbina se primjenjuje nad dimenzioniranje. Uz to, razvija se više različitih metoda za poboljšanje sposobnosti prolaska kroz kvar koje koriste energetsku elektroniku. Velike mehaničke sile koje se javljaju tijekom i nakon kvara također treba držati pod kontrolom. [1]

Trenutni trend istraživanja je poboljšanje sposobnosti prolaska kroz kvar individualnih turbina. Postoji i mogućnost ograničavanja pada napona na spojnim točkama generatora dodavanjam jalove snage na strateškim lokacijama u distribucijskom sustavu i u sabirnoj mreži vjetroparka. [1]

7. ANALIZA UTJECAJA VJETROELEKTRANE NA STABILNOST

Analiza utjecaja vjetroelektrane na stabilnost sustava rađena je u programu DIgSILENT PowerFactory. Korišten je sustav IEEE 24 Bus Reliability Test System, prikazan na slici 7.1. U sustavu postoje 32 proizvodne jedinice i 19 opterećenja. Svi parametri sustava koje je bilo potrebno unjeti u model preuzeti su iz [5].



Slika 7.1 IEEE 24 Bus Reliability Test System [4]

Prvo je provedena analiza tokova snaga, kako bi se dobilo uvid u napone svih sabirnica i opterećenja elemenata sustava. Rezultati tokova snaga prikazani su tablicom 7.1.

Tablica 7.1 Tokovi snaga

	Proizvodnja	Opterećenje	Ukupni gubici	Instalirani proizvodni kapacitet	Rotirajuća rezerva
P [MW]	3163,11	3159,00	4,11	3405,00 MW	241,89 MW
Q [MVAr]	488,02	643,00	45,24		
S [MVA]	3200,54	3223,78			

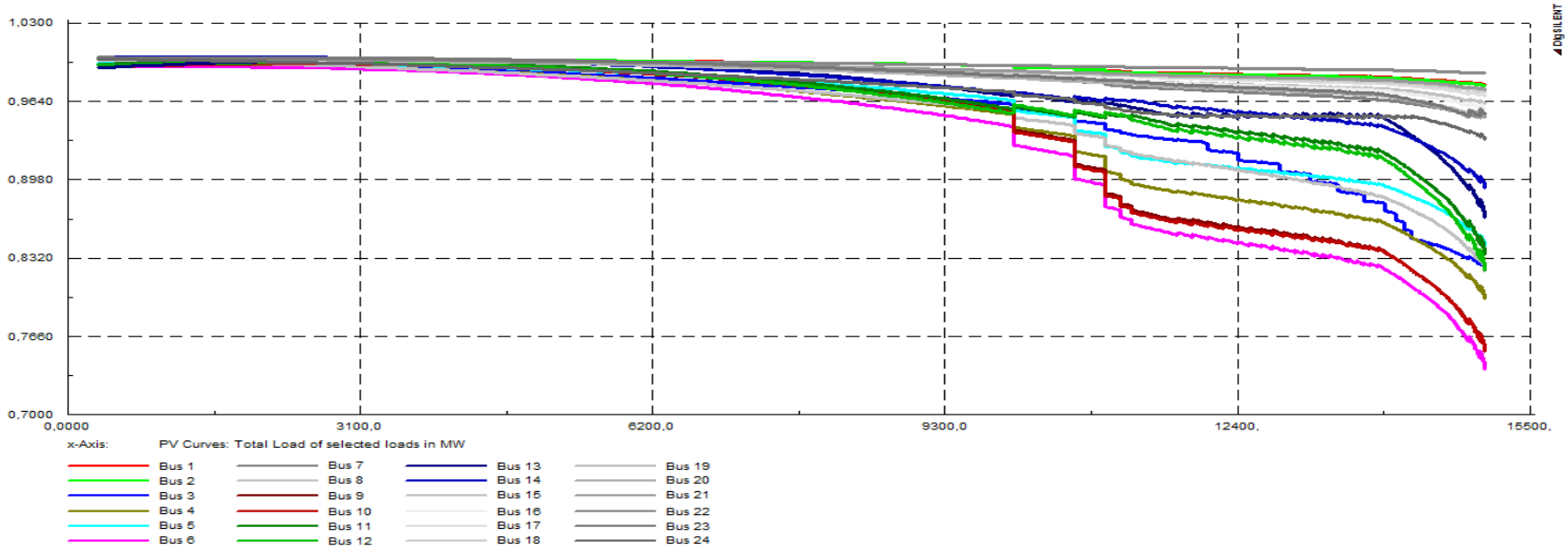
Naponi svih sabirnica su bili u prihvatljivim granicama, a kao najslabija se pokazala sabirnica 6, te je ona odabrana kao mjesto dodavanja vjetroelektrane u drugom dijelu simulacije. Dodan je vjetropark od 180 vjetroturbina snage 2 MW, dakle ukupno 360 MW, što je nešto više od najjačeg konvencionalnog generatora u sustavu, generatora G 23_3, čija je snaga 350 MW. Vjetroelektrana tako čini malo više od 10% ukupne proizvodnje u sustavu.
Za usporedbu, u tablici 7.2 su prikazani rezultati tokova snaga sa dodanom vjetroelektranom na sabirnicu 6.

Tablica 7.2 Tokovi snaga nakon dodavanje vjetroelektrane u sustav.

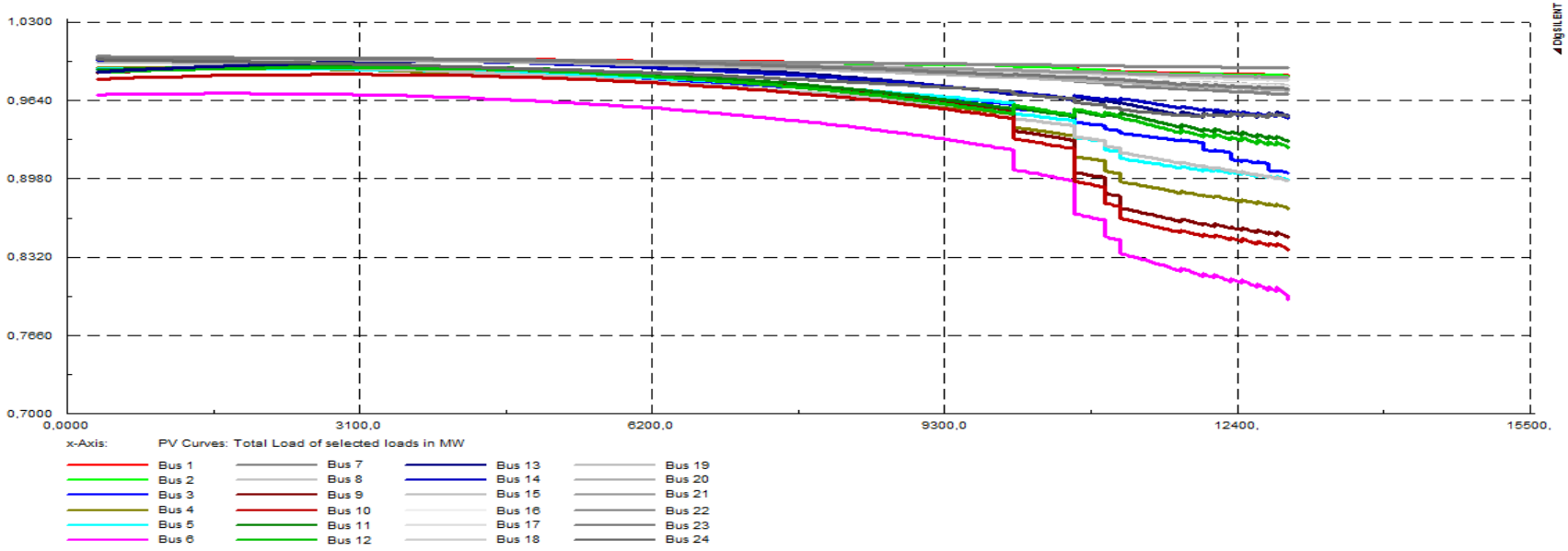
	Proizvodnja	Opterećenje	Ukupni gubici	Instalirani proizvodni kapacitet	Rotirajuća rezerva
P [MW]	3165,23	3159,00	6,23	3772,35 MW	599,77 MW
Q [MVAr]	527,02	643,00	84,17		
S [MVA]	3208,81	3223,78			

7.1 Utjecaj povećanja djelatne i jalove potrošnje na napone sabirnica

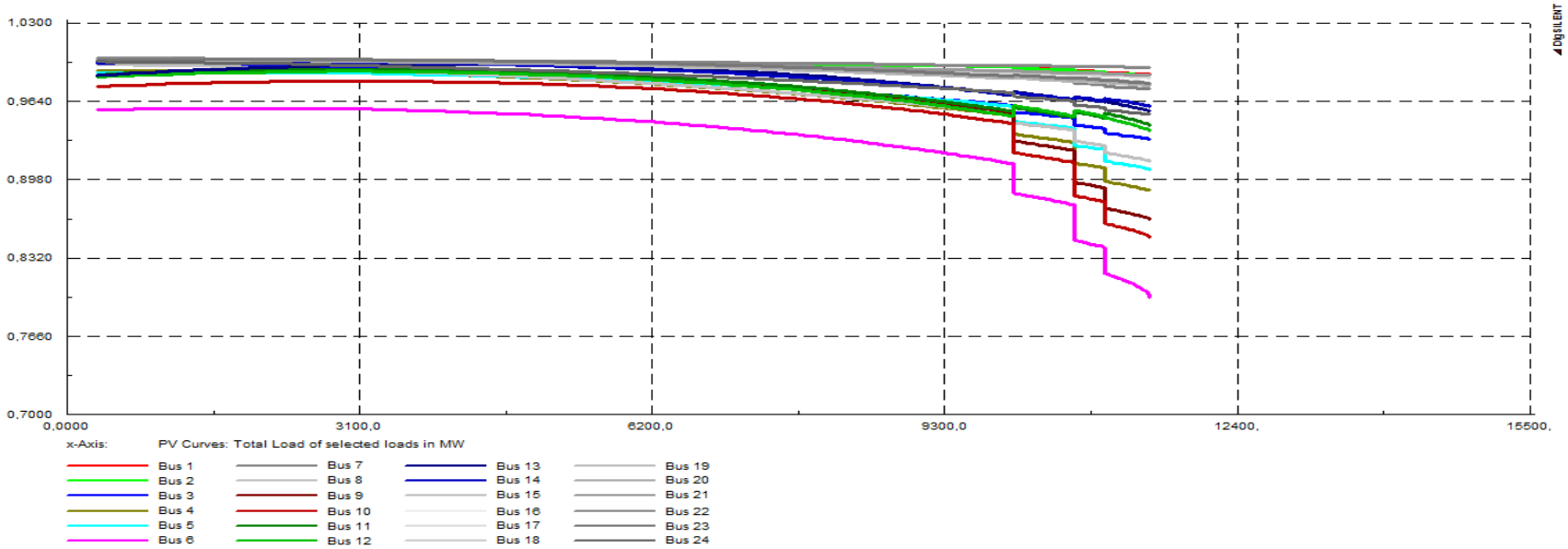
Za analizu utjecaja povećanja djelatne i jalove snage potrošnje na iznose napona sabirnica izrađene su PV i QV krivulje za svaku pojedinu sabirnicu. PV krivulje predstavljaju jedan od osnovnih alata za ispitivanje naponske stabilnosti sustava, a dobivene su korištenjem skripte "PV Curves" iz standardnog DPL (eng. DIgSILENT Programming Language) upravljačkog seta. Nakon odabira željenih sabirnica i potrošača i pokretanja skripte, ona povećava djelatnu snagu odabranih potrošača uz držanje faktora snage konstantnim sve dok tokovi snaga konvergiraju. Slika 7.2 prikazuje dijagram dobiven izvršavanjem skripte prije dodavanja vjetroelektrane u sustav, a slike 7.4 – 7.9 prikazuju dijagrame nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav, za različite razine integracije.



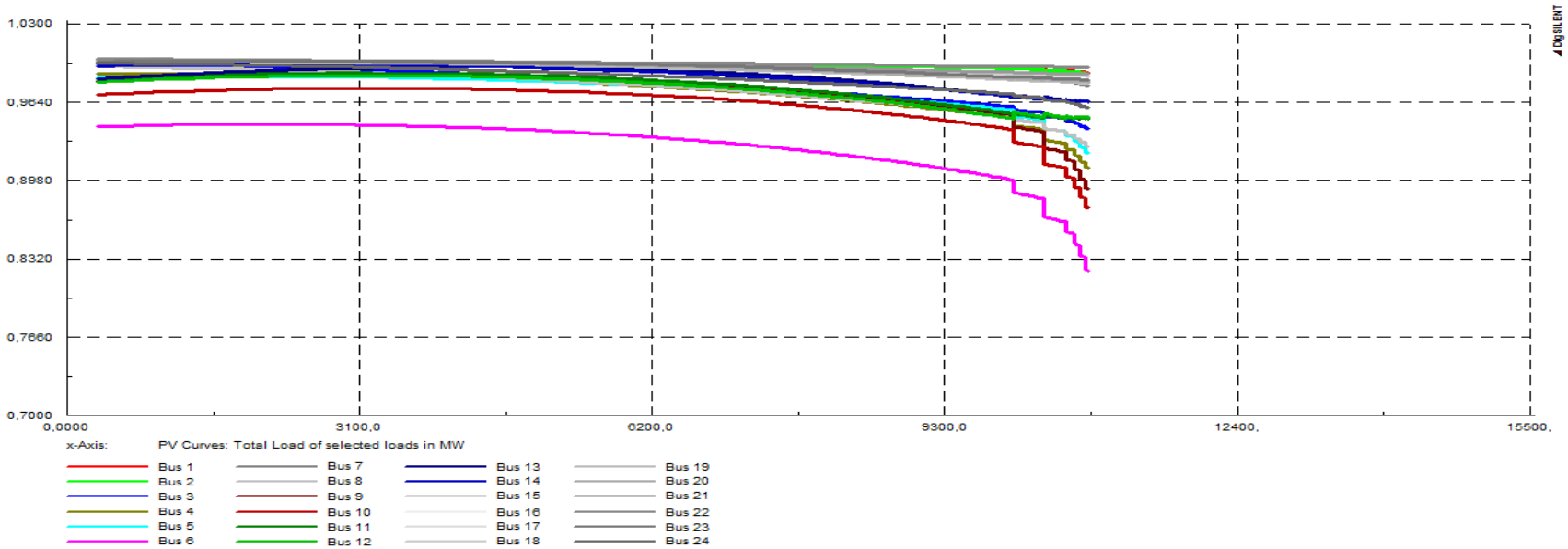
Slika 7.2 PV krivulje bez vjetroelektrane u sustavu



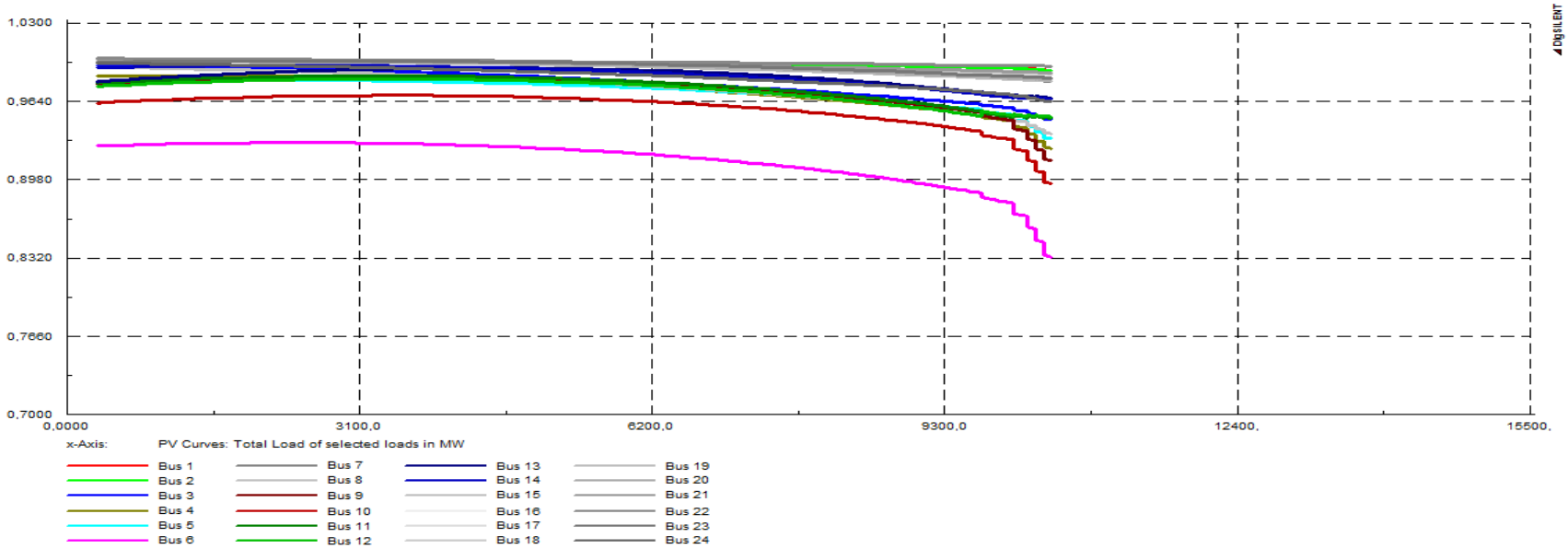
Slika 7.3 PV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 360 MW, razina integracije 10%



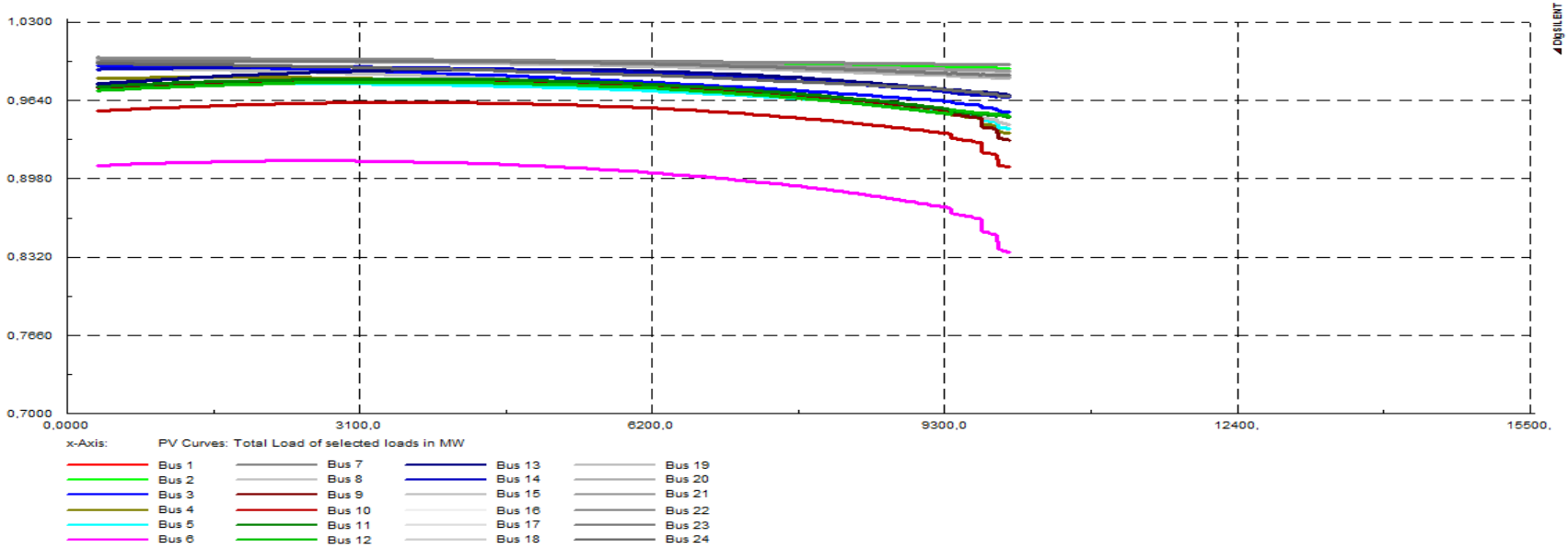
Slika 7.4 PV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 520 MW, razina integracije 13,3%



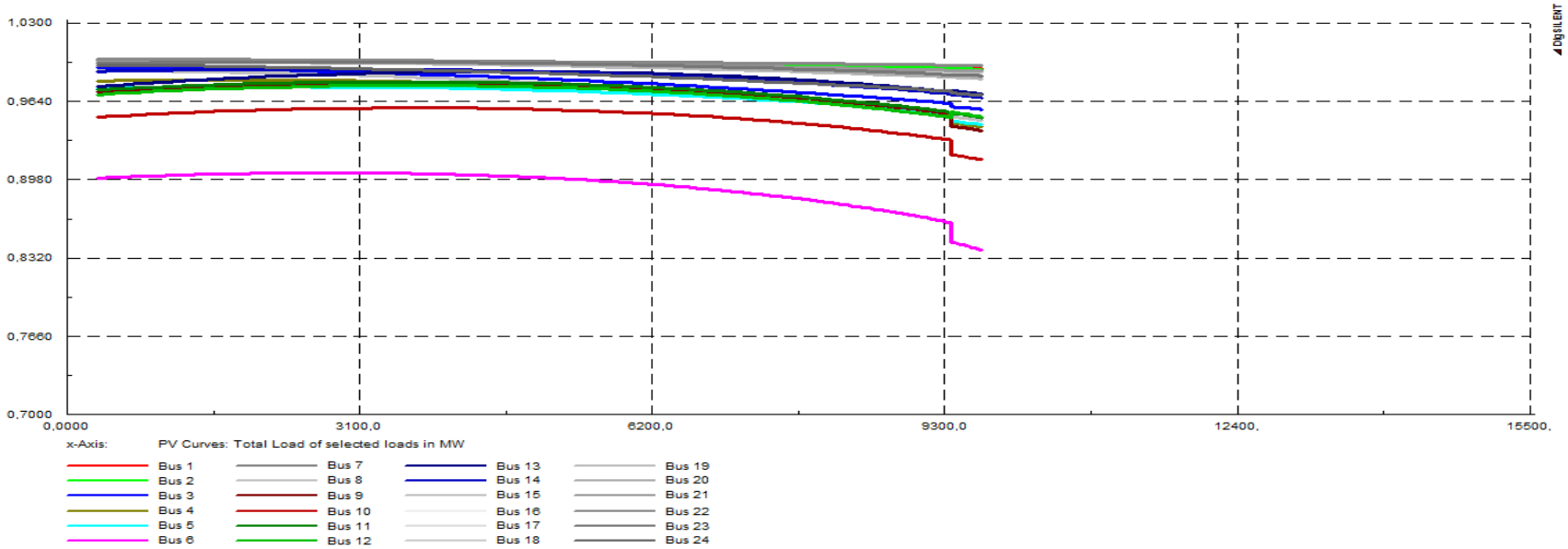
Slika 7.5 PV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 680 MW, razina integracije 16,67%



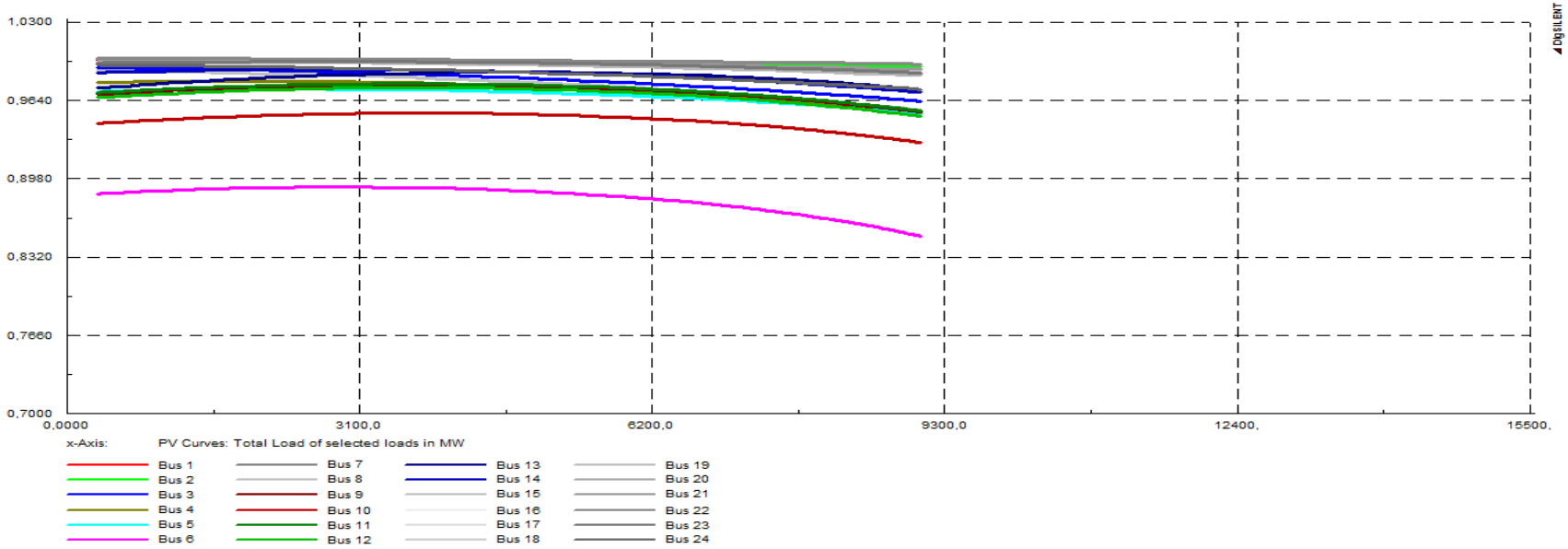
Slika 7.6 PV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 860 MW, razina integracije 20%



Slika 7.7 PV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 1 020 MW, razina integracije 23,1%



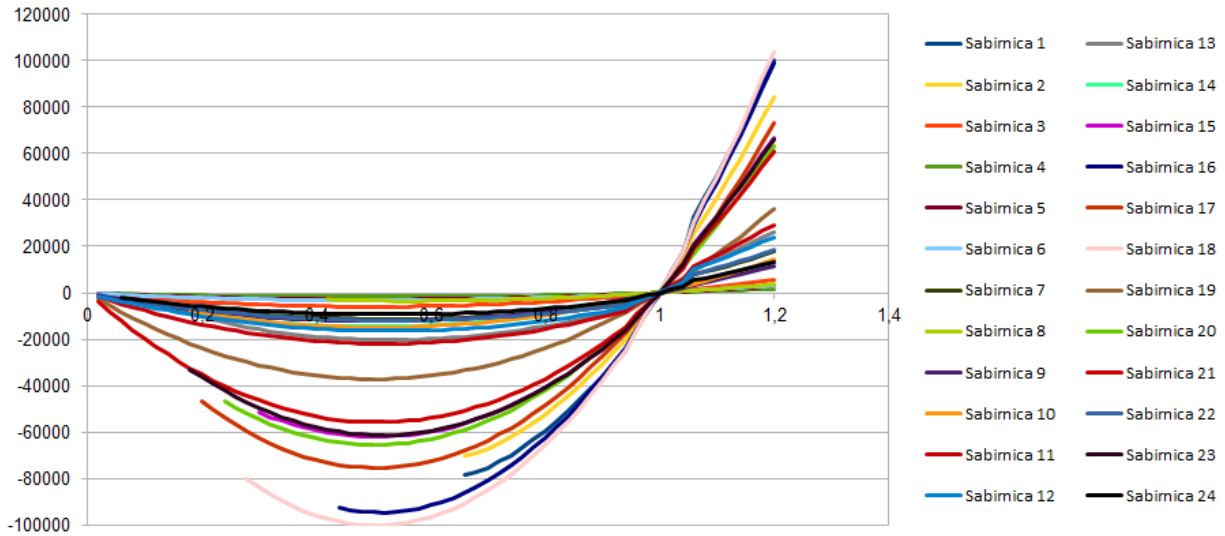
Slika 7.8 PV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 1 100 MW, razina integracije 24,4%



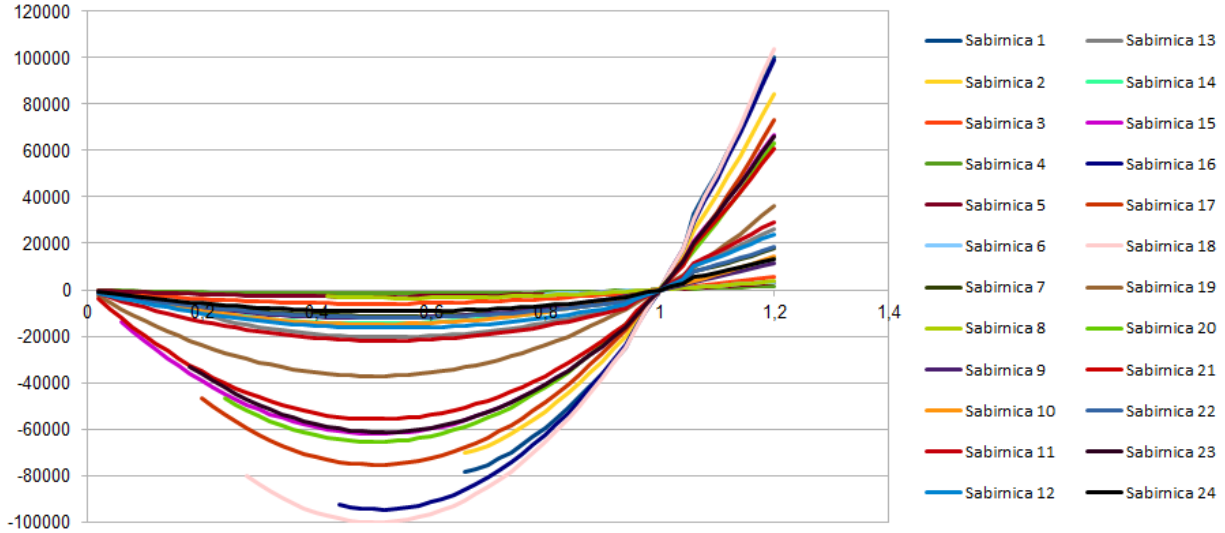
Slika 7.9 PV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 1 200 MW, razina integracije 26,1%

Iz krivulja se vidi da, u usporedbi s drugim sabirnicama, sabirnice 6 i 10 mogu podnjeti najmanji porast opterećenja. Dodavanje vjetroelektrane omogućava veće opterećenje sustava, pri čemu je najveći utjecaj na sabirnice 6 i 10.

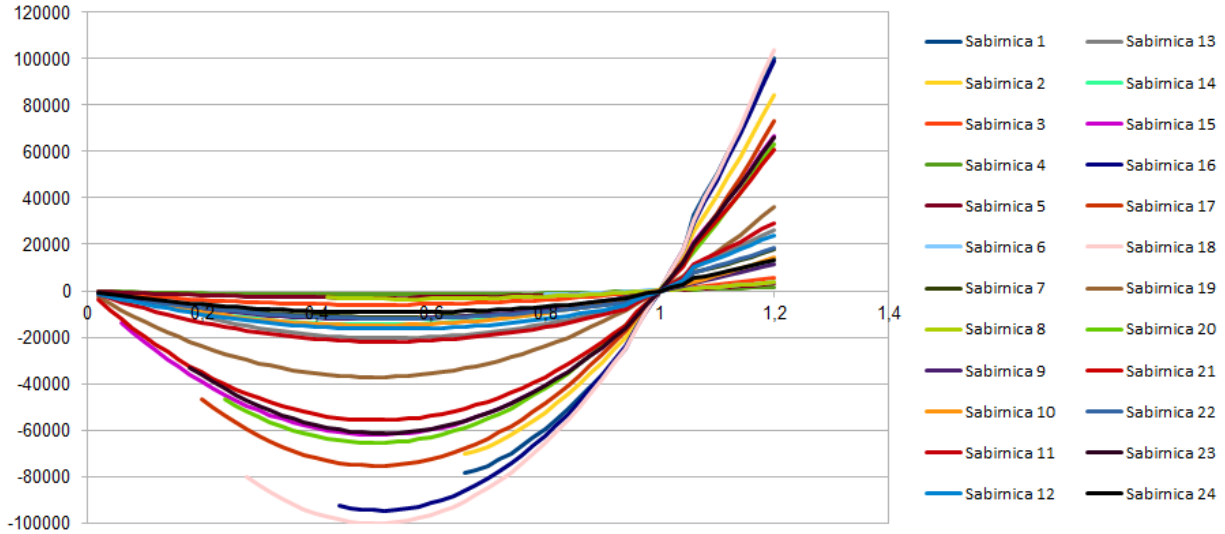
Za dobivanje QV krivulja također je korištena skripta iz DPL paketa, "QV Curves". Prije pokretanja skripte bilo je potrebno dodati generator na sabirnice. Skripta izračunava tokove snaga sve dok napon ne bude manji od ili jednak nuli, te zapisuje rezultate u matricu. Prikazani dijagrami izrađeni su iz dobivenih podataka u Microsoft Excelu. Slika 7.10 prikazuje QV krivulje prije, a slike 7.11 – 7.17 nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav, za različite razine integracije.



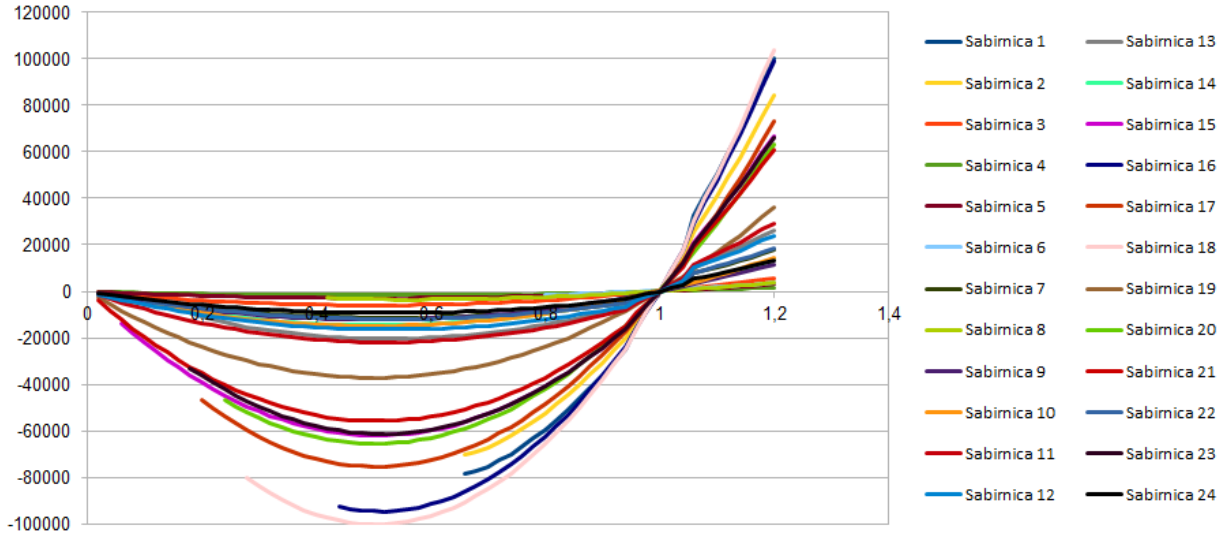
Slika 7.10 QV krivulje bez vjetroelektrane u sustavu



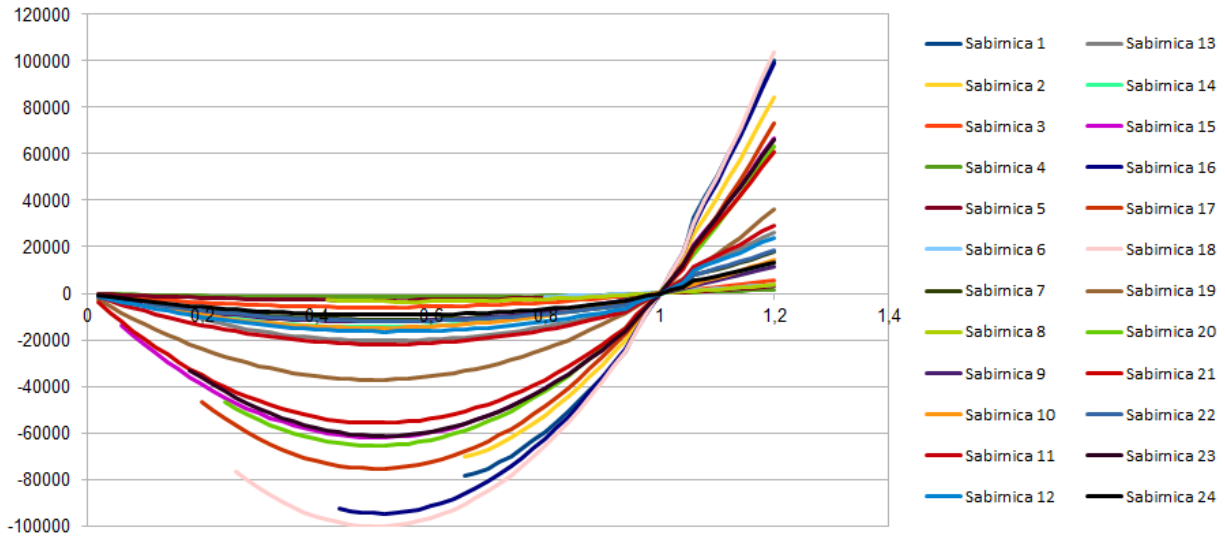
Slika 7.11 QV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 360 MW, razina integracije 10 %



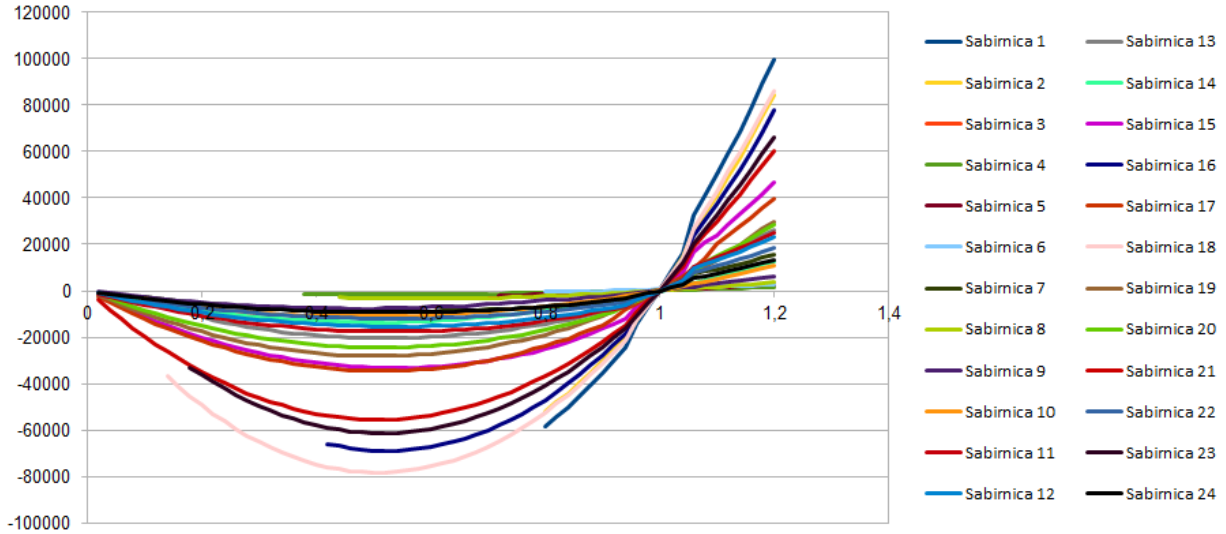
Slika 7.12 QV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 520 MW, razina integracije 13,3 %



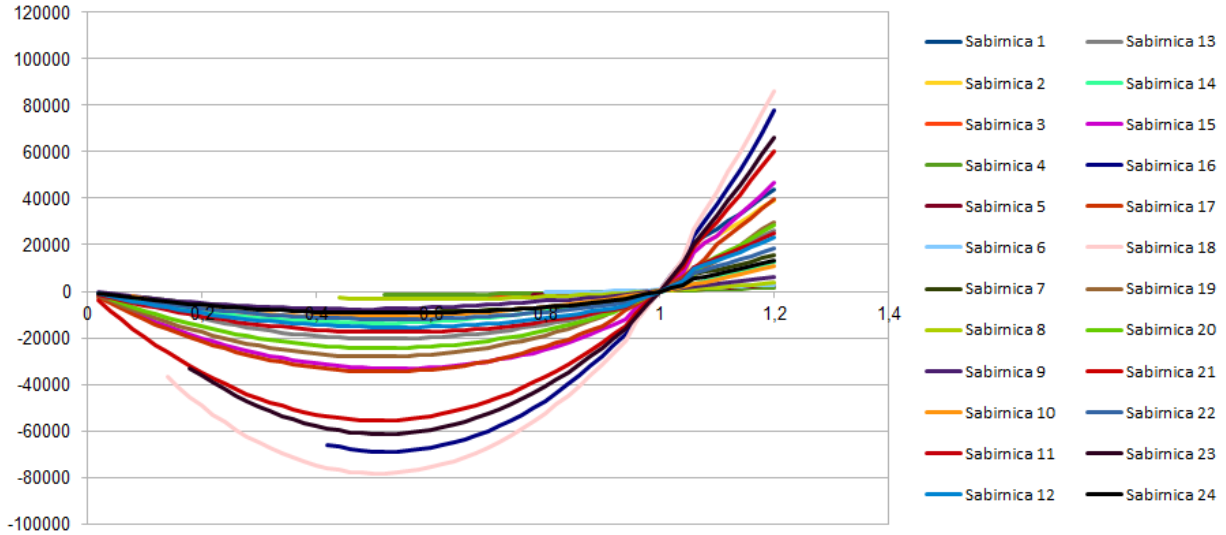
Slika 7.13 QV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 680 MW, razina integracije 16,67 %



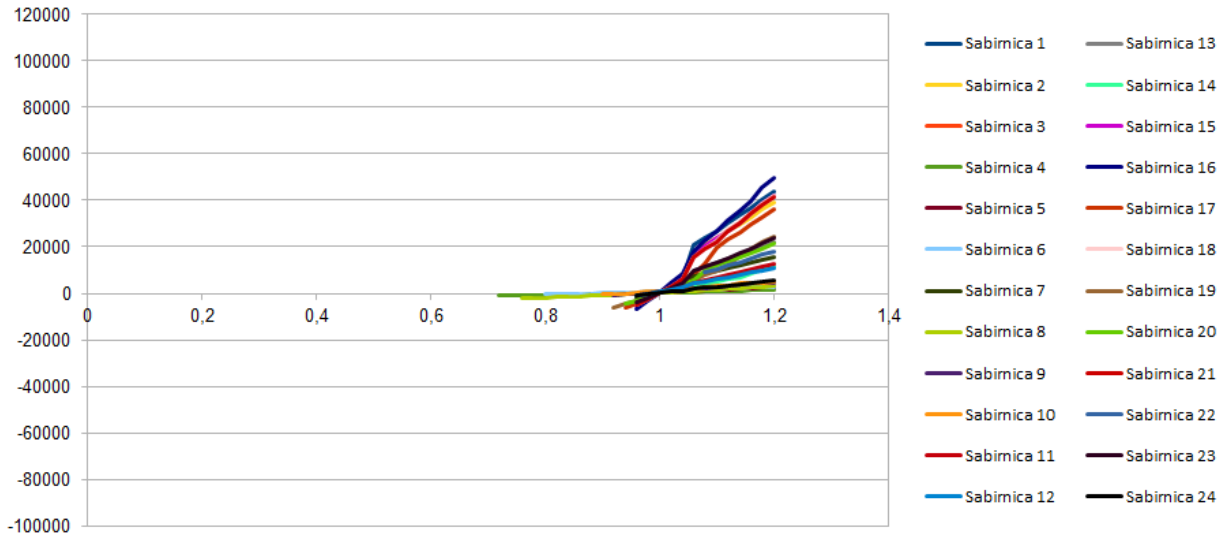
Slika 7.14 QV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 860 MW, razina integracije 20 %



Slika 7.15 QV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 1 020 MW, razina integracije 23,1 %



Slika 7.16 QV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 1 100 MW, razina integracije 24,4 %

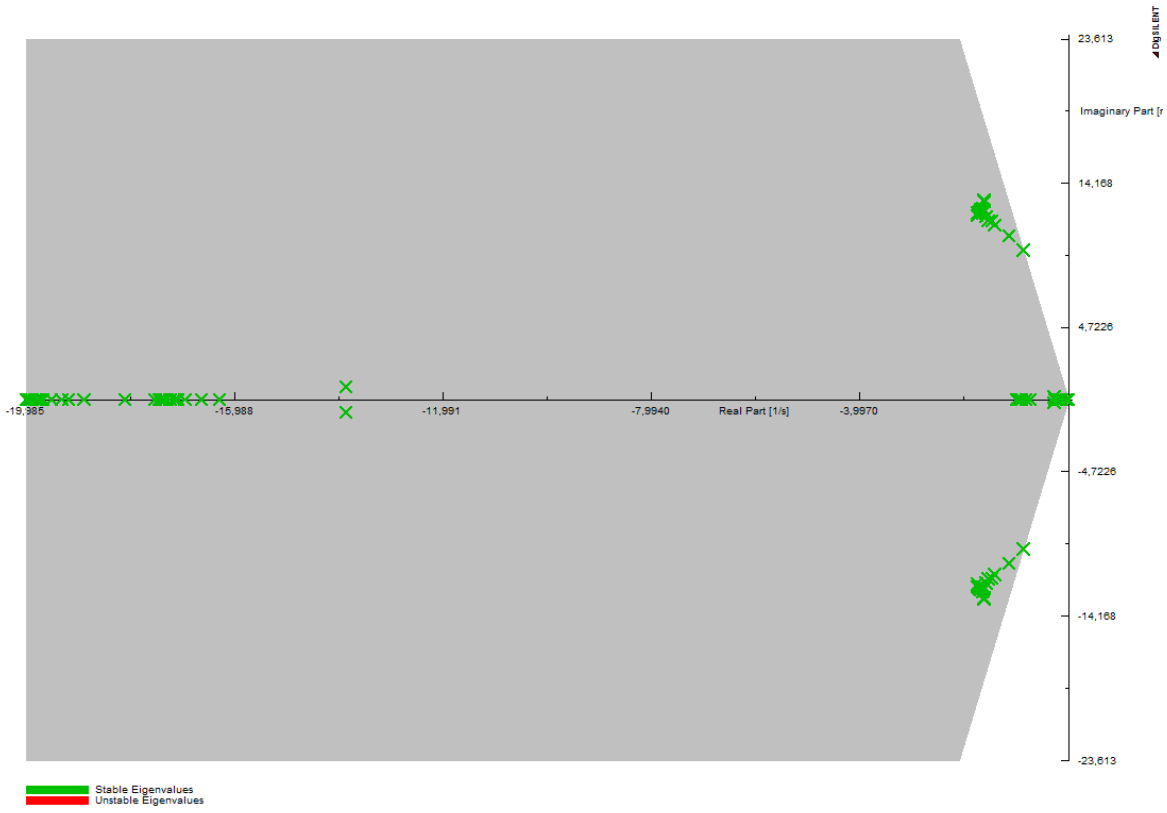


Slika 7.17 QV krivulje sa dodanom vjetroelektranom od 1 200 MW, razina integracije 26,1 %

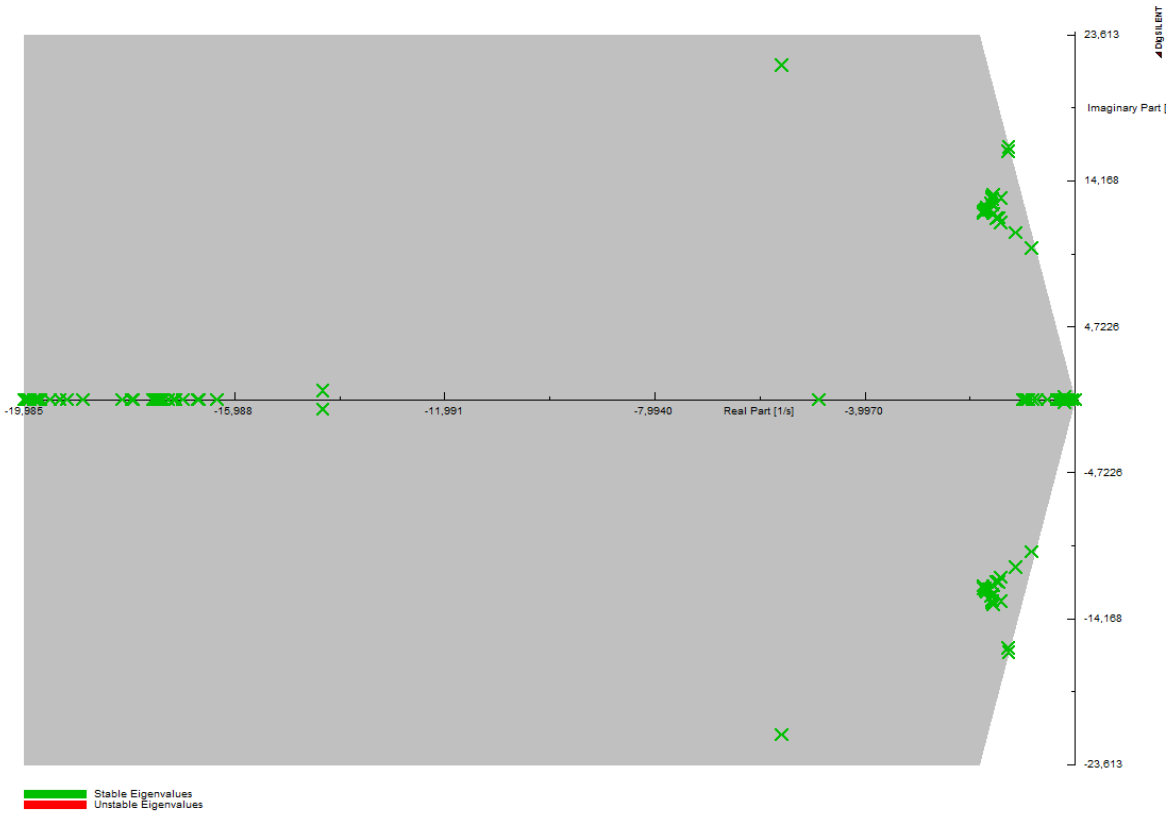
Priključenje vjetroelektrane s 10% instalirane snage u odnosu na konvencionalne elektrane u sustavu ima zanemariv utjecaj na moguće jalovo opterećenje sabirnica. Značajni utjecaj se primjećuje tek kada razina integracije pređe 20 %.

7.2 Analiza oscilatorne stabilnosti

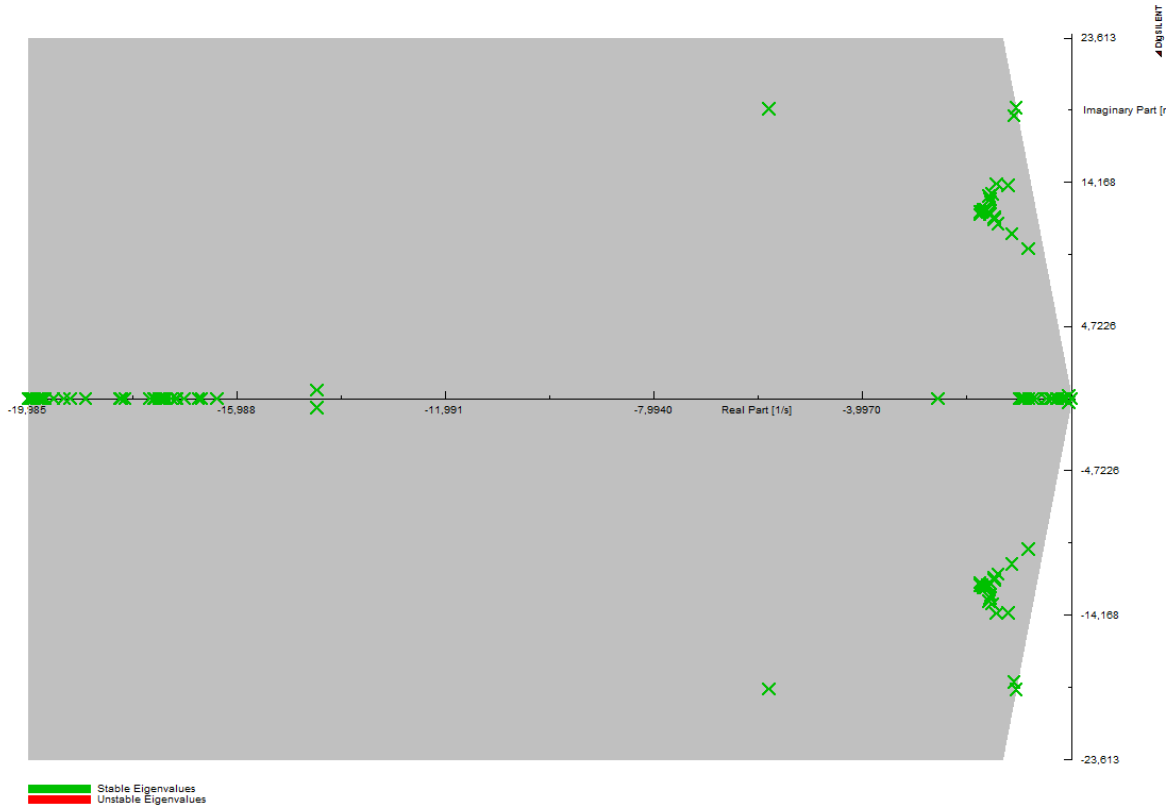
Kao metoda za analizu oscilatorne stabilnosti korištena je modalna analiza. Ona izračunava svojstvene vrijednosti i svojstvene vektore dinamičkog višestrojnog sustava. Modalna analiza prikazuje polove sustava. Oni polovi koji se nalaze s lijeve strane s-ravnine su stabilni, oni koji se nalaze na imaginarnoj osi su na granici stabilnosti, dok su u desnom dijelu s-ravnine smješteni nestabilni polovi. Slika 7.18 prikazuje dijagram svojstvenih vrijednosti prije dodavanja vjetroelektrane u sutav, slika 7.19 nakon dodavanja vjetroelektrane snage 680 MW, a slika 7.20 nakon dodavanja vjetroelektrane snage 1 200 MW.



Slika 7.18 Dijagram svojstvenih vrijednosti prije dodavanja vjetroelektrane



Slika 7.19 Dijagram svojstvenih vrijednosti nakon dodavanja vjetroelektrane snage 680 MW



Slika 7.20 Dijagram svojstvenih vrijednosti nakon dodavanja vjetroelektrane snage 1 200 MW

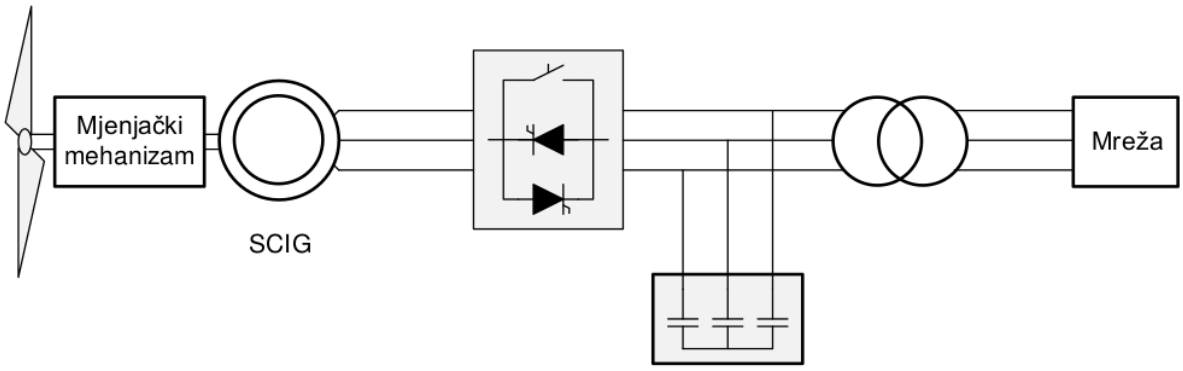
Kao i kod QV krivulja vidi se da u slučaju niske razine integracije vjetroelektrana nema velik utjecaj na svojstvene vrijednosti. Za više razine integracije utjecaj je veći, ali ovaj sustav ni prije dodavanja vjetroelektrane, niti nakon dodavanja nije imao nestabilne polove.

7.3 Analiza kratkih spojeva

Analiza kratkog spoja je uz analizu tokova snaga najčešće korištena metoda proračuna električnih mreža. Važna je i za planiranje sustava i tijekom rada sustava. Kod pojave kratkog spoja različiti tipovi elektrana će imati različit doprinos struji kvara. Postoje različite podjele vrsta vjetroelektrana, primjerice prema vrsti generatora, načinu spoja na mrežu, ili kontroli brzine vrtnje, no većina autora koristi podjelu prema prema vrsti korištenog generatora, te razlikuju četiri dominantne konfiguracije vjetroelektrana:

Tip A - Kavezni asinkroni generator

Prve vjetroelektrane u primjeni su koristile turbine konstantne brzine s kaveznim asinkronim generatorima. Asinkroni generatori proizvode električnu energiju pri brzinama većim od sinkrone, dakle kada je klizanje negativno. Uobičajeno klizanje pri radu asinkronih generatora je između 0% i -1%. Treba napomenuti da vjetroelektrane tipa A mogu imati velik doprinos struji kvara. Prema [6], doprinos može biti čak 6 puta veći od nazivne struje, te se za vrijeme trajanja kvara smanjuje s vremenom. Slika 7.21 Prikazuje principijelnu shemu vjetroelektrane tipa A.

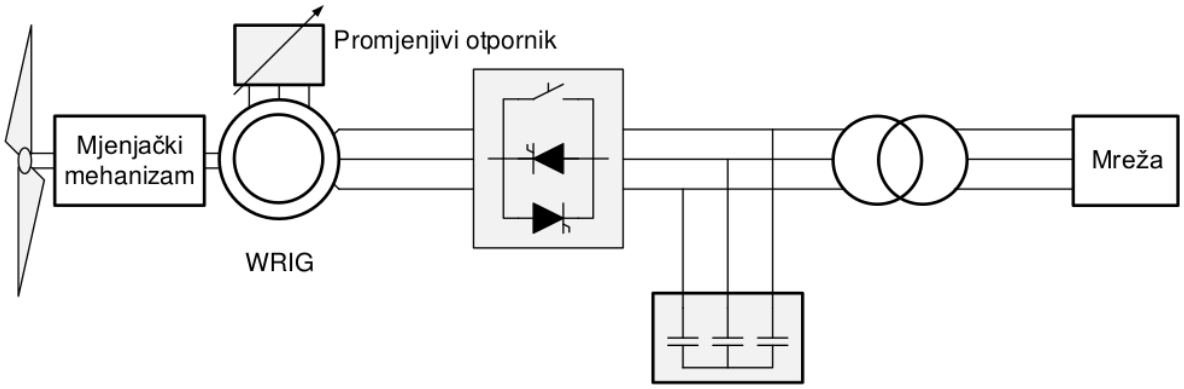


Slika 7.21 Principijelna shema vjetroelektrane tipa A [7]

Tip B - Klizno kolutni asinkroni generator sa promjenjivim otporom rotorskog kruga

Može raditi u većem rasponu brzina od tipa A. Kod ovog tipa je trofazni namot rotora spojen preko elektroničkih energetskih pretvarača na vanjski otpor. Koristi se vrlo brzi kontroler (eng. ERRC - external rotor-resistance controller) za regulaciju otpora rotora, čime je moguće

prilagoditi momentnu karakteristiku stroja i (ograničeno) povećati raspon dozvoljenog klizanja [8]. Za razliku od tipa A kod kojeg je klizanje pri normalnom radu između 0% i -1%, kod vjetroelektrane tipa B klizanje može ići do -10%, no primjenjuje se i aktivna kontrola kuta zakreta lopatica rotora (eng. active pitch control), kako bi klizanje ostalo što bliže nazivnoj vrijednosti. Njihov doprinos struji kvara je sličan kao kod vjetroelektrana tipa A, ali se može smanjiti povećavanjem vanjskog otpora u rotorskom krugu [6]. Slika 7.22 Prikazuje principijelnu shemu vjetroelektrane tipa B.

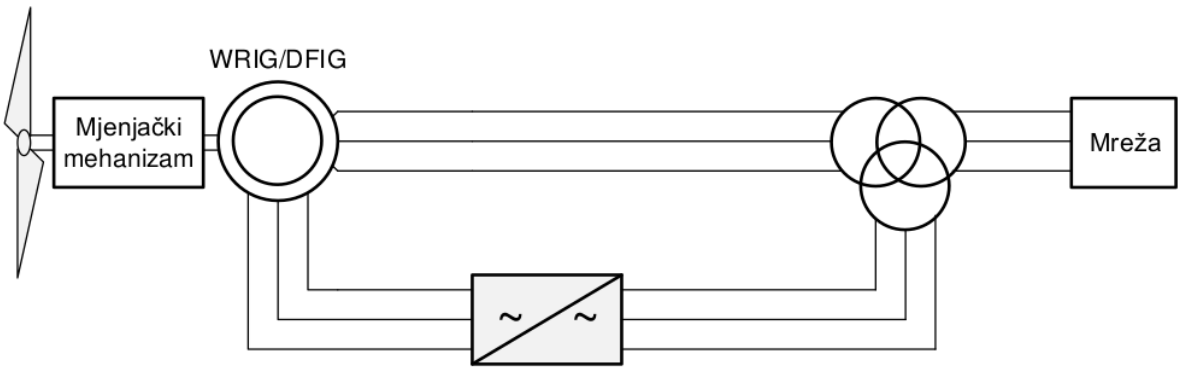


Slika 7.22 Principijelna shema vjetroelektrane tipa B [7]

Tip C - Dvostrano napajani asinkroni generator

Tip C zbog korištenja dvostrano napajanog asinkronog generatora ne zahtjeva fiksnu brzinu vrtnje. Ovakva izvedba povećava raspon dopuštenih brzina za približno 30% [8]. Zato se kod njih ne moraju koristiti elektronički energetski pretvarači dimenzionirani za nazivnu snagu stroja, nego za približno trećinu nazivne snage [6]. Maksimalnu proizvodnju imaju pri niskim i umjerenim brzinama vjetra, dok se kod velikih brzina primjenjuje pitch regulacija brzine kako bi se smanjilo mehaničko opterećenje. Slika 7.23 Prikazuje principijelnu shemu vjetroelektrane tipa C.

Korištenjem elektroničkih energetskih pretvarača radna i jalova snaga se mogu kontrolirati neovisno i trenutačno unutar granica za koje je pretvarač dizajniran. Elektronički energetski pretvarač također omogućuje da ovakvi generatori imaju sposobnost ne sudjelovanja u oscilacijama sustava nakon otklanjanja kvara. Doprinos struji kvara ne prelazi trostruku vrijednost nazivne struje. [6]

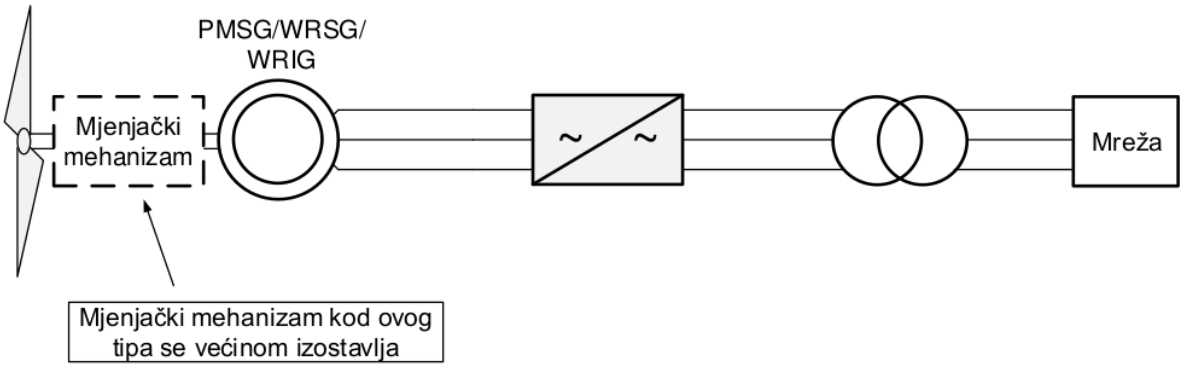


Slika 7.23 Principijelna shema vjetroelektrane tipa C [7]

Tip D - Vjetroelektrane sa potpunim priključkom pomoću elektroničkih energetskih pretvarača (eng. Full Converter Interface)

Kod ovog tipa vjetroelektrana se koriste i asinkroni generatori i sinkroni generatori (sa namotanim rotorom ili permanentnim magnetom). Imaju velike prednosti u usporedbi s otalim tipovima jer se radna i jalova snaga koju daje vjetroelektrana može u potpunosti regulirati preko elektroničkih energetskih pretvarača, te imaju najveći raspon dozvoljenje brzine, no mana je velika cijena elektroničkog energetskog pretvaraća budući da on mora biti dizajniran za nazivnu snagu vjetroelektrane. [8]

Doprinos struji kvara je također ograničen elektroničkim energetskim pretvaračem, prema [6], obično na 110% vrijednosti nazivne struje. Slika 7.24 Prikazuje principijelnu shemu vjetroelektrane tipa D.

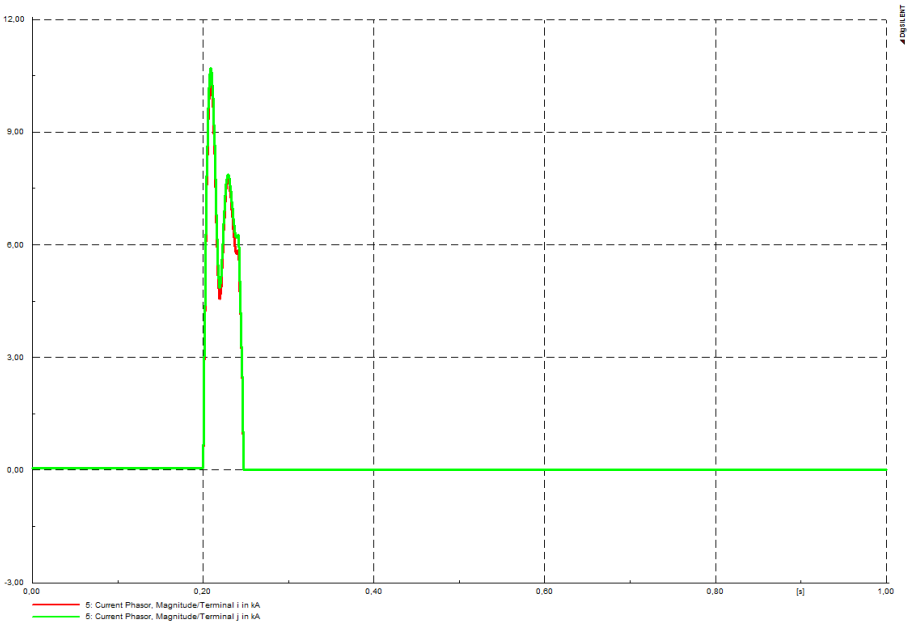


Slika 7.24 Principijelna shema vjetroelektrane tipa D [7]

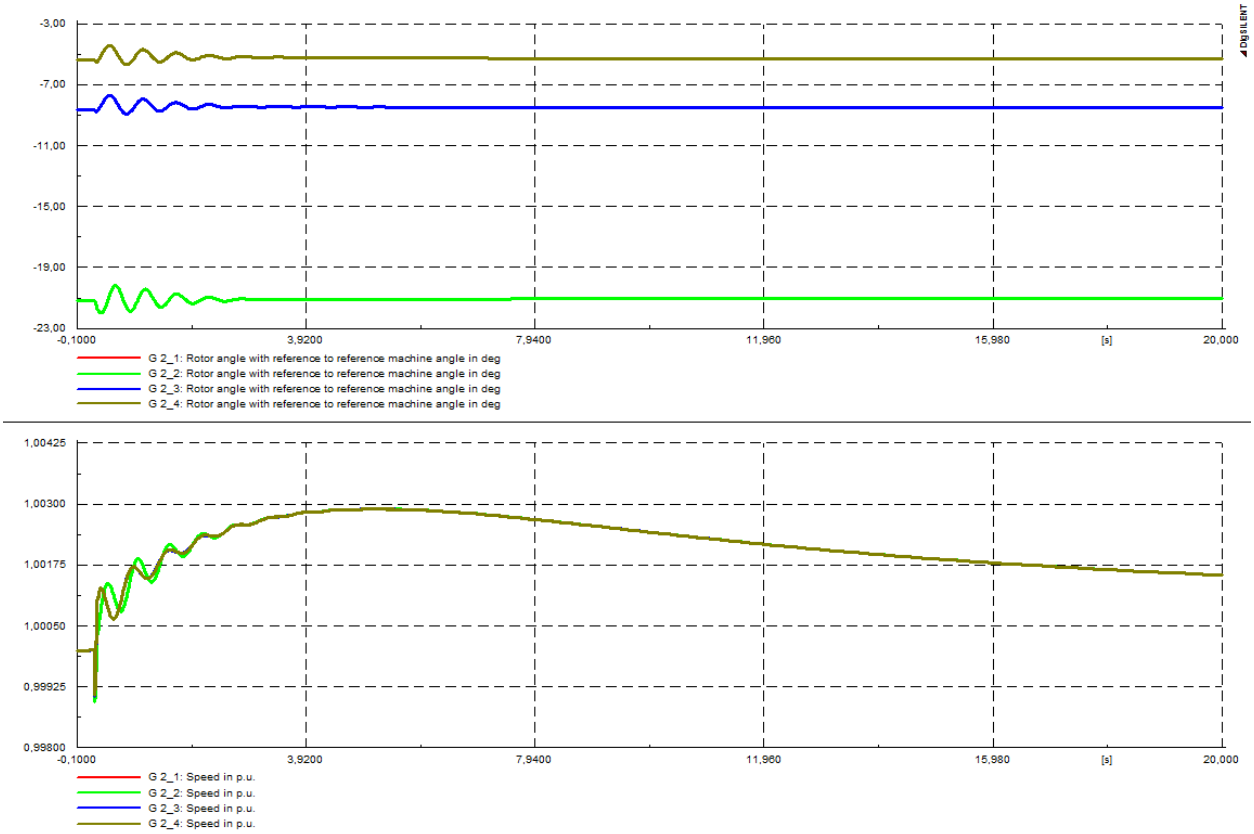
Budući da tip A i tip B imaju vrlo sličan doprinos struji kvara, simulacija je izvedena samo za tipove A, C i D. Kratki spoj se događa na jednom od dva voda (vod 5 i vod 10) spojena na sabirnicu na koju je priključena vjetroelektrana (sabirnica 6). U svim modeliranim slučajevima je postavljen kratki spoj impedancije 0 Ω i trajanja 40 ms. Kratki spoj se pojavi u trenutku t=200 ms, na 50% duljine voda, a u trenutku t=240 ms dođe do isključenja voda. Snimljeni su dijagrami koji prikazuju struju na vodu koji je pogođen trofaznim kratkim spojem, te promjene kuta rotora i brzine vrtnje generatora spojenih na sabirnice blizu mjesta kvara, sabirnice 2, 7 i 13.

7.3.1 Pojava kratkog spoja prije dodavanja vjetroelektrane u sustav

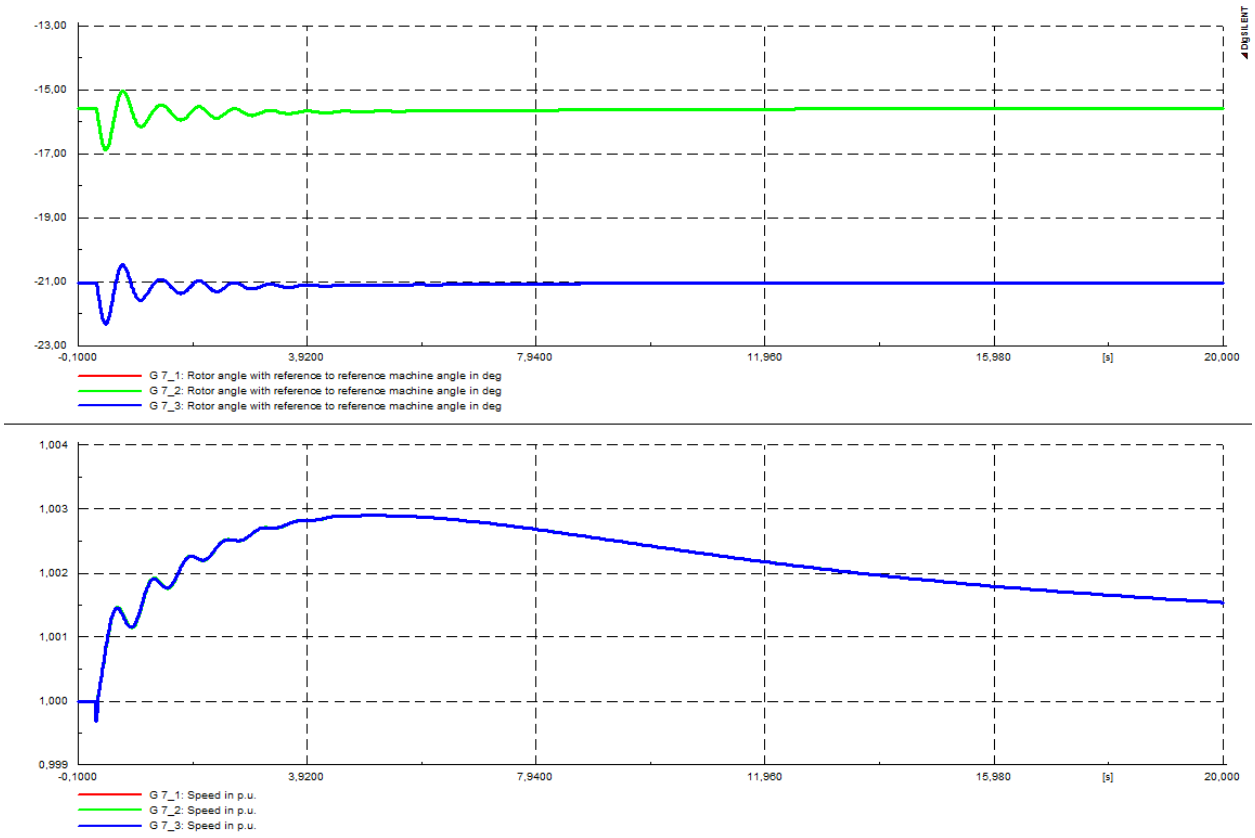
Kratki spoj na vodu 5 (od sabirnice 6 do sabirnice 2).



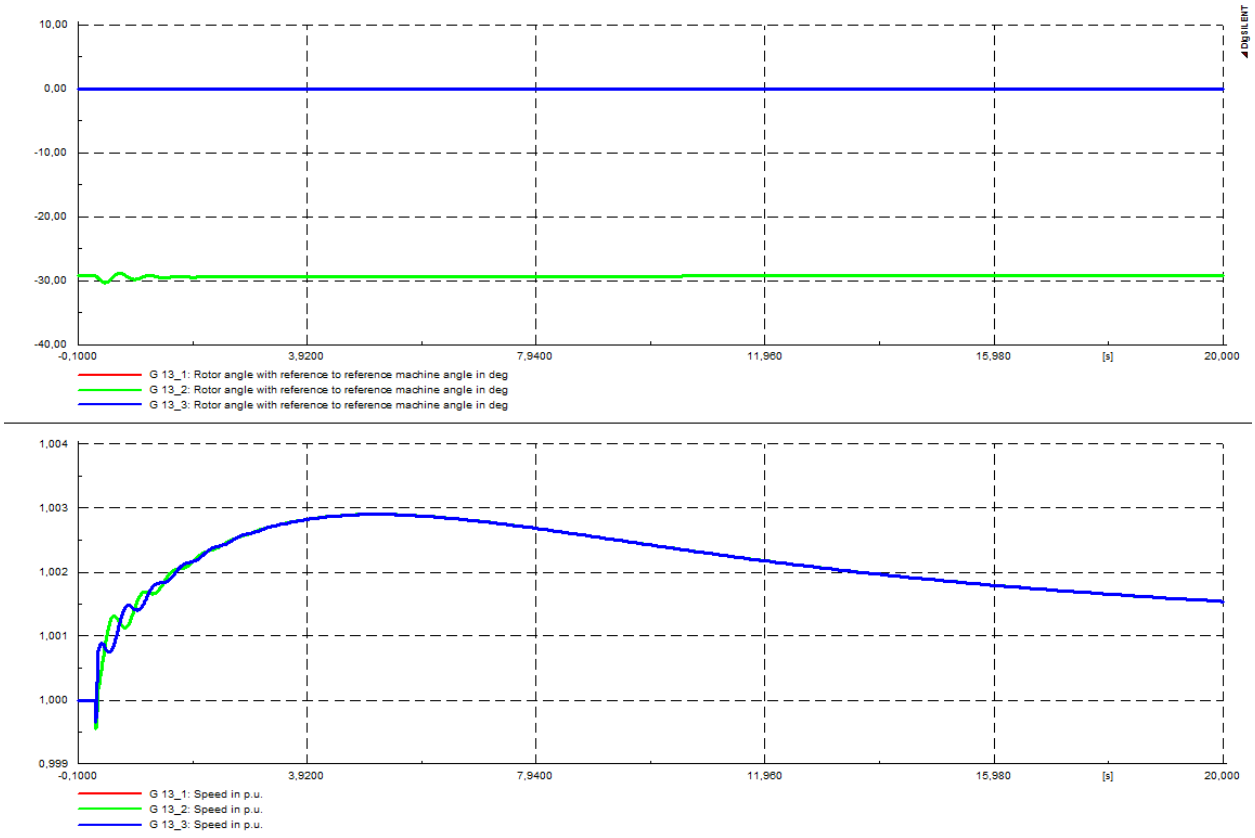
Sl. 7.25 Kratki spoj na vodu 5



Sl. 7.26 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2



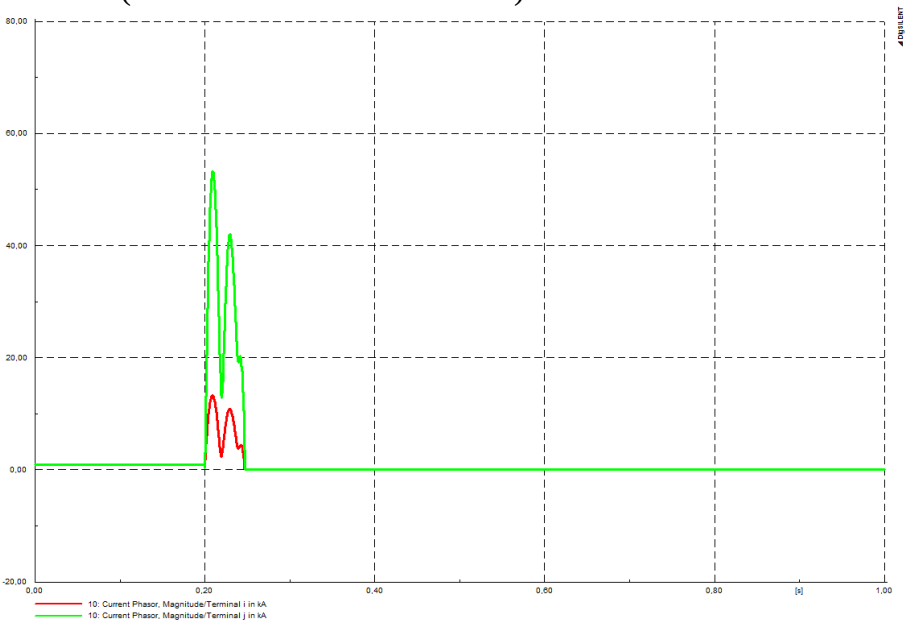
Sl. 7.27 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7



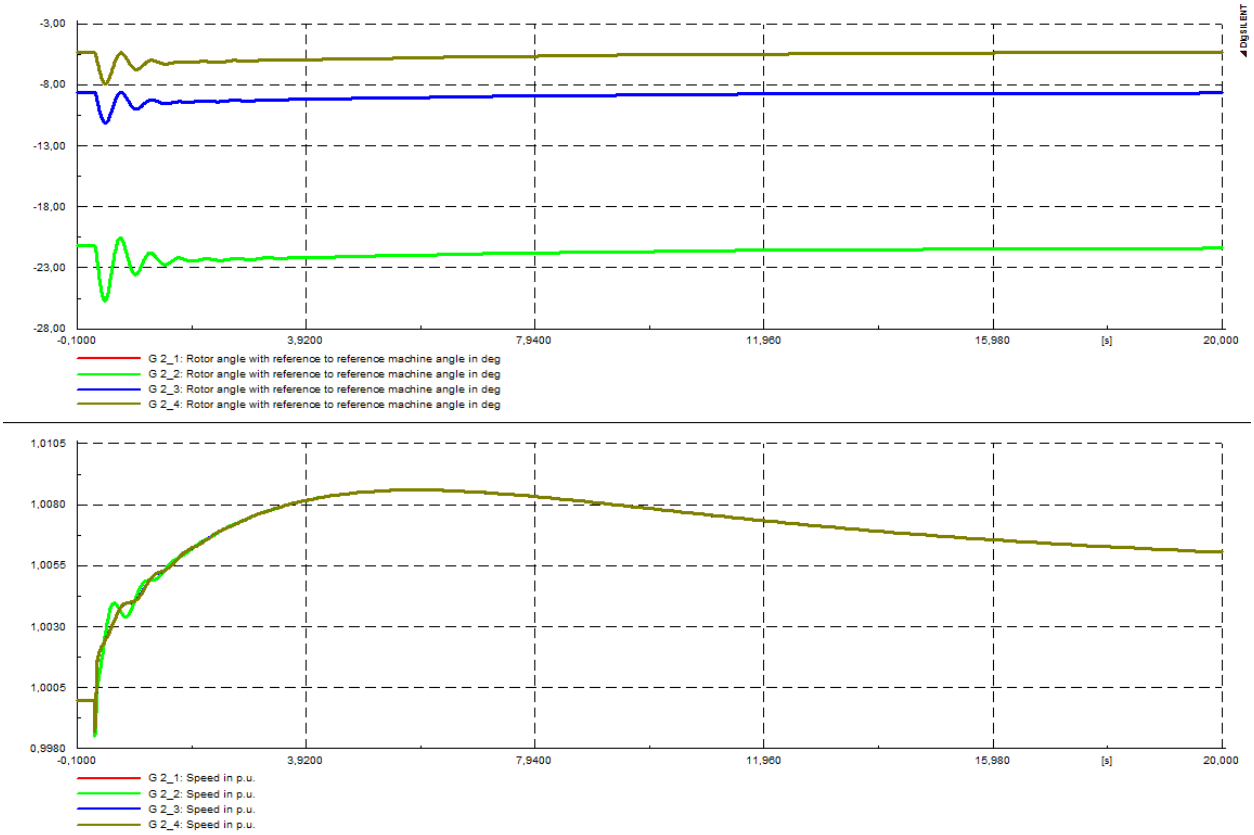
Sl. 7.28 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

Vidljivo je da se kod svih generatora brzina neznatno promjeni, manje od 0,003 p.u., a kutovi se vrate na početnu vrijednost nakon manje od 4 sekunde.

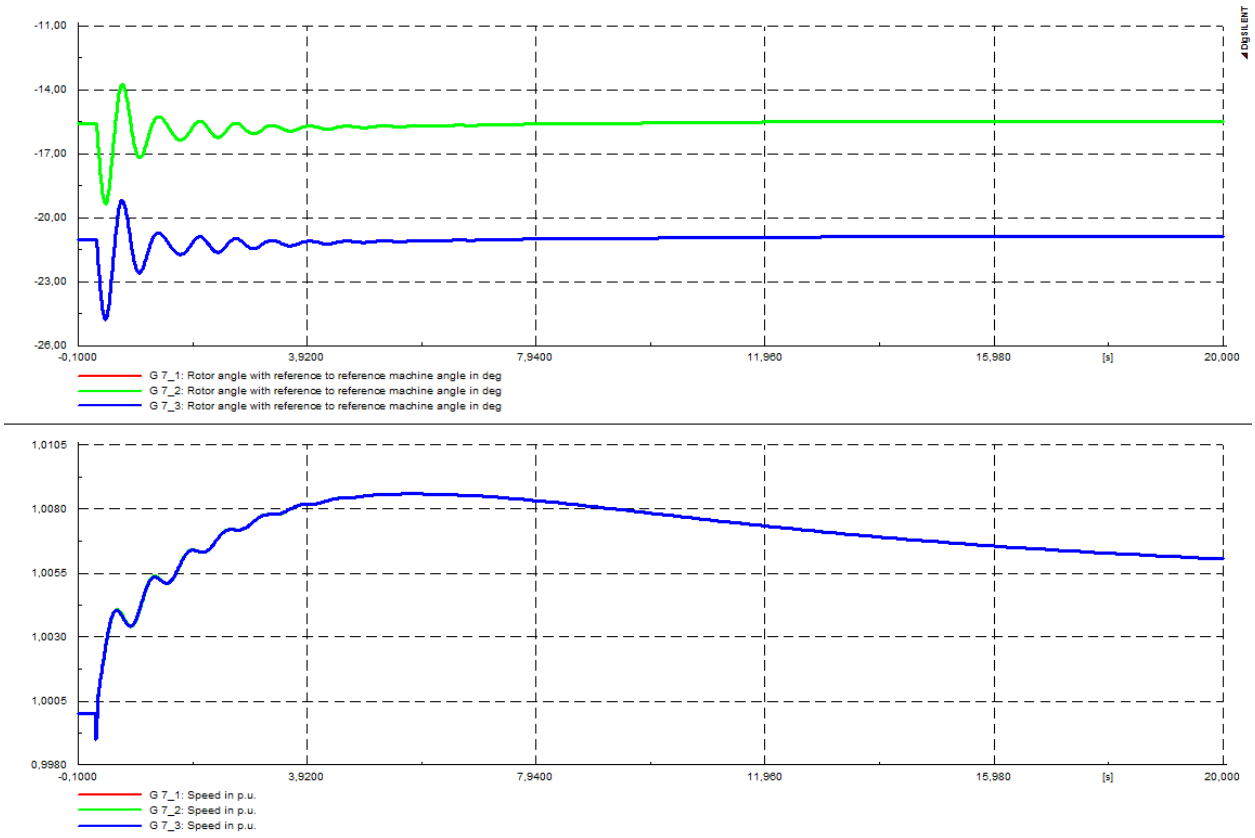
Kratki spoj na vodu 10 (od sabirnice 6 do sabirnice 10).



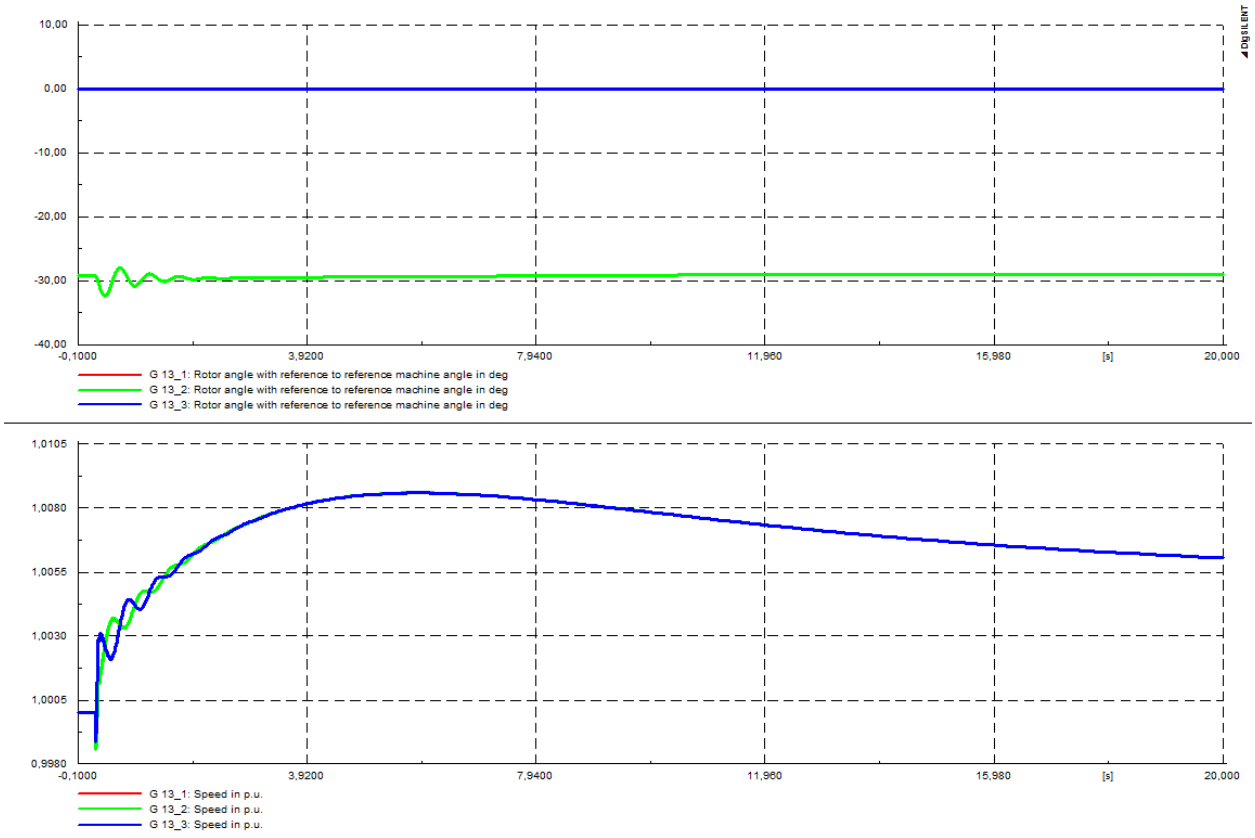
Sl. 7.29 Kratki spoj na vodu 10



Sl. 7.30 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2



Sl. 7.31 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7

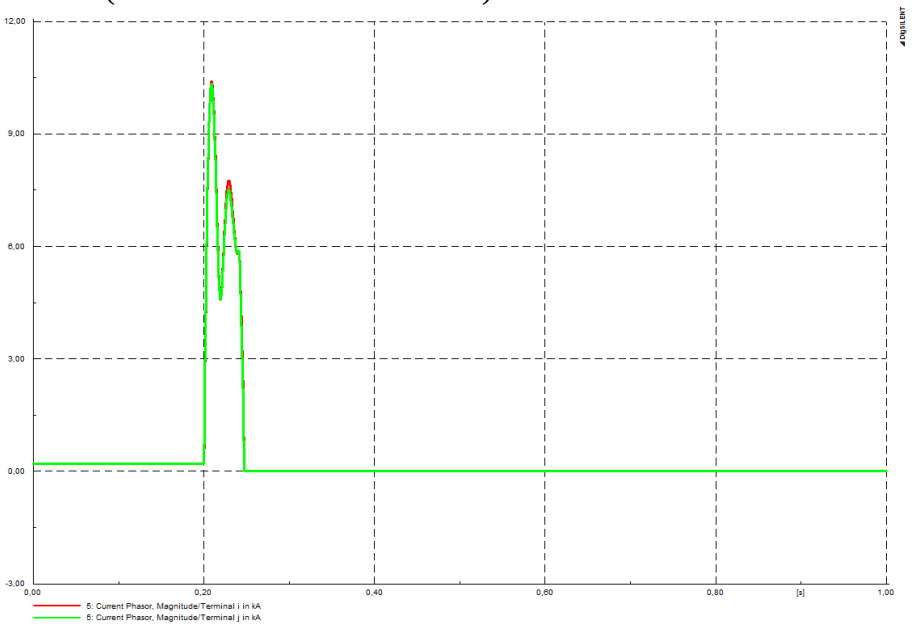


Sl. 7.32 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

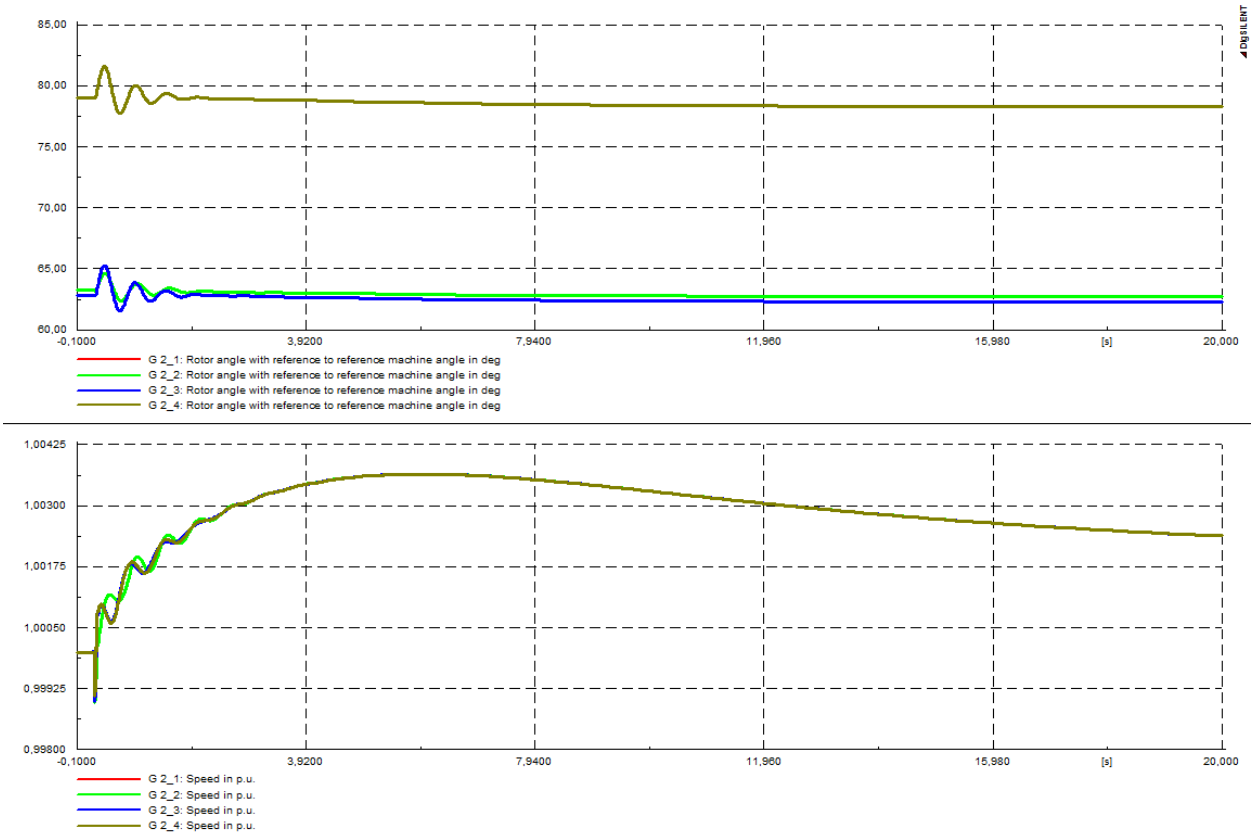
Kutovi se kao i u slučaju kratkog spoja na vodu 5 brzo stabiliziraju, a promjena brzine je nešto veća, ali i dalje zanemariva.

7.3.2 Pojava kratkog spoja nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav – tip A

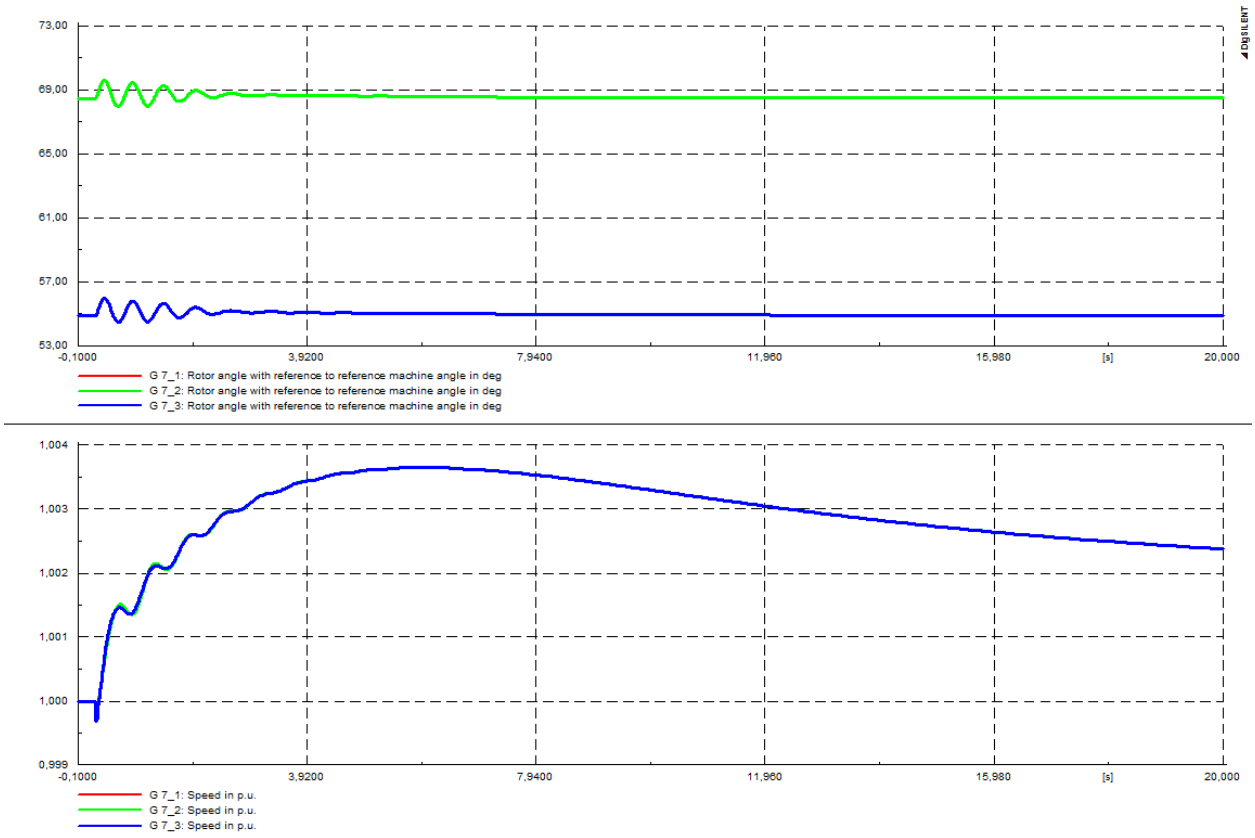
Kratki spoj na vodu 5 (od sabirnice 6 do sabirnice 2).



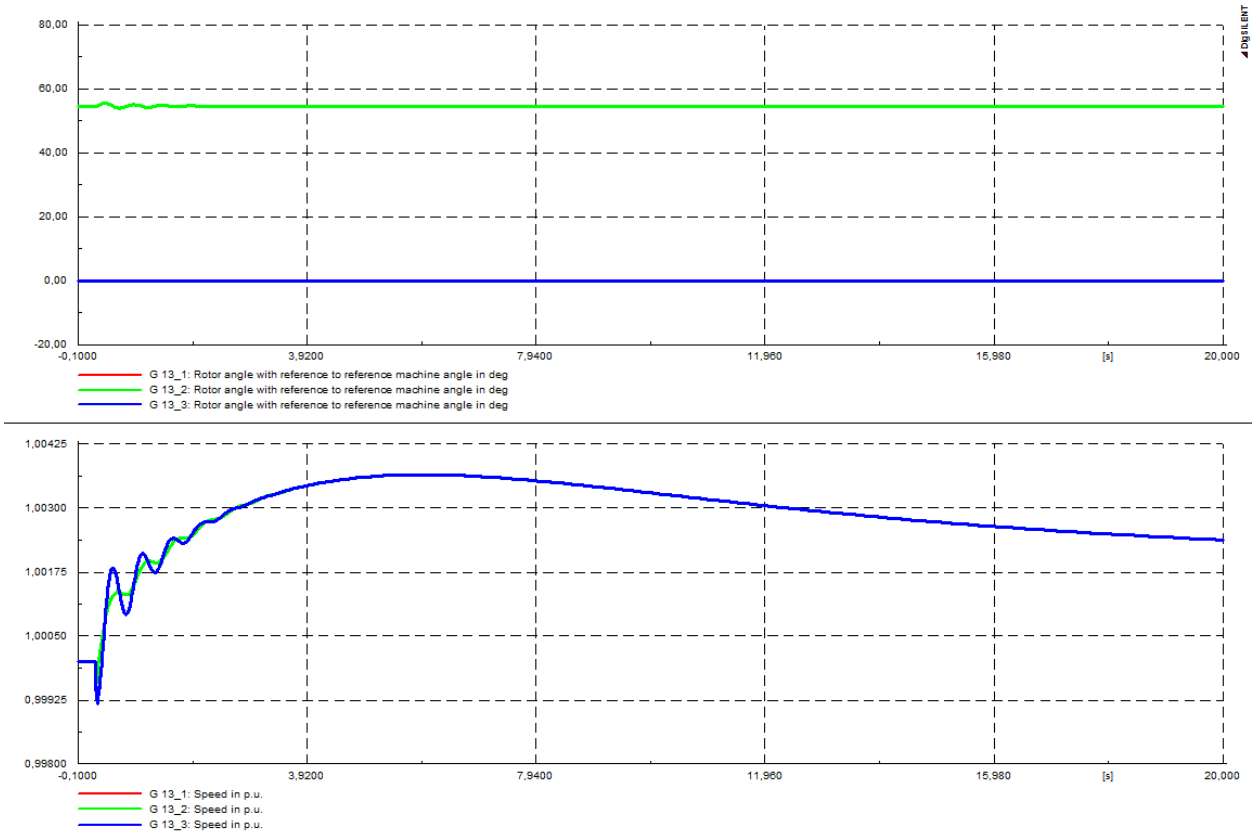
Sl. 7.33 Kratki spoj na vodu 5



Sl. 7.34 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2



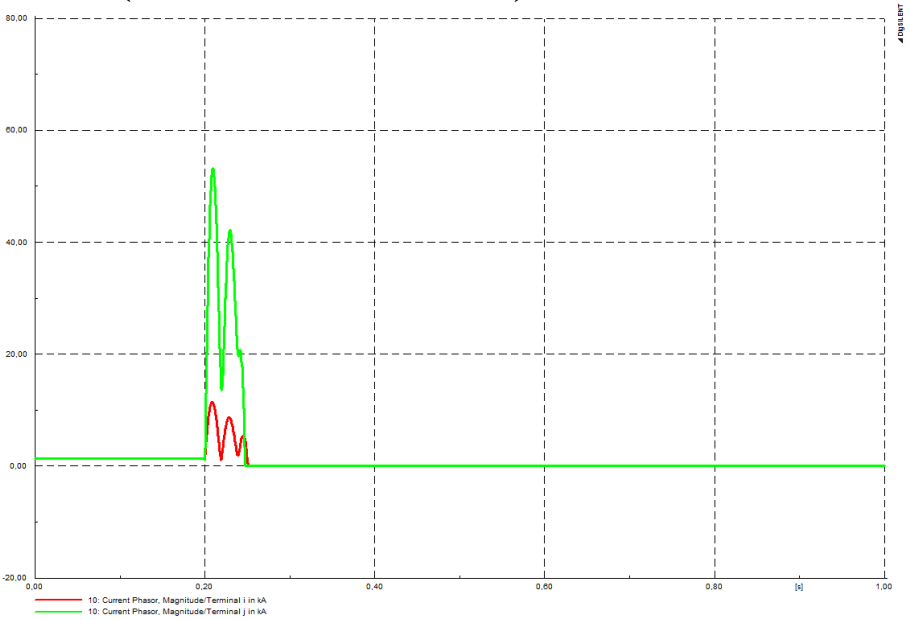
Sl. 7.35 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7



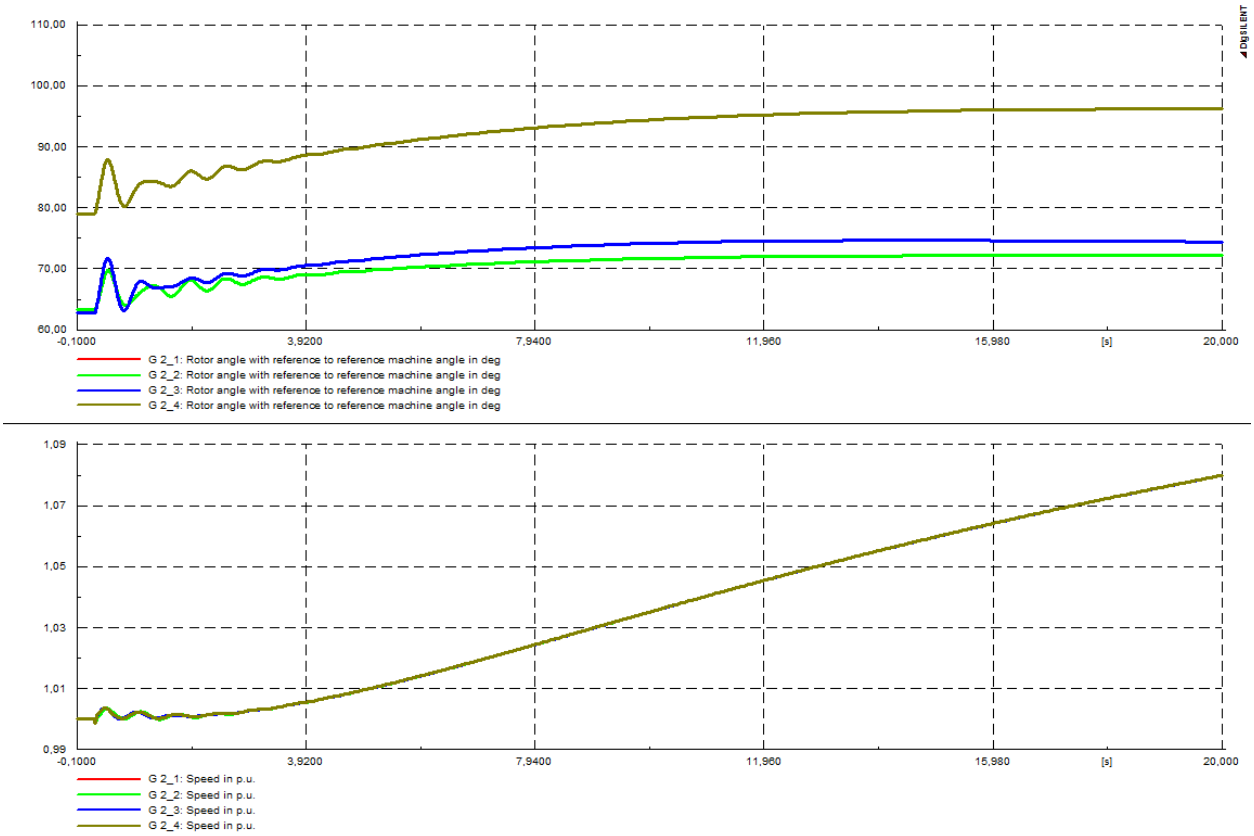
Sl. 7.36 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

Dodavanje vjetroelektrane nema značajan utjecaj na slučaj pojave kvara na vodu 5.

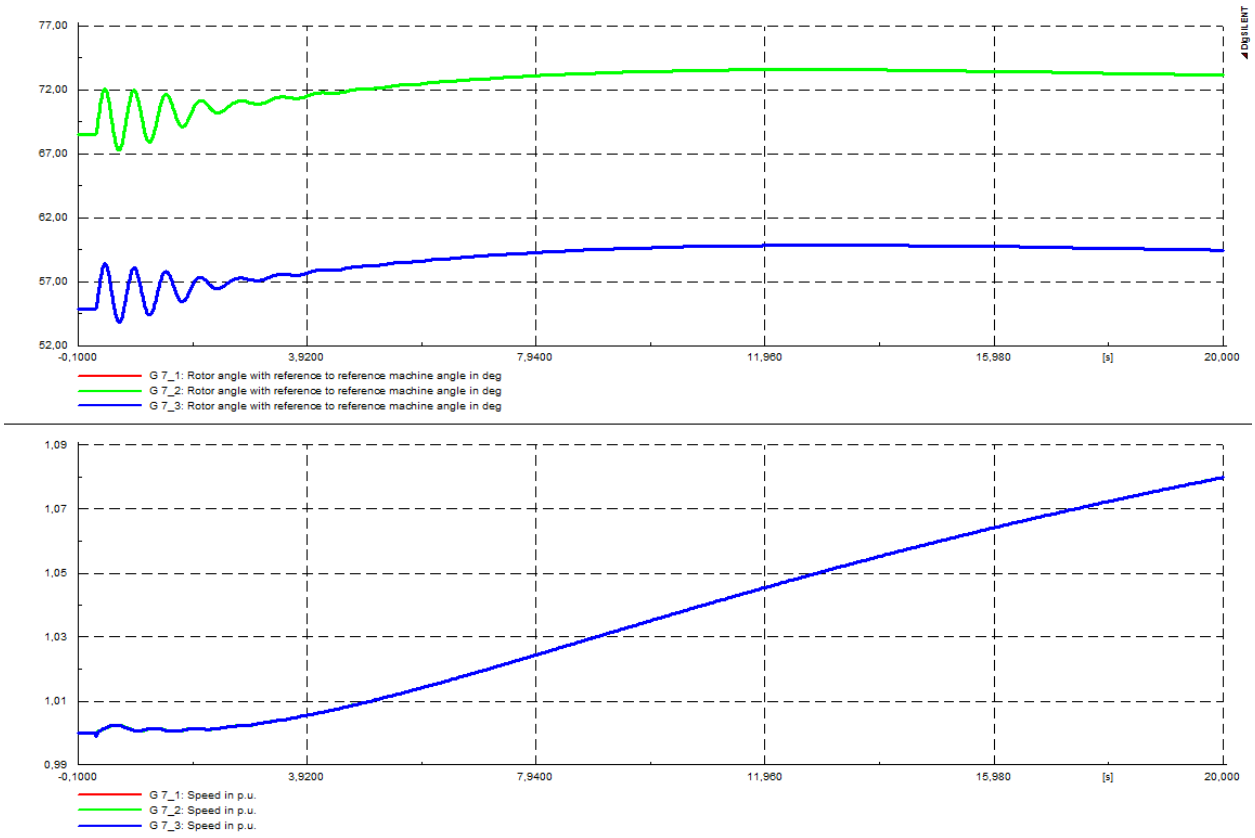
Kratki spoj na vodu 10 (od sabirnice 6 do sabirnice 10).



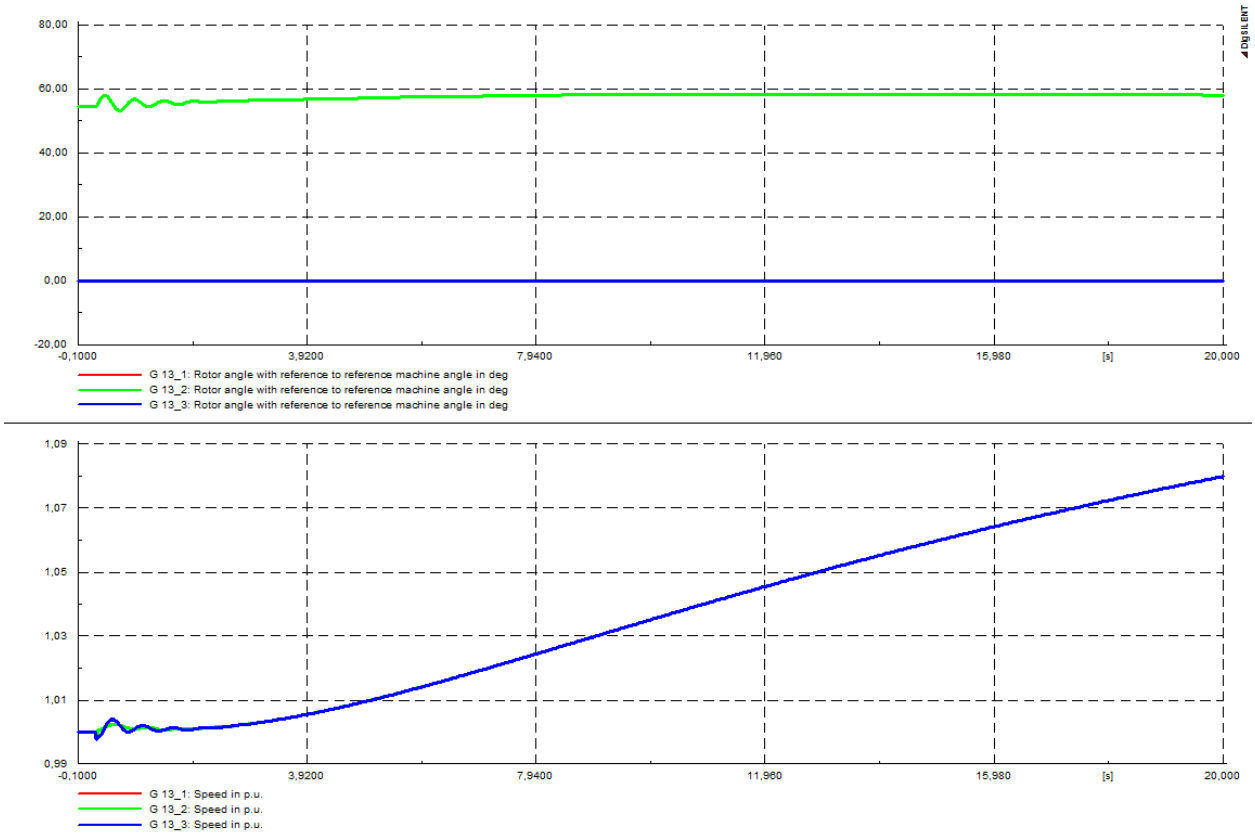
Sl. 7.37 Kratki spoj na vodu 10



Sl. 7.38 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2



Sl. 7.39 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7

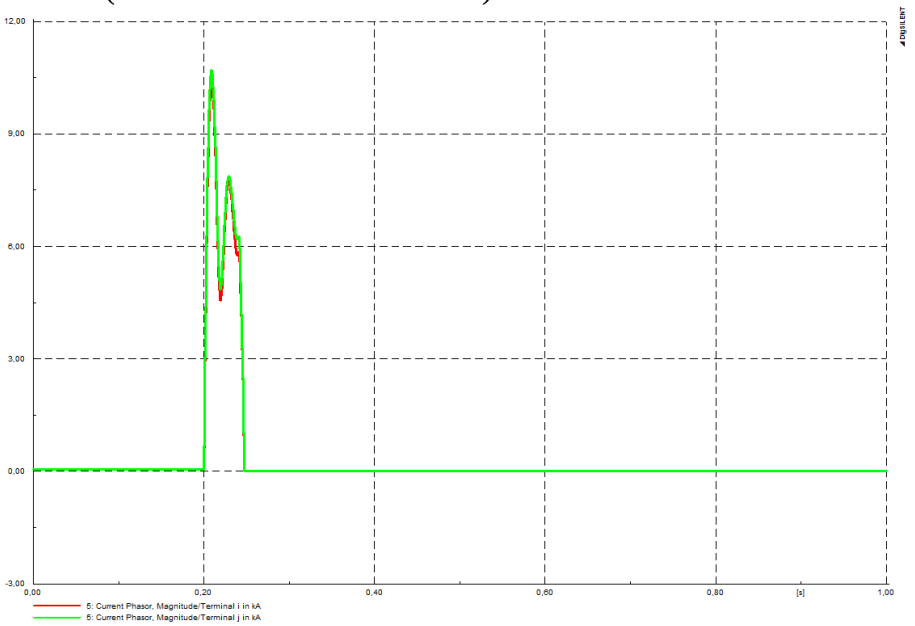


Sl. 7.40 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

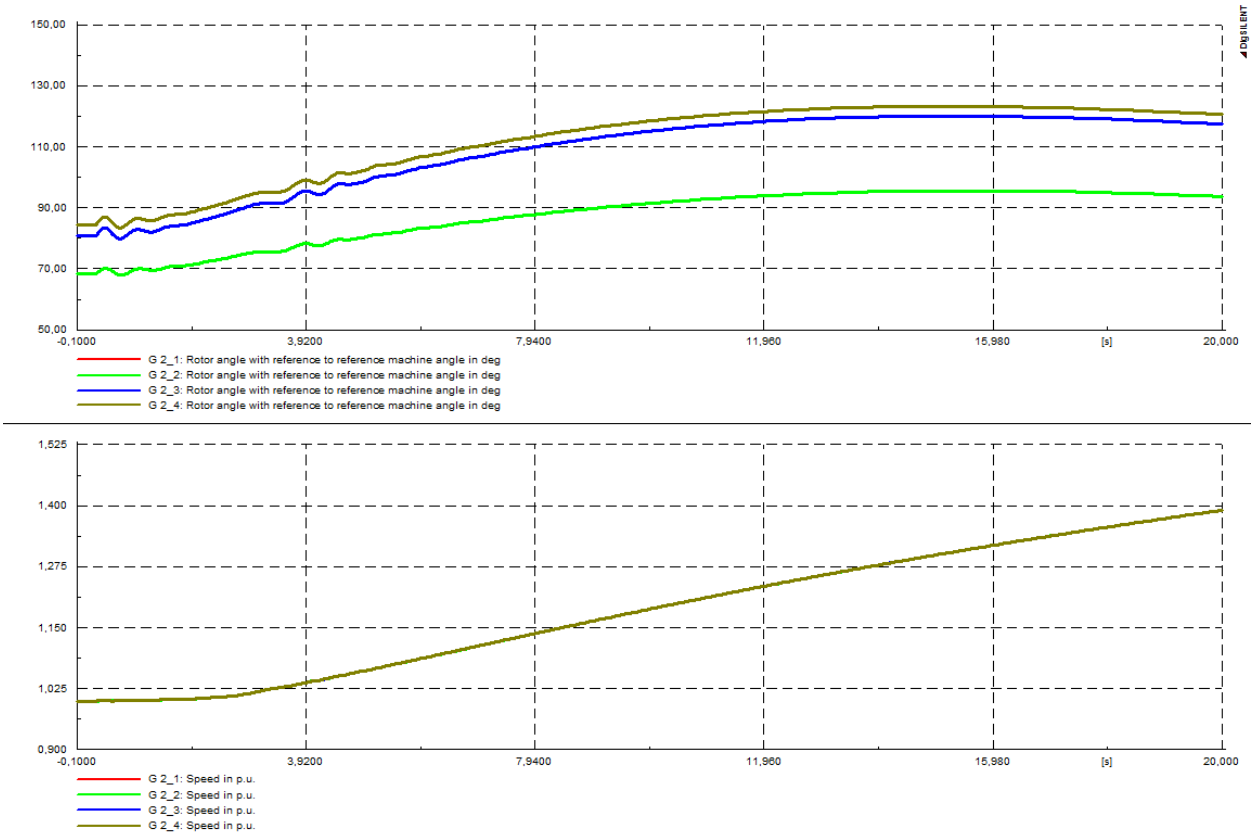
Iz dijagrama je vidljivo da kutovi rotora u ovom slučaju imaju veće oscilacije, i brzina vrtnje više poraste nego u prethodnim slučajevima, ali je sustav i dalje stabilan.

7.3.3 Pojava kratkog spoja nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav – tip C

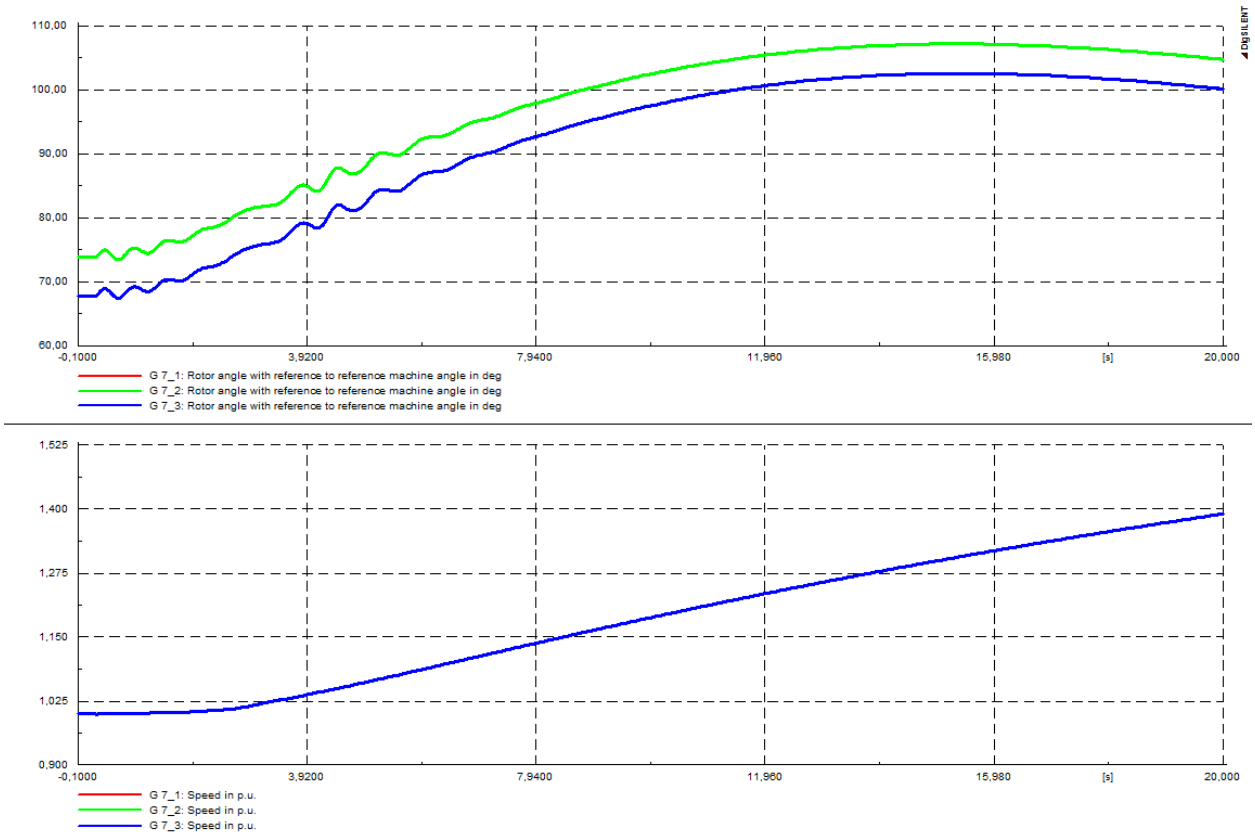
Kratki spoj na vodu 5 (od sabirnice 6 do sabirnice 2).



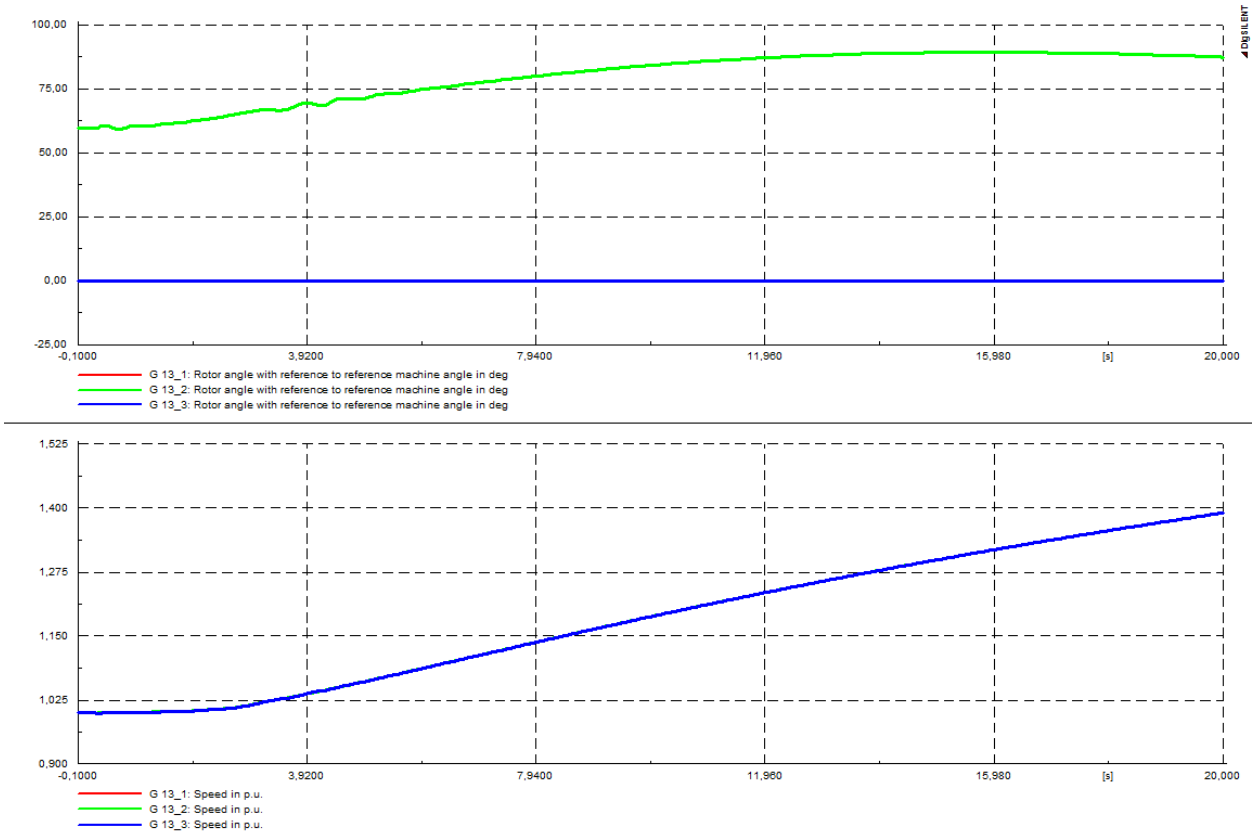
Sl. 7.41 Kratki spoj na vodu 5



Sl. 7.42 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2



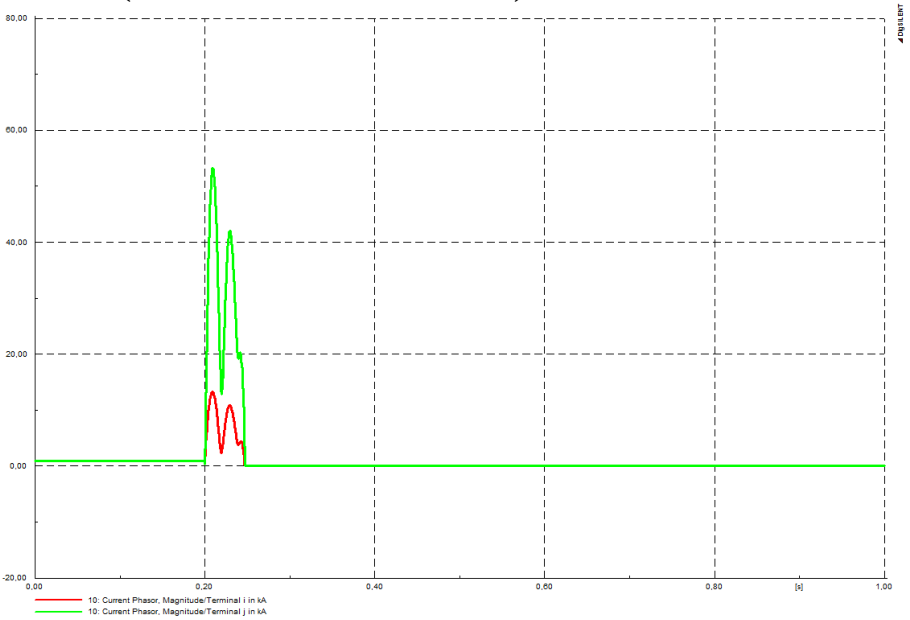
Sl. 7.43 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7



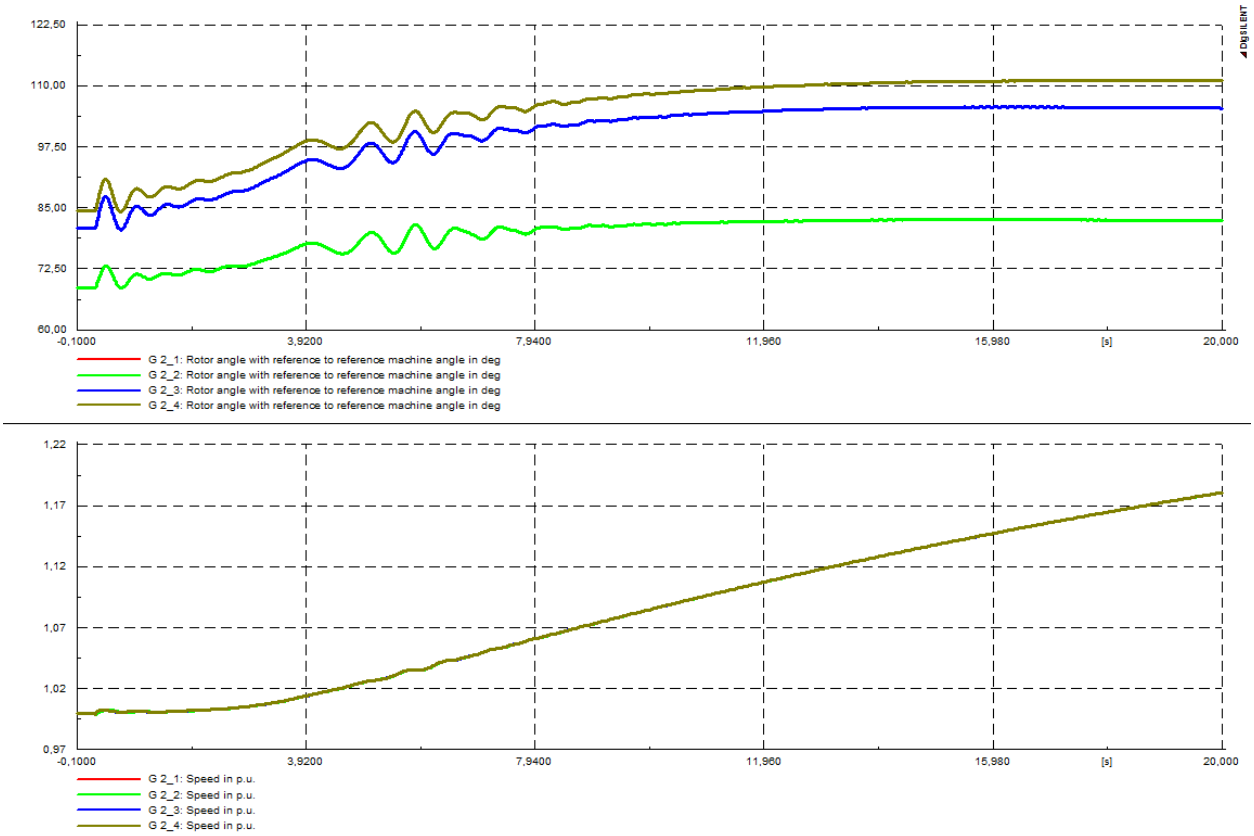
Sl. 7.44 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

Promjene brzina generatora su mnogo veće nego u prethodinim slučajevima.

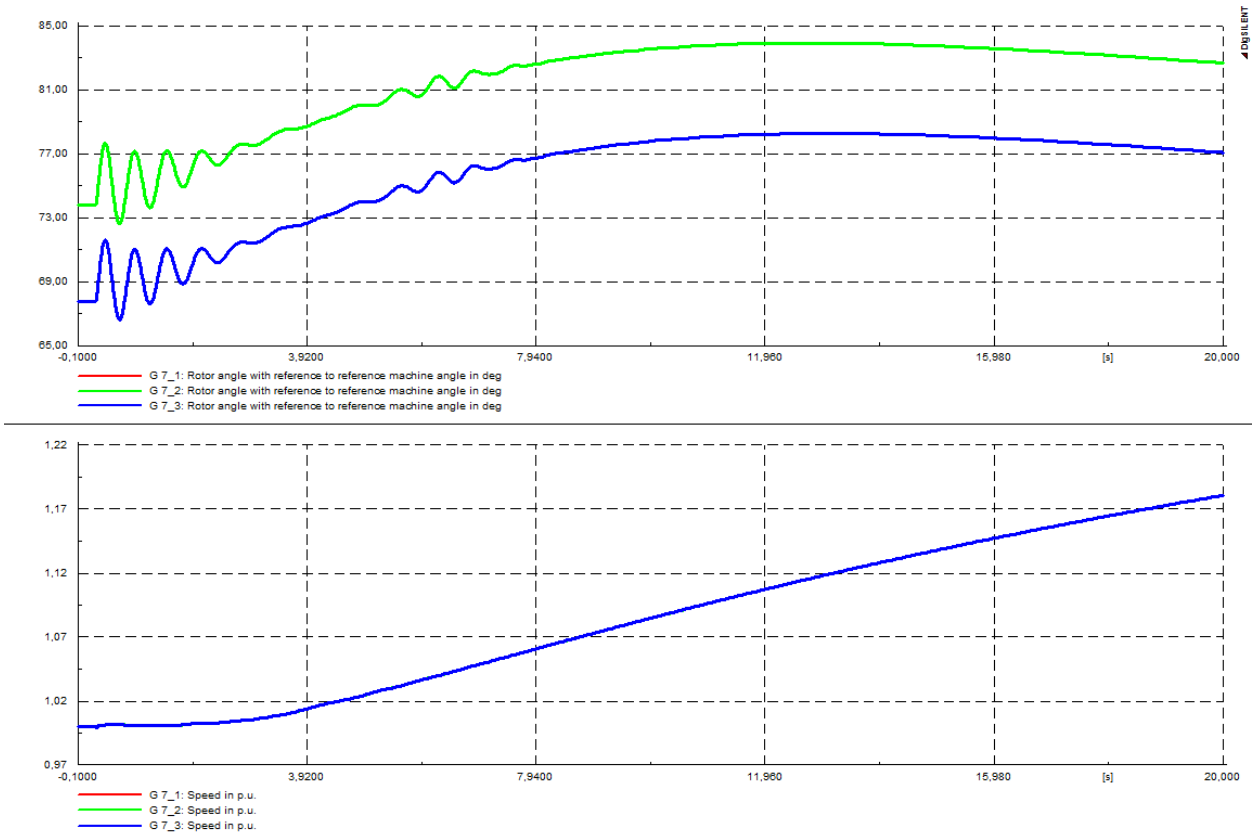
Kratki spoj na vodu 10 (od sabirnice 6 do sabirnice 10).



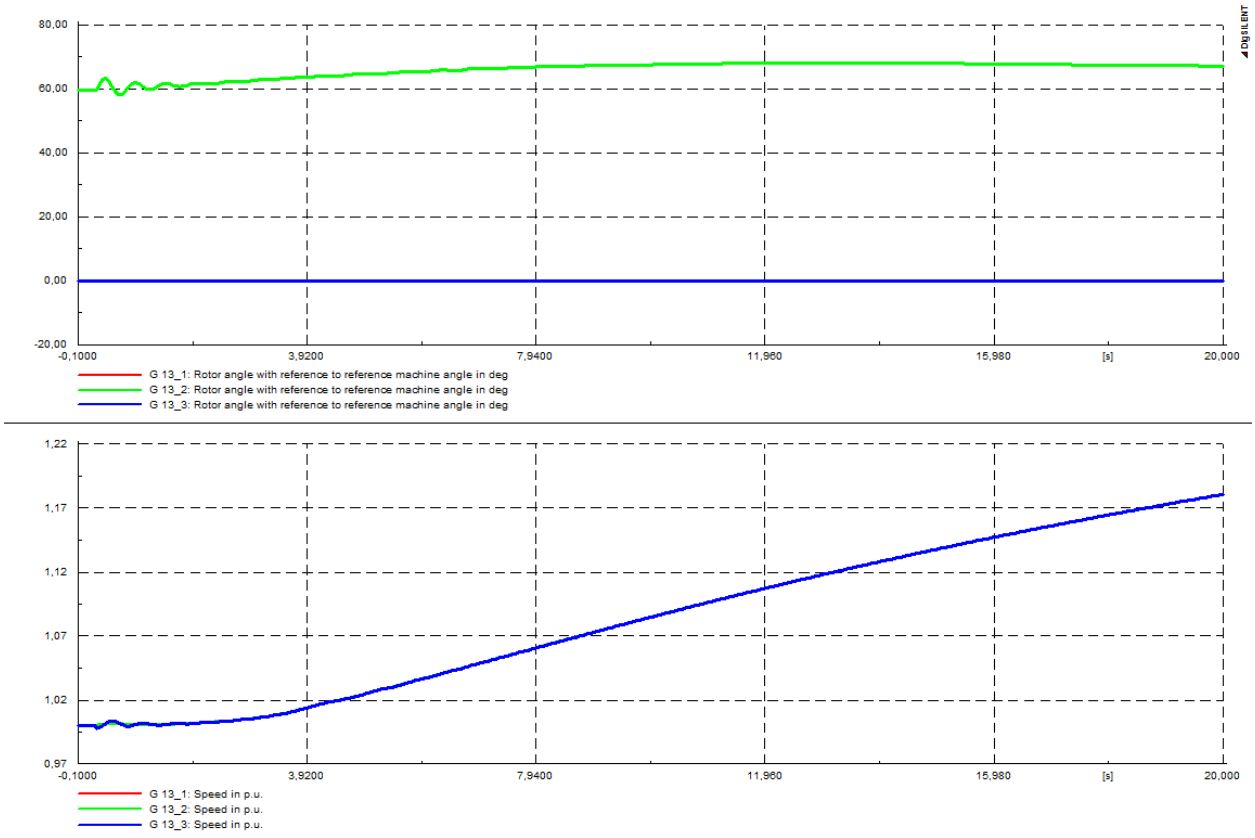
Sl. 7.45 Kratki spoj na vodu 10



Sl. 7.46 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2



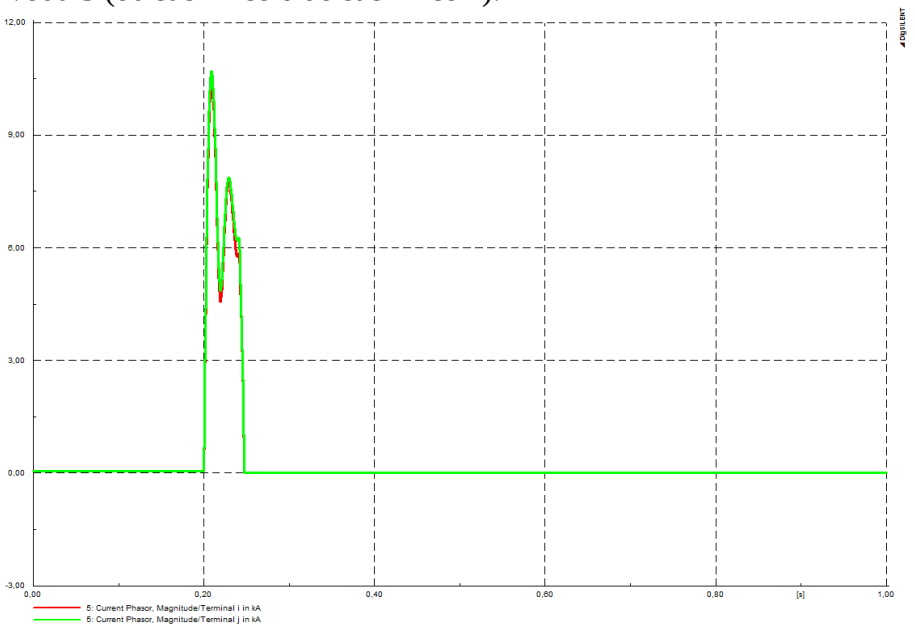
Sl. 7.47 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7



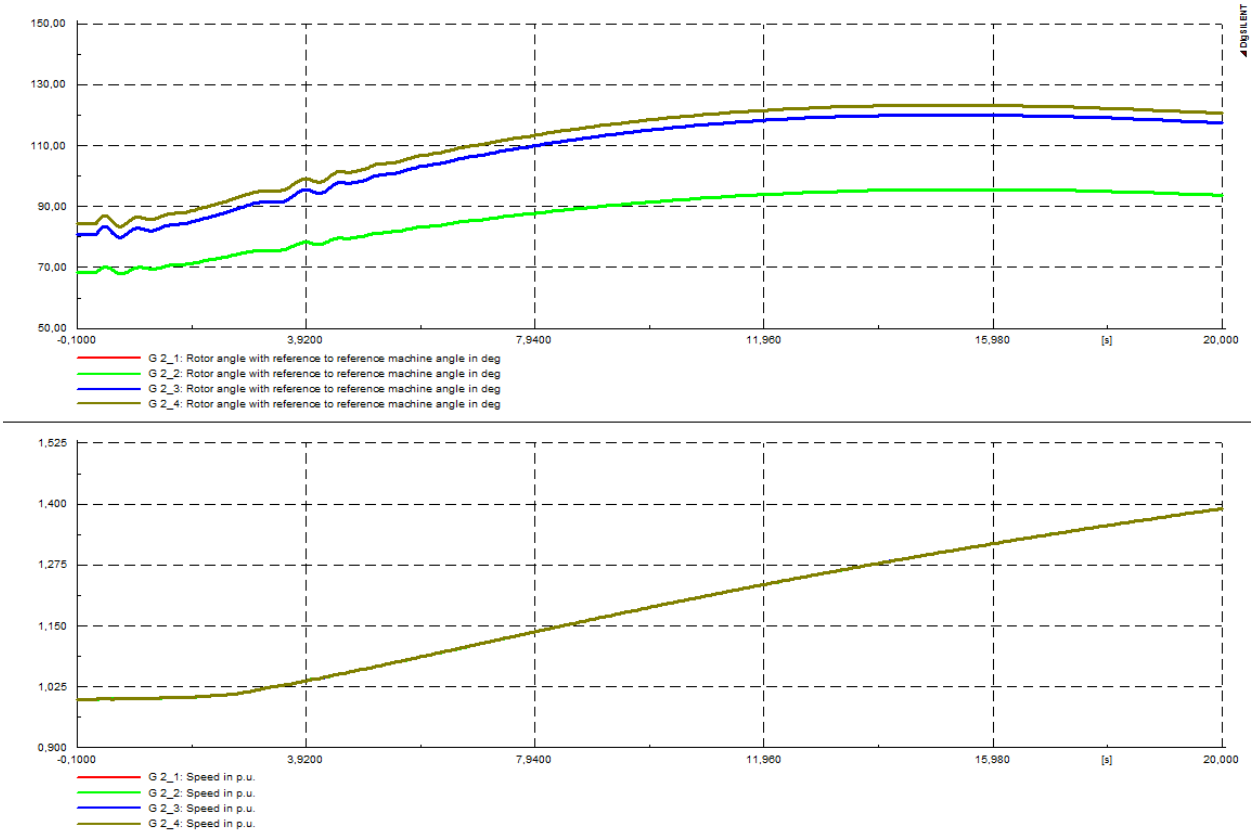
Sl. 7.48 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

7.3.4 Pojava kratkog spoja nakon dodavanja vjetroelektrane u sustav – tip D

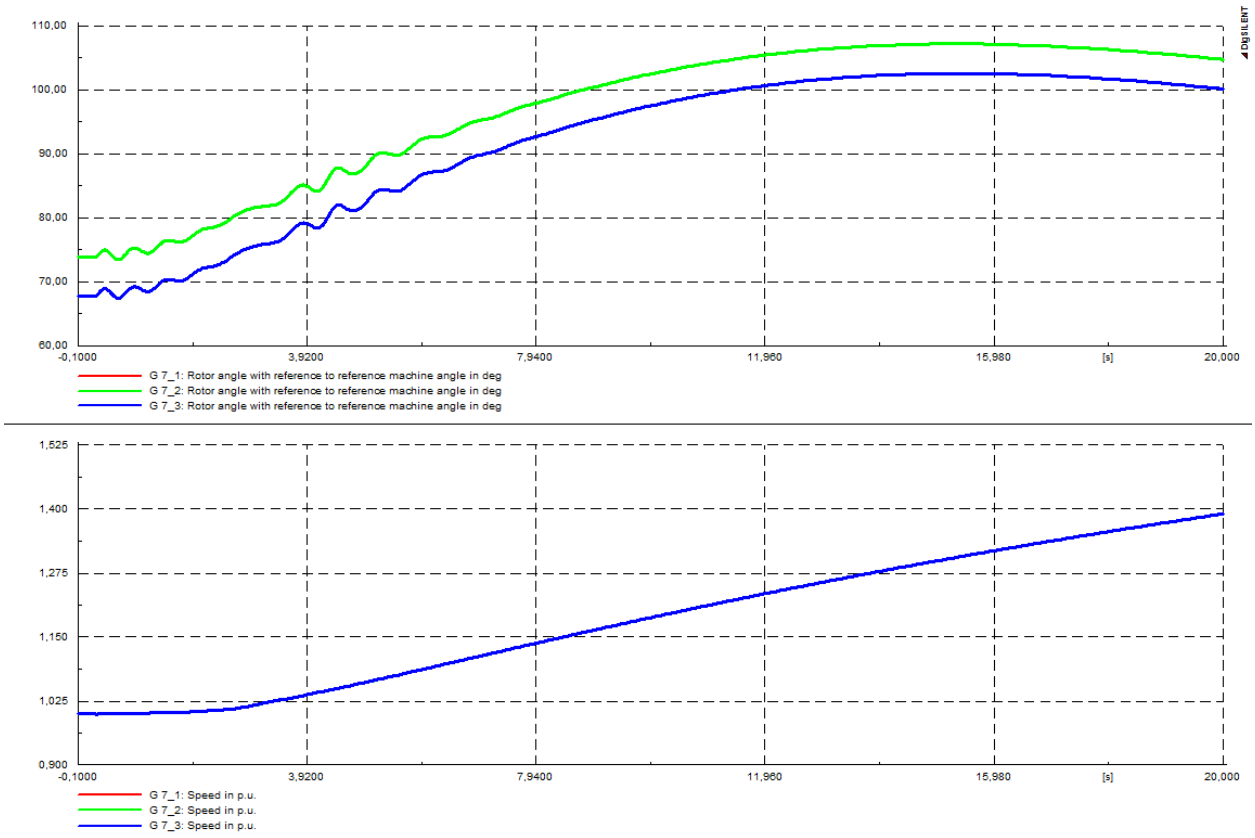
Kratki spoj na vodu 5 (od sabirnice 6 do sabirnice 2).



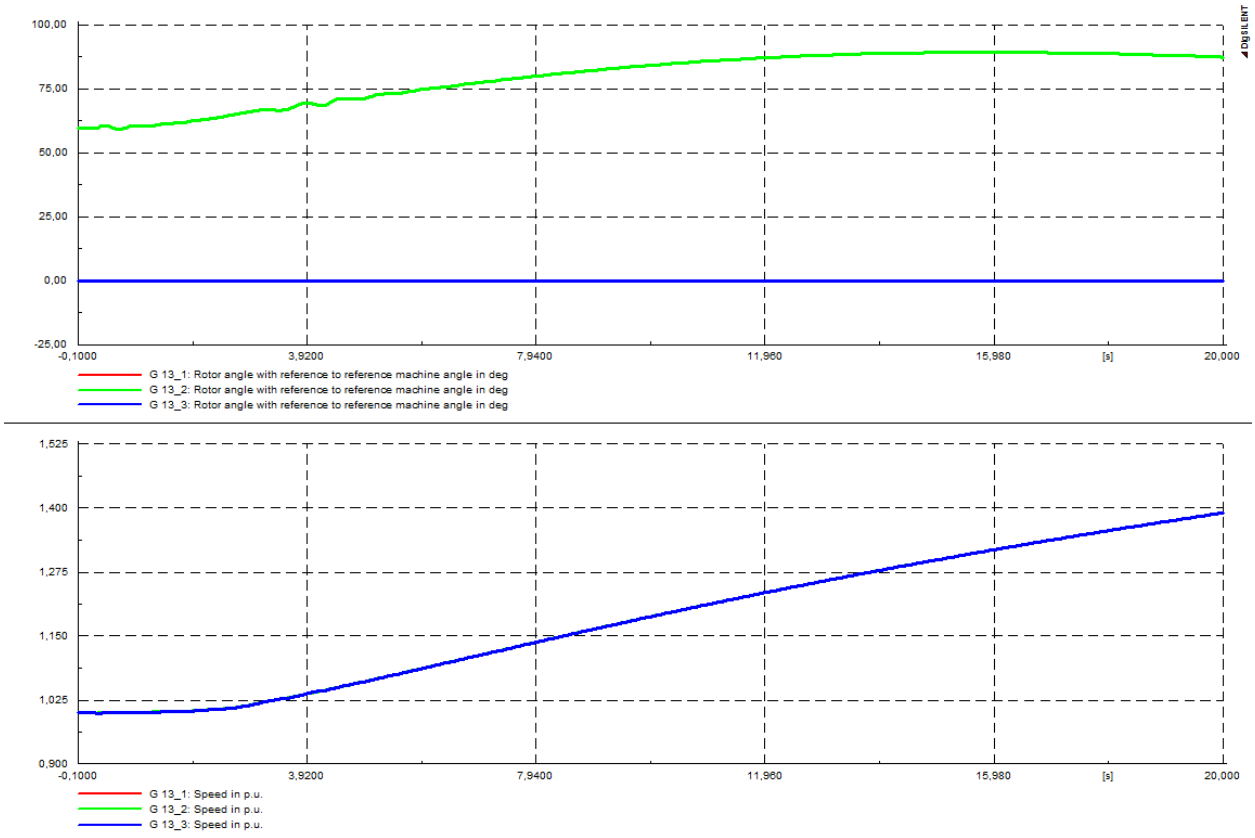
Sl. 7.49 Kratki spoj na vodu 5



Sl. 7.50 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2

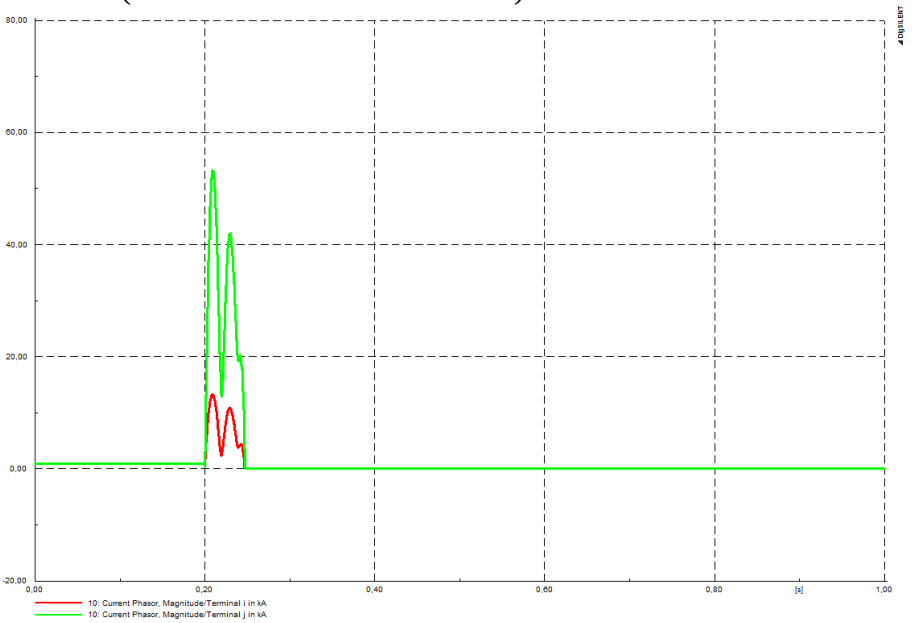


Sl. 7.51 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7

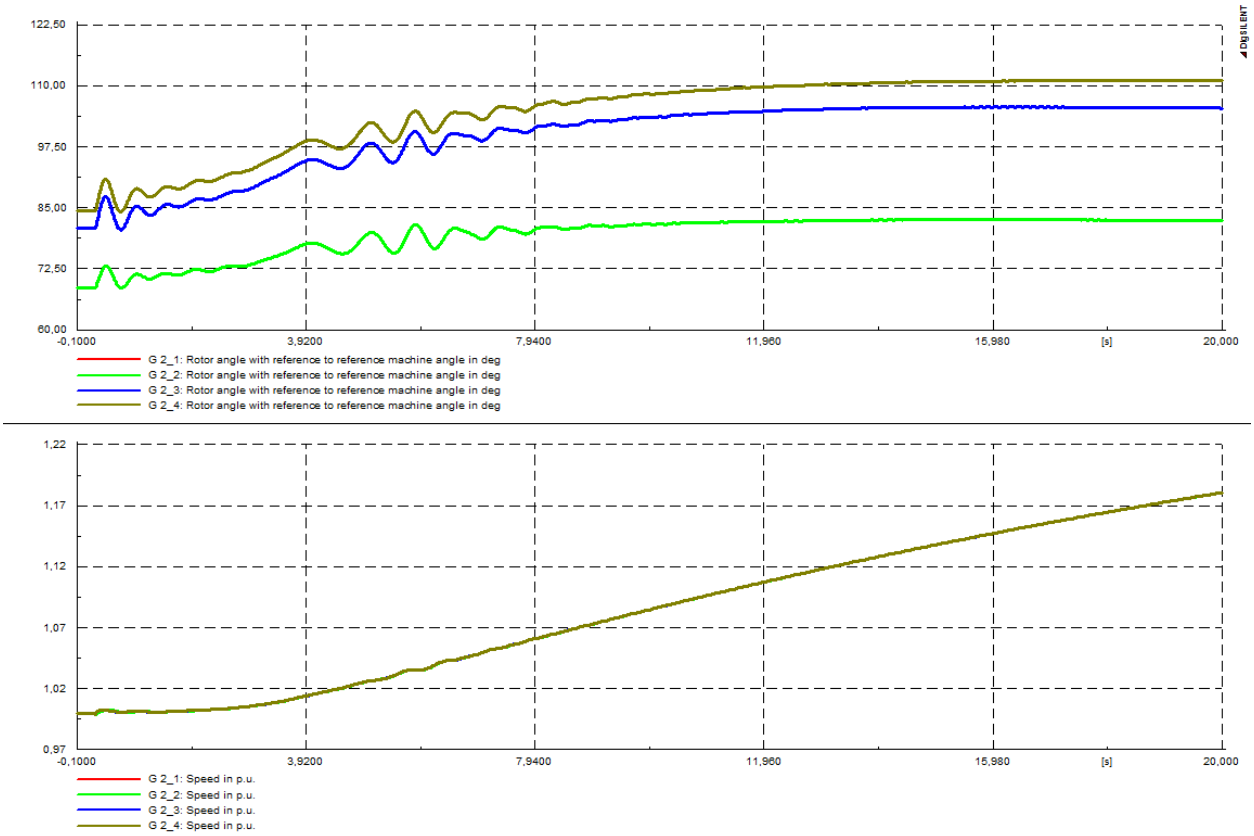


Sl. 7.52 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

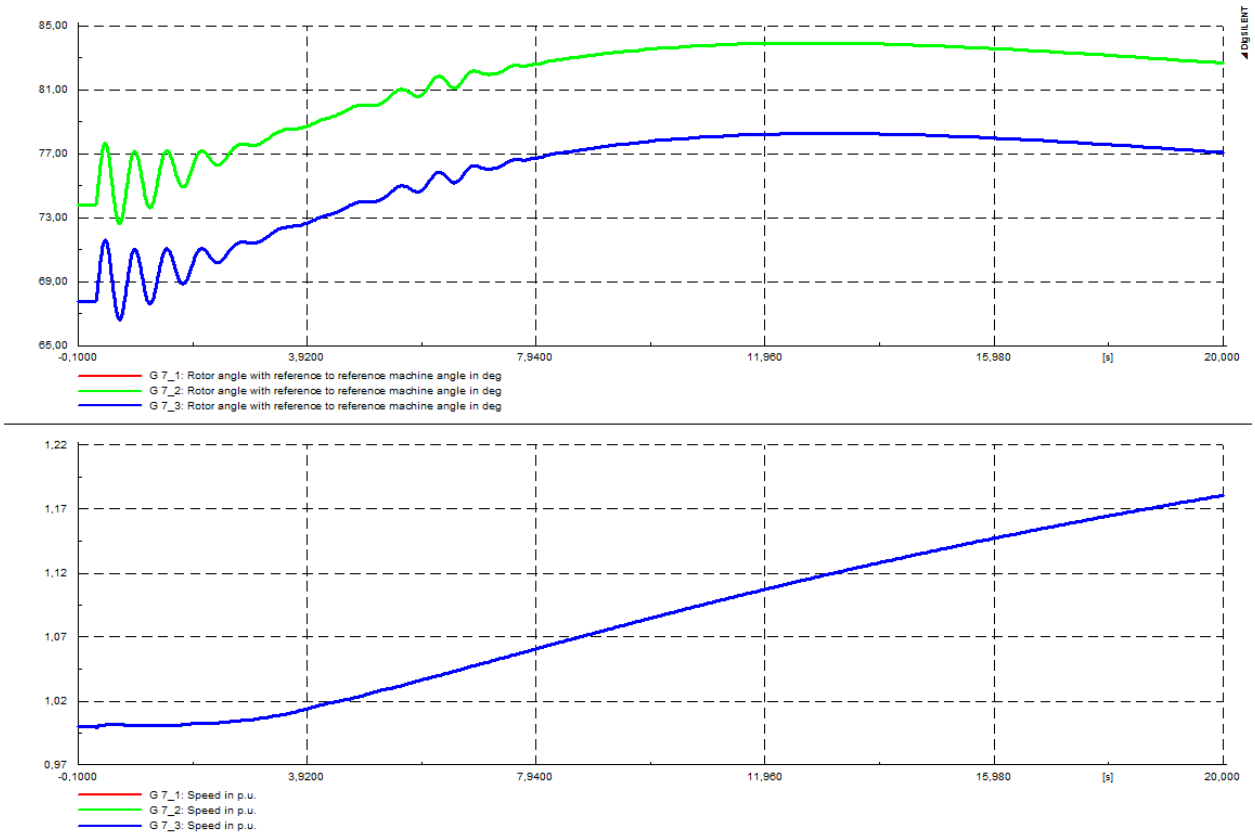
Kratki spoj na vodu 10 (od sabirnice 6 do sabirnice 10).



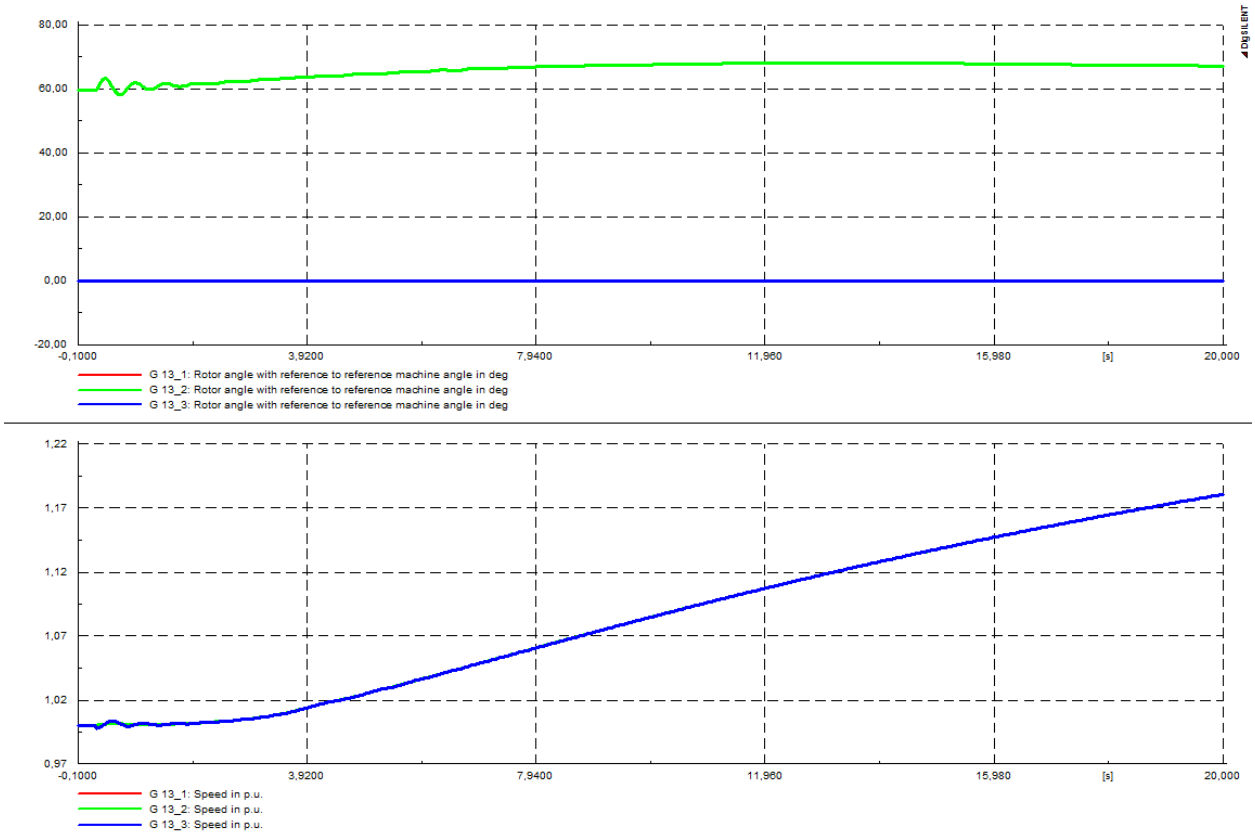
Sl. 7.53 Kratki spoj na vodu 10



Sl. 7.54 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 2



Sl. 7.55 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 7



Sl. 7.56 Kutovi rotora i promjena brzine generatora spojenih na sabirnicu 13

U ovom konkretnom slučaju se pokazalo da praktički nema razlike između prilika u sustavu nakon kvara kada je priključena elektrana tipa C ili tipa D. Razlog tome je relativno mala veličina vjetroelektrane u odnosu na ostale generatore u sustavu. Kada bi elektrana bila veće snage, vjetroelektrana tipa C bi imao veći utjecaj na kutove rotora i brzinu vrtnje ostalih generatora u sustavu nego vjetroelektrana tipa D.

8. ZAKLJUČAK

Sinkroni generatori koji su u širokoj upotrebi u konvencionalnim elektranama su vrlo kruto povezani s mrežom i zato neizbježno imaju oscilatorni odziv u slučaju pojave poremećaja. Kavezni asinkroni strojevi nemaju tako krutu vezu s mrežom, njihov moment je proporcionalan s klizanjem, što omogućuje prigušenje oscilacija i stoga vjetroelektrane sa takvim generatorima imaju pozitivan utjecaj na kutnu stabilnost sustava. Problem kod korištenja asinkronih generatora je što u slučaju pojave kvara povlače iz mreže velike količine jalove snage, što može srušiti napon, te im je potrebno osigurati izvor jalove energije smješten blizu njih kako bi se to izbjeglo. Najveću prednost imaju dvostrano napajani asinkroni generatori, jer imaju dobre mogućnosti kontroliranja i iznosa i kuta injektiranog napona. Zbog toga ih se može koristiti kao stabilizatore koji mogu osigurati prigušenje njihanja snage bez narušavanja kvalitete napona. Djelomična zamjena konvencionalnih elektrana sa sinkronim generatorima elektranama na obnovljive izvore električne energije će stoga poboljšati prigušenje elektromehaničkih njihanja. Pri planiranju proširenja elektroenergetskog sustava valja povesti računa i o vrlo promjenjivoj prirodi samih obnovljivih izvora koju nije moguće točno predvidjeti.

Utjecaj zamjene konvencionalnih elektrana obnovljivim izvorima ili njihovo dodavanje u sustav ne mora nužno imati pozitivan utjecaj na stabilnost sustava. Njihov utjecaj će ovisiti o samom sustavu, njihovom smještaju u odnosu na glavne postojeće centre proizvodnje i potrošnje električne energije, te razini integracije (penetracije).

LITERATURA

[1] Math H. Bollen, Fainan Hassan: Integration of Distributed Generation in the Power System
John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

[2] Mrežna pravila, http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/126651.html, (lipanj, 2016.)

[3] HEP - OPS d.o.o. Dodatni tehnički uvjeti za priključak i pogon vjetroelektrana na prijenosnoj mreži, Zagreb, 2008.

[4] Christos Ordoudis, Pierre Pinson, Juan M. Morales, Marco Zugno, An Updated Version of the IEEE RTS 24-Bus System for Electricity Market and Power System Operation Studies, Technical University of Denmark

[5] The IEEE Reliability Test System, A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, NO. 3, August 1999

[6] E. Muljadi, V. Gevorgian, N. Samaan, J. Li, S. Pasupulati, Short Circuit Current Contribution for Different Wind Turbine Generator Types, Preprint, Conference Paper NREL/CP-550-47193 March 2010

[7] Damir Šljivac, Obnovljivi izvori energije, prezentacije uz predavanja, 2016

[8] J.Machowski, J.W.Bialek, J.R.Bumby, Power system dinamycs, Stability and control, John Wiley & Sons Ltd., Velika Britanija, 2008.]

SAŽETAK

U ovome radu dan je teorijski pregled utecaja elektrana na obnovljive izvore energije na stabilonst napona, frekvencije i kuta elektroenergetskog sustava, te prolazak kroz kvar. U programskom alatu DIgSILENT PowerFactory izvršena je simulacija dodavanja jedne vjetroelektrane u sustav kako bi se analizirao njen utjecaj na stabilnost napona i kutnu stabilnost, te su prezentirani rezultati analize.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, vjetroelektrane, naponska stabilnost, stabilnost frekvncije, kutna stabilnost, prolazak kroz kvar

ABSTRACT

In this paper a theoretical overview of the impact of renewable energy sources on voltage stability, frequency stability and angular stability is described, as well as fault ride through. A simulation was carried out using software package DIgSILENT PowerFactory for the case of adding one wind power plant to an existing system so that it's impact on voltage and angular stability could be analyzed. The reusults of the analysis are presented.

Key words: renewable energy, wind power plants, voltage stability, frequency stability, angular stability, fault ride through

ŽIVOTOPIS

Josip Damjanović rođen je 5. veljače 1992. godine u Zagrebu. Osnovnu školu završio je 2006. godine u Nijemcima, te upisao srednju tehničku školu u Vinkovcima, smjer elektrotehničar. Za vrijeme srednjoškolskog obrazovanja sudjelovao je na županijskim natjecanjima iz fizike i državnom natjecanju iz osnova elektrotehnike. Nakon završetka srednje škole upisao je preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, te se na drugoj godini opredjelio za smjer Elektroenergetika. Preddiplomski studij završio je 2014. godine i upisao diplomski studij elektrotehnike.

PRILOZI

Tablica P.3.1 Published Values for the Inertia Constant of Large Generators [1]

Generator type	Size	Inertia constant [s]
Japanese 60 Hz system	95,000 MW	14–18
Thermal unit (2-pole)	Up to 500 MW	3–6
Thermal unit (2-pole)		2.5–6
Thermal unit (2-pole)		4–7
Thermal unit (4-pole)	Up to 100 MW	6–10
Thermal unit (4-pole)		4–10
Thermal unit (4-pole)		6–9
Large thermal unit		3.5
Large turbogenerator		4
Turbogenerators	50 MW class	2–5
Turbogenerator		2.8
Turbogenerator (2-pole)		3–5
Turbogenerator (4-pole)		5–8
Noncondensing unit		3–4
Thermal unit, forced cooling		7–10
Thermal unit, natural cooling		10–15
Combined cycle gas turbine		7–8
Hydro unit		2–4
Hydro unit		6–8
Large hydro unit		4
Large hydro unit		3.0–5.5
Synchronous condenser		1–1.25

Tablica P.3.2 Published Values for the Inertia Constant of Motors and Small Generators [1]

Generator type	Size	Inertia constant [s]
Synchronous motor		2
Synchronous motor		3–5
Synchronous motor		1–5
Induction motor		3
Induction motor	4.3 MVA	2.0
Induction motor	94 kVA–4.7 MVA	0.45–1.98
Synchronous generators	1.5–5 MVA	0.5–2
Small diesel generators		0.8–1.5
Induction generators		3–5
Landfill unit		1.0
Waste unit		3
Biomass unit		3
Small hydro unit		1.5
Small hydro unit		1.5–4.0
Wind turbine	2 MW	2.4–6.8
Wind turbine		2.2
Wind turbine		3
Wind turbine		4.3
CHP with combined cycle gas turbine		4–6
CHP with heat recovery steam turbine		3.5
CHP with gas turbine		6
CHP with internal combustion engine		1.7
CHP with steam turbine		3